

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS PURAS E APLICADAS**



Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos  
PROFÁGUA

EDIENE MONTEIRO ROMÃO

**SENSIBILIDADE DA VAZÃO NA BACIA DO RIO PIRACICABA COMO  
FERRAMENTA DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**



Itabira - Minas Gerais

2024

Ediene Monteiro Romão

**Sensibilidade da vazão na bacia do rio Piracicaba como ferramenta de  
gestão de recursos hídricos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá. Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karinne Reis Deusdará Leal

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas - UNIFEI

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Eliane Maria Vieira

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Banca Examinadora:

---

Dr.<sup>a</sup> Janaina Ferreira Guidolini

Carbon Next

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Carolina Vasques Freitas

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

---

Prof. Dr. Jonathan Mota da Silva

Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas – UFRN

Itabira – Minas Gerais

2024

## DEDICATÓRIA

Dedicado à minha avô Ana Amélia Cabral (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho só foi possível graças ao apoio fundamental da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Agradeço sinceramente ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, por todo o suporte técnico e científico fornecido ao longo deste percurso.

Agradeço ao grande criador Deus por ser fonte de sabedoria, conhecimento e graça nos momentos mais incertos e difíceis pós pandemia.

Não posso deixar de expressar minha imensa gratidão à minha orientadora, professora Karinne Reis Deusdará Leal, que teve sabedoria para me orientar nos momentos mais difíceis durante a execução do trabalho, por sua orientação e apoio incansáveis, seu conhecimento e experiência foram imprescindíveis para cada passo deste trabalho, acredito que possua uma grande bagagem científica e que muitos que a conhecerem e tiverem tempo suficiente para aproveitar disso, não terão prejuízo algum.

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão à professora Eliane Maria Vieira por ter me dado todo suporte necessário nas aulas de geotecnologias, principalmente nos momentos presenciais. Sua contribuição para minha aprendizagem na elaboração de mapas temáticos foi fundamental. Também quero agradecer à professora Ana Carolina Vasques Freitas por compartilhar generosamente sua expertise e experiência em pesquisa e captação de dados livres, sua contribuição foi de imenso valor para enriquecer este estudo.

Aos meus colegas de curso, que estiveram mais próximos de mim nessa caminhada, Nádia, Peterson, Dayane, Igor e Alexia que também estavam conciliando trabalho e pesquisa, no mais desejo sabedoria e sucesso a todos da turma.

“Viver – não é? – é muito perigoso.  
Porque ainda não se sabe. Porque aprender  
a viver é que é o viver mesmo”.

*Guimarães Rosa*

## RESUMO

ROMÃO, Ediene Monteiro. *Sensibilidade da vazão na bacia do rio Piracicaba como ferramenta de gestão de recursos hídricos*. 2024. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2024.

O monitoramento da vazão é importante para avaliar o volume de água disponível em uma bacia hidrográfica e identificar variações nessa variável. Isso é crucial para uma gestão eficaz dos recursos hídricos e para a tomada de decisões sobre o uso da água. Este estudo teve como objetivo analisar as tendências dos dados históricos da bacia do rio Piracicaba de 1987 a 2022 e investigar suas possíveis causas. Para a precipitação anual, não foram detectadas tendências com significância estatística. Em contraste, a evapotranspiração potencial anual estimada para a bacia do rio Piracicaba apresentou uma tendência de aumento significativa ( $p = 0,0002$ ). Foi identificada uma redução na vazão a partir de 2010, com significância estatística em três das quatro estações analisadas ( $p = 0,0301^*$ ,  $0,0234^*$ ,  $0,177$  e  $0,0835^*$ ). Com relação às mudanças no uso da terra ao longo dos anos detectou-se redução (6,6%) da área agrícola e aumento de (33%) da urbanizada. Destaque para a área de mineração, que aumentou 130%. Este aumento significativo nas áreas destinadas à mineração pode estar relacionado ao declínio da vazão do rio Piracicaba a partir de 2010, devido à intensificação da exploração de recursos hídricos. a análise de elasticidade das séries históricas indicou que um aumento de 10% na evapotranspiração potencial reduz 39,5% na vazão, já uma redução de 10% na precipitação reduz cerca de 16,5% na vazão. A análise de magnitude de tendências evidenciou uma perda de 1,8mm/ano na estação Carrapato Brumal e 1,75 mm/ano na estação Rio Piracicaba. A estação MC (magnitude de -4,51) também mostra um declínio acentuado, mas com significância marginal, ou seja, quase significativa. Estes resultados destacam a importância do monitoramento contínuo da vazão e da gestão integrada dos recursos hídricos, especialmente em cenários de mudanças climáticas. A intensificação da mineração e o aumento da evapotranspiração potencial exigem medidas de adaptação e mitigação para garantir a sustentabilidade hídrica na bacia do rio Piracicaba.

**Palavras-chave:** Disponibilidade hídrica, Elasticidade, Uso da Terra, Análise de tendências, Rio Doce.

## ABSTRACT

ROMÃO, Ediene Monteiro. *Flow sensitivity in the Piracicaba river basin as a water resources management tool*. 2024. 116 f. Dissertation (Professional Master's Degree in National Network in Management and Regulation of Water Resources – PROFÁGUA), Institute of Pure and Applied Sciences, Federal University of Itajubá, Itabira Campus, Minas Gerais, 2024.

Monitoring streamflow is essential for assessing the volume of water available in a watershed and identifying variations in this variable. This is crucial for effective water resource management and decision-making regarding water use. This study aimed to analyze the trends in historical data from the Piracicaba River basin from 1987 to 2022 and investigate their possible causes. For annual precipitation, no statistically significant trends were detected. In contrast, the estimated annual potential evapotranspiration for the Piracicaba River basin showed a significant increasing trend ( $p = 0.0002$ ). A reduction in streamflow was identified starting in 2010, with statistical significance in three out of the four stations analyzed ( $p = 0.0301^*$ ,  $0.0234^*$ ,  $0.177$ , and  $0.0835^*$ ). Regarding land-use changes over the years, a 6.6% reduction in agricultural land and a 33% increase in urbanized areas were observed. Notably, the mining area increased by 130%. This significant increase in mining areas may be related to the decline in streamflow in the Piracicaba River since 2010, due to intensified exploitation of water resources. The elasticity analysis of the historical series indicated that a 10% increase in potential evapotranspiration reduces streamflow by 39.5%, while a 10% reduction in precipitation reduces streamflow by about 16.5%. The trend magnitude analysis revealed a loss of 1.8 mm/year at the Carrapato Brumal station and 1.75 mm/year at the Rio Piracicaba station. The MC station (magnitude of -4.51) also shows a sharp decline, but with marginal significance, i.e., nearly significant. These results highlight the importance of continuous streamflow monitoring and integrated water resource management, especially in the context of climate change. The intensification of mining and the increase in potential evapotranspiration call for adaptation and mitigation measures to ensure water sustainability in the Piracicaba River basin.

**Keywords:** Water availability, Elasticity, Land use, Trend analysis, Doce River.

## Sumário

1. Introdução .....	15
2. Objetivos .....	18
2.1.    Objetivos específicos .....	18
3. Revisão bibliográfica .....	19
3.1.    Bacia hidrográfica e balanço hídrico .....	19
3.2.    Ciclo hidrológico .....	24
3.3.    Mudanças climáticas e os impactos no ciclo hidrológico .....	28
3.4.    Impactos das mudanças de uso da terra no ciclo hidrológico .....	31
3.5.    Elasticidade .....	34
4 Área de estudo .....	35
4.2 Declividade da bacia do rio Piracicaba .....	39
4.3 Classes de solos predominantes na bacia do rio Piracicaba .....	41
4.3 Clima .....	42
5 Materiais e Métodos .....	45
5.1 Aquisição de dados hidroclimatológicos .....	46
5.2 Tratamento dos dados .....	50
5.3 Construção e caracterização das séries históricas .....	54
5.4 Análises estatísticas .....	59
5.5 Cálculo da elasticidade .....	63
6 Resultados .....	64
6.1 Precipitação .....	65
6.2 Vazão .....	68
6.3 Evapotranspiração potencial (ETp) .....	74
6.4 Uso e ocupação da terra .....	79
6.5 Análise de tendências .....	84
6.6 Coeficiente de Runoff e Elasticidade .....	92
7 Considerações finais .....	95

Referências bibliográficas.....	97
Apêndice A .....	108
Apêndice B .....	115

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de uma bacia hidrográfica delimitada sobre um mapa topográfico. ....	20
Figura 2 – Delimitação da área contribuinte conforme os pontos A, B e C indicados. ....	21
Figura 3 – Exemplo de ordenamento dos cursos d'água pelo método de Strahler. ...	22
Figura 4 – Entradas e saídas de água de uma bacia hidrográfica. P: precipitação, EVT: evaporação e Q: vazão. ....	23
Figura 5 – Etapas do ciclo hidrológico global. ....	24
Figura 6 – Tipos de chuva. ....	25
Figura 7 – Divisão da água do solo e da água subterrânea. ....	27
Figura 8 – Efeito da urbanização sobre o ciclo hidrológico. ....	32
Figura 9 – Localização da bacia do rio Piracicaba/MG. ....	36
Figura 10 – Hipsometria da bacia do rio Piracicaba/MG. ....	39
Figura 11 – Declividade da bacia hidrográfica do rio Piracicaba-MG. ....	40
Figura 12 – Classes de solos presente na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-MG. ....	42
Figura 13 – Clima da bacia hidrográfica do rio Piracicaba. ....	44
Figura 14 – Altitude e precipitação anual por tipo de clima ....	45
Figura 15 – Fluxograma metodológico. ....	46
Figura 16 – Localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste estudo. ....	49
Figura 17 – Percentual de falhas mensais nas estações analisadas. ....	50
Figura 18 – Área de influência das estações pluviométricas. ....	55
Figura 19 – Média histórica dos totais mensais da precipitação considerando as 14 estações pluviométricas espalhadas na bacia rio Piracicaba, no período de 1987 a 2022. ....	56
Figura 20 – Média histórica dos totais mensais de evapotranspiração potencial na bacia do rio Piracicaba. ....	57
Figura 21 – Pontos de evapotranspiração de cada região a montante das estações fluviométricas. ....	58
Figura 22 – Subdivisão da bacia hidrográfica do rio Piracicaba em função das estações fluviométricas. ....	63

Figura 23 – Precipitação acumulada anual, entre o período de 1987 a 2022, das estações pluviométricas da bacia do rio Piracicaba. ....	65
Figura 24 – Precipitação acumulada anual-média espacial na bacia do rio Piracicaba. ....	66
Figura 25 – Precipitação acumulada anual média espacial na bacia do rio Piracicaba para o período de 1987 a 2022. ....	68
Figura 26 – Série de vazões médias anuais (ano hidrológico) para o período de 1987 a 2022, para as quatro estações fluviométricas encontradas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba.....	70
Figura 27 – Médias de vazões no período seco e chuvoso para o período de 1987 a 2022 das estações CB(a), RP(b), NE(c), e MC(d). Vazão média anual e vazões mínimas (média do trimestre seco) e máximas (média do trimestre chuvoso) para as estações fluviométricas analisadas nesse estudo.....	72
Figura 28 – Curva de permanência para as estações Mário de Carvalho, Nova Era IV, Rio Piracicaba e Carrapato. ....	73
Figura 29 – Média histórica da evapotranspiração na bacia do rio Piracicaba entre 1987 a 2020 para as estações CB(a), RP(b), NE(c) e MC(d).....	75
Figura 30 – Acumulado anual de Evapotranspiração potencial na bacia do rio Piracicaba (linha azul claro). Linhas azul escuro e laranja denotam os acumulados durante os três meses mais chuvosos e os três meses mais secos, respectivamente. ....	76
Figura 31 – Ciclo anual de evapotranspiração potencial (acumulado mensal) considerando o período de 1987 a 2020.....	78
Figura 32 – Série histórica de evapotranspiração potencial no período de 1987 a 2020 para as estações CB (a), RP (b), NE (c) e MC (d). ....	79
Figura 33 – Mapa de uso e ocupação da terra na bacia do rio Piracicaba em 1987 e 2022. ....	80
Figura 34 – Áreas afetadas no uso e ocupação da terra na bacia do rio Piracicaba em 1987 e 2022. ....	81
Figura 35 – Diagrama de Sankey evidenciando mudanças no uso da terra ocorridas na bacia do rio Piracicaba. ....	83
Figura 36 – Análise de tendência utilizando o Teste estatístico de Mann Kendall para as quatro estações de vazão.....	85

Figura 37 – Resultado do teste estatístico Mann Kendall para a série histórica de média anual de precipitação.....	85
Figura 38 – Teste Mann Kendall para a média dos pontos de evapotranspiração potencial.....	87
Figura 39 – Teste Theil-Sen estação Rio Piracicaba .....	88
Figura 40 – Teste Theil-Sen estação Carrapato Brumal.....	89
Figura 41 – Teste Theil-Sen estação Nova Era.....	90
Figura 42 – Teste Theil-Sen estação Mário de Carvalho .....	91
Figura 43 – Elasticidades e coeficiente de Runoff.....	94
Figura 44 – Análise de tendência para a estação pluviométrica MC-Mário de Carvalho .....	108
Figura 45– Análise de tendência para a estação pluviométrica SMI-Santa Maria de Itabira .....	108
Figura 46 – Análise de tendência para a estação pluviométrica UP-Usina Peti .....	109
Figura 47 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FCD-Fazenda Cachoeira Dantas.....	109
Figura 48 – Análise de tendência para a estação pluviométrica CC-Colégio Caraça .....	109
Figura 49 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FAL-Fazenda Água Limpa .....	110
Figura 50 – Análise de tendência para a estação pluviométrica SB-Santa Bárbara	111
Figura 51 – Análise de tendência para a estação pluviométrica RP-Rio Piracicaba	111
Figura 52 – Análise de tendência para a estação pluviométrica C-Caeté .....	112
Figura 53 – Análise de tendência para a estação pluviométrica JM-José de Melo .	112
Figura 54 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FO-Fazenda Ocidente .....	113
Figura 55 – Análise de tendência para a estação pluviométrica BO-Belo Oriente ..	113
Figura 56 – Análise de tendência para a estação pluviométrica F-Ferros.....	114
Figura 57 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FP-Fazenda Paraíso .....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características morfométricas da bacia do Rio Piracicaba. ....	37
Tabela 2 – Declividade da bacia do rio Piracicaba.....	40
Tabela 3 – Informações das estações pluviométricas e fluviométricas na bacia do rio Piracicaba/MG utilizadas neste estudo. ....	47
Tabela 4 – Coeficiente de correlação das estações fluviométricas. ....	51
Tabela 5 – Coeficiente de correlação das estações pluviométricas. ....	52
Tabela 6 – Número de pontos da evapotranspiração pertencentes a cada região a montante. ....	59
Tabela 7 – Precipitação média das áreas do polígono de Thiessen 1987-2022. ....	67
Tabela 8 – Vazões de referência $Q_{7,10}$ ; $Q_{90}$ e $Q_{95}$ das estações fluviométricas analisadas. ....	74
Tabela 9 – Variações no Uso da Terra na Bacia do rio Piracicaba, comparando a situação em 1987-2022.....	82
Tabela 10 – Dados Anuais de Vazão, precipitação e evapotranspiração pelo método TheilSen .....	92
Tabela 11 – Caracterização dos postos pluviométricos pertencentes a cada região delimitada.....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CRI	Categoria de risco de barragem
DO2	Bacia do rio Piracicaba, referente a uma sub-bacia do rio Doce
ETP	Evapotranspiração potencial
ETR	Evapotranspiração real
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
$Q_{7,10}$	Vazão mínima de 7 dias para um período de retorno de 10 anos
$Q_{90}$	Vazão de referência com permanência de 90%
$Q_{95}$	Vazão de referência com permanência de 95%
PIRH	Plano Integrado de Recursos Hídricos
UPRGH	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

## 1. Introdução

A análise de tendências em séries temporais hidroclimatológicas (chuva, vazão e evapotranspiração) é de extrema importância para a gestão dos recursos hídricos, pois pequenas alterações podem provocar impactos ambientais, sociais e econômicos. Por exemplo, tendências negativas na precipitação podem causar redução da umidade do solo e vazão e, por consequência, reduzir a disponibilidade hídrica para a irrigação e consumo humano. Por isso, identificar padrões ou tendências nas séries históricas hidroclimatológicas é de relevante importância, uma vez que impactam os recursos hídricos e seus usos múltiplos. No estudo de Medeiros *et al.* (2022), projetaram-se eventos de precipitação mais severos, frequentes e duradouros do que os já observados, em todas as regiões brasileiras, com as mudanças mais pronunciadas esperadas em chuvas intensas e secas severas na porção centro-norte e sul do Brasil.

Cumplido *et al.* (2023) relatam que a região Sudeste do país tem vivenciado várias décadas com aumento na frequência, intensidade e duração de eventos extremos e secas. Algumas das principais causas, atualmente, são as mudanças climáticas, como a diminuição do total anual precipitado ou o aumento da evaporação potencial, mas, também, podem ser causadas pelo uso excessivo da água, pela falta de planejamento e pelo gerenciamento ineficiente dos recursos hídricos (PBMC, 2016).

A região sudeste do país vem sendo afetada nos últimos anos por dois tipos de extremos climáticos, sendo esses, chuvas intensas e um longo período de estiagem, que geralmente causa escassez hídrica. De acordo com Marengo, Alves (2015), Coelho *et al.* (2016) e Machado (2022), a crise hídrica que afetou os reservatórios do Sistema Cantareira em São Paulo, resultando no esgotamento de seu volume em julho de 2014, foi causada por anomalias negativas de precipitação. Essas anomalias foram provocadas por um prolongado período de bloqueio atmosférico. A crise hídrica mencionada anteriormente restringiu o acesso à água para a população e causou perturbações econômicas na metrópole. Jacobi *et al.* (2021) argumentam que a crise da água exige uma reflexão sobre o modelo atual de gestão da água ou pelo menos sobre a prática desse modelo. Eles afirmam que o aumento do consumo de água da

população e o déficit de chuvas foram provavelmente os principais fatores associados à crise hídrica sistêmica, o que reforça a importância da governança da água.

Conforme o relatório do plano integrado de recursos hídricos PIRH-Doce (2022), dentre as onze sub-bacias pertencentes à bacia do rio Doce, a do rio Piracicaba, localizada na porção alta, é a que apresenta maior demanda de água para o abastecimento humano, indústria, mineração e termoelétrica, além de possuir sete empreendimentos de potencial hidráulico, ou seja, as usinas hidrelétricas, barragens e pequenas centrais hidrelétricas. Logo, tanto o uso consuntivo (uso de água para atividades que consomem ou retiram a água, como irrigação agrícola e abastecimento urbano), quanto não consuntivo (uso de água que não a retira do ciclo hidrológico, como a geração de energia hidrelétrica), são essenciais para manter o desenvolvimento econômico e social da região. Diante dos diversos impactos ocasionados pelas mudanças no uso da terra, assim como variações climáticas, a disponibilidade hídrica desta região pode estar ameaçada.

Nesse sentido, as vazões mínimas de referência são indicadores importantes para avaliar a disponibilidade de água em uma determinada bacia hidrográfica. As mudanças climáticas e as mudanças de uso da terra podem afetar significativamente as vazões mínimas de referência, alterando a quantidade e a qualidade da água disponível em uma bacia hidrográfica (ANA, 2024). Por exemplo, o aumento da temperatura e a redução da precipitação podem levar a uma diminuição da vazão mínima de referência em uma determinada bacia hidrográfica, o que pode afetar a disponibilidade de água para as comunidades que dependem desse recurso hídrico (Costa *et al.*, 2023).

Um método que vem sendo usado ultimamente para avaliar o impacto da alteração da precipitação na vazão é o da elasticidade, a qual pode ser calculada considerando diversas variáveis hidroclimáticas, não se limitando apenas à precipitação. Este conceito permite verificar como as mudanças nos elementos climáticos, como temperatura, umidade e outros, afetam a disponibilidade e a distribuição da vazão ao longo do tempo. No entanto, neste estudo, escolhemos focar na precipitação e na evapotranspiração porque essas variáveis têm um impacto direto e significativo na vazão dos rios e na disponibilidade de água. A precipitação é a principal fonte de água para os sistemas fluviais, enquanto a evapotranspiração representa a perda de água para a atmosfera. Este método é amplamente utilizado

em estudos de mudanças climáticas, hidrologia e gestão de recursos hídricos. Ele serve para avaliar a sensibilidade dos sistemas hidroclimáticos às variações climáticas, ajudando na previsão de impactos e na formulação de estratégias de adaptação (Andréassian *et al.*, 2016).

Assim, este estudo teve a proposta de analisar dados históricos de séries de precipitação, de evapotranspiração e de vazão a fim de identificar tendências, além de verificar a elasticidade da vazão causada pela precipitação e pela evapotranspiração potencial para a bacia do rio Piracicaba, com a finalidade de subsidiar tomadas de decisões e ações que possibilitem minimizar o impacto aos recursos hídricos.

## **2. Objetivos**

Avaliar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Piracicaba, localizada na bacia do rio Doce, no Estado de Minas Gerais, de modo a compreender a sensibilidade da vazão decorrente de alterações na precipitação e evapotranspiração, assim como mudanças no uso e cobertura da terra.

### **2.1. Objetivos específicos**

- a) Caracterizar as séries históricas de vazão, precipitação e evapotranspiração e analisar suas tendências;
- b) Avaliar a sensibilidade da vazão em relação à precipitação e à evapotranspiração.
- c) Analisar o papel das mudanças no uso e cobertura da terra nas tendências verificadas para a bacia.

### **3. Revisão bibliográfica**

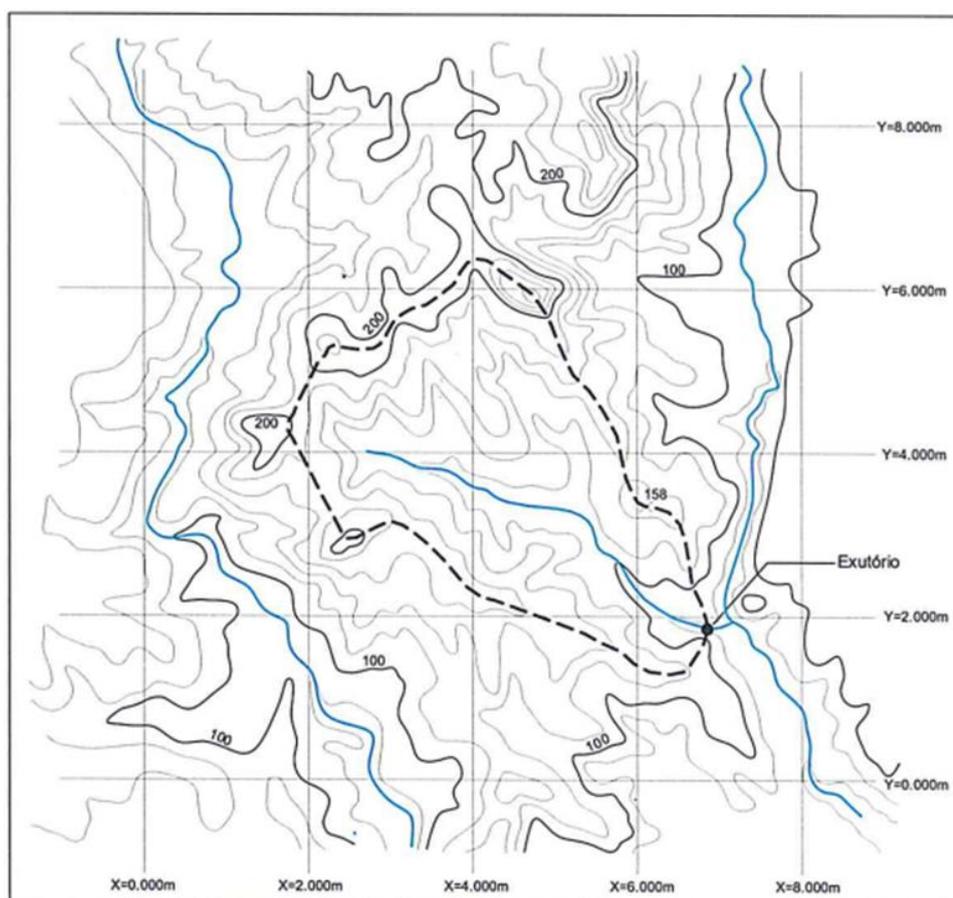
Essa pesquisa realizou o estudo das vazões de referência de uma bacia da porção alta do rio Doce, a bacia do rio Piracicaba, que possui grande aporte econômico, no que diz respeito a indústrias de mineração, reflorestamento de eucaliptos e siderurgia. Portanto, neste item estão revisados assuntos essenciais para a compreensão deste estudo. Primeiramente aborda-se brevemente os conceitos de bacias hidrográficas, balanço hídrico e ciclo hidrológico. Na sequência, abordam-se os impactos das mudanças nas variáveis climatológicas no ciclo hidrológico e por fim, apresenta-se uma revisão sobre o conceito de elasticidade.

#### **3.1. Bacia hidrográfica e balanço hídrico**

Conceitualmente, uma bacia hidrográfica corresponde a uma área de captação natural da água, originada a partir da precipitação de uma determinada região, “que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída” (Tucci, 1997). Assim, uma bacia hidrográfica “compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem” (Tucci, 1997), formada por cursos d'água secundários (chamados de afluentes), que se unem até resultar em um leito único (chamado rio principal). O ponto onde todas as águas da bacia se encontram é chamado exutório (Tucci, 1997).

Os limites de uma bacia hidrográfica podem ser identificados através de um mapa topográfico, como ilustrado na Figura 1. O divisor de águas, representado pela linha imaginária tracejada na Figura 1, delimita as regiões do mapa em que a água da chuva escoar até o exutório (ponto preto na Figura 1), sendo, portanto, constituinte da bacia hidrográfica delimitada. As regiões adjacentes, em que a água da chuva não é escoada até o exutório indicado, são constituintes de outras bacias hidrográficas.

Figura 1 – Exemplo de uma bacia hidrográfica delimitada sobre um mapa topográfico.

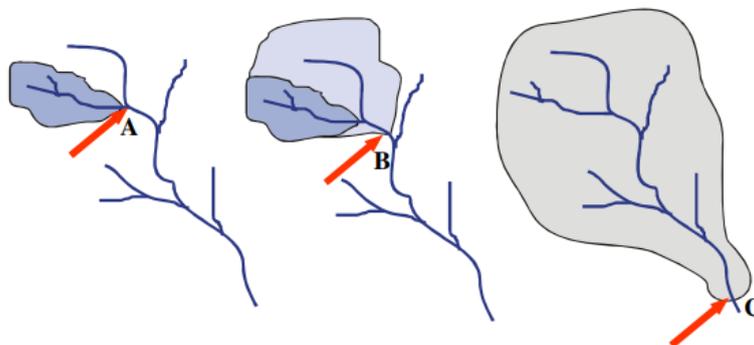


Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

É importante mencionar o conceito de bacia dentro de bacia, ou seja, o conceito de bacias. As bacias podem ser compreendidas como áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal. Para definir os limites de área de uma bacia alguns autores utilizam-se de diferentes valores. Para Faustino (1996), as bacias são aquelas que possuem áreas maiores que 100 km<sup>2</sup> e menores que 700 km<sup>2</sup>, já para Rocha (1997, apud Martins *et al.*, 2005, p.316), são áreas entre 20.000 ha e 30.000 ha (200 km<sup>2</sup> a 300 km<sup>2</sup>).

A Figura 2 ilustra como funciona o desmembramento das bacias, o ponto A na figura mostra uma bacia que está inserida na bacia do ponto B. O ponto B mostra uma bacia que está inserida na bacia do ponto C. O ponto C mostra a bacia hidrográfica inteira que contém a bacia do ponto B e do ponto A (Paz, 2004).

Figura 2 – Delimitação da área contribuinte conforme os pontos A, B e C indicados.



Fonte: Paz (2004).

Ainda acerca do conceito de área, uma característica muito importante é a área de drenagem, que se refere a área total delimitada pela drenagem com direção comum. A área de drenagem pode ser expressa em qualquer unidade de área, tais como  $\text{km}^2$  ou ha. É por meio da área de drenagem que é definida a potencialidade hídrica de uma bacia, pois essa é uma área de captação da água da chuva. Logo, se multiplicarmos a área da bacia (em  $\text{m}^2$ , por exemplo) pela lâmina precipitada ao longo de um intervalo de tempo (por exemplo em mm, que é equivalente a  $\text{l/m}^2$ ) é encontrado o volume de água recebido ao longo desse intervalo de tempo (em l, considerando as unidades de exemplo). Para calcular a área da bacia, normalmente são utilizados programas computacionais de auxílio ao desenho ou Sistemas de Informações Geográficas.

As bacias hidrográficas também podem ser caracterizadas com relação à ordenação da rede de drenagem. Isso é importante, pois nos dá uma ideia do grau de ramificação da rede de drenagem. Cursos de água de maior ordem apresentam mais ramificações do que cursos de água de menor ordem. Uma metodologia utilizada atualmente para ordenar os cursos de água é a de Horton, modificada por Strahler (Collischon e Dornelles, 2013), em que os:

Menores canais sem tributários são considerados de primeira ordem; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens; os canais de quarta ordem

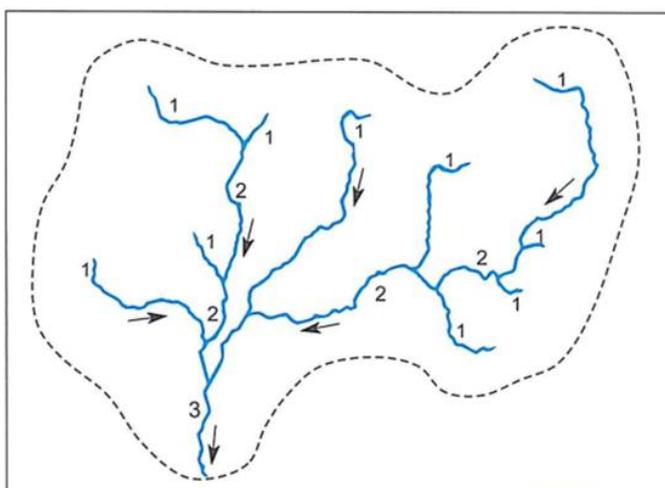
surtem da confluência de canais de terceira ordem, podendo receber tributários de ordens inferiores e, assim, sucessivamente (Silveira, 2016).

A

**Figura 3** *mostra a ordenação dos cursos d'água de uma bacia hipotética. Esta é uma caracterização adimensional e para atribuir uma ordem a uma bacia hidrográfica utiliza-se a maior ordem identificada. Na*

Figura 3, por exemplo, atribui-se a ordem 3 à bacia.

Figura 3 – Exemplo de ordenamento dos cursos d'água pelo método de Strahler.



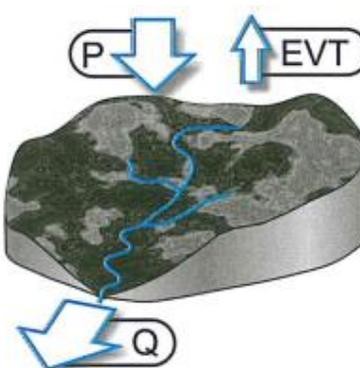
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

Por fim, é importante mencionar o conceito de tempo de concentração de uma bacia hidrográfica, referindo-se o mesmo como um conceito abstrato, definido como o tempo necessário para que uma gota de chuva que cai sobre a região mais remota da bacia, atinja o exutório. Para este cálculo, considera-se desde o início do seu escoamento até o instante em que atinge o final da bacia hidrográfica (Collischonn e Dornelles, 2013). Para compreender este conceito é importante considerar tanto a distância total que a gota de chuva deve percorrer, como também a velocidade com que a água esco. Portanto, bacias com áreas de drenagem maiores tendem a apresentar maiores tempos de concentração. Em paralelo, o tempo de concentração em bacias montanhosas é menor do que em bacias planas.

Assim, uma bacia hidrográfica é uma área de terra que é drenada por um rio principal e seus afluentes. Podemos considerar a bacia hidrográfica como um sistema

para compreender seu balanço hídrico. Podemos considerar como entrada neste sistema a água proveniente de eventos de precipitação, como chuva, neve e granizo e, como saídas deste sistema, a água escoada para o rio principal e seus afluentes, ou aquela evaporada e transpirada pela vegetação, conforme ilustra a Figura 4 (Collischonn e Dornelles, 2013).

Figura 4 – Entradas e saídas de água de uma bacia hidrográfica. P: precipitação, EVT: evaporação e Q: vazão.



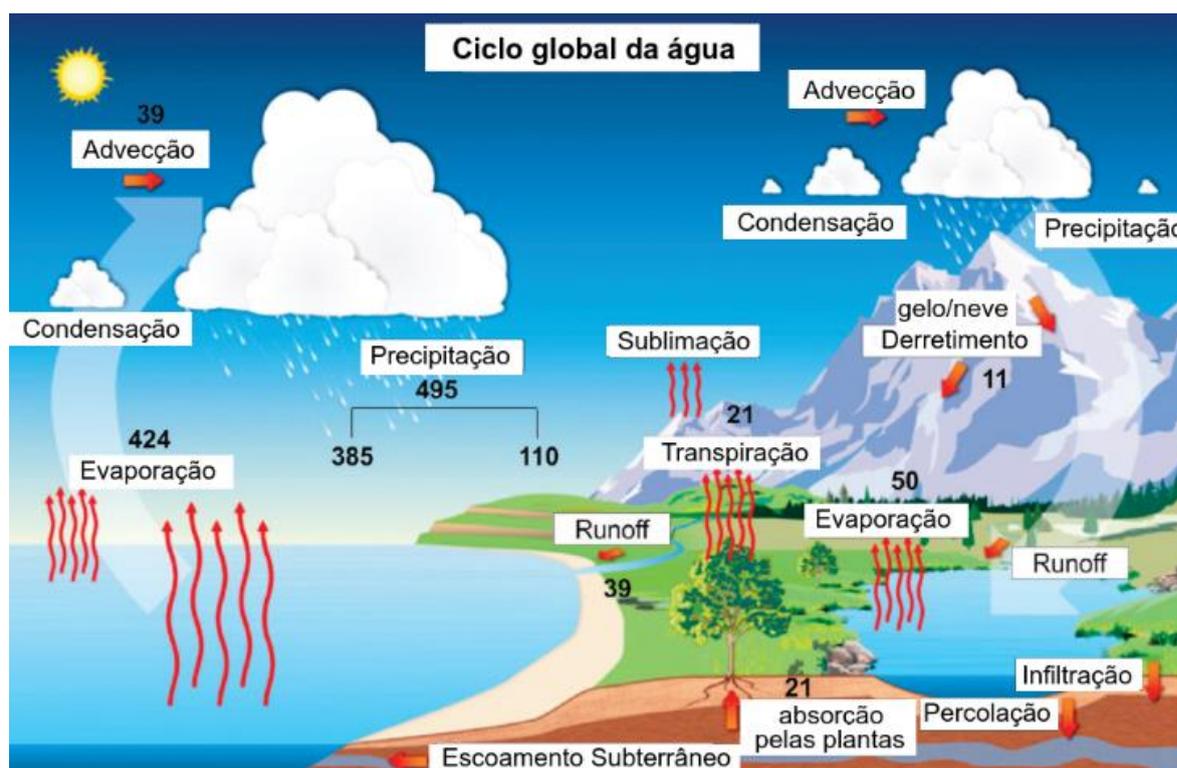
Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

Baseado neste conceito de balanço hídrico é possível perceber que o volume de água que escoa pelo rio não é o mesmo que aquele precipitado, mas sim um percentual deste, pelo fato de haver reduções antes do seu escoamento. Para compreender e calcular este percentual, usa-se o coeficiente de vazão, chamado de coeficiente de *runoff*. Este coeficiente pode ser calculado através da relação entre o volume de água escoado e precipitado ( $Q/P$ ). Valores mais altos deste coeficiente indicam que mais chuva é transformada em vazão e representam superfícies com maior impermeabilização. Já valores mais baixos indicam que menos chuva é transformada em vazão e representa superfícies arborizadas. Há diversos fatores que influenciam o percentual de água que escoa, alguns são de natureza climática e podem estar relacionados com a precipitação e também com a temperatura, e outros de natureza fisiográfica, sendo relacionados com as características físicas da bacia hidrográfica. Assim, pode-se dizer que o “papel hidrológico da bacia hidrográfica é o de transformar uma entrada de volume de água concentrada no tempo, através da precipitação, em uma saída de água mais distribuída no tempo, a vazão” (Paz, 2004).

### 3.2. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico consiste na circulação global da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, que é impulsionada fundamentalmente pela energia do sol, associada à gravidade e movimentos de rotação terrestre. Este sistema é globalmente fechado, ou seja, a quantidade de água no planeta Terra não aumenta nem diminui, mas pode ser considerado aberto a nível local. Por exemplo, a água evaporada em uma determinada região pode condensar e cair na forma de chuva em outra região. Importante ressaltar que a circulação da água pode ocorrer nos dois sentidos: atmosfera para superfície terrestre e vice-versa (Tucci, 1993). A Figura 5 apresenta, esquematicamente, as diversas etapas do ciclo hidrológico global.

Figura 5 – Etapas do ciclo hidrológico global.



Fonte: Tatsch (2020).

Entender a dinâmica do ciclo hidrológico consiste em compreender as principais etapas do seu ciclo; dentre elas, tem-se a etapa de precipitação. A formação das nuvens de chuva está relacionada ao movimento ascendente de massas de ar

úmido, e a forma de ascensão do ar úmido diferencia os principais tipos de chuva (Figura 6), sendo elas, frontais, convectivas ou orográficas (Collischonn e Dornelles, 2013).

Figura 6 – Tipos de chuva.



Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

Após a precipitação, ocorre a interceptação, que é o processo de “retenção de parte da precipitação acima da superfície do solo, que pode ocorrer devido à vegetação ou outras formas de obstrução” (Paz, 2004). A maior parte do volume de água interceptado é então evaporado, o que significa que esse volume não contribui para o escoamento superficial, pois não atinge o solo.

A interceptação realizada pelo dossel florestal pode ser medida coletando a chuva com pluviômetros colocados sob a vegetação e alguns colocados acima ou ao lado da área com vegetação. No estudo realizado por Moura (2023), que compara duas espécies de árvores urbanas e diferentes intensidades de chuva, verificou-se que a intensidade da chuva afeta a interceptação pluvial de duas espécies de plantas, *P. echinata* e *S. siamea*. Em eventos com baixa intensidade de chuva (0,3 mm/h), a interceptação média é mais alta (85,5% para *P. echinata* e 87% para *S. siamea*). Em eventos com alta intensidade de chuva (8,5 mm/h), a interceptação média é mais baixa (36% para *P. echinata* e 30,83% para *S. siamea*).

Tucci (2013) afirma que mesmo que o tipo de vegetação e sua densidade possam influenciar na interceptação, o conjunto de folhas de uma mata pode interceptar cerca de 25% da chuva, o que retarda e reduz picos de cheias. O papel da interceptação no balanço hídrico de uma bacia possui importância, pois este processo diminui os impactos da chuva no solo, pelo armazenamento de água pela vegetação, além de redirecionar os fluxos na superfície do solo, favorecendo a infiltração ao invés do escoamento superficial. A interceptação pode ocorrer pela estrutura física das plantas ou pela cobertura morta, ou seja, a serrapilheira (Assis *et al.*, 2023).

A evaporação pode ser definida como o escape de moléculas da superfície de um líquido (Chang e Goldby, 2016). A evaporação é uma das principais perdas de água em mananciais superficiais. Ela pode afetar diretamente a disponibilidade hídrica, pois retira água da superfície da terra e a leva para a atmosfera.

Para Souza Filho *et al.* (2005), a evapotranspiração é influenciada pela energia disponível na superfície, ou seja, a incidência dos raios solares, pelo “gradiente de pressão de vapor d’água entre a superfície e a atmosfera e pelas resistências às transferências de vapor” (Tucci, 2013), que podem ser da planta, solo ou atmosfera. Quando a chuva chega à cobertura florestal, uma parte dela é devolvida para a atmosfera através da evaporação e transpiração das plantas. A outra parte da chuva atinge o solo após a lavagem do dossel superior, das árvores do sub-bosque e do escoamento pelo tronco das árvores. Essa água que atinge o solo é chamada de precipitação efetiva. Ressalta-se que a evapotranspiração é um processo importante para o ciclo da água, pois a mesma ajuda a regular a temperatura do ar e a umidade do solo (Santos, 2020).

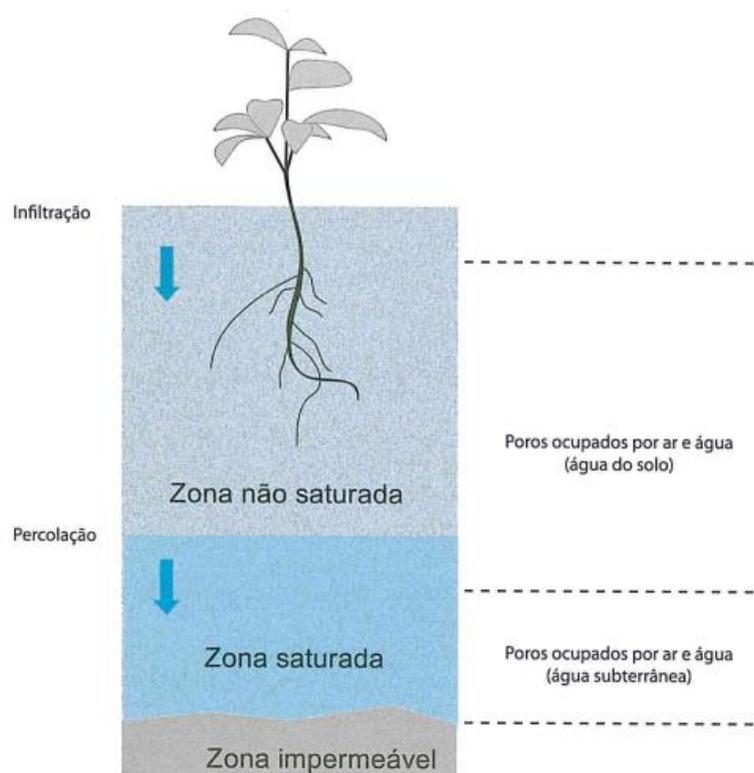
A evapotranspiração (ET) é a perda de água da superfície da terra para a atmosfera por evaporação e transpiração das plantas e animais. De acordo com Tucci *et al.* (2001), a ETR (Evapotranspiração real) é a quantidade de água que é realmente evaporada e transpirada da superfície da terra, sendo influenciada por uma série de fatores, incluindo a precipitação, a temperatura e a umidade do solo. Já a ETp (Evapotranspiração potencial), segundo Melo (2022), é o máximo de água que pode ser perdida pela planta e solo, que são essenciais para o balanço hídrico como parte desse sistema hidrológico, principalmente para o setor agrícola, que realiza cálculos de necessidade de irrigação.

Uma vez que a água da chuva, que não foi interceptada, chegue ao solo, pode escoar superficialmente ou infiltrar no solo. O escoamento superficial pode ser entendido como a água que não infiltra no solo ou não percola até os aquíferos, ela escoar superficialmente, sendo retida em depressões do solo, evaporando ou sendo absorvida pela vegetação ou até mesmo atingir outros corpos d’água. (Paz, 2004). A quantificação do escoamento superficial é de extrema importância para um melhor entendimento do ciclo hidrológico em determinada região. Ela também tem diversas aplicações práticas, tais como a identificação de períodos de enchentes e secas, o diagnóstico quanto a necessidade de regularização de vazão por meio de barragens, a caracterização do potencial hidrelétrico, o reconhecimento da capacidade de

armazenamento de água na bacia e a análise da aptidão agrícola regional (XU *et al.*, 2018).

A infiltração pode ser entendida como a penetração da água no solo, se iniciando pela superfície, conforme Figura 7. A percolação é entendida como o movimento descendente da água da zona não saturada para a zona saturada, em posição abaixo; somado a isso ainda há processos de redistribuição interna da água da chuva, podendo ser fluxos laterais ou verticais, para cima e para baixo (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013). A infiltração e a percolação são processos importantes no ciclo hidrológico, pois ajudam a reabastecer as águas subterrâneas. É citado no Manual de Águas Subterrâneas, publicado pelo Ministério do Meio Ambiente (2007), que as águas subterrâneas são aquelas que se encontram abaixo da superfície da terra, preenchendo os espaços vazios existentes entre os grãos do solo, rochas e fissuras. A infiltração pode ocorrer a partir de uma fissura no solo, que pode causar a floração de nascente; essa infiltração de água pode alimentar um córrego ou rio.

Figura 7 – Divisão da água do solo e da água subterrânea.



Fonte: Collischonn e Dornelles (2013).

Por fim, o escoamento subterrâneo, ou escoamento de base, é composto por parte da água que penetra no solo e se move lentamente através dele. Ele é mais lento do que o escoamento superficial, que é a água que corre sobre a superfície do solo. O escoamento subterrâneo alimenta os rios e os lagos, e é responsável pela manutenção desses corpos de água durante épocas de estiagem (Azevedo, 2022). A água disponível nos corpos hídricos superficiais pode ser evaporada para a atmosfera e, assim, fecha-se o ciclo hidrológico.

### **3.3. Mudanças climáticas e os impactos no ciclo hidrológico**

O efeito estufa é um fenômeno natural que ocorre quando a radiação solar incidente atravessa a atmosfera e aquece a superfície terrestre; parte desta radiação é refletida novamente na forma de calor para a atmosfera. A radiação transformada em calor é bloqueada pelos gases de efeito estufa, proporcionando a manutenção da temperatura ideal para a vida na Terra. Porém, quando a quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera aumenta, a Terra retém mais calor, o que pode causar consequências negativas para o planeta (Assad *et al.*, 2015). As atividades humanas estão intensificando esse efeito estufa, o que está causando o aquecimento global. Este, por sua vez, é responsável por uma série de eventos climáticos extremos, como secas, chuvas intensas, inundações, furacões, derretimento de geleiras e aumento do nível do mar (Pawlowski *et al.*, 2017).

A radiação solar está diretamente ligada ao aumento da temperatura e consequente aumento da evaporação de líquidos e sólidos. Além da radiação solar, outras variáveis meteorológicas podem interferir na evaporação em superfícies livres de água, sendo a temperatura do ar, vento e pressão de vapor (TUCCI, 1993). O mesmo autor destaca que com o aumento da temperatura tem-se uma maior intensidade de evaporação, permitindo que uma maior quantidade de vapor de água esteja presente em um mesmo volume de ar até atingir seu grau de saturação. As alterações na evapotranspiração podem desequilibrar o balanço hídrico local, o que pode ter um impacto negativo nos serviços ecossistêmicos, especialmente nos padrões de precipitação (O' Connor *et al.*, 2019).

O estudo de Gomes (2020), que estimou os valores de evapotranspiração na Bacia Amazônica sob um cenário rigoroso de mudanças climáticas, relata que a elevação da evapotranspiração na floresta amazônica também causa impactos nos serviços ambientais e nos ecossistemas. Uma maior evapotranspiração bombeia mais umidade para a atmosfera que, reciclada, pode concentrar a precipitação e causar eventos extremos de chuva (MARENGO, 2006) e estes, por sua vez, podem ocasionar picos de enchentes.

No estudo de Chagas *et al.* (2022) foi analisado dados de vazões nas principais bacias hidrográficas tropicais da América do Sul e constatou-se que o uso da terra e o desmatamento amplificaram o efeito das mudanças climáticas nos extremos de vazões nas últimas quatro décadas, ou seja, o desmatamento reduz a capacidade das florestas de absorver água da chuva, o que leva a um aumento nas vazões máximas e uma diminuição nas vazões mínimas, sendo que essa bacia em estudo possui preocupações crescentes quanto aos dois extremos hidrológicos: as inundações e as secas. Os autores utilizaram observações diárias de vazões de 897 bacias hidrográficas, em um período de 35 anos.

As mudanças climáticas estão causando mudanças no ciclo da água, incluindo chuvas e secas mais intensas, e essas alterações nos padrões de precipitação também estão afetando as cidades, com o aumento do calor, inundações e aumento do nível do mar em cidades costeiras (IPCC, 2021). O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (2023), confirma que as mudanças climáticas são reais e que o aquecimento global é causado pela atividade humana. A temperatura média global pode aumentar até 4,4 graus Celsius até o final do século 21, o que gerará ondas de calor, tempestades, inundações, secas, perda de biodiversidade e aumento do nível do mar. O relatório destaca a urgência de reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa nas próximas décadas, além de políticas efetivas para limitar as emissões, investimento em tecnologias de captura e estoque de gases do efeito estufa, adaptação às mudanças climáticas e justiça social e ambiental.

As mudanças climáticas estão causando padrões de precipitação mais extremos em todo o mundo. Mais pessoas estão experimentando secas e inundações, e os eventos climáticos estão ficando mais intensos. Isso está gerando um impacto negativo na água disponível para as diversas atividades antrópicas, tais como agricultura, geração de energia e para manutenção da saúde humana. Cerca de meio

bilhão de pessoas, atualmente, vivem em áreas onde a precipitação média de longo prazo é tão alta quanto era registrado anteriormente em apenas 1 a cada 6 anos. Aproximadamente 163 milhões de pessoas agora vivem em áreas secas em relação há 50 anos atrás. Desde 1950 houve um aumento da intensidade da precipitação e um grande aumento de pessoas residindo em regiões que tiveram aumento na intensidade das chuvas (IPCC, 2023).

Neste contexto de mudanças climáticas e impactos no ciclo hidrológico, pesquisas relacionadas às vazões de referência são necessárias para fornecer informações sobre a quantidade de água disponível nos cursos de água para utilização nas diversas atividades antrópicas, além de garantir a preservação do meio ambiente. As vazões mínimas de referência são aquelas que têm alta permanência ao longo do tempo. Podem ser compreendidas como aquele valor de vazão disponível mesmo em período de estiagem, com baixa probabilidade de acontecer um valor mais baixo. As vazões de permanência mais comuns são as vazões Q90 ou Q95, isso significa que essas vazões são mantidas por 90% ou 95% do tempo, respectivamente (ANA, 2011). Elas são importantes por limitar o uso consuntivos das águas e, com isso, evitar conflitos de usos atuais e futuros. Este valor é adotado como referência para concessão das outorgas de uso de recursos hídricos e também para definição da situação hídrica.

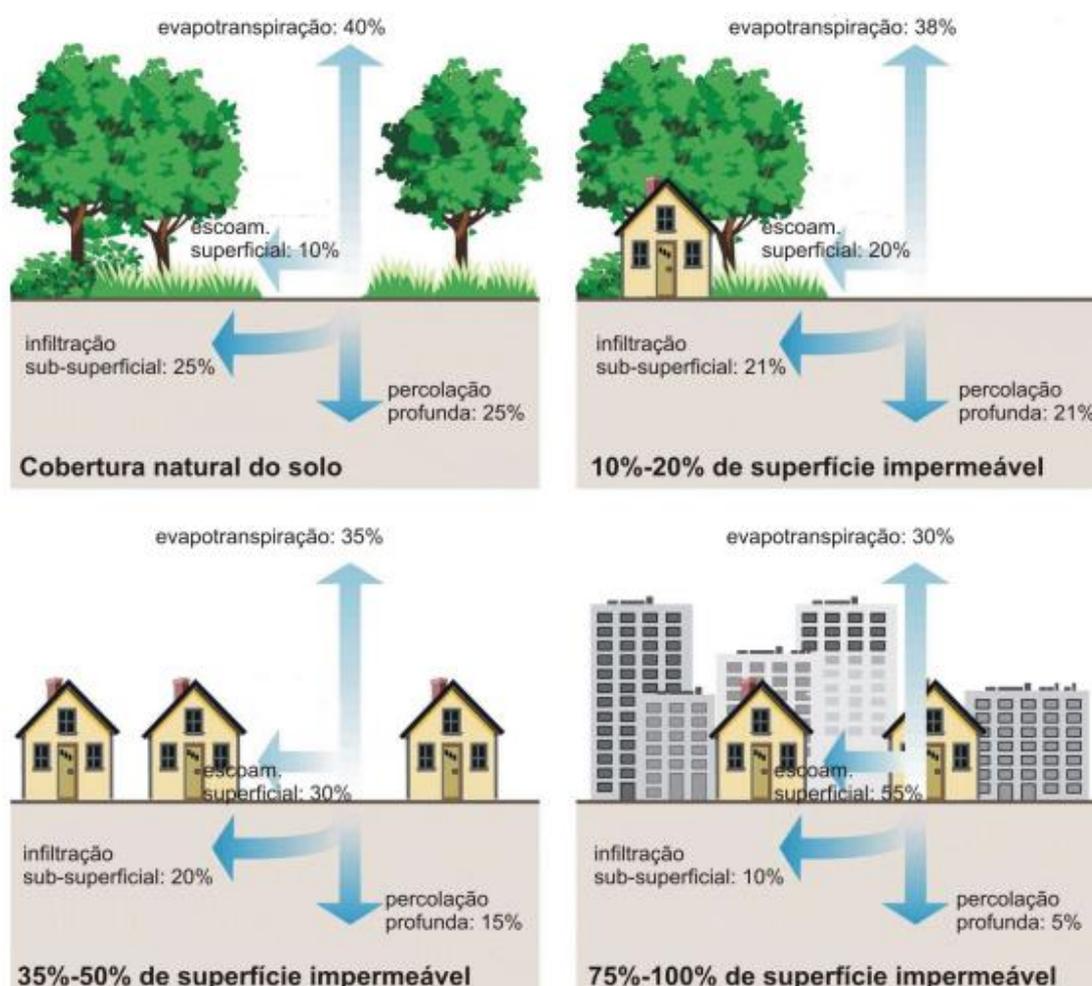
Em Minas Gerais, por exemplo, a Resolução conjunta SEMAD-Igam nº 1.548 de 2012, estabelecia que a vazão de referência era 50% da  $Q_{7,10}$ , que é compreendida como a vazão mínima durante 7 dias consecutivos com período de recorrência de 10 anos. Entretanto, esta resolução foi revogada e, em 2022, foi definida a portaria Igam nº 32, que institui a  $Q_{7,10}$  mensal para a vazão de referência superficial na bacia do Rio Doce. Importante destacar o avanço destas estimativas de vazão de referência para a bacia do Rio Doce: na portaria antiga o estado utilizava a vazão  $Q_{7,10}$  anual como referência e, atualmente, adota-se a  $Q_{7,10}$  mensal. Estudos desta natureza podem subsidiar um adequado planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, especialmente no contexto de adaptação às mudanças climáticas, uma vez que permite retirada de água, através do instrumento de gestão outorga, de um volume com a mínima possibilidade de falha.

### **3.4. Impactos das mudanças de uso da terra no ciclo hidrológico**

As atividades humanas têm um impacto significativo no ciclo hidrológico, por exemplo, a construção de barragens em rios altera o fluxo de água, aumentando a evaporação e elevando o nível das águas subterrâneas. A urbanização também tem impacto, pois a impermeabilização do solo reduz a infiltração de água e aumenta o escoamento superficial, o que pode resultar em alagamentos e enxurradas e, em longo prazo, pode reduzir a recarga dos aquíferos. O desmatamento é outro fator que contribui para a alteração do ciclo hidrológico, pois reduz a interceptação da água da chuva pelas plantas e deixa o solo exposto à erosão (Paz, 2004).

A Figura 8 ilustra o impacto da urbanização no ciclo hidrológico, mostrando como a substituição da cobertura natural do solo por superfícies impermeáveis afeta o escoamento de água. Quando a impermeabilização atinge entre 30% e 50% da superfície, o escoamento superficial passa a corresponder a 55% do total de precipitação, enquanto que, na situação de cobertura natural do solo, esse percentual era de apenas 10%. Isso demonstra como a urbanização pode alterar significativamente o ciclo hidrológico.

Figura 8 – Efeito da urbanização sobre o ciclo hidrológico.



Fonte: Paz (2004).

Alterações no uso e ocupação da terra podem influenciar diretamente no ciclo hidrológico, caso o ciclo natural de escoamento seja modificado, ou seja, uma terra impermeável pode gerar um desequilíbrio na distribuição temporal das chuvas. Para Lima e Morais (2023), as atividades humanas, como a monocultura e a pastagem plantada, geralmente ocupam terrenos planos que são favoráveis para grandes sistemas de repartição e mecanização pesada; isso ocorre em atividades agrícolas extensivas, onde o preparo da terra e a colheita dos grãos são realizados com equipamentos pesados, que geralmente causam a compactação do solo. Em terrenos íngremes o escoamento é maior, devido a água ter menos tempo para se infiltrar no solo. Em terrenos planos, a água tem mais tempo para se infiltrar no solo, o que ajuda a reduzir o escoamento superficial.

Barragens de usos múltiplos de recursos hídricos são aquelas que têm uma estrutura hidráulica que atravessa o curso de água, resultando na acumulação e armazenamento de água. Isso significa que essas barragens são construídas para reter água em um determinado local, permitindo seu uso para diversos fins; porém as barragens podem trazer consequências para a região a jusante, tanto para o ecossistema, quanto para as populações (Correia *et al.*, 2020).

A combinação dos processos de urbanização, industrialização e crescimento populacional, todas como intervenções oriundas da necessidade de abastecimento de água, drenagem, coleta e tratamento de esgoto – impactam na estrutura deste ciclo hidrológico básico, tornando-o mais complexo (UNESCO, 2008).

O desmatamento em larga escala pode alterar completamente o ciclo da água. Isso pode levar a um ciclo vicioso: o desmatamento aumenta a compactação do solo, o que aumenta o escoamento superficial e, conseqüentemente, o assoreamento dos rios. Isso reduz a infiltração da água no solo, diminuindo a vazão dos aquíferos e dos rios, e reduzindo a precipitação média. Esse ciclo pode alterar o regime de chuvas, resultando em períodos secos prolongados e chuvas intensas concentradas em curtos períodos de tempo (Dias *et al.*, 2021).

O estudo de Marengo e Souza (2018) sobre mudanças climáticas e desmatamento na Amazônia aponta que existem evidências indiscutíveis sobre o papel da floresta amazônica como provedora e reguladora de água tanto para a região amazônica quanto para outras partes da América do Sul. A água evapotranspirada pela floresta quando chega na atmosfera é transportada pelos ventos para outras partes do continente, onde se condensa e forma chuva. Esse processo de transporte de umidade atmosférica é chamado de "rios voadores", constituindo importante mecanismo da circulação atmosférica que gera chuvas nas regiões centro-oeste, sudeste e sul do país (Nobre, 2014). Alterações na cobertura vegetal da Amazônia devido ao desmatamento tem afetado 40% a 50% da sua capacidade de bombear e reciclar a água.

Estima-se que entre 30% e 50% das precipitações pluviométricas na Amazônia consistem em evaporação reciclada. Esse processo de reciclagem da chuva, vital para a manutenção da floresta, é interrompido quando esta é derrubada (Marengo e Souza, 2018). Um recente estudo realizado por Smith *et al.* (2023) avaliou o efeito do desmatamento em florestas tropicais na precipitação. Os autores encontraram que a perda de floresta causou reduções robustas na precipitação quando o desmatamento

ocorreu em resoluções maiores que 2.500 km<sup>2</sup>. Os maiores declínios na precipitação ocorreram em resoluções de 40.000 km<sup>2</sup>, para a qual 1 ponto percentual de perda de floresta reduziu a precipitação em  $0,25 \pm 0,1$  mm por mês.

### 3.5. Elasticidade

A elasticidade ou sensibilidade da vazão à chuva é uma medida importante na hidrologia. Ela representa a relação entre a mudança proporcional na vazão média anual e a mudança proporcional na precipitação média anual. Essa análise permite avaliar como a precipitação e outras variáveis afetam as mudanças no sistema hidrológico (Deusdará-Leal *et al.*, 2022).

A elasticidade pode ser calculada usando diversas variáveis hidroclimáticas, não somente a precipitação, e através do método não-paramétrico (estimador empírico). Estimativas empíricas da elasticidade de vazão tem a vantagem de não serem limitadas pelas suposições dos modelos hidrológicos, assim como não requerem validação do modelo (Sankarasubramanian *et al.*, 2001; Andréassian *et al.*, 2016). Alguns estudos encontraram grandes semelhanças entre os métodos de modelagem e não paramétricos (Chiew *et al.*, 2006; Hu *et al.*, 2012).

Um valor de elasticidade igual a 1 indica que uma mudança de 1% na precipitação (ou outra variável climatológica) resulta em uma mudança de 1% na vazão. A vazão de um rio pode aumentar ou diminuir em resposta a mudanças na precipitação.

Na maior parte do território nacional, foi observado que a EQ/ETp é sempre negativa, ou seja, as vazões sempre diminuem com o aumento da ETp, com valores oscilando entre -1 e -3. Em contraste, valores positivos de elasticidade indicam que as variáveis se movem na mesma direção, como na relação entre chuva e vazão. Quando a precipitação aumenta, a vazão tende a aumentar também, resultando em uma elasticidade positiva. Para a EQ/P, a elasticidade é consistentemente positiva, indicando que as vazões sempre aumentam com o aumento da precipitação, e os valores geralmente variam entre 1 e 4 (Gonçalves *et al.*, 2023).

Deusdará-leal *et al.* (2022) utilizou o conceito de elasticidade para analisar a sensibilidade da geração de vazão no sudeste brasileiro para o período de 1970 a 2017. Os autores concluíram que as bacias de Três Marias e Mascarenhas,

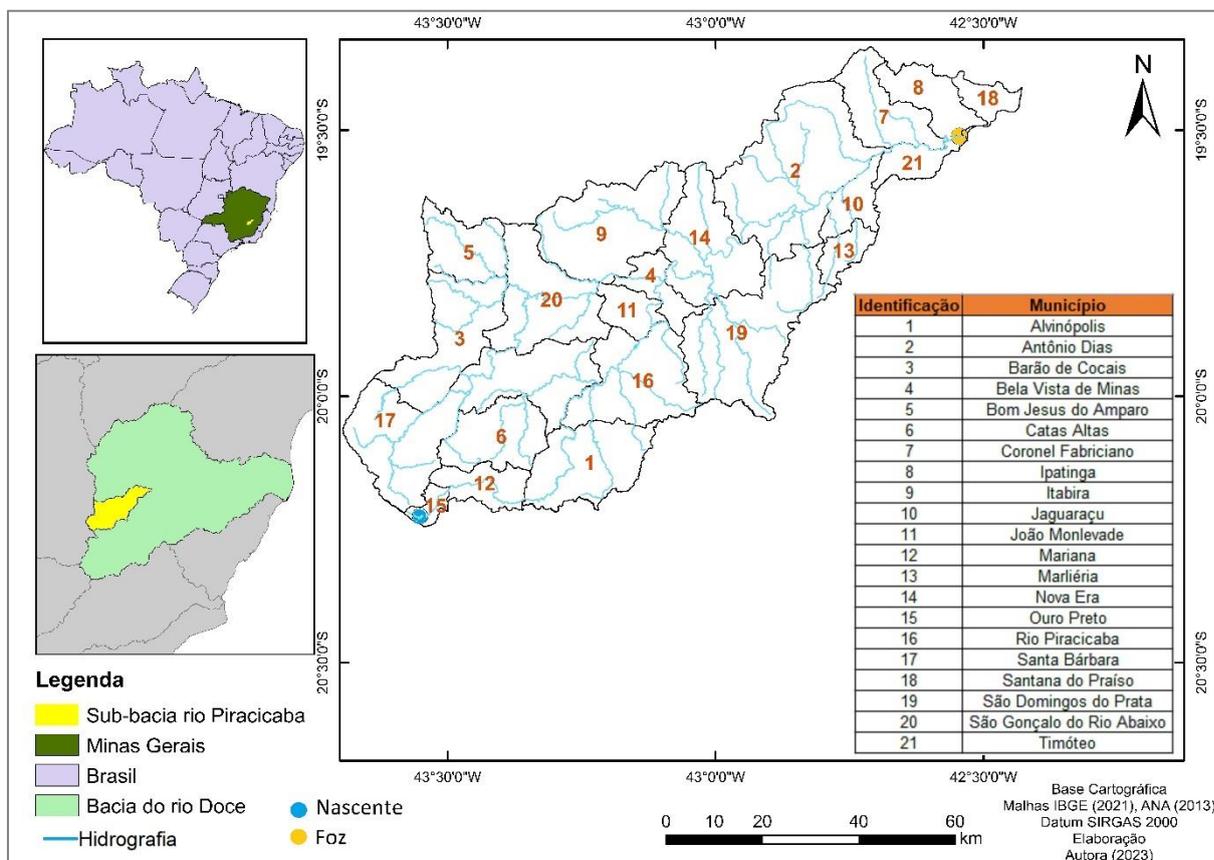
localizadas nas bacias de drenagem dos rios São Francisco e Doce, respectivamente, apresentaram os valores (absolutos) mais altos de elasticidade da vazão com relação à precipitação e à evapotranspiração. Os autores também encontraram uma boa correlação entre o coeficiente de runoff e a elasticidade, sugerindo que bacias menos úmidas são mais sensíveis às variações climatológicas. Importante lembrar que o coeficiente de runoff pode ser definido como razão entre o volume de água escoado superficialmente e o volume de água precipitado (Carvalho e Silva, 2006).

#### **4 Área de estudo**

A área de estudo é a bacia do rio Piracicaba, que pertence a bacia do rio Doce, localizada entre as latitudes 19°19'S e 20°15'S, e longitudes 42°30'W e 43°42'W no Estado de Minas Gerais (MG). Ela integra as Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH's) da bacia do rio Doce e se denomina como DO2, constituindo o alto rio Doce juntamente com as bacias DO1 e DO3.

A bacia do rio Piracicaba (Figura 9) possui uma área de aproximadamente 5685,86 km<sup>2</sup>, correspondendo a 8% do território da bacia do rio Doce, e o seu curso d'água principal apresenta 241 km de extensão. O rio Piracicaba é o curso d'água mais importante da região e suas nascentes encontram-se no município de Ouro Preto na região 15 da (Figura 9), a 1.680 m de altitude, passando por cidades como Rio Piracicaba, Nova Era, Antônio Dias e pela Região do Vale do Aço, formada por Coronel Fabriciano e Ipatinga, na margem esquerda e Timóteo, na margem direita. Os principais rios afluentes da bacia são os rios do Peixe, Turvo, Conceição, Una, Machado, Santa Bárbara e Prata. A bacia também recebe a descarga de muitos córregos e ribeirões, que constituem sua rede de drenagem (PARH PIRACICABA, 2010). O trecho principal do rio Piracicaba deságua na bacia do rio Doce que fica entre as cidades de Ipatinga e Timóteo, onde está localizada a sua foz.

Figura 9 – Localização da bacia do rio Piracicaba/MG.



Fonte: Autora (2024).

A população desses municípios é predominantemente urbana, correspondendo a cerca de 964.372 mil habitantes (IBGE, 2023). A região é conhecida por possuir áreas de mineração, lavras de materiais preciosos, sendo uma das maiores reservas do mundo em minério de ferro, manganês, bauxita, ouro, esmeralda, alumínio, quartzito entre outros; apresentando quatro grandes siderúrgicas em áreas urbanas e amplas áreas de reflorestamento (PIRH, 2010).

#### 4.1 Caracterização da área de estudo

As atividades humanas têm causado vários impactos no meio ambiente, incluindo o aquecimento global, perda de biodiversidade e alterações na quantidade e qualidade da água. Essas atividades são conhecidas como atividades antropogênicas (IPCC, 2023). Neves (2022) mostrou como a interação de forças externas e internas moldou a ocupação e o desenvolvimento de atividades humanas

na bacia do rio Doce por mais de três séculos. As forças externas incluíram o processo de colonização e suas consequências sociais, políticas e econômicas, enquanto as forças internas abrangeram a expansão urbana, a instalação de indústrias siderúrgicas, as condições climáticas e o relevo, entre outros. Essa dinâmica resultou em uma intensa exploração dos recursos naturais e na remoção da vegetação para uso comercial.

A hierarquia fluvial da bacia é de ordem 8 (Tabela 1), o que significa que ela possui uma rede de drenagem bem desenvolvida. O comprimento total dos cursos d'água é de 6248,41 km, com um comprimento do rio principal de 236,1 km. A densidade de drenagem (DD) é de 1,150 km/km<sup>2</sup>, indicando uma boa capacidade de drenagem da bacia.

Tabela 1 – Características morfométricas da bacia do Rio Piracicaba.

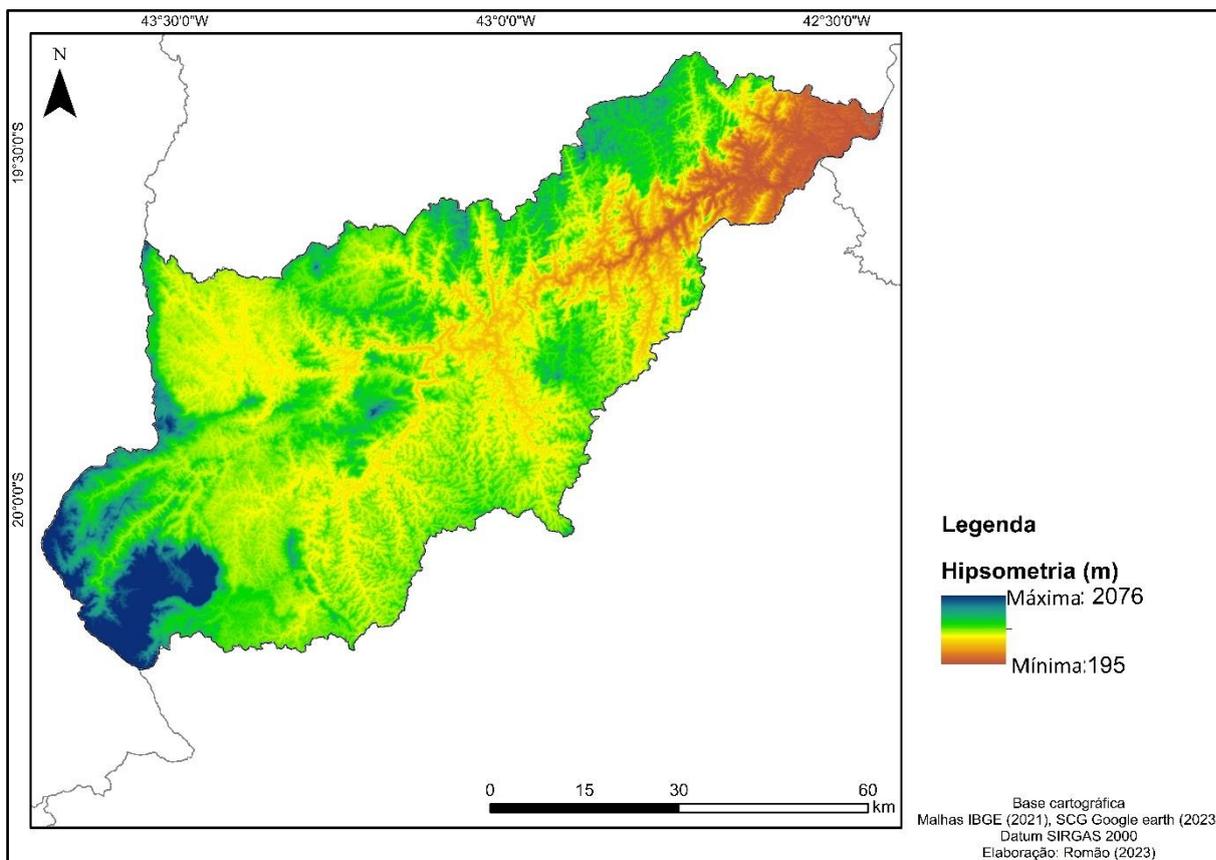
<b>Características da Bacia Rio</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
<b>Piracicaba</b>		
Área Total (A)	5431,3	km <sup>2</sup>
Perímetro Total (P)	688,1	km
Comprimento Axial da Bacia (La)	139,2	km
Coeficiente de Compacidade (Kc) $Kc = (P/\sqrt{A}) * 0,28$	2,614	-
Fator de Forma (Kf) $Kf = A/L^2$	0,097	-
Índice de Circularidade (IC) $Ic = (12,57 * A) / P^2$	0,144	-
Altitude Mínima	228,784	m
Altitude Média	805,280	m
Altitude Máxima	2076,340	m
Declividade Mínima	0,0014	%
Declividade média	26,160	%
Declividade Máxima	455,030	%

Amplitude Altimétrica da Bacia	1847,557	m
Ordem dos Curso d'água (Hierarquia Fluvial)	8	-
Comprimento do Curso d'água	236,1	km
Comprimento total dos cursos d'água	6248,41	km
Densidade de Drenagem (DD)	1,150	km.km <sup>-2</sup>

Fonte: Rocha (2021).

A bacia possui em sua área de drenagem (Figura 10) altitudes bem elevadas na região de sua nascente, superando os 2000 metros. Na região próxima a foz a altitude é bastante diferente, apresentando redução para 195 metros. Essa diferença de altitude é em torno de 1800 m, o que é correspondente as estimativas produzidas por Rocha (2021). O mapa de hipsométrico foi criado a partir de dados de Modelos de Elevação do Terreno (MDE), que possuem resolução de aproximadamente de 30m.

Figura 10 – Hipsometria da bacia do rio Piracicaba/MG.



Fonte: Autora (2024) com base na Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE. 2008. Topodata: Projeto de dados geomorfométricos do Brasil.

#### 4.2 Declividade da bacia do rio Piracicaba

A área da bacia foi classificada conforme o percentual de declividade estabelecido pela Embrapa (1999): 0-3% (plano), 3-8% (suave ondulado), 8-20% (ondulado), 20-45% (forte ondulado), 45-75% (montanhoso) e 75-100% (escarpado).

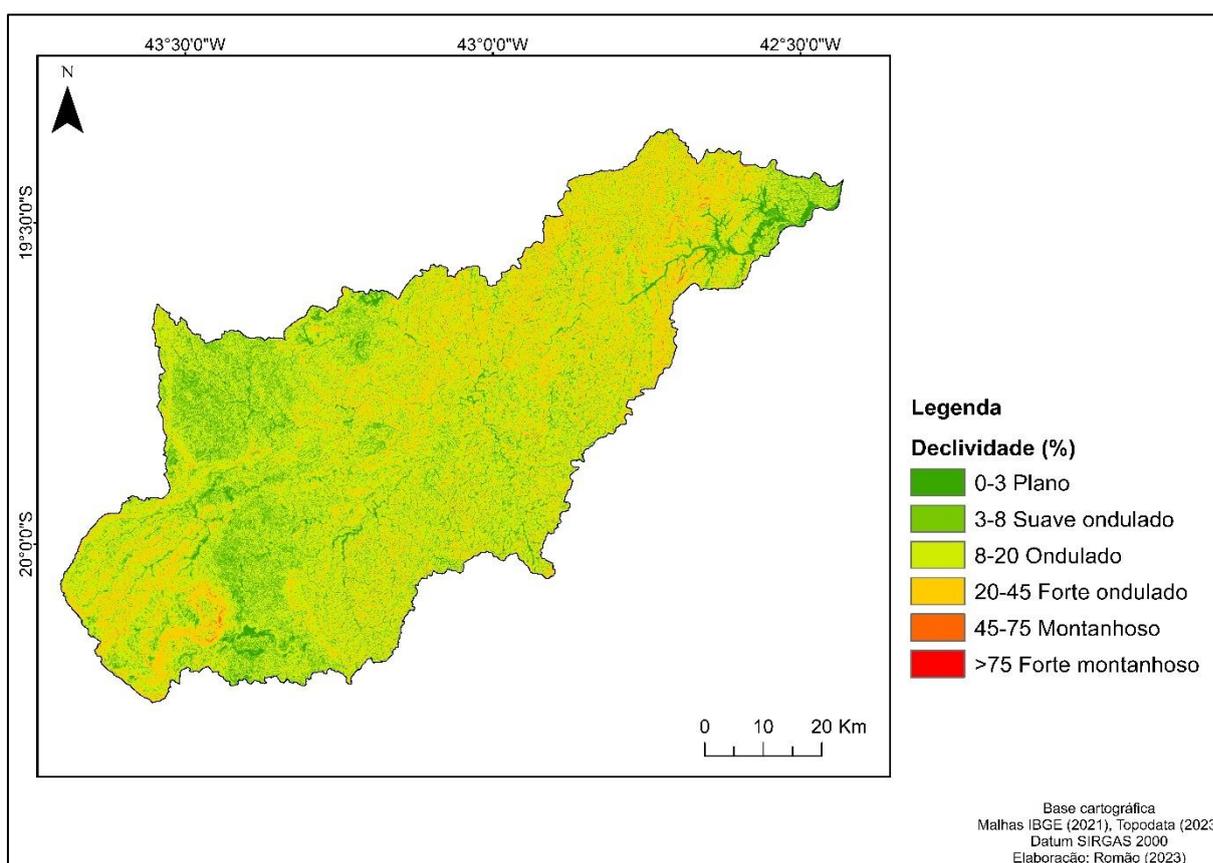
Observou-se que a bacia é caracterizada em sua maior parte por áreas ondulada e forte-ondulada (Tabela 2), fator que favorece o arraste de partículas e potencializa a ocorrência de processos erosivos, conforme observa-se na Figura 11. O conjunto de dados do modelo digital de elevação (MDE) foi adquirido no portal TOPODATA (INPE) com uma resolução de 30 metros por pixel. Utilizou-se o software ArcGIS, versão 10.8, para processar o MDE e criar tanto o mapa de elevação (Figura 10), quanto o mapa de inclinação (Figura 11).

Tabela 2 – Declividade da bacia do rio Piracicaba.

Declividade (%)	Relevo	Área (km <sup>2</sup> )	%
0-3	Plano	271	4,8
3-8	Suave-ondulado	1007	17,8
8-20	Ondulado	3169	55,9
20-45	Forte-ondulado	1217	21,5
45-75	Montanhoso	8,5	0,1
>75	Forte-montanhoso	0,0	0,0
<b>Total</b>		<b>5685</b>	<b>100</b>

Fonte: Autora (2023).

Figura 11 – Declividade da bacia hidrográfica do rio Piracicaba-MG.



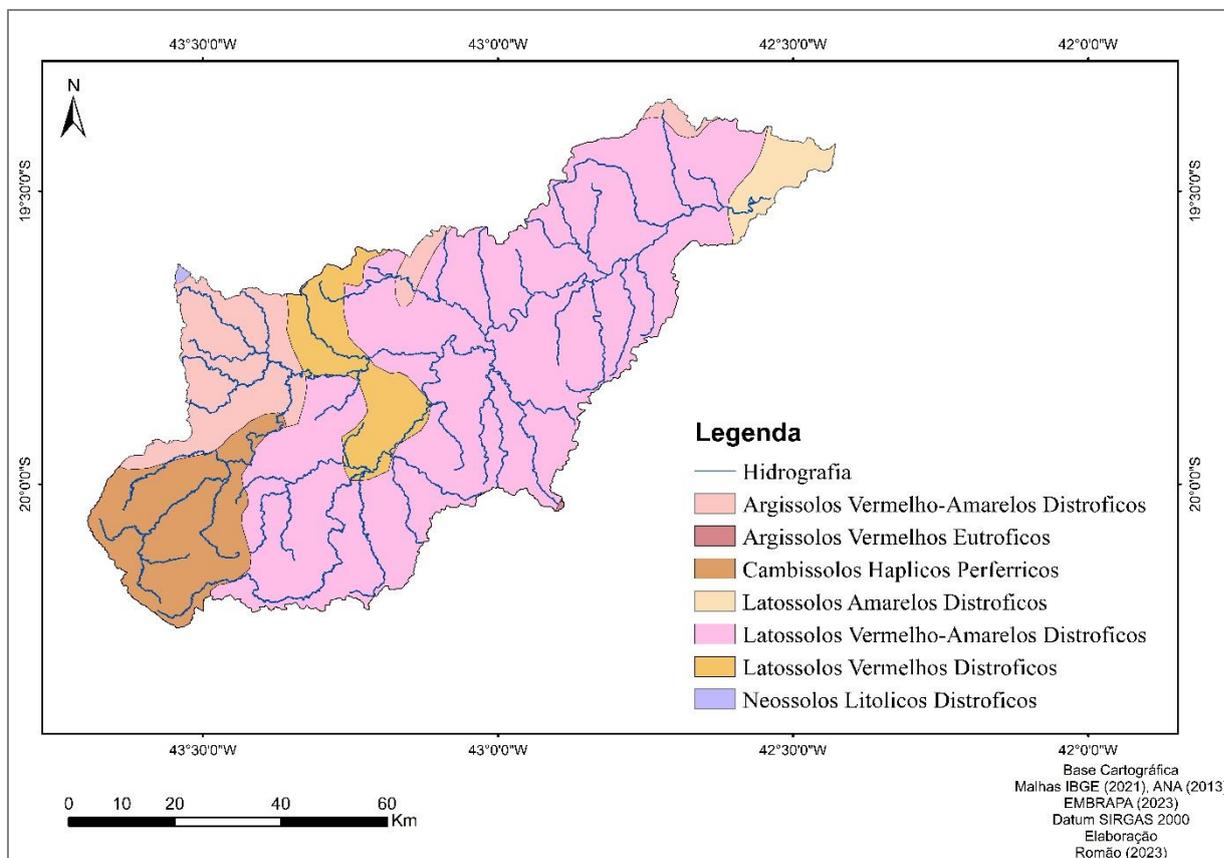
Fonte: Autora (2024) com base na Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE. 2008. Topodata: Projeto de dados geomorfométricos do Brasil.

A avaliação da declividade na bacia do rio Piracicaba é crucial para a compreensão dos processos hidrológicos. A categorização das áreas conforme os gradientes de inclinação, desde a nascente em Ouro Preto até a foz entre Timóteo e Ipatinga, desempenha um papel fundamental no ciclo hidrológico. Nas regiões mais elevadas e íngremes próximas à nascente, espera-se um maior escoamento superficial nessa região em relação a região da foz, devido à menor capacidade de infiltração do solo causado pela maior velocidade de arraste das águas, o que pode resultar em um aumento do potencial erosivo. Já nas áreas menos declivosas, como na região da foz, a tendência é de maior infiltração do solo e, conseqüentemente, uma maior retenção de água no terreno.

#### **4.3 Classes de solos predominantes na bacia do rio Piracicaba**

Os solos possuem uma relação direta com os processos de erosão, bem como com a qualidade e a quantidade de água superficial. Na bacia do rio Piracicaba-MG, predominam solos das classes Latossolos e Cambissolos, conforme a Figura 12 (SIBS - EMBRAPA, 2018). Os Latossolos Vermelho-Amarelos são abundantes e caracterizam-se por serem profundos e bem drenados. Os Latossolos Amarelos, embora em menor quantidade, estão localizados na região do “Vale do Aço”, na foz do rio Piracicaba. Esses solos têm características específicas, como alta acidez, baixa fertilidade natural, e textura média a argilosa, o que influencia a capacidade de retenção de água e nutrientes (EMBRAPA, 2023).

Figura 12 – Classes de solos presente na bacia hidrográfica do rio Piracicaba-MG.



Fonte: Autora (2023) com base nos dados da EMBRAPA EMBRAPA. (Banco de Dados de Solos - BD Solos. Disponível em: [https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta\\_publica.html](https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html).)

### 4.3 Clima

Alvares *et al.* (2013) realizaram um levantamento climático para o Brasil, baseado na classificação de Köppen-Geiger, utilizando dados de temperatura e precipitação de 2.950 estações meteorológicas. Utilizando esse levantamento pode-se verificar que a bacia do rio Piracicaba apresenta três tipos climáticos distintos: Cwa, Cwb e Aw.

O clima Cwa, conhecido como subtropical de inverno seco e verão quente, apresenta chuvas mais intensas durante o verão, que ocorre geralmente entre os meses de outubro e março, com uma precipitação anual variando entre 1.200 e 1.500 mm. As temperaturas médias anuais ficam entre 18°C e 22°C. No verão, as máximas podem alcançar entre 30°C e 32°C, enquanto no inverno as mínimas variam entre

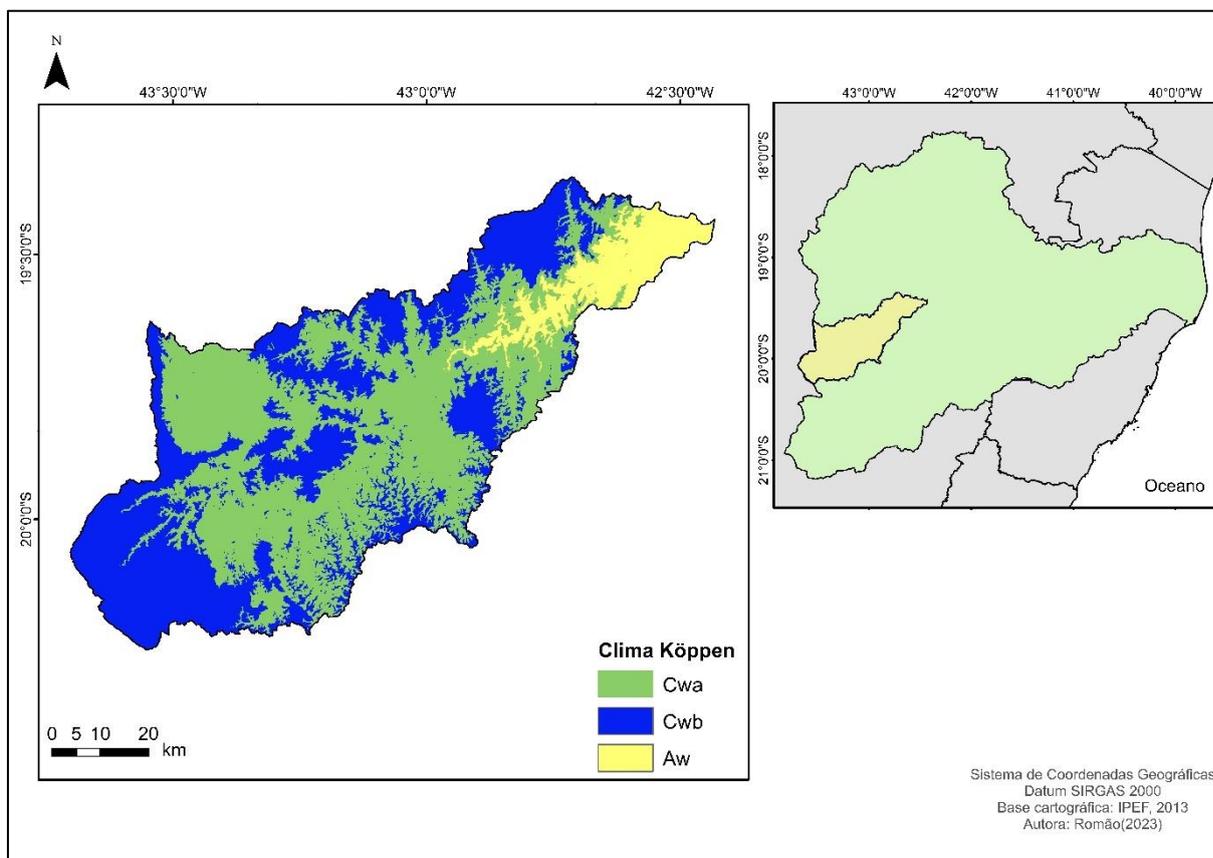
12°C e 15°C, podendo ser ainda mais baixas em áreas de maior altitude (de Sá Júnior *et al.*, 2012).

O clima Cwb, também chamado de subtropical de altitude com inverno seco e verão ameno, possui um padrão de precipitação semelhante ao clima Cwa, com chuvas intensas no verão (outubro a março) e uma precipitação anual também entre 1.200 e 1.500 mm. No entanto, as temperaturas médias anuais são ligeiramente mais baixas, variando entre 17°C e 19°C. No verão, as máximas ficam entre 25°C e 28°C, enquanto no inverno as mínimas frequentemente caem abaixo de 10°C, podendo chegar a 5°C em altitudes mais elevadas (de Sá Júnior *et al.*, 2012).

Por fim, o clima Aw, ou tropical com inverno seco, possui uma estação chuvosa concentrada principalmente no verão, de novembro a março, com uma precipitação anual variando entre 1.000 e 1.300 mm. As temperaturas médias anuais são mais altas, oscilando entre 22°C e 26°C. No verão, as temperaturas frequentemente superam os 30°C, podendo atingir até 35°C. No inverno, as mínimas geralmente não caem abaixo de 15°C, e as máximas diurnas ainda são elevadas, ao redor de 25°C a 28°C (de Sá Júnior *et al.*, 2012).

O tipo climático Cwa é o mais comum na bacia, sendo encontrado na maior parte da área. O tipo climático Cwb é encontrado nas regiões da bacia onde a altitude é maior. Por fim, o tipo climático Aw é encontrado na foz do rio Piracicaba (Figura 13).

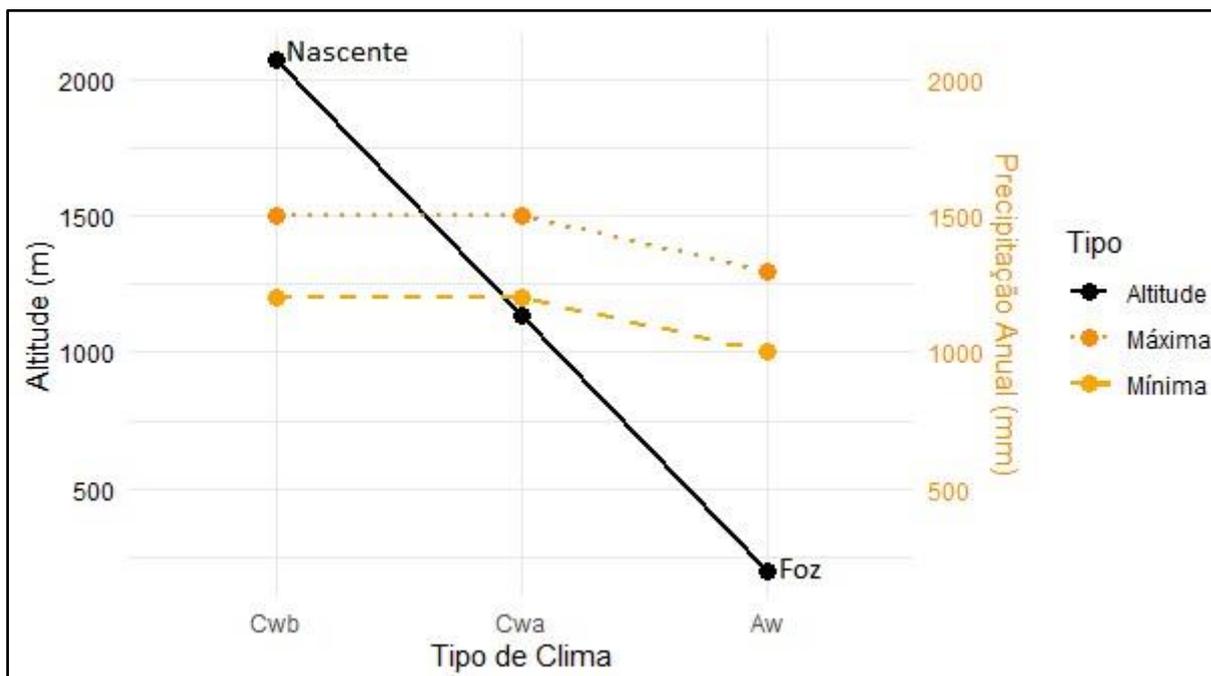
Figura 13 – Clima da bacia hidrográfica do rio Piracicaba.



Fonte: Autora (2024) com base em Alvares et al. (2013).

A Figura 14 ilustra a relação entre altitude e precipitação anual para diferentes tipos de clima, destacando como essas variáveis se comportam em climas Cwb, Cwa e Aw. A linha preta sólida, que representa a altitude, mostra uma descida acentuada da nascente, localizada no ponto mais alto próximo ao clima Cwb, até a foz, no ponto mais baixo próximo ao clima Aw. As linhas tracejadas indicam a precipitação anual máxima e mínima, que variam menos dramaticamente ao longo dos diferentes tipos de clima. Essa representação visual é útil para compreender como a altitude influencia a distribuição da precipitação anual em diferentes zonas climáticas, fornecendo insights valiosos para estudos de climatologia e geografia.

Figura 14 – Altitude e precipitação anual por tipo de clima



Fonte: Autora (2024).

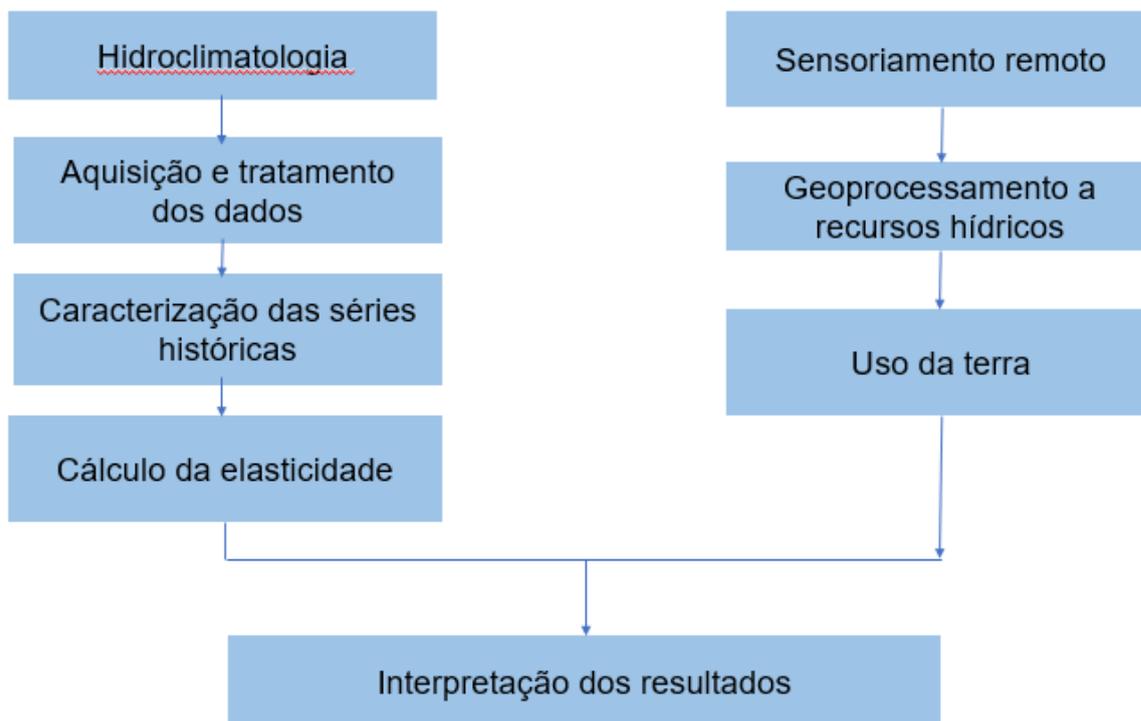
## 5 Materiais e Métodos

A metodologia utilizada neste estudo se inicia com a coleta de dados hidroclimatológicos. Em seguida, os dados foram tratados, sendo aplicado a regressão linear múltipla para correção de falhas. Foram construídas séries históricas de vazão, precipitação e evapotranspiração e, na sequência, foi realizado o cálculo da elasticidade e o coeficiente de vazão.

Foi realizada a análise de tendências dos dados históricos da bacia hidrográfica do rio Piracicaba de 1987 a 2022. Os dados coletados foram cruzados e analisados em conjunto para identificar as relações entre os diferentes fatores que afetam a bacia do rio Piracicaba; além disso, foi realizada a validação dos cálculos de elasticidade e, ao final, foi realizada a interpretação dos resultados. A sequência metodológica da pesquisa está ilustrada na

Figura 15 e nas próximas subseções será descrita cada etapa detalhadamente

Figura 15 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Autora (2024).

### 5.1 Aquisição de dados hidroclimatológicos

Os dados de chuva e de vazão utilizados neste estudo foram obtidos através do portal Hidroweb (2022). Foram selecionadas 14 estações pluviométricas e 4 estações fluviométricas na região de estudo. As informações destas estações são apresentadas na Tabela 3 e suas localizações são apresentadas na Figura 16.

Tabela 3 – Informações das estações pluviométricas e fluviométricas na bacia do rio Piracicaba/MG utilizadas neste estudo.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Sigla</b>	<b>Estação</b>	<b>Latitude (°)</b>	<b>Longitude (°)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Período de dados</b>
<b>01942029</b>	Mário de Carvalho	MC	P	-19,525	-42,644	232	1986-2022
<b>01943008</b>	Santa Maria de Itabira	SMI	P	-19,442	-43,118	538	1941-2022
<b>01943027</b>	Usina Peti	UP	P	-19,881	-43,367	1.110	1946-2022
<b>02042031</b>	Fazenda Cachoeira D'antas	FCD	P	-20,011	-42,674	280	1981-2022
<b>02043059</b>	Colégio Caraça	CC	P	-20,097	-43,488	1.300	1983-2022
<b>02043056</b>	Fazenda água limpa	FAL	P	-20,305	-43,616	965	1983-2022
<b>01943007</b>	Santa Bárbara	SB	P	-19,945	-43,401	748	1941-2022
<b>01943001</b>	Rio Piracicaba	RP	P	-19,923	-43,178	623	1940-2022
<b>1943010</b>	Caeté	C	P	-19,901	-43,668	926	1941-2022
<b>1943024</b>	José de Melo	JM	P	-19,69	-43,586	851	1944-2016

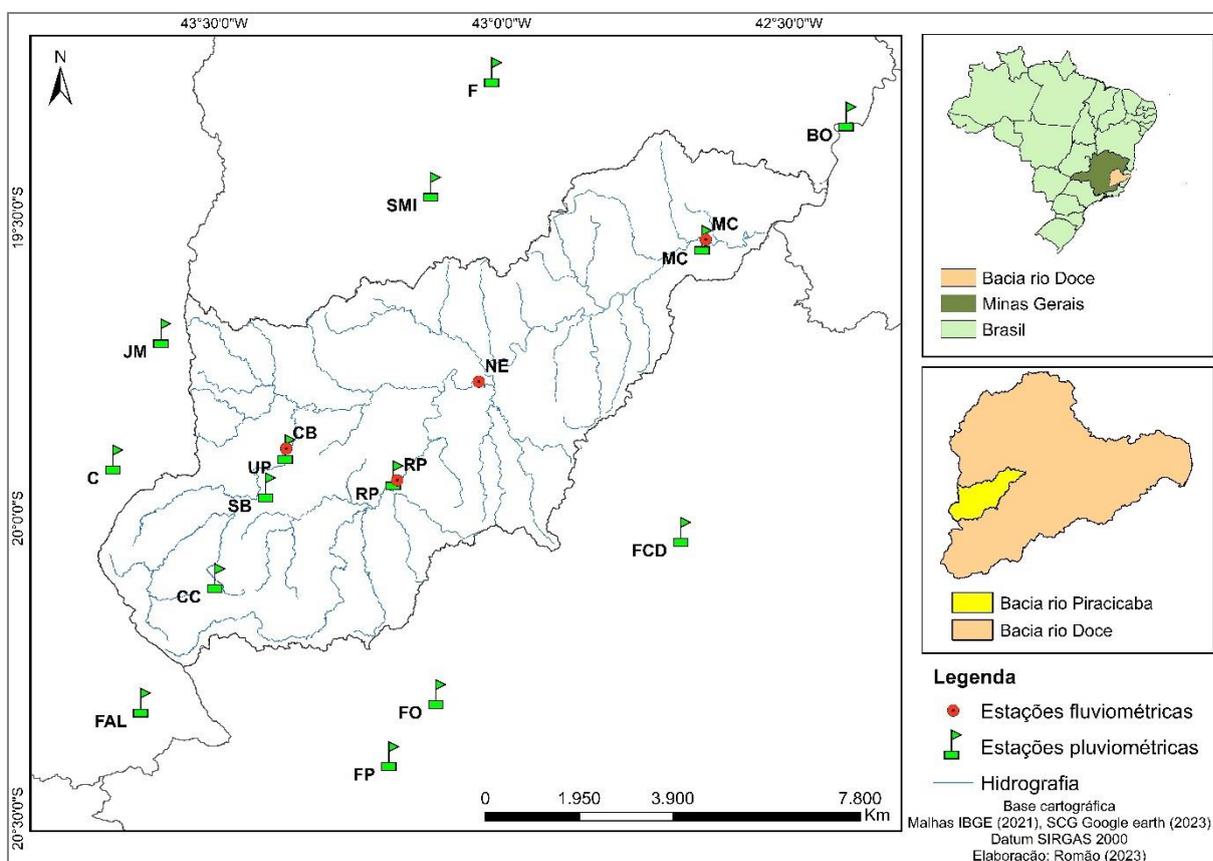
---

<b>2043027</b>	Fazenda Ocidente	FO	P	-20,286	-43,099	555	1967-2022
<b>1942030</b>	Belo Oriente	BO	P	-19,316	-42,396	224	1986-2022
<b>1943003</b>	Ferros	F	P	-19,25	-43,014	453	1941-2022
<b>2043011</b>	Fazenda Paraíso	FP	P	-20,39	-43,18	483	1941-2022
<b>56640000</b>	Carrapato Brumal	CB	F	-19,792	-43,459	755	1954-2022
<b>56610000</b>	Rio Piracicaba	RP	F	-19,932	-43,173	748	1925-2022
<b>56696000</b>	Mário de Carvalho	MC	F	-19,524	-42,64	232	1985-2022
<b>56659998</b>	Nova Era	NE	F	-19,766	-43,033	526	1989-2022

---

Fonte: Autora (2024) com base em Hidroweb (2023).

Figura 16 – Localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas neste estudo.



Fonte: Autora (2023).

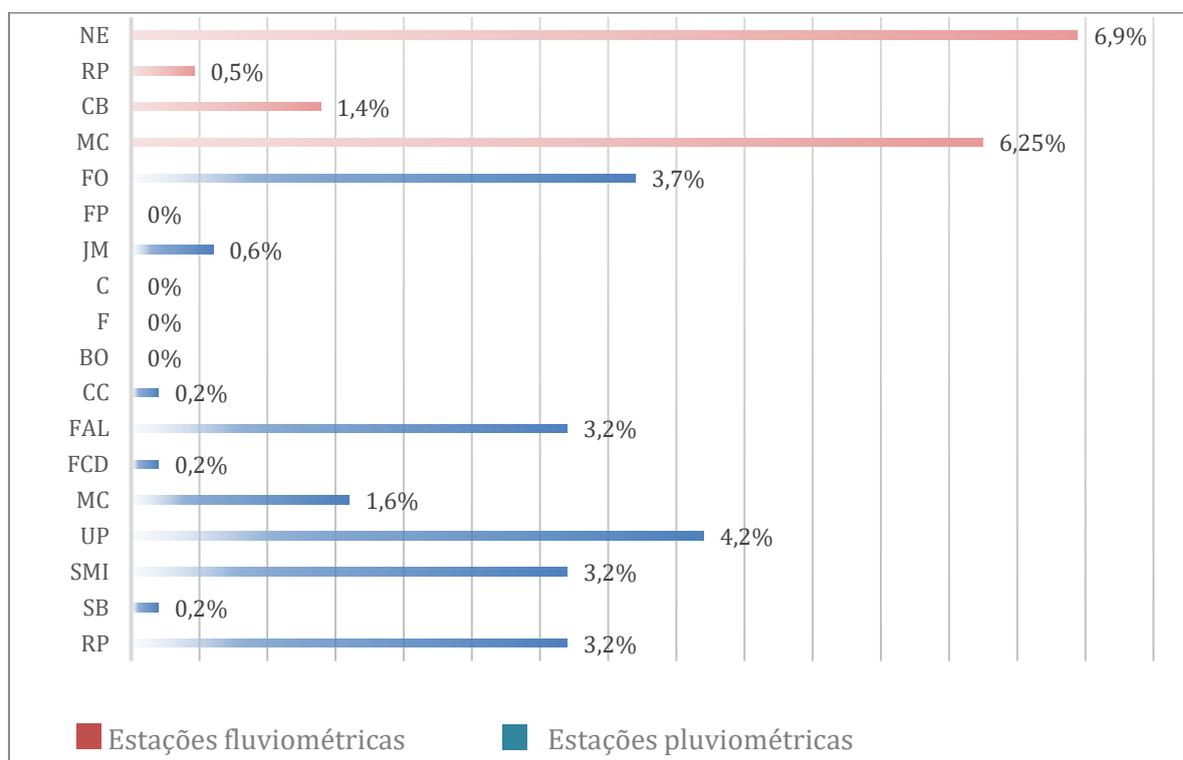
Neste estudo, os dados de evapotranspiração potencial foram obtidos do estudo de Xavier et al. (2022) para o período de 1987 a 2020. Os dados de Xavier et al. (2022), desde a sua primeira versão, em 2016 (Xavier et al., 2016), têm sido amplamente utilizados em estudos hidroclimáticos recentes, como na análise comparativa das precipitações diárias interpoladas e dados de estações na região dos Tabuleiros Costeiros, que mostrou uma forte correlação entre os dados das estações pluviométricas e os dados interpolados, indicando a viabilidade de uso desta base para análises hidroclimáticas na região (Barros et al., 2018). Outro exemplo é o estudo sobre homogeneidade, eventos extremos e suas causas na Bacia do Rio São Francisco, que utilizou os dados para identificar áreas climatologicamente homogêneas e quantificar eventos extremos na bacia (Silva et al., 2019). Xavier et al. (2022) utilizou a equação de Penman-Monteith em seus estudos para estimar a evapotranspiração potencial.

## 5.2 Tratamento dos dados

Os dados pluviométricos e fluviométricos diários foram transformados em dados mensais; desta forma, o primeiro nível de consistência ocorreu de acordo com o seguinte procedimento: meses com menos do que 20 dias foram descartados e preenchidos da mesma forma que os dados faltantes.

Na Figura 17 ilustra-se o percentual de falhas mensais nas estações de chuva e de vazão. Esses números representam o percentual mensal de falhas de medição em cada estação. É evidente que algumas estações têm taxas mais altas de falhas, como a estação de chuva UP-Usina Peti(4,2%) e de vazão NE-Nova Era (6,9%), enquanto outras têm percentuais muito baixos ou até mesmo zero, como a de vazão RP-Rio Piracicaba (0,5%) e chuva BO-Belo Oriente (0%).

Figura 17 – Percentual de falhas mensais nas estações analisadas.



Fonte: Autora (2024).

Após essa primeira consistência, os dados fluviométricos e pluviométricos foram analisados a fim de preencher falhas na série de dados. O método utilizado para realizar o preenchimento de falhas foi o método de regressão linear múltipla. Para este

preenchimento foram selecionadas as estações que apresentaram o maior coeficiente de correlação (Tabela 4 e 5) com a estação que apresentava falhas. Na Tabela 4 apresenta-se os valores dos coeficientes de correlação para as estações fluviométricas, em que estão destacados os maiores valores. Porém, para o preenchimento das falhas de vazão, como se tratava de apenas 4 postos de monitoramento, todos com altos coeficientes de correlação, foi aplicada a regressão linear múltipla com todas as estações restantes.

Tabela 4 – Coeficiente de correlação das estações fluviométricas.

<b>Estação</b>	<b>MC</b>	<b>CB</b>	<b>RP</b>	<b>NE</b>
<b>MC</b>	1,00	0,91	0,95	0,98
<b>CB</b>	0,93	1,00	0,91	0,95
<b>RP</b>	<b>0,95</b>	0,91	1,00	0,96
<b>NE</b>	<b>0,98</b>	<b>0,95</b>	0,96	1,00

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Uma importante restrição foi seguida para o preenchimento de falhas no que se refere à seleção de estações pluviométricas utilizadas. Segundo Zeilhofer *et al.* (2003), para preenchimento de falhas é necessário utilizar pares de pontos com máxima correlação. No preenchimento das falhas pluviométricas foram usadas as 3 (três) estações da Usina de Peti (1943027), Fazenda Água limpa (2043056) e Colégio Caraça (2043059), pois são as que apresentaram os maiores coeficientes de correlação (Tabela 5).

Tabela 5 – Coeficiente de correlação das estações pluviométricas.

Estação	RP	SB	SMI	UP	MC	FCD	FAL	CC	BO	F	C	JM	FP	FO
<b>RP</b>	1,00													
<b>SB</b>	0,85	1,00												
<b>SMI</b>	0,84	0,85	1,00											
<b>UP</b>	<b>0,91</b>	<b>0,90</b>	<b>0,89</b>	<b>1,00</b>										
<b>MC</b>	0,86	0,81	0,84	0,88	1,00									
<b>FCD</b>	0,88	0,84	0,86	0,89	0,86	1,00								
<b>FAL</b>	<b>0,87</b>	<b>0,86</b>	<b>0,83</b>	<b>0,91</b>	<b>0,82</b>	<b>0,86</b>	1,00							
<b>CC</b>	<b>0,85</b>	<b>0,86</b>	<b>0,84</b>	<b>0,92</b>	<b>0,83</b>	<b>0,85</b>	<b>0,92</b>	<b>1,00</b>						
<b>BO</b>	0,84	0,76	0,82	0,84	0,87	0,85	0,80	0,80	1,00					
<b>F</b>	0,86	0,82	0,87	0,88	0,91	0,87	0,84	0,83	0,87	1,00				
<b>C</b>	0,86	0,87	0,88	0,93	0,83	0,86	0,91	0,91	0,81	0,85	1,00			
<b>JM</b>	0,87	0,87	0,88	0,93	0,86	0,87	0,91	0,92	0,83	0,87	0,93	1,00		

<b>FP</b>	0,88	0,89	0,86	0,91	0,84	0,90	0,90	0,89	0,83	0,85	0,89	0,90	1,00	
<b>FO</b>	0,87	0,86	0,84	0,91	0,84	0,87	0,87	0,86	0,82	0,85	0,86	0,90	0,92	1,00

---

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Após o preenchimento de falhas nos dados de vazão e precipitação, os valores de vazão foram transformados de m<sup>3</sup>/s para mm/ano, considerando a área de drenagem da bacia hidrográfica, conforme a Equação 2. A área da bacia do Rio Piracicaba foi determinada utilizando o programa ArcGIS, resultando em uma extensão de 5685,86 km<sup>2</sup>. Esse cálculo inclui a área incremental do Vale do Aço.

A Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) DO2 é composta pela bacia do Rio Piracicaba e por uma área incremental a jusante da foz deste rio, conforme os dados do Portal do Comitê (2020).

$$Q \left( \frac{mm}{ano} \right) = \frac{Q(m^3/s) \times 31,536}{Área da bacia (km^2)} \quad \text{Equação 1}$$

### 5.3 Construção e caracterização das séries históricas

As séries históricas de precipitação foram geradas a partir do acumulado mensal de chuvas, no período de 1987 a 2022, para cada estação da bacia do rio Piracicaba. Para realizar a análise espacial da precipitação, foi utilizada a técnica de interpolação por polígonos de Thiessen, implementada no software ArcGIS 10.8. Cada polígono de Thiessen representa a área de influência de uma estação pluviométrica específica, permitindo uma análise detalhada da distribuição espacial da chuva.

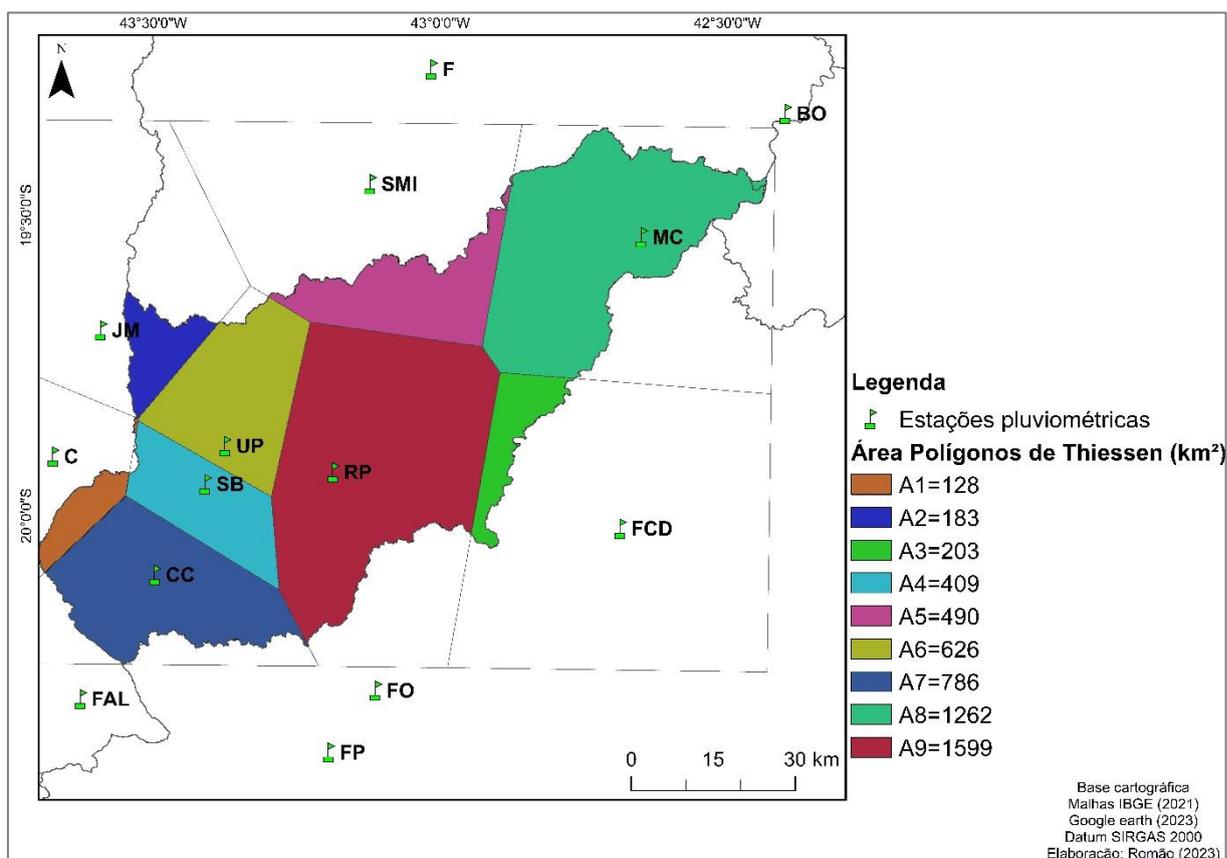
Para calcular a precipitação média na bacia, cada polígono de Thiessen recebe um peso proporcional à sua área em relação à área total da bacia. Esses pesos são utilizados para calcular a média ponderada da precipitação, garantindo que áreas maiores tenham uma influência proporcionalmente maior no cálculo final. A tabela de pesos apresentada nos resultados mostra a área de cada polígono e o peso correspondente, proporcionando uma visão precisa da variabilidade espacial da precipitação na bacia do rio Piracicaba.

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba foi dividida em nove áreas distintas pelo polígono de Thiessen (Figura 18). Cada área foi delimitada por um polígono que representa a região mais próxima de um ponto de amostragem específico. Essa técnica é comumente usada para estimar valores em locais onde não há dados disponíveis.

Assim, pela técnica de polígonos de Thiessen, verificou-se a influência de 9 (nove) estações, sendo elas Caeté, José de Melo, Santa Maria de Itabira, Colégio Caraça, Santa Bárbara, Usina Peti, Rio Piracicaba, Fazenda Cachoeira D'Antas e Mário de Carvalho; porém, como a bacia possui poucos pontos de monitoramento foi considerada mais 5 estações que estão próximas de cada área, sendo a estação de Ferros, Belo Oriente, Fazenda Oriente, Fazenda Paraíso e Fazenda Água Limpa.

O método de Thiessen é uma técnica de análise espacial que considera que cada estação pluviométrica possui uma área de influência dentro do perímetro em que se encontra. Esse procedimento leva em conta que as estações pluviométricas não estão uniformemente distribuídas no espaço. A hipótese é que a falta de dados em uma estação pluviométrica pode ser preenchida por um valor semelhante ao da área de influência da estação com dados mais próximos (Tucci, 2009).

Figura 18 – Área de influência das estações pluviométricas.

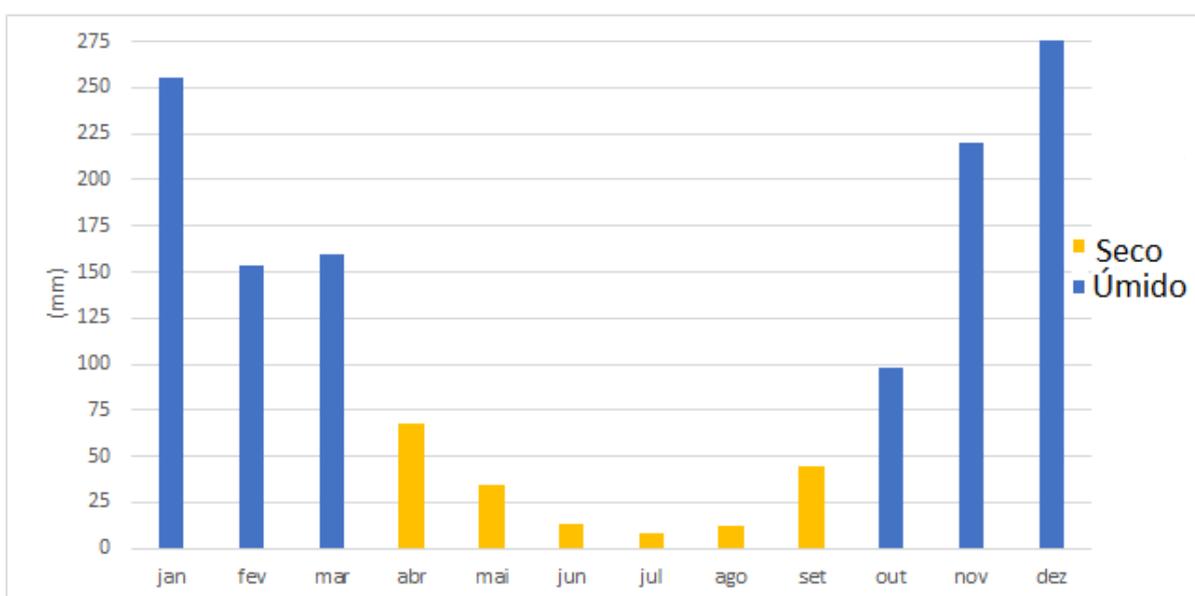


Fonte: Autora (2024).

Por meio da análise das médias mensais históricas, ou seja a média simples de todos os meses de 1987 a 2022 das 14 estações, para a sub-bacia do rio Piracicaba, nota-se o histograma da Figura 19 com a divisão da sazonalidade do ano hidrológico em período úmido (azul), começando em outubro e terminando em março, e período seco, começando em maio e terminando em agosto (laranja). Essa informação corrobora aquela publicada por Marques (2010), sobre o ano hidrológico na bacia do rio Doce ter início em outubro e final em setembro.

Gregory (1979) propôs um método para definir meses secos e chuvosos em uma escala temporal mensal. De acordo com esse método, um mês é considerado seco quando a precipitação é menor que a mediana da série, e chuvoso quando a precipitação é maior que a mediana, no caso a mediana da precipitação da bacia do rio Piracicaba é de 83 mm, logo valores abaixo serão considerados meses secos (abril a setembro) e acima meses chuvosos (outubro a março).

Figura 19 – Média histórica dos totais mensais da precipitação considerando as 14 estações pluviométricas espalhadas na bacia rio Piracicaba, no período de 1987 a 2022.



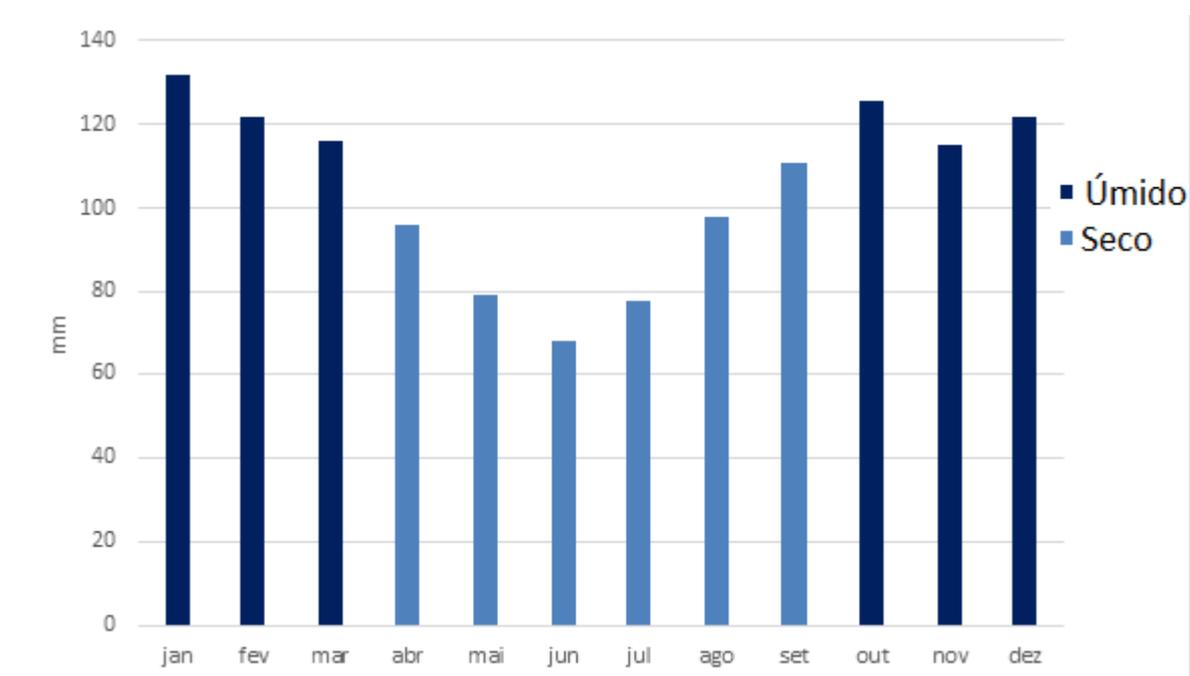
Fonte: Autora (2024).

Em relação aos dados de evapotranspiração potencial, foram utilizados os 47 pontos de grade que ocupam a área da bacia do rio Piracicaba, considerando o

período de 1987 a 2020. A resolução dos pontos de grade utilizada no estudo foi de  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ , cobrindo todo o território brasileiro. Essa alta resolução espacial permite uma análise detalhada e precisa das variáveis climáticas, facilitando a compreensão das variações espaciais e temporais da evapotranspiração ao longo do período estudado.

Para evapotranspiração potencial foi obtida a média mensal **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) para a bacia no período de 1987 a 2020.

Figura 20 – Média histórica dos totais mensais de evapotranspiração potencial na bacia do rio Piracicaba.



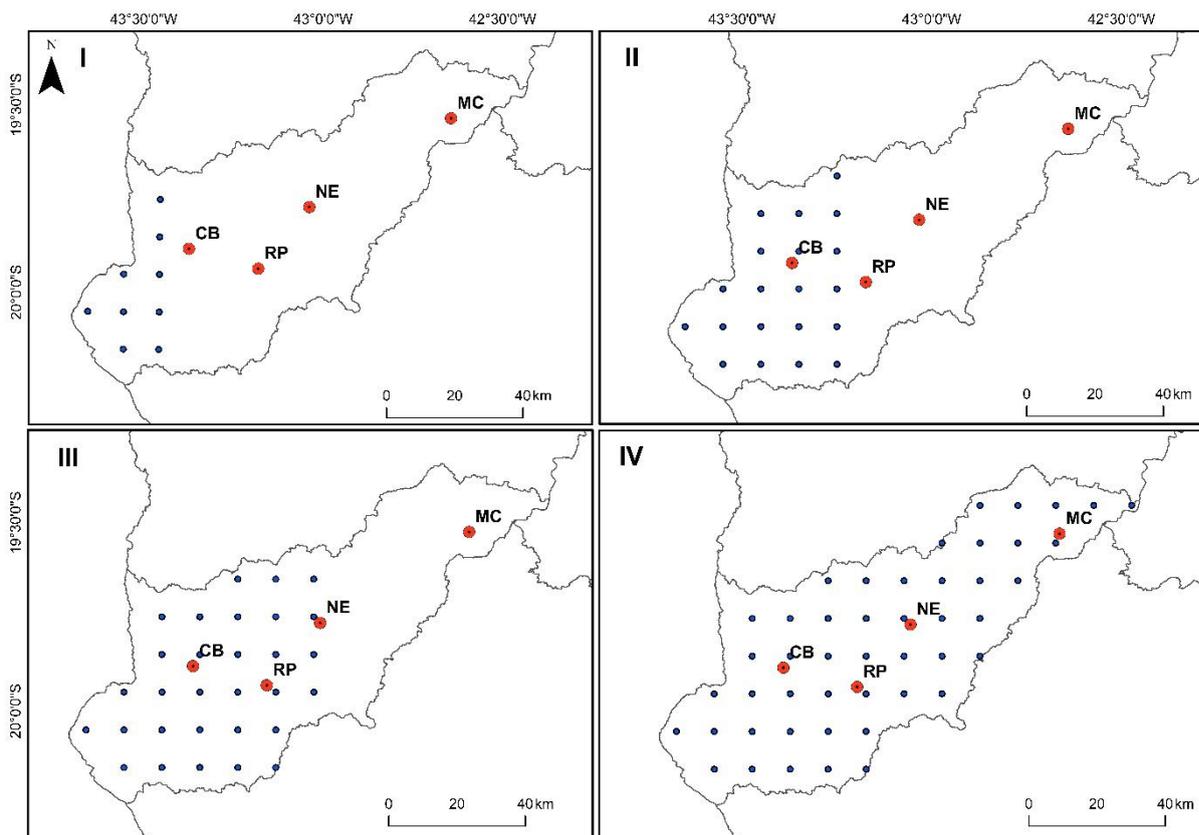
Fonte: Autora (2024).

Para a vazão, foram construídas quatro séries históricas correspondentes à média anual para o período de 1987 a 2022. As quatro séries foram criadas para representar diferentes aspectos ou subdivisões da bacia do rio Piracicaba, permitindo uma análise mais detalhada e segmentada dos dados hidrológicos.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra quatro mapas, com pontos georreferenciados, cada um associado a uma estação fluviométrica: CB, RP, NE e MC, respectivamente na Figura 20, sendo I,II,III,IV. Os pontos pretos representam medições que contribuem para o cálculo da evapotranspiração potencial.

A densidade desses pontos varia entre os mapas, indicando a variabilidade espacial na bacia. Essa divisão foi usada para o cálculo da elasticidade da vazão pela evapotranspiração EQ/ETp. A Figura 21 apresenta o georreferenciamento dos pontos de grade de evapotranspiração correspondentes a cada estação fluviométrica.

Figura 21 – Pontos de evapotranspiração de cada região a montante das estações fluviométricas.



Fonte: Autora (2024).

A Tabela 6 mostra o número de pontos de grade da evapotranspiração para cada estação fluviométrica. Estes pontos de grade de cada bacia, localizados a montante, são onde os dados de evapotranspiração foram coletados para calcular a elasticidade da EQ/ETp.

Tabela 6 – Número de pontos da evapotranspiração pertencentes a cada região a montante.

Figura	Estação fluviométrica	Pontos montante
I	CB	9
II	RP	20
III	NE	30
IV	MC	47

Fonte: Autora (2024).

#### 5.4 Análises estatísticas

Foram analisados os valores de acumulado anuais da precipitação e evapotranspiração potencial. Foi aplicado o método de Mann-Kendall para detectar tendências, seja de aumento ou de diminuição, ao longo do tempo. O teste de Mann-Kendall (MK) é uma abordagem não paramétrica que não faz suposições sobre a distribuição dos dados, concentrando-se apenas em identificar tendências. Sendo um teste robusto, ele é adequado para lidar com valores discrepantes e detectar tendências não lineares (Kendall, 1945; Kumar et al., 2002).

Esses testes são fundamentais para determinar não apenas se houve alterações de tendência, mas também para identificar o momento em que essas mudanças ocorreram. É importante destacar que para ser considerada como tal, essa mudança deve estar contida nos intervalos de confiança estabelecidos pela estatística utilizada, adotando-se, neste caso, o intervalo de confiança de 95%.

O teste de Mann-Kendall (MK) é utilizado para identificar a presença de tendências significativas em séries temporais históricas. A detecção é feita com base na (estatística) S, conforme a Equação (3):

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{se}(x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{se}(x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{se}(x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

Aqui,  $n$  representa o tamanho da série temporal, enquanto  $x_k$  e  $x_j$  são os valores da série temporal nos pontos  $k$  e  $j$ , respectivamente. A função *sign* retorna -1, 0 ou 1, dependendo da tendência: decrescente, constante ou crescente.

A variância de  $S$  é calculada pela Equação (4):

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{Equação 4}$$

A significância da tendência é determinada pelo cálculo do valor de  $Z$ , conforme a Equação (5). Valores positivos de  $Z$  indicam tendências crescentes, enquanto valores negativos de  $Z$  denotam tendências decrescentes. O nível de significância estatística adotado neste estudo foi de 5%, ou seja, a hipótese nula foi rejeitada com  $p\text{-value} < 0,05$  ( $\alpha=0,05$ ).

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad \text{Equação 5}$$

No teste de Mann-Kendall é possível identificar o ponto inicial de uma mudança na série temporal ao aplicar uma estatística  $U(t_n)$ . Essa estatística é calculada começando pelo valor  $i = 1$  e seguindo até  $i = N$ , dado por:

$$U(t_n) = \frac{(t_n - E(t_n))}{\sqrt{\text{var}(t_n)}} \quad \text{Equação 6}$$

em que  $t_n$  apresentará uma distribuição normal com média e variância dadas, respectivamente, pelas equações:

$$E(t_n) = \frac{N(N-1)}{4} \quad \text{Equação 7}$$

$$Var(t_n) = \frac{N(N-1)(2N+5)}{72}$$

Equação 8

Assim, foi gerado a estatística dentro do intervalo  $-1,96 < U(t_n) < 1,96$  (em que 1,96 corresponde a  $\alpha_0 = 0,05$ ). De maneira similar, procedeu-se com o cálculo no sentido inverso da série, começando de  $i = N$  até  $i = 1$ , gerando a estatística inversa representada por  $U(t_n)'$ . A interseção das curvas  $U(t)$  e  $U(t)'$  indica o ponto aproximado de mudança de tendência, desde que este ponto esteja contido no intervalo de confiança estabelecido ( $-1,96 < U(t_n) < 1,96$ ). Com base nessa análise de tendências, passamos a calcular o coeficiente de runoff e a vazão de referência. Para isso, foi realizada uma análise detalhada das vazões de referência dos dados consistidos da vazão diária entre 1987 e 2022 nas quatro estações MC, NE, RP e CB.

A magnitude é uma medida que expressa a grandeza ou intensidade de um fenômeno, seja ele físico, matemático ou estatístico. Segundo Arcand e Watzke (2017), a magnitude pode ser utilizada para compreender a escala de diferentes elementos no universo, desde as menores partículas subatômicas até as maiores galáxias. O método Theil-Sen, conforme discutido por Dang et al. (2015) e Wilhelm (2021), é um estimador robusto amplamente utilizado em regressões lineares. Este método é particularmente valorizado por sua resistência a outliers, ou seja, dados anômalos que podem distorcer os resultados de análises estatísticas tradicionais. Além disso, o método Theil-Sen possui alta eficiência assintótica, o que significa que ele se aproxima da eficiência máxima à medida que o tamanho da amostra aumenta.

Em análises de tendências, a robustez contra dados anômalos é crucial, pois esses dados podem influenciar significativamente os resultados e levar a conclusões errôneas. O método Theil-Sen é especialmente útil nesse contexto, pois calcula a mediana das inclinações de todas as linhas possíveis entre pares de pontos de dados, em vez de depender de uma única linha de melhor ajuste. Isso proporciona uma estimativa mais estável e confiável da tendência central.

Ao aplicar o método Theil-Sen para calcular a magnitude das tendências, obtemos uma estimativa robusta que é menos sensível a outliers. Isso é particularmente importante em estudos hidrológicos e climáticos, onde os dados podem ser altamente variáveis e sujeitos a extremos. Nesta pesquisa, o coeficiente de

runoff foi calculado utilizando a média de longo prazo dos dados anuais tratados de vazão e precipitação. A seguir, o cálculo do coeficiente de vazão foi realizado conforme a Equação 9:

$$Cr = \frac{Q}{P} \quad \text{Equação 9}$$

Em que Cr representa o valor do coeficiente, Q representa a vazão média de longo termo e P representa a precipitação média de longo termo, ou seja a média de chuvas completa da série temporal de 1987 a 20222 na bacia.

As vazões mínimas de referência, como Q7,10, Q90 e Q95, foram calculadas com uso do software Excel 2019. Foram usadas as vazões diárias originais, ou seja, sem realizar preenchimento de falhas. Essa abordagem foi adotada para garantir que os cálculos refletissem as condições reais observadas, sem introduzir possíveis vieses que poderiam surgir do preenchimento de dados faltantes. Os valores de Q7,10 foram estimados por meio da distribuição de probabilidade de Gumbel para mínimos, conforme a Equação 10. No estudo de Oliveira e Gonçalves (2022), a distribuição de Gumbel para mínimos foi a que melhor se ajustou aos dados de três estações hidrométricas, o que foi uma surpresa em relação à expectativa inicial. Inicialmente, esperava-se que os valores mínimos, como as vazões mínimas, seguissem esse padrão de distribuição. Essa expectativa foi baseada nos resultados de Melo (2016), que, ao estudar a bacia hidrográfica do Rio das Velhas, encontrou que a distribuição de Gumbel se destacou nos testes realizados com as vazões mínimas de referência na maioria dos casos. Esses resultados reforçam a adequação da distribuição de Gumbel para modelar vazões mínimas em diferentes contextos hidrológicos.

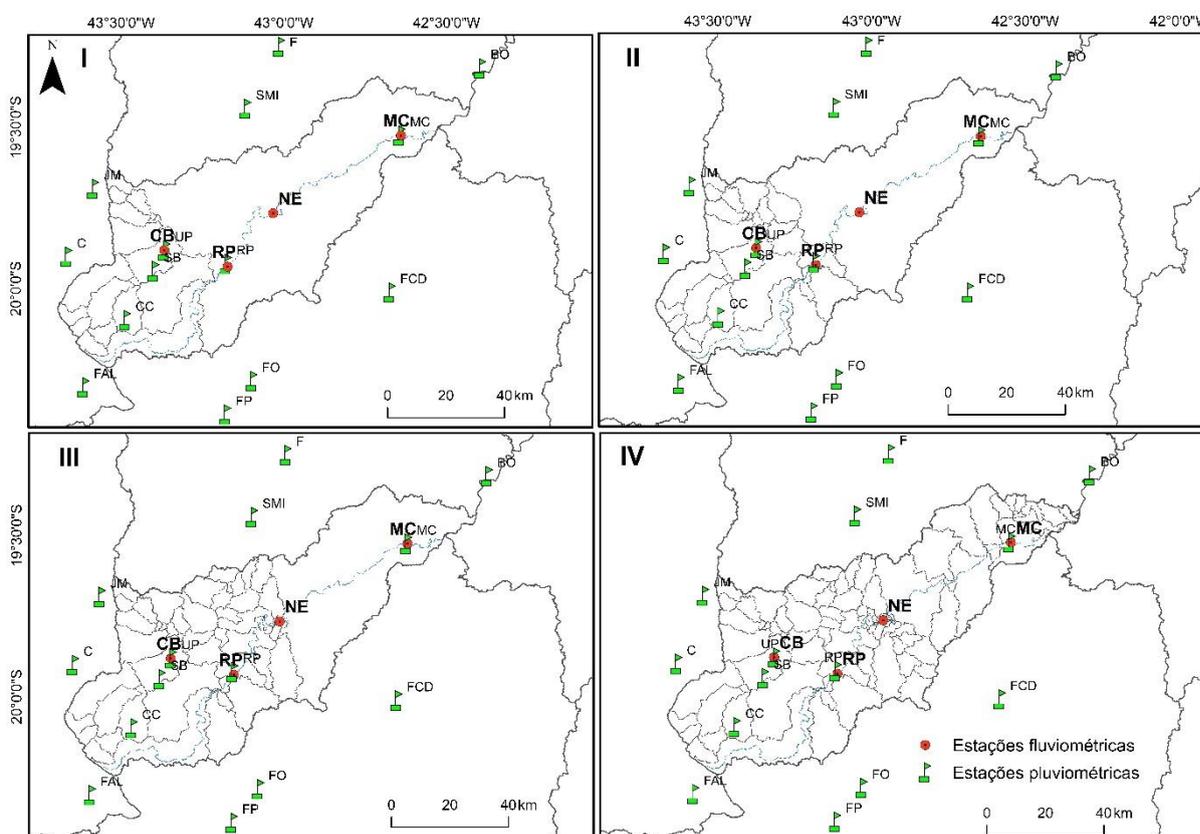
$$x = \bar{x} + s \cdot \left\{ 0,45 + 0,7797 \cdot \ln \left[ \ln \left( \frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right] \right\} \quad \text{Equação 10}$$

Em que as variáveis correspondentes são x: valor da vazão desejada;  $\bar{x}$ : média das vazões mínimas anuais; s: desvio padrão das vazões mínimas anuais e TR: tempo de retorno em anos. Neste caso, uma vez que a Q7,10 é a menor vazão média consecutiva de 7 dias, com tempo de retorno de 10 anos, o valor de TR é de 10 anos.

## 5.5 Cálculo da elasticidade

Para os cálculos da elasticidade climática, a bacia foi dividida em 4 regiões, com base nas quatro estações fluviométricas disponíveis. Cada estação corresponde à foz de uma sub-bacia. A delimitação dessas sub-bacias foi realizada utilizando o método de Ottobacias, aplicando o nível Otto 5 (Figura 22). Cada ponto fluviométrico foi relacionado com os pontos de chuva e de evapotranspiração a montante, sendo, assim possível obter a elasticidade da vazão em função da precipitação, evapotranspiração e o valor do escoamento de cada área delimitada. Os polígonos na Figura 21, em cada um dos mapas I, II, III e IV, representam as divisões de uma bacia hidrográfica em sub-bacias, conforme delimitação fornecida pelos metadados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), e os símbolos em verde as estações pluviométricas e em laranja as estações fluviométricas (ANA, 2023).

Figura 22 – Subdivisão da bacia hidrográfica do rio Piracicaba em função das estações fluviométricas.



Fonte: Autora (2024).

Para realizar a análise da sensibilidade da vazão foi usado o conceito de elasticidade. Portanto, para estimar o valor de elasticidade da vazão foi utilizado o método não paramétrico descrito por Sankarasubramanian *et al.* (2001). O método baseia-se na equação 11:

$$EQ = \text{mediana} \left( \frac{Qt - \bar{Q}}{Xt - \bar{X}} \cdot \frac{\bar{X}}{\bar{Q}} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Em que EQ é a elasticidade de vazão em relação a uma variável climatológica, sendo ela a precipitação ou a evapotranspiração;  $Qt$  é o valor da vazão no tempo  $t$ ;  $\bar{Q}$  é o valor da vazão média para todo o período analisado;  $Xt$  é a precipitação ou a evapotranspiração potencial no tempo  $t$  anual; e  $\bar{X}$  é a precipitação ou a evapotranspiração potencial média para todo o período analisado.

A elasticidade foi calculada para as quatro estações fluviométricas. No contexto da interpretação dos resultados, um valor de elasticidade de vazão em relação à precipitação igual a 2 implica que uma variação de 1% na precipitação média anual está associada a uma variação de 2% na vazão média anual (Chagas *et al.*, 2020). Por outro lado, valores negativos de elasticidade indicam uma relação inversa entre evapotranspiração e vazão. Isso significa que, em determinadas condições hidrológicas, um aumento percentual na evapotranspiração pode resultar em uma diminuição percentual na vazão, sugerindo possíveis influências como saturação do solo, características de infiltração ou regulação por reservatórios na bacia hidrográfica.

## 6 Resultados

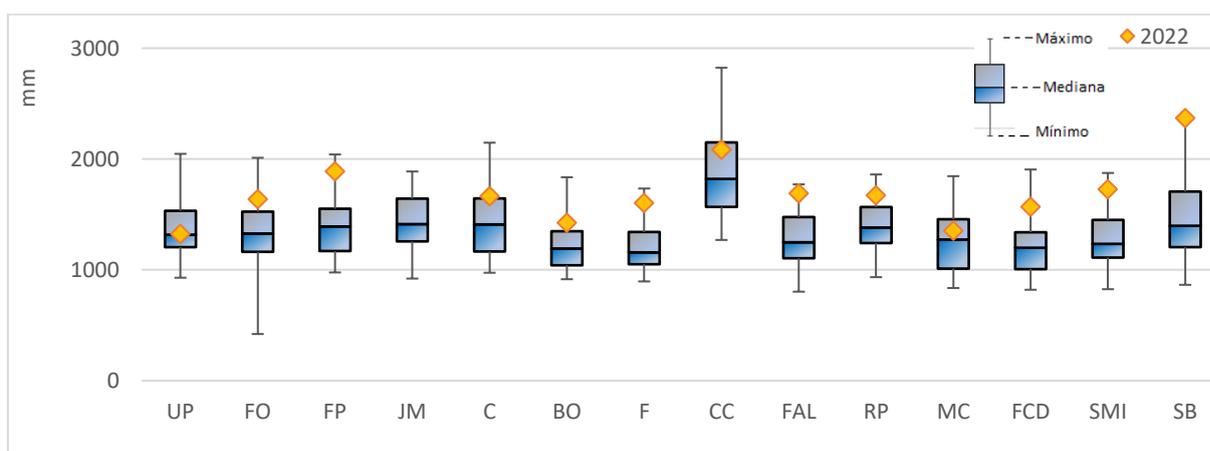
Neste item são apresentados os resultados a respeito da caracterização das séries históricas de precipitação, evapotranspiração e vazão com suas análises estatísticas, espaciais e temporais, além do resultado das elasticidades EQ/P e EQ/ET<sub>p</sub>.

## 6.1 Precipitação

Na bacia hidrográfica do rio Piracicaba há uma grande variabilidade espacial nos valores de precipitação anual (Figura 23), levando em conta que foi analisado um período de 36 anos de dados (Figura 19). A análise das estações pluviométricas revelou que a maioria apresentou uma dispersão dos dados de precipitação anual entre 1000 e 2000 mm. No entanto, a estação CC destacou-se por apresentar uma dispersão variando de valores específicos, diferente das demais. É importante ressaltar que o ponto laranja no gráfico não se refere à dispersão dos dados, mas sim a um ano específico da base de dados. Além disso, a estação SB também registrou um valor acima de 2000 mm em 2022.

A Figura 23 ilustra essas observações, onde a maioria das estações mantém um intervalo de precipitação similar entre 1000 e 2000 mm. A exceção é a estação CC, que apresentou um valor significativamente mais alto em 2022, conforme indicado pelo ponto laranja próximo ao topo do gráfico. A estação CC apresenta um valor de precipitação mais discrepante em relação às demais estações, além do fato de estar localizada em uma alta altitude. Por ser um gráfico que ilustra a variação anual total da precipitação, nota-se que os valores de 2022, que são mais recentes, estão acima dos valores das medianas de todas as estações analisadas, porém, estão abaixo do limite máximo da maioria das estações. A estação JM-José de Melo não possui dados de precipitação para o ano de 2022.

Figura 23 – Precipitação acumulada anual, entre o período de 1987 a 2022, das estações pluviométricas da bacia do rio Piracicaba.

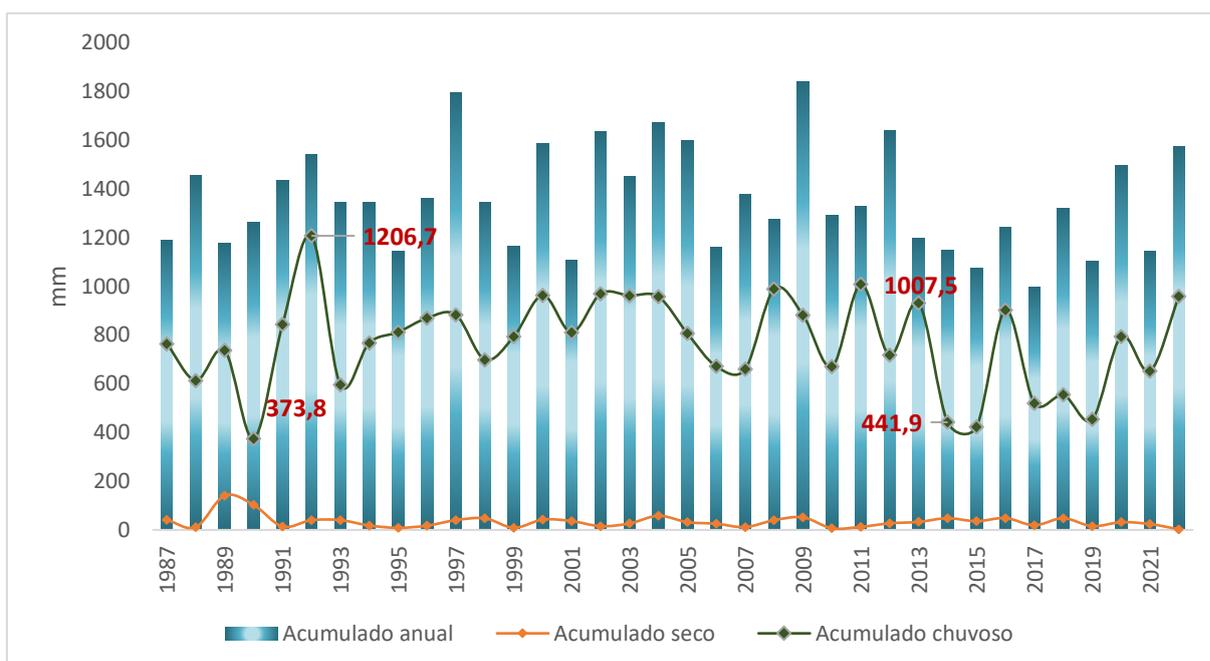


Fonte: Autora (2024).

Na Figura 24, apresenta-se a precipitação acumulada anual, que representa a média espacial da bacia do rio Piracicaba para o período entre 1987 e 2022. A média aritmética simples foi utilizada para calcular essa precipitação acumulada. A linha laranja corresponde ao acumulado durante o trimestre mais seco, compreendendo os meses de junho a agosto. A linha verde representa os acumulados durante o trimestre mais chuvoso, compreendendo os meses de novembro, dezembro e janeiro.

Houve variação entre 1000 a 2000 mm (barra azul). Os anos com maiores precipitações acumuladas no período chuvoso foram 1992 e 2011, que estão com acumulados que variam de 1007,5 a 1206,7. Os anos com menor precipitação acumulada no período chuvoso foram 1990, 2014 e 2015, que estão com acumulados abaixo de 442 mm (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A média espacial foi calculada utilizando o método de média aritmética simples. Este método consiste em somar os valores de precipitação registrados em diferentes pontos da bacia e dividir pelo número total de pontos, resultando na média espacial da precipitação.

Figura 24 – Precipitação acumulada anual-média espacial na bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Autora (2024).

A Tabela 7 mostra a precipitação média das áreas do polígono de Thiessen para o período de 1987 a 2022. Cada área é associada a uma ou mais estações meteorológicas. Para os valores de Pi (precipitação na estação), foram usados os acumulados de precipitação média de 1987 a 2022 e para as áreas com mais de uma estação pluviométrica foi aplicada a média nas mesmas. Por fim, Wi refere-se ao fator de peso, que é a área de cada polígono dividida pela área da bacia.

A Tabela 7 mostra que a área A7, que é associada às estações pluviométricas de CC, FAL e FP, é a que apresenta a maior precipitação média, com 1526 mm. A área A1, que é associada à estação pluviométrica de C é a que apresenta a segunda maior precipitação média, com 1424 mm. A área A2, que é associada à estação pluviométrica de JM, é a que apresenta a menor precipitação média, com 1192 mm. A precipitação média da área total do polígono de Thiessen é de 1350 mm. Para calcular a precipitação média da última coluna, foi utilizado o somatório da multiplicação de Pi (precipitação na estação) por Wi (fator de peso). A tabela pode ser utilizada para analisar a distribuição da precipitação na área do polígono de Thiessen. Ela mostra que a precipitação é mais abundante nas áreas localizadas nas regiões sudoeste e sul do polígono. Essa maior incidência de chuvas pode ser explicada pelas chuvas orográficas, que ocorrem quando massas de ar úmidas são forçadas a subir ao encontrar barreiras naturais, como montanhas ou serras. Ao subir, o ar se resfria, o vapor de água se condensa e precipita, resultando em chuvas mais intensas e frequentes nessas regiões

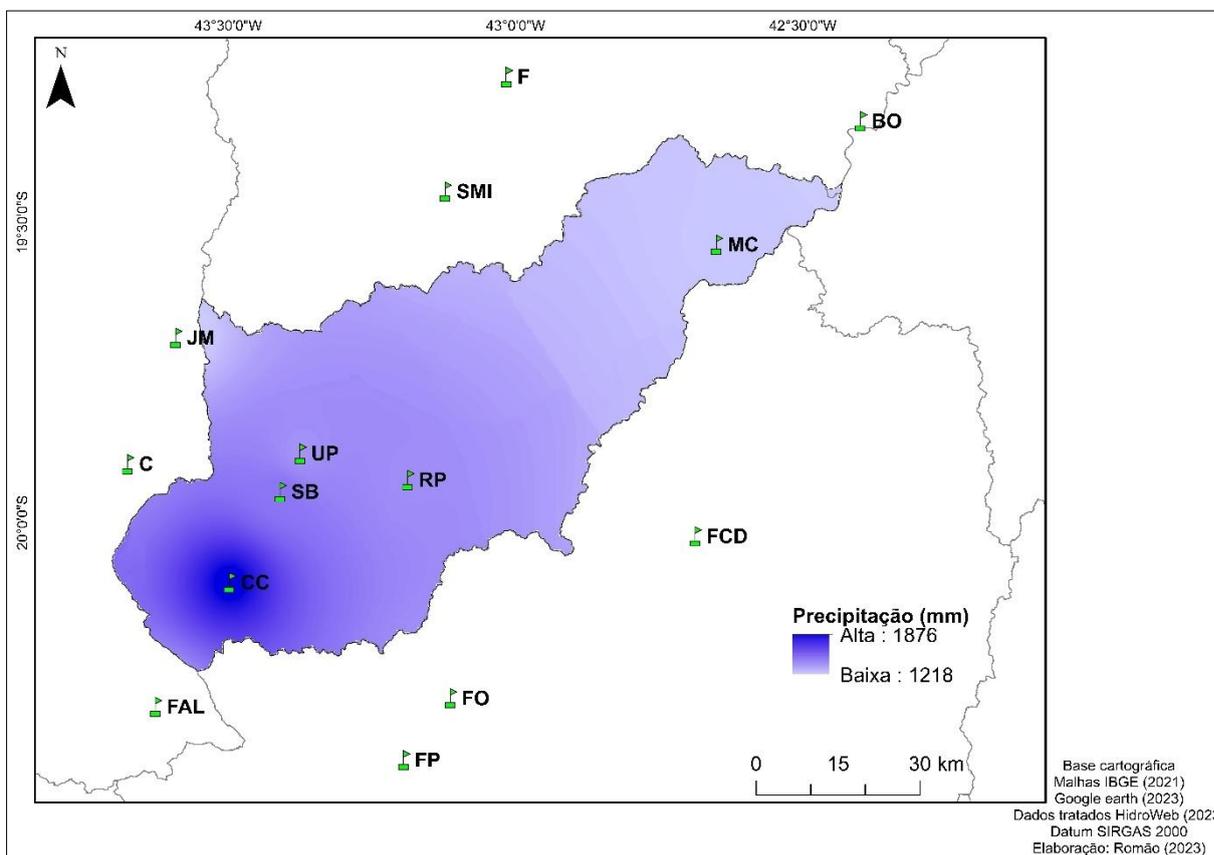
Tabela 7 – Precipitação média das áreas do polígono de Thiessen 1987-2022.

Área	Estação	Wi	Área (km <sup>2</sup> )	Pi (mm)	Pi.Wi (mm)
A1	C	0,02	128	1424	28,48
A2	JM	0,03	183	1192,09	35,76
A3	FCD	0,04	203	1219,43	48,77
A4	SB	0,07	409	1482,47	103,77
A5	SMI,F	0,09	490	1245,18	112,06
A6	UP	0,11	626	1387,78	152,66
A7	CC,FAL,FP	0,14	786	1526,46	213,70
A8	MC,BO	0,22	1262	1227,48	270,04
A9	RP,FO	0,28	1599	1372,58	384,32
<b>Total</b>		<b>1,00</b>	<b>5686</b>	<b>Pm da área total</b>	<b>1350</b>

Fonte: Autora (2024).

Fazendo uma análise da precipitação anual média espacial, observa-se uma divisão marcante nos acumulados, evidenciando uma variação espacial considerável. Nas áreas mais elevadas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), o volume pluviométrico anual é significativamente maior, alcançando em torno de 1800 mm por ano. Isso ocorre porque as massas de ar úmido são forçadas a subir ao encontrar uma barreira topográfica, como uma montanha. À medida que o ar sobe, ele se resfria e a umidade se condensa, resultando em maior precipitação nessas regiões elevadas.

Figura 25 – Precipitação acumulada anual média espacial na bacia do rio Piracicaba para o período de 1987 a 2022.



Fonte: Autora (2024).

## 6.2 Vazão

Na

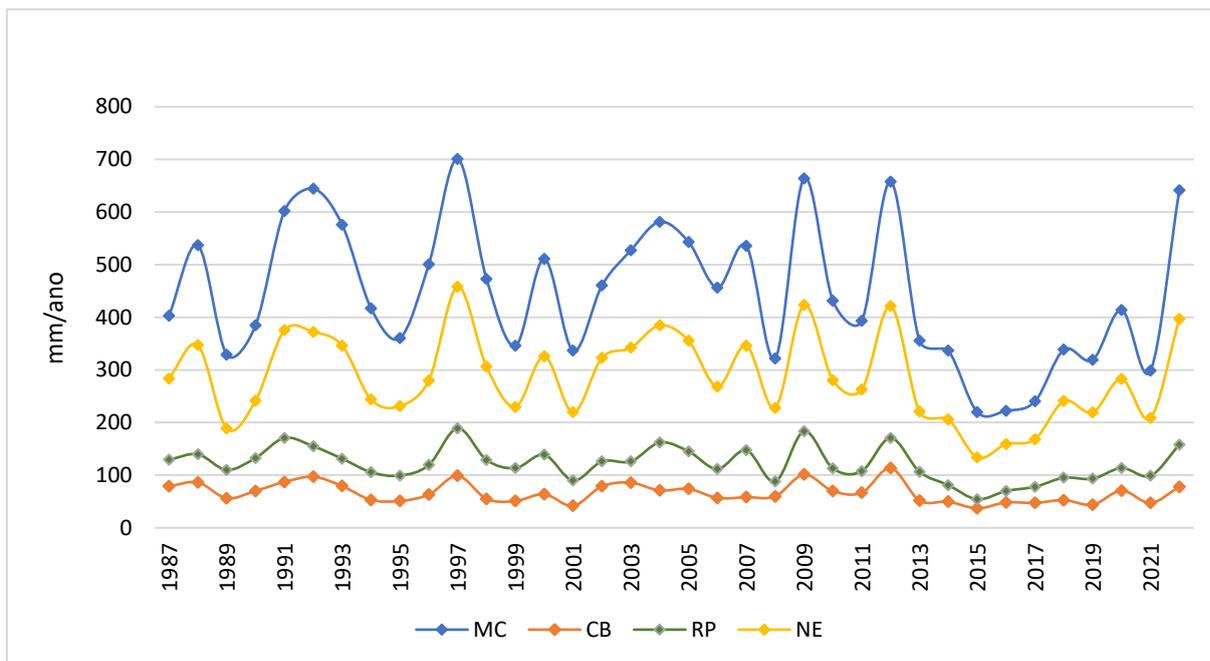
revela-se que a vazão média anual varia significativamente entre as estações fluviométricas, com a estação próxima a nascente CB-Carrapato Brumal apresentando menor vazão, com valores entre 50 a 115 mm/ano e o posto MC próximo a foz, apresentando maior vazão, com valores entre 219 a 700 mm/ano, como esperado. Essas diferenças estão relacionadas à geografia, clima e uso da terra em cada região. A vazão no posto RP variou entre 54 a 188 mm, sendo esse também próximo a nascente, já o posto NE, localizado na porção média da bacia, apresentou variação de vazão de 133 a 458 mm.

A estação MC, localizada próximo à foz da bacia, apresentou picos anuais mais altos. Foi verificado valores maiores de vazões conforme aumenta a distância da nascente da bacia. Há evidências de que o comportamento das bacias hidrográficas segue certos padrões, como o aumento da densidade de drenagem conforme a vazão aumenta (Godsey e Kirchner, 2014). Além disso, na

evidenciam-se flutuações significativas nas taxas de vazão ao longo dos anos para todas as estações, indicando variações na vazão possivelmente devido a fatores como precipitação, uso da terra e gestão da água.

É observado que, o período entre 2014 e 2015, foi marcado por uma redução na vazão próxima de 60% nas quatro estações, sendo que ocorreu um fenômeno de redução também na precipitação da bacia nesse mesmo período, que pode ser visualizado na **Erro! Fonte de referência não encontrada**.<sup>3</sup> Um fenômeno comparável à crise do Cantareira em que a precipitação acumulada foi drasticamente reduzida, o sistema Cantareira recebeu apenas 23% da média histórica das afluições em 2014 (ANA, 2014).

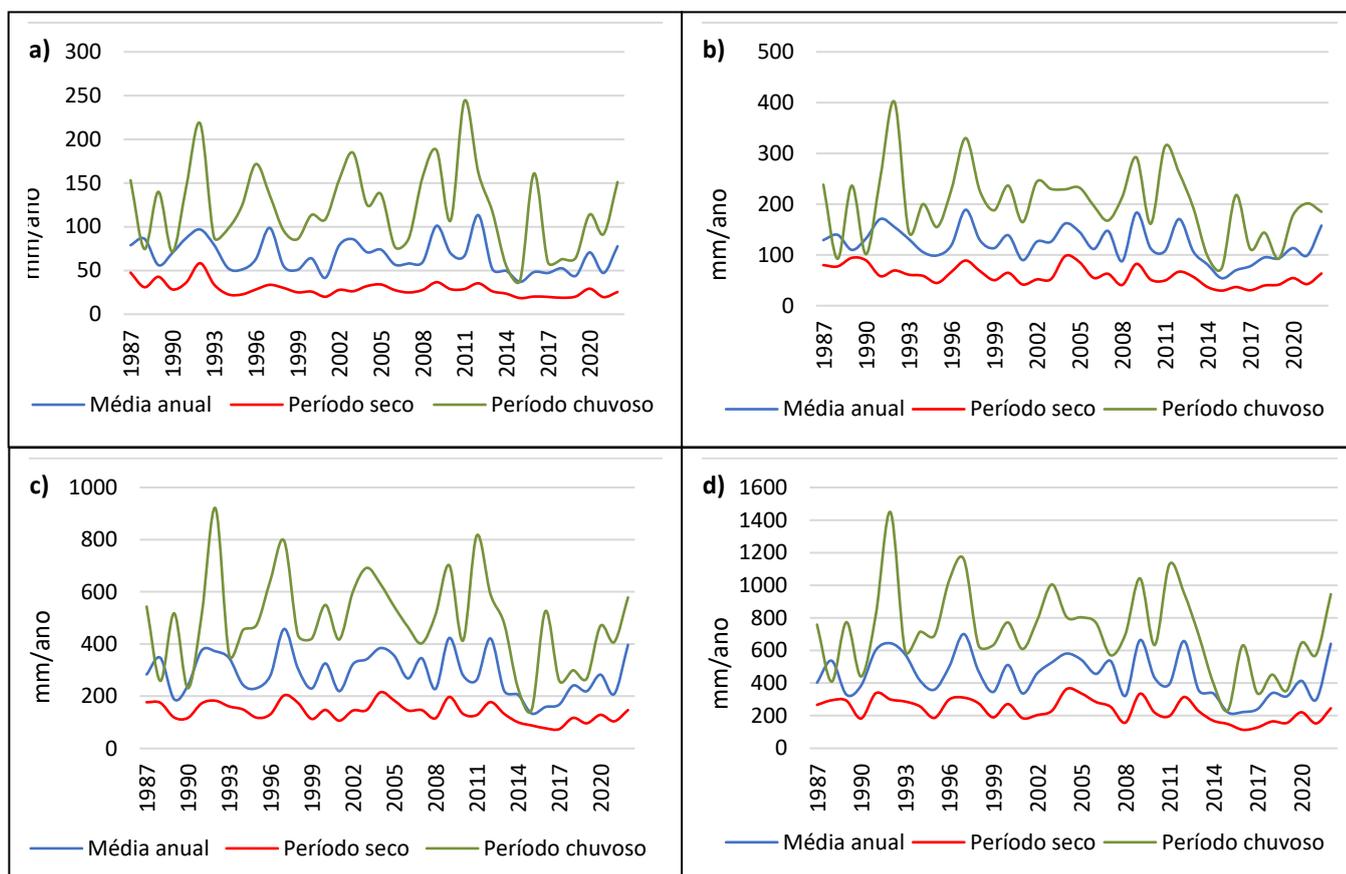
Figura 26 – Série de vazões médias anuais (ano hidrológico) para o período de 1987 a 2022, para as quatro estações fluviométricas encontradas na bacia hidrográfica do rio Piracicaba.



Fonte: Autora (2024).

Na Figura 27, mostra-se as médias de vazões de 1987 a 2022 para as estações CB, RP, NE e MC, respectivamente, e a média de vazões para o período seco, e chuvoso. O período seco (linha laranja) representa a vazão nos três meses mais secos (junho, julho e agosto), mostrando uma tendência constante. O período chuvoso (linha verde) representa a vazão nos meses chuvosos (janeiro, novembro e dezembro), também com um aumento notável recentemente. Nos anos de 1993 e 2015, a proximidade entre a vazão média anual e o período chuvoso sugere uma correlação forte. Isso significa que, nesses anos, a vazão média foi muito próxima à vazão durante o período chuvoso. Para Terada (2022), a pavimentação das cidades impede que a água da chuva penetre no solo, o que reduz a recarga dos aquíferos, o mesmo enfatiza que as fortes chuvas, que seriam naturalmente drenadas para os rios, acabam sobrecarregando as redes de drenagem da cidade, o que pode causar inundações.

Figura 27 – Médias de vazões no período seco e chuvoso para o período de 1987 a 2022 das estações CB(a), RP(b), NE(c), e MC(d). Vazão média anual e vazões mínimas (média do trimestre seco) e máximas (média do trimestre chuvoso) para as estações fluviométricas analisadas nesse estudo.



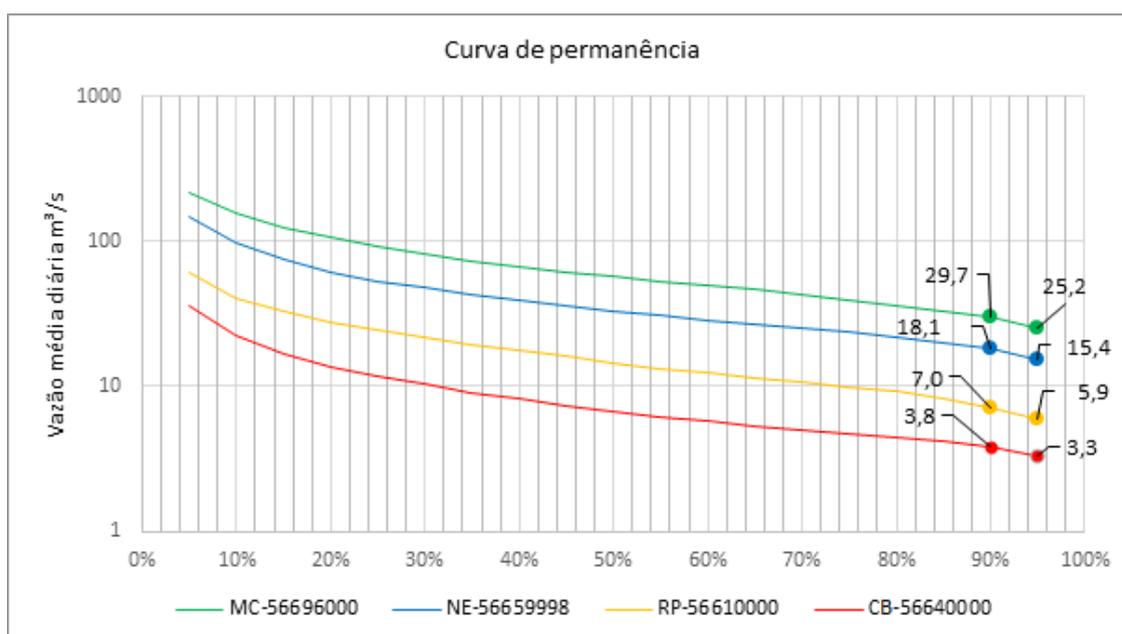
Fonte: Autora (2024).

Diante das mudanças climáticas e dos seus impactos no ciclo hidrológico, discutidos no item 3.3, torna-se fundamental analisar as curvas de permanência de vazão. Essa análise se torna crucial para estabelecer as vazões mínimas de referência em pequenas bacias hidrográficas de Minas Gerais. A compreensão das vazões de referência é essencial para identificar patamares importantes, como os limites máximos de água permitidos para outorga. As mudanças climáticas podem afetar diretamente esses patamares, tornando crucial a análise e adaptação dessas referências às novas condições do ciclo hidrológico. Os resultados das curvas de permanência, utilizando os dados de 1987 a 2022, podem ser observados na Figura 28. Após a sua plotagem, obteve-se os valores das vazões mínimas com 95% e 90% de permanência, das estações em estudo.

Evidencia-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada.7** que na estação C B em 90% do tempo os valores das vazões do curso d'água se igualam ou superam 3,8 m<sup>3</sup>/s e que em 95% do tempo os valores se igualam ou superam a vazão de 3,3 m<sup>3</sup>/s. Já para a estação RP em 90% do tempo os valores das vazões do curso d'água se igualam ou superam 7,03 m<sup>3</sup>/s e que em 95% do tempo os valores se igualam ou superam a vazão de 5,9 m<sup>3</sup>/s. A estação de NE em 90% do tempo os valores das vazões do curso d'água se igualam ou superam 18,1 m<sup>3</sup>/s e que em 95% do tempo os valores se igualam ou superam a vazão de 15,4 m<sup>3</sup>/s. Na estação MC em 90% do tempo os valores das vazões do curso d'água se igualam ou superam 29,7 m<sup>3</sup>/s e que em 95% do tempo os valores se igualam ou superam a vazão de 25,2 m<sup>3</sup>/s.

Bacias com áreas de drenagem maiores tendem a apresentar maiores tempos de concentração. Nas bacias montanhosas, os tempos de concentração são menores em comparação com as bacias planas, devido às características do relevo (Collischon e Dorneles, 2013). Portanto, é possível observar que o aumento nos valores das vazões de referência, reportados aqui nesse estudo, está correlacionado com o aumento da área de drenagem das bacias hidrográficas de contribuição.

Figura 28 – Curva de permanência para as estações Mário de Carvalho, Nova Era IV, Rio Piracicaba e Carrapato.



Fonte: Autora (2024).

Foram analisadas as vazões de referência  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  para as estações em estudo, a fim de se compreender a dinâmica do sistema de vazões. As vazões obtidas são apresentadas na Tabela 8. Normalmente, a vazão  $Q_{7,10}$  é mais restritiva, ou seja, seus valores são menores que os das vazões  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ . No entanto, os valores de vazão de referência dependem do regime hidrológico do curso d'água (Melo e Von Sperling, 2007).

Tabela 8 – Vazões de referência  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  das estações fluviométricas analisadas.

<b>Estação Fluviométrica</b>	<b><math>Q_{7,10}</math> (<math>m^3/s</math>)</b>	<b><math>Q_{90}</math> (<math>m^3/s</math>)</b>	<b><math>Q_{95}</math> (<math>m^3/s</math>)</b>
Mário de Carvalho	17,7	29,7	25,2
Nova Era IV	5,1	18,1	15,4
Rio Piracicaba	3,6	7,0	5,9
Carrapato-Brumal	2,0	3,8	3,3

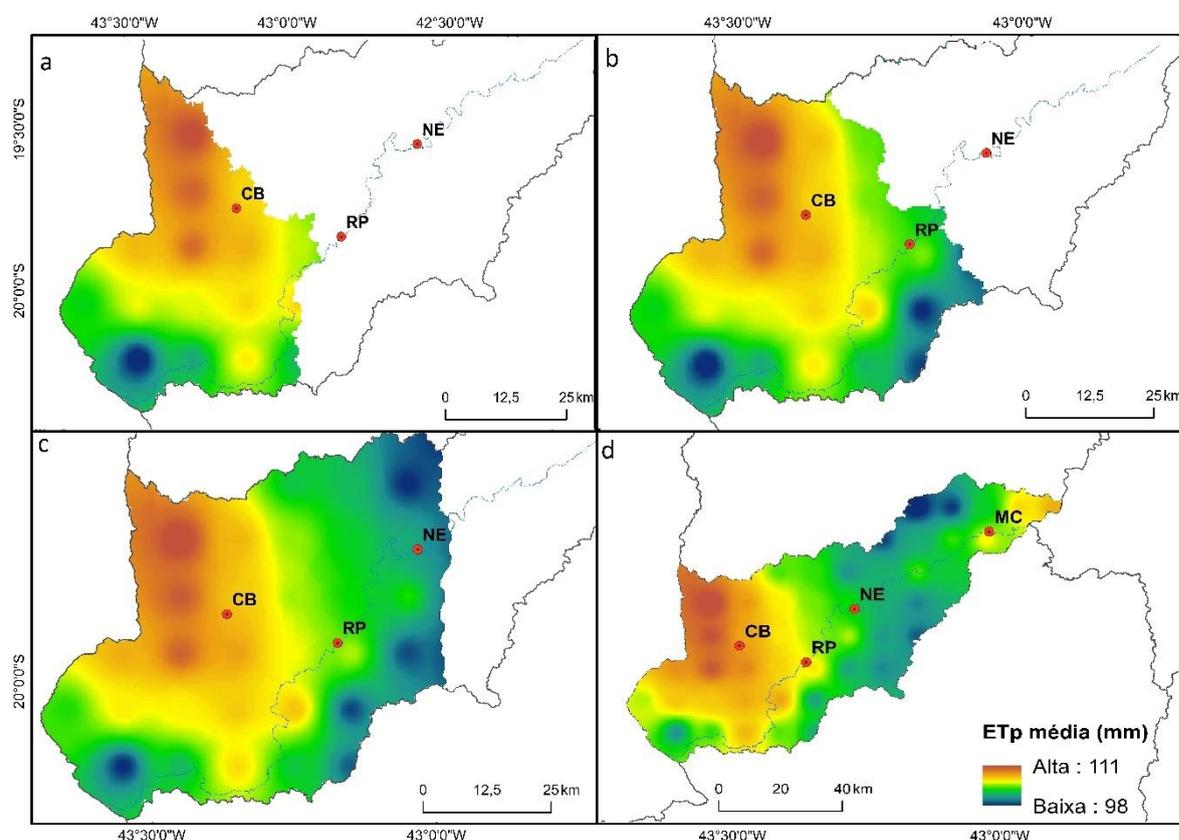
Fonte: Autora (2024).

### 6.3 Evapotranspiração potencial (ETp)

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra-se a média histórica da evapotranspiração potencial na bacia do rio Piracicaba dividida em 4 sub-bacias, considerando cada estação fluviométrica como a foz de uma sub-bacia. A variação espacial da evapotranspiração potencial é influenciada por diversos fatores, tais como temperatura, umidade do ar, cobertura vegetal e disponibilidade de água no solo, conforme indicado por Xavier (2022).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, as áreas em vermelho representam valores mais altos de evapotranspiração, enquanto as áreas em azul indicam valores mais baixos. A análise dos dados revela que a média anual em um período de 33 (trinta e três) anos atingiu um valor mínimo de 98 mm e um máximo de 111 mm, com uma concentração de valores mais altos na região noroeste da bacia, representado pela cor azul.

Figura 29 – Média histórica da evapotranspiração na bacia do rio Piracicaba entre 1987 a 2020 para as estações CB(a), RP(b), NE(c) e MC(d).

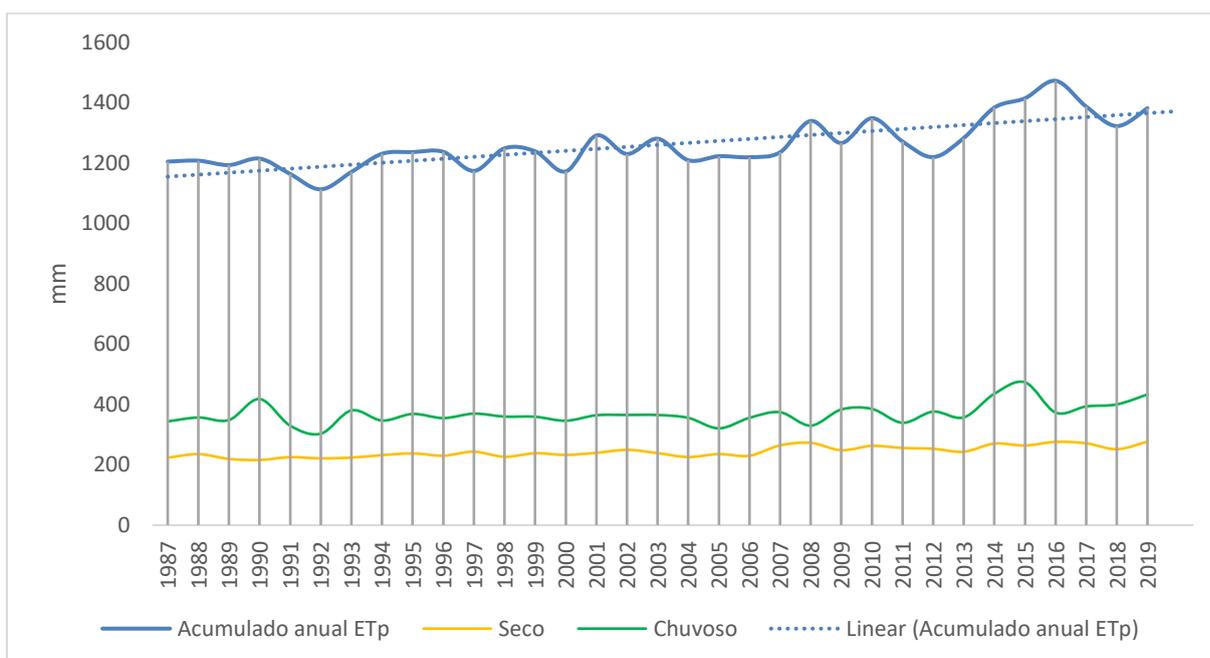


Fonte: Autora (2024).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta-se a média anual de evapotranspiração potencial (ano hidrológico) na bacia do rio Piracicaba de 1987 a 2019. As três linhas distintas representam o acumulado anual total (em azul), o acumulado dos três meses chuvosos em verde, (novembro, dezembro e janeiro) e o acumulado dos três meses mais secos em laranja (junho, julho e agosto).

Lima (2024), observou um aumento gradativo da evapotranspiração média ao longo dos períodos analisados na bacia do rio Doce, tanto na estação seca quanto na estação chuvosa, isso foi atribuído ao aumento da temperatura média na região. Nesse estudo foi observado um padrão semelhante de aumento na evapotranspiração. Esse padrão consistente reforça as conclusões apresentadas por Lima (2023), sugerindo que o aumento da temperatura média está, de fato, influenciando a evapotranspiração na bacia do rio Doce.

Figura 30 – Acumulado anual de Evapotranspiração potencial na bacia do rio Piracicaba (linha azul claro). Linhas azul escuro e laranja denotam os acumulados durante os três meses mais chuvosos e os três meses mais secos, respectivamente.



Fonte: Autora (2024).

Durante os meses chuvosos, a evapotranspiração potencial aumenta, pois coincide com os meses mais quentes e é fortemente influenciada pela temperatura. Isso destaca a importância da gestão hídrica durante esses períodos para evitar a escassez de água nas bacias hidrográficas. Nos meses secos, a evapotranspiração potencial é mais baixa devido às temperaturas mais baixas do inverno, resultando em menor disponibilidade de água, o que pode ser atribuído à menor precipitação e evaporação.

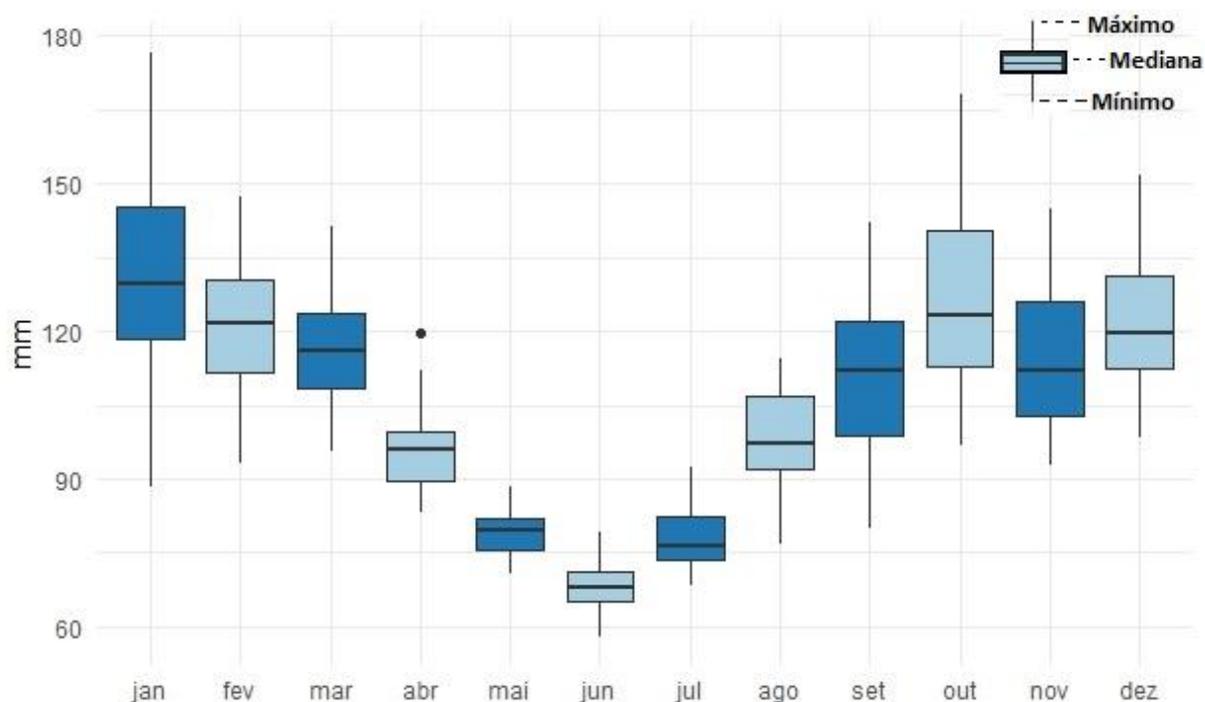
A linha do acumulado anual de evapotranspiração potencial (ETp) na bacia do rio Piracicaba (Figura 30) mostra que, ao longo dos anos, a evapotranspiração potencial tem aumentado. Esse aumento pode ser associado a vários fatores, como o aumento da temperatura e alterações no uso da terra. Assim como observado na bacia do rio Doce, o incremento da temperatura média na bacia do rio Piracicaba contribui para maiores taxas de evapotranspiração, o que pode impactar a disponibilidade hídrica na região. Essas observações reforçam a necessidade de estratégias de

gestão hídrica que considerem as mudanças climáticas e suas implicações para a evapotranspiração e a disponibilidade de água. No estudo de Lima (2024), foi observado um aumento gradativo da evapotranspiração média ao longo dos períodos analisados na bacia do rio Doce, tanto na estação seca quanto na estação chuvosa. Esse aumento foi atribuído ao incremento da temperatura média na região, que tem influenciado diretamente os processos de evaporação e transpiração das plantas. A pesquisa destaca que, com o aumento das temperaturas, a demanda atmosférica por água também cresce, resultando em maiores taxas de evapotranspiração. Esse fenômeno é particularmente preocupante para a gestão dos recursos hídricos, pois pode levar a uma redução na disponibilidade de água para usos agrícolas e urbanos

Ao comparar essas informações com a média mensal de evapotranspiração na Figura 31, podemos observar que os valores mais altos de evapotranspiração ocorrem nos meses de janeiro, fevereiro e outubro, de acordo com a média mensal fornecida. Esses meses correspondem a períodos em que a evapotranspiração tende a ser mais elevada devido às condições climáticas.

Portanto, a relação entre os dados de evapotranspiração reportados por Lima (2023) e a média mensal de evapotranspiração da Figura 31 mostra uma consistência geral, onde os meses com maiores valores de evapotranspiração na média mensal também refletem o aumento gradativo observado no estudo. Isso ressalta a importância de considerar a sazonalidade climática ao analisar a evapotranspiração e seu impacto na gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Doce. Notou-se que o mês de abril ocorre uma anormalidade de mudança nos dados indicado pelo outlier.

Figura 31 – Ciclo anual de evapotranspiração potencial (acumulado mensal) considerando o período de 1987 a 2020.

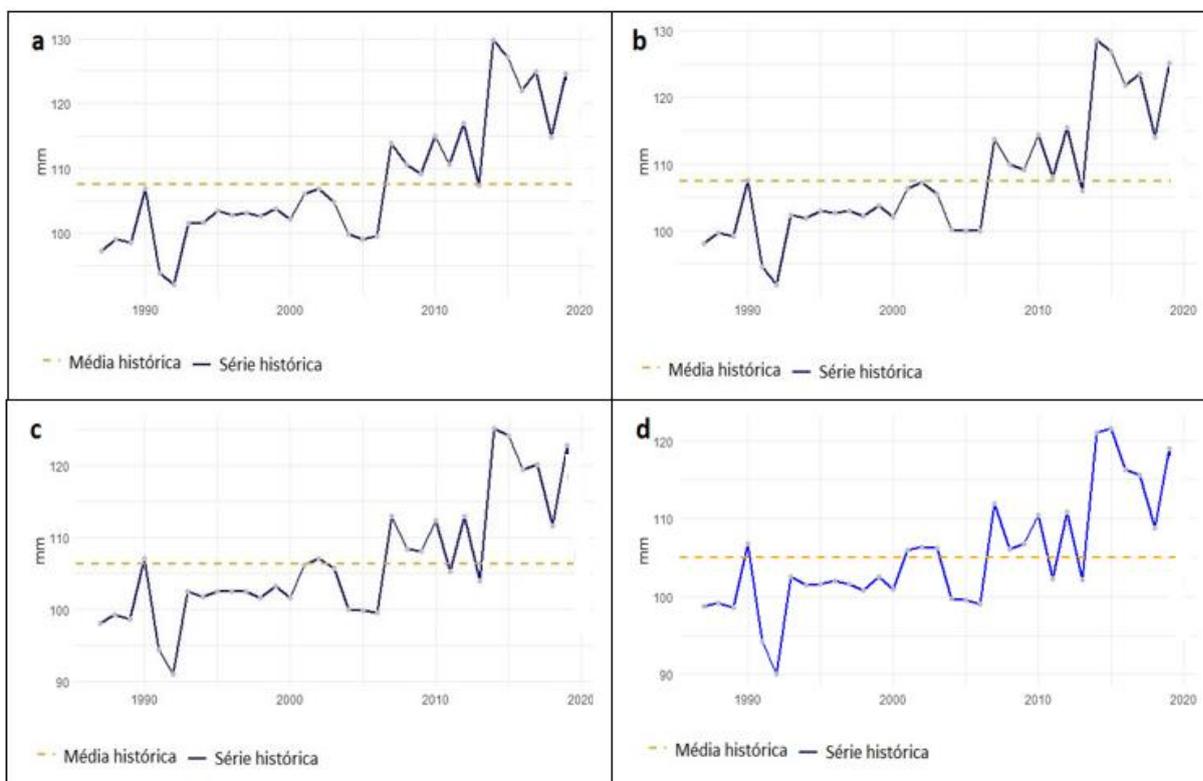


Fonte: Autora (2024).

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam-se as médias históricas espaciais de evapotranspiração potencial, produzidas com base nas informações da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, cada um associado a uma estação fluviométrica, na ordem a,b,c,d sendo relacionado as estações CB, RP, NE e MC, respectivamente. Nota-se que a ETp começou a elevar-se a partir de 2007, partindo de valores de 110 mm e chegando a atingir valores máximos próximo de 130 mm em 2014.

Durante os meses chuvosos, a evapotranspiração potencial aumenta, pois coincide com os meses mais quentes e é fortemente influenciada pela temperatura. Esse padrão diferente foi causado pelo déficit de precipitação da Figura 24. Nas Figuras 32a e 32b, quando a ETp começa a sair do padrão, isso pode indicar alterações no uso da terra ou outros fatores como o aumento de temperatura devido ao aquecimento global.

Figura 32 – Série histórica de evapotranspiração potencial no período de 1987 a 2020 para as estações CB (a), RP (b), NE (c) e MC (d).



Fonte: Autora (2024).

## 6.4 Uso e ocupação da terra

A **Erro! Fonte de referência não encontrada**.3 ilustra a distribuição do uso da terra na bacia do rio Piracicaba, destacando áreas urbanizadas, agrícolas e florestais. A região vermelha representa a zona urbana, indicando que a bacia possui áreas urbanizadas com atividades residenciais, comerciais e industriais. Essa urbanização pode impactar significativamente os processos hidrológicos, aumentando o escoamento superficial e a poluição hídrica.

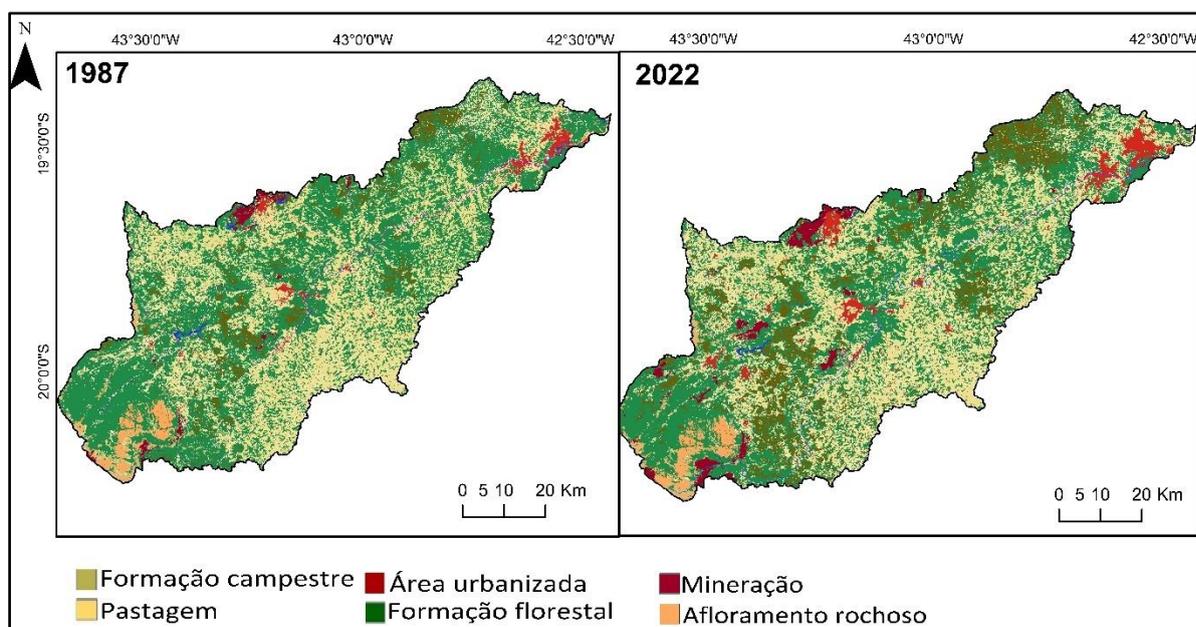
A área amarela indica zonas agrícolas, utilizada para o cultivo de alimentos, incluindo plantações e pastagens. A agricultura é uma atividade econômica importante, mas pode levar à degradação do solo e à alteração dos regimes de escoamento, dependendo das práticas de manejo adotadas.

A região verde representa áreas florestais, que são essenciais para a conservação ambiental. As florestas abrigam biodiversidade, protegem o solo contra

a erosão e contribuem para a manutenção da qualidade da água. A preservação dessas áreas florestais é vital para a sustentabilidade ecológica da bacia e manutenção do ciclo hidrológico.

Villa Nova *et al.* (1976) defendem que o balanço de energia é responsável por aproximadamente 90% da evapotranspiração potencial. Alterações nas características da cobertura do solo não apenas afetam os parâmetros do balanço de energia, mas também influenciam diretamente o processo evaporativo. Por exemplo, uma diminuição na umidade relativa pode resultar em maiores variações de temperatura, semelhantes aos climas desérticos, e alterações significativas no equilíbrio dos sistemas convectivos na região.

Figura 33 – Mapa de uso e ocupação da terra na bacia do rio Piracicaba em 1987 e 2022.

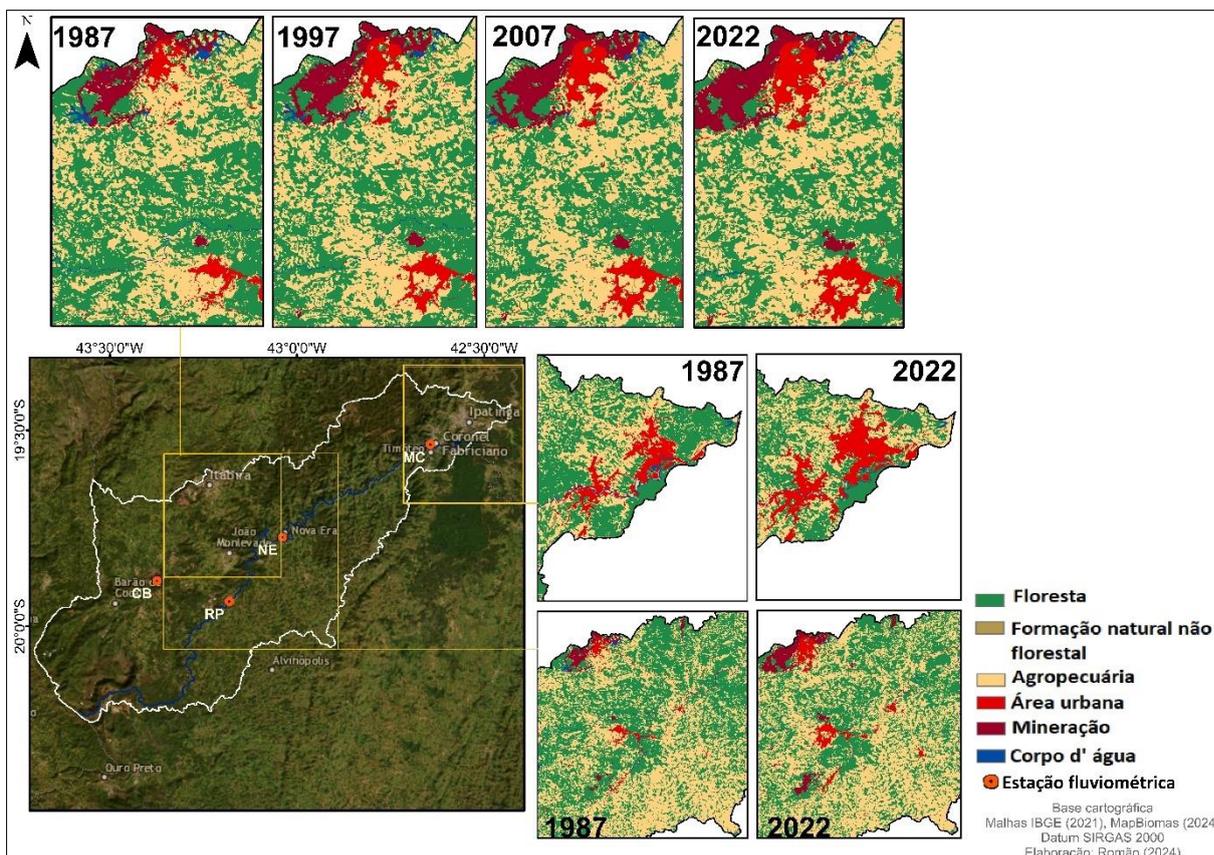


Fonte: Autora (2024).

A análise das mudanças no uso e ocupação da terra na bacia do rio Piracicaba entre 1987 e 2022 revela transformações significativas no ambiente local (Figura 34). Ao longo desses 35 anos, observa-se uma redução das áreas de floresta e um aumento das áreas urbanas e agrícolas. Essas mudanças são evidentes na Figura 34, que apresenta mapas comparativos de diferentes anos, destacando a expansão urbana e a conversão de terras para uso agrícola. Além

disso, a figura inclui um zoom em duas áreas específicas, identificadas como 'CB' e 'MC', permitindo uma comparação detalhada entre a situação atual e a de 1987.

Figura 34 – Áreas afetadas no uso e ocupação da terra na bacia do rio Piracicaba em 1987 e 2022.



Fonte: Autora (2024) a partir dos dados do Mapbiomas.

A Não floresta refere-se a áreas que não são cobertas por florestas, incluindo formações naturais não florestais, como campos, pastagens e outras vegetações naturais que não se enquadram na categoria de floresta. Essas áreas podem ser utilizadas para diferentes fins, como agricultura, pastagem ou mesmo permanecer como vegetação natural não florestal.

Tabela 9 mostra a variação percentual no uso da terra em diferentes categorias, como floresta, agricultura, área urbanizada, mineração, não floresta e corpo d'água. (manter no mesmo parágrafo a frase abaixo). Em 1985, a maior parte da terra na bacia do rio Piracicaba, cerca de 3091 km<sup>2</sup>, estava dedicada à floresta. Em 2022, essa área aumentou ligeiramente para 3136 km<sup>2</sup>, representando uma variação de

aproximadamente 1,46%. Esse aumento evidencia que as áreas florestais foram preservadas ao longo dos anos.

Por outro lado, as terras agrícolas experimentaram uma redução considerável. Em 1985, havia 2270 km<sup>2</sup> dedicados à agricultura, mas até 2022 essa área diminuiu para 2120 km<sup>2</sup>, representando uma queda de aproximadamente 6,61%. Essa diminuição pode estar associada a diversos fatores, incluindo a urbanização e a conversão de terras agrícolas para outros usos.

A área urbanizada apresentou um aumento significativo no mesmo período. Em 1985, a área urbanizada era de 135 km<sup>2</sup>, mas em 2022 cresceu para 179 km<sup>2</sup>, o que representa um aumento de aproximadamente 32,59%. Esse crescimento substancial indica um desenvolvimento urbano considerável, refletindo o aumento da população.

Não floresta refere-se a áreas que não são cobertas por florestas, incluindo formações naturais não florestais, como campos, pastagens e outras vegetações naturais que não se enquadram na categoria de floresta. Essas áreas podem ser utilizadas para diferentes fins, como agricultura, pastagem ou mesmo permanecer como vegetação natural não florestal.

Tabela 9 – Variações no Uso da Terra na Bacia do rio Piracicaba, comparando a situação em 1987-2022.

Uso da terra	Variação (%)	Observações
Floresta	+1.46%	A área florestal aumentou ligeiramente, indicando preservação ao longo dos anos.
Agricultura	-6.61%	Houve uma redução significativa, possivelmente devido à urbanização e conversão de terras.
Área Urbanizada	+32.59%	Aumento substancial, refletindo o desenvolvimento urbano e o crescimento populacional.
Mineração	+130%	A área dedicada à mineração dobrou, evidenciando um crescimento notável na atividade.
Não Floresta	+17.76%	Aumento na área classificada como não floresta.
Corpo d' Água	-35.90%	Redução na área dedicada a corpos d' água.

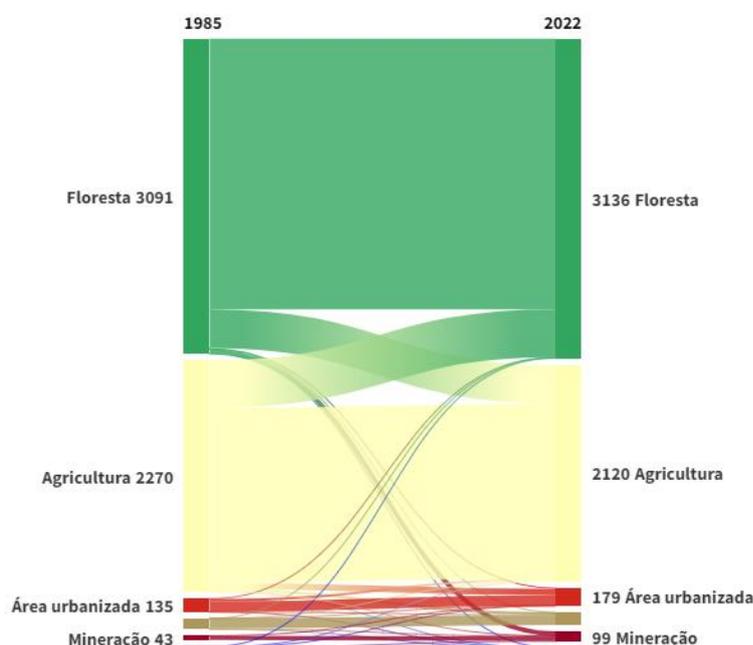
Fonte: Autora (2024).

Além disso, a área dedicada à mineração dobrou ao longo dos anos. Em 1985, havia 43 km<sup>2</sup> utilizados para atividades de mineração, e em 2022 essa área aumentou para 99 km<sup>2</sup>, representando um crescimento de aproximadamente 130%. Esse aumento acentuado pode estar relacionado à intensificação das atividades de exploração de recursos naturais na bacia do rio Piracicaba.

A

apresenta um diagrama de Sankey que ilustra alterações no uso da terra na bacia do rio Piracicaba entre os anos de 1985 e 2022. Ao longo desse período, diferentes tipos de uso da terra apresentaram variações significativas.

Figura 35 – Diagrama de Sankey evidenciando mudanças no uso da terra ocorridas na bacia do rio Piracicaba.



Fonte: Autora (2024).

A intensificação das atividades de mineração, em particular, pode ter contribuído para a queda da vazão da bacia do rio Piracicaba a partir de 2010. A mineração pode impactar significativamente os recursos hídricos através da alteração

do curso natural das águas, contaminação dos aquíferos, e aumento da demanda por água para os processos de extração e processamento dos minerais.

### 6.5 Análise de tendências

Uma tendência é considerada significativa quando os valores absolutos de  $U(t)$  ultrapassam os intervalos de confiança. O início dessa tendência pode ser identificado no ponto de interseção entre as curvas  $U(t)$  (representadas por linhas contínuas) e  $U(t')$  (representadas por linhas pontilhadas). O teste de Mann-Kendall ajudou a detectar tendências estatisticamente relevantes nas séries temporais. Se os valores de  $U(t)$  estiverem fora dos intervalos de confiança, isso indica uma tendência significativa.

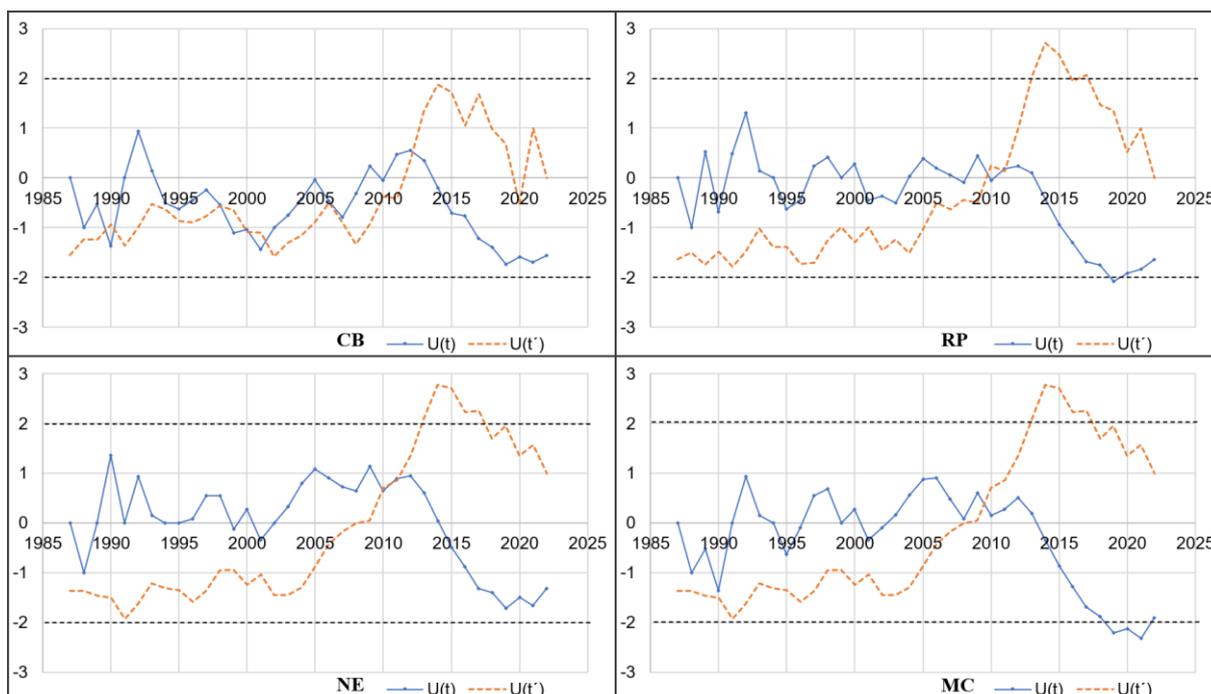
Com relação aos dados de vazão na Figura 36 lustra-se o resultado das curvas  $U(t)$  (linha contínua) e  $U(t')$  (linha tracejada). No contexto das estações hidrológicas analisadas, a série de vazão mostrou uma tendência decrescente a partir de 2010. Isso significa que a quantidade de água que flui através dessas estações está diminuindo com o tempo. No caso da estação RP e MC,  $U(t)$  ultrapassou a linha de confiança para baixo, indicando uma tendência decrescente significativa. Os resultados da pesquisa indicam uma tendência significativa nas estações do RP, NE e MC. A estatística  $U(t')$  dessas estações ultrapassou o nível superior de confiança de 95%, sugerindo uma tendência decrescente. Isso implica que a redução observada na vazão nessas estações é consistente.

Para as análises de tendências dos dados hidroclimáticos históricos da bacia do rio Piracicaba, foi adotado o mesmo estilo de gráfico utilizado por Penereiro *et al.* (2016). Este estilo de gráfico, conforme descrito no estudo do autor, é eficaz para visualizar e interpretar os resultados das análises de Mann-Kendall, permitindo uma representação clara das tendências identificadas ao longo do tempo. A escolha desse estilo de gráfico baseia-se na sua capacidade de comunicar de forma concisa e informativa as mudanças nas variáveis hidroclimáticas ao longo dos anos, facilitando a compreensão e a interpretação dos padrões observados na bacia em estudo.

Pesquisas como a de Guedes *et al.* (2019), Siqueira e Nery (2021) e Rodrigues *et al.* (2020) analisaram séries temporais de precipitação com métodos estatísticos, sendo o Mann Kendall aplicado em ambas pesquisas. Os autores analisaram de 1975

a 2016 e não encontraram tendências significativas na bacia do Atlântico Sudeste, na qual está a bacia do Doce.

Figura 36 – Análise de tendência utilizando o Teste estatístico de Mann Kendall para as quatro estações de vazão.

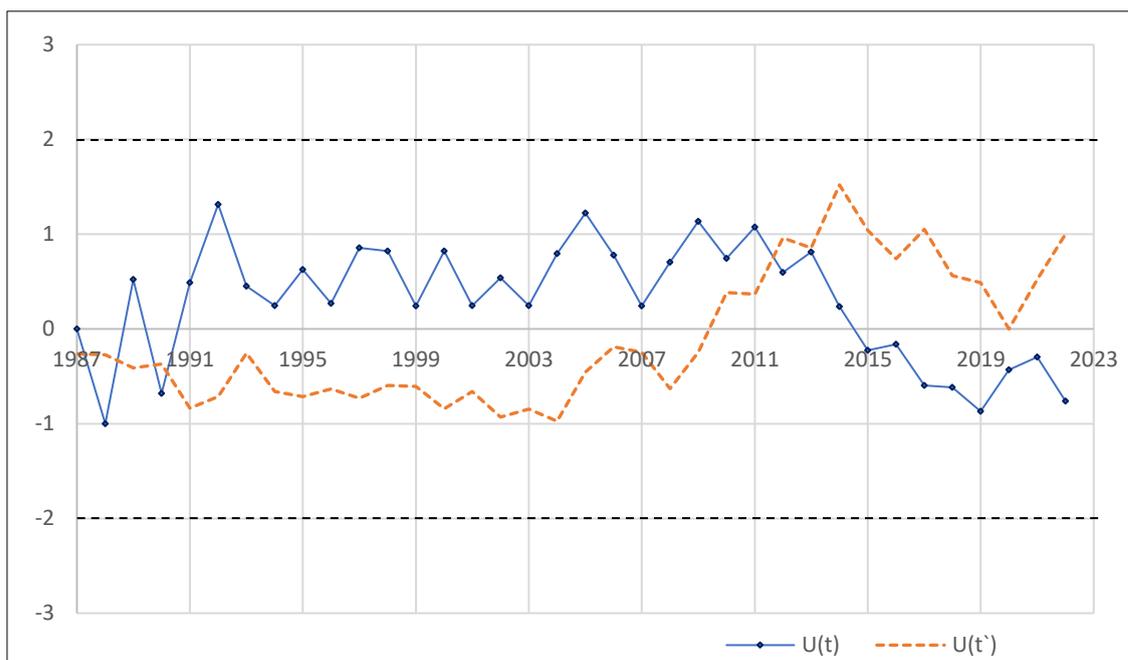


Fonte: Autora (2024).

Com relação à análise de tendência para a precipitação, conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** percebe-se uma mudança significativa na tendência de precipitação em 2012, onde ocorre uma mudança na inclinação da linha de tendência. Sendo a tendência decrescente, indicando um valor negativo de  $U(t)$ .

De acordo com Penereiro *et al.* (2016), foram observadas tendências negativas na precipitação na estação de Morada Nova, no bioma Cerrado a partir de 1989, o mesmo foi observado por Rao *et al.* (2016), no período de 1979 a 2011, uma tendência de redução na precipitação durante a estação chuvosa na região sudeste do Brasil, que engloba o bioma da Mata Atlântica.

Figura 37 – Resultado do teste estatístico Mann Kendall para a série histórica de média anual de precipitação.

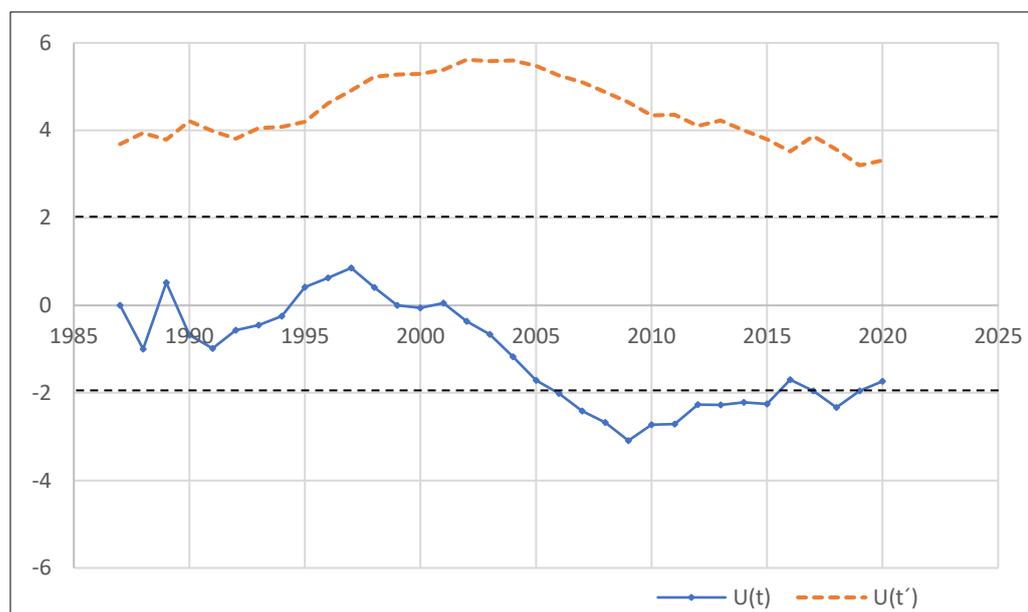


Fonte: Autora (2024).

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta duas linhas: a linha azul representa a tendência de  $U(t)$ , que é a soma dos valores de classificação de tendência para os anos anteriores a 2020 ( $t$ ), enquanto a linha laranja representa a tendência de  $U(t')$ , que é a soma dos valores de classificação de tendência para os anos posteriores a 2020 ( $t'$ ). A tendência de  $U(t)$  é negativa, o que indica que houve uma diminuição na evapotranspiração potencial nos anos anteriores a 2020. Por outro lado, a tendência de  $U(t')$  é positiva, o que indica um aumento na evapotranspiração potencial nos anos posteriores a 2020.

Essas tendências são estatisticamente significativas apresentando p-valor igual a 0,0002 (Tabela 9), o que significa que a mudança na evapotranspiração potencial ao longo do tempo não pode ser explicada apenas por flutuações aleatórias. O p-valor é um indicador da relevância da sensibilidade, e quando se aproxima de zero, sugere que os parâmetros são altamente significativos (Abbaspour, 2015).

Figura 38 – Teste Mann Kendall para a média dos pontos de evapotranspiração potencial.



Fonte: Autora (2024).

As análises realizadas indicam tendências preocupantes (Tabela 10) nas séries temporais de vazão e evapotranspiração potencial (ETp) em diversas estações. As magnitudes negativas observadas nas estações CB, RP, NE e MC sugerem uma redução significativa na vazão, com a estação MC destacando-se pela maior diminuição, com uma magnitude de -4,51. Esse declínio é estatisticamente significativo nas estações CB e RP, conforme indicado pelos p-valores ( $p < 0,05$ ), ao passo que, apesar das reduções nas estações NE e MC, elas não atingem o mesmo nível de significância estatística, apontando para a necessidade de mais estudos para confirmar essas tendências.

O teste Theil-Sen, uma técnica robusta para estimar a tendência em séries temporais, foi aplicado para analisar as mudanças na vazão dos rios na bacia do rio Piracicaba. Os resultados indicam uma tendência negativa nas estações CB, RP, NE e MC (Figuras 39, 40, 41 e 42), sugerindo uma redução significativa na vazão ao longo do tempo. Em particular, a estação MC apresentou a maior diminuição, com uma magnitude de -4,51, destacando-se como a área mais afetada.

Figura 39 – Teste Theil-Sen estação Rio Piracicaba

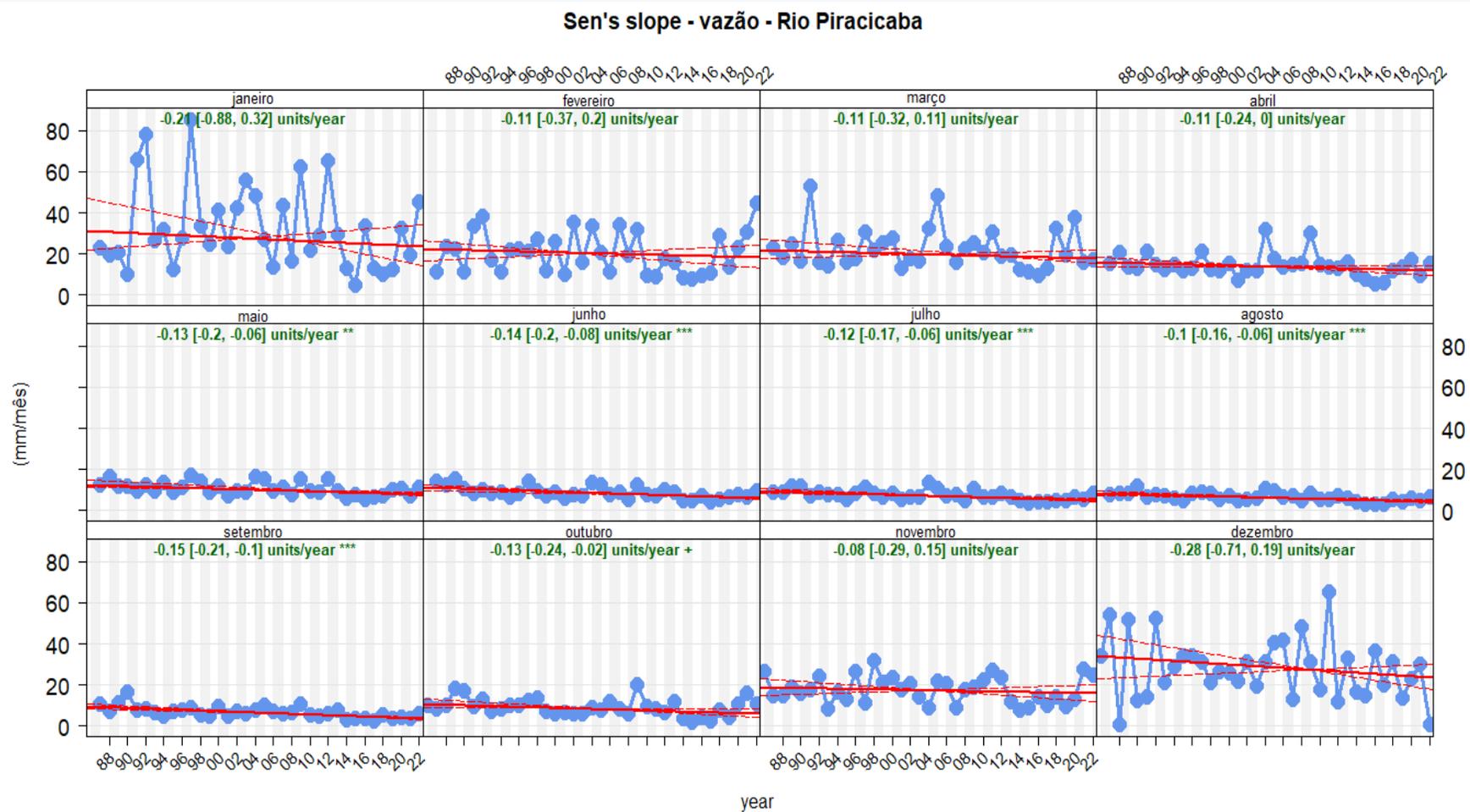


Figura 40 – Teste Theil-Sen estação Carrapato Brumal

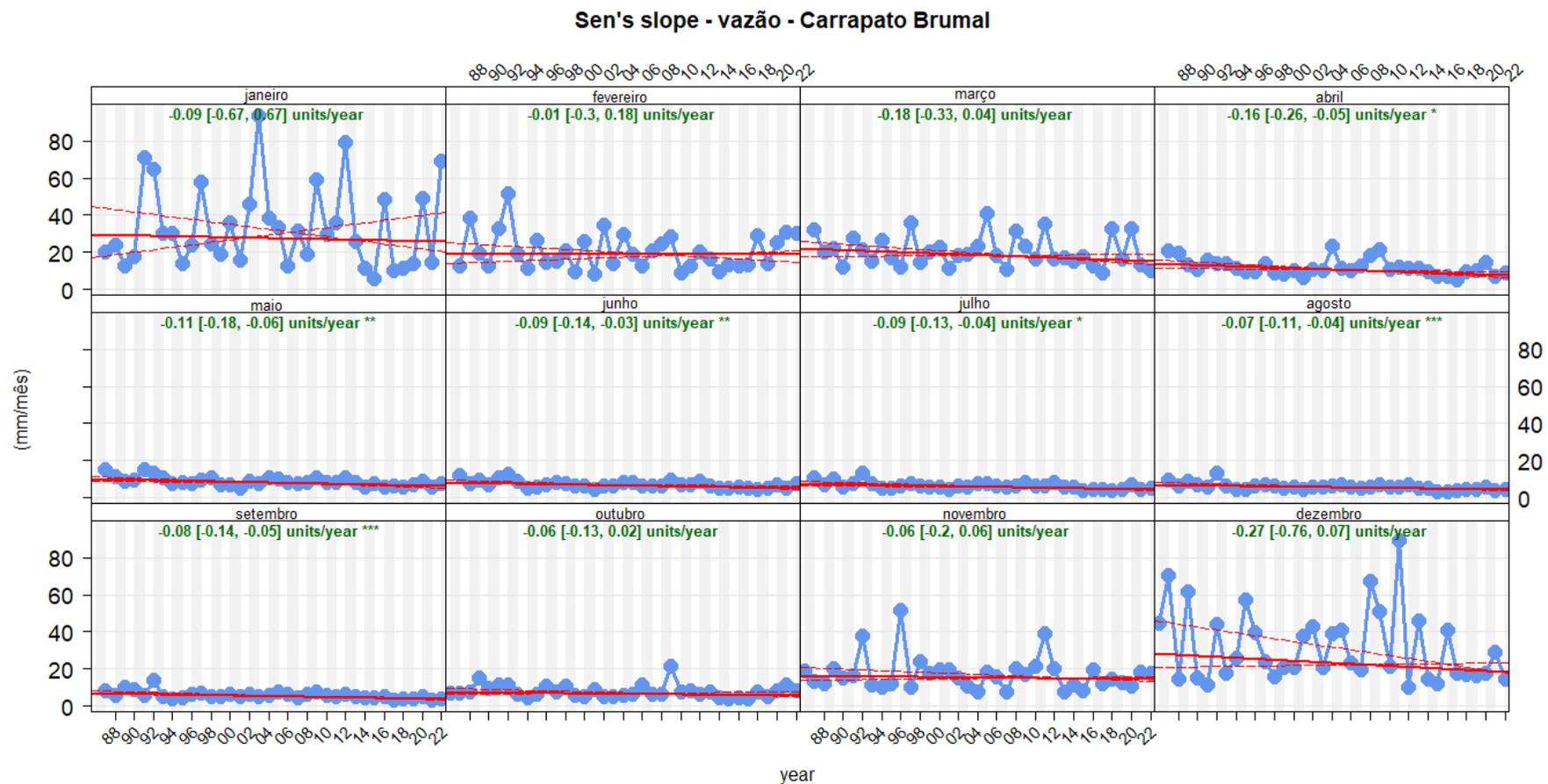


Figura 41 – Teste Theil-Sen estação Nova Era

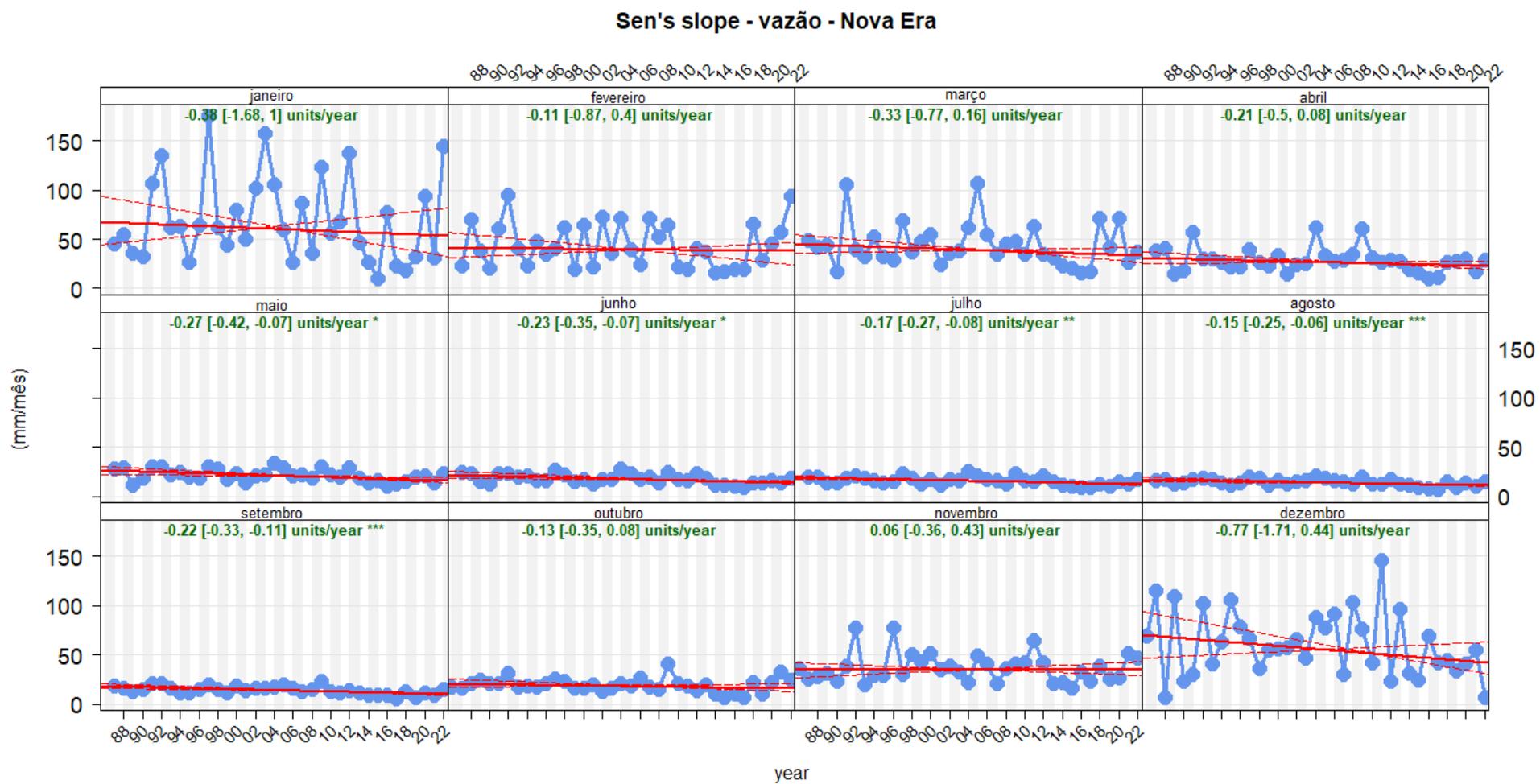
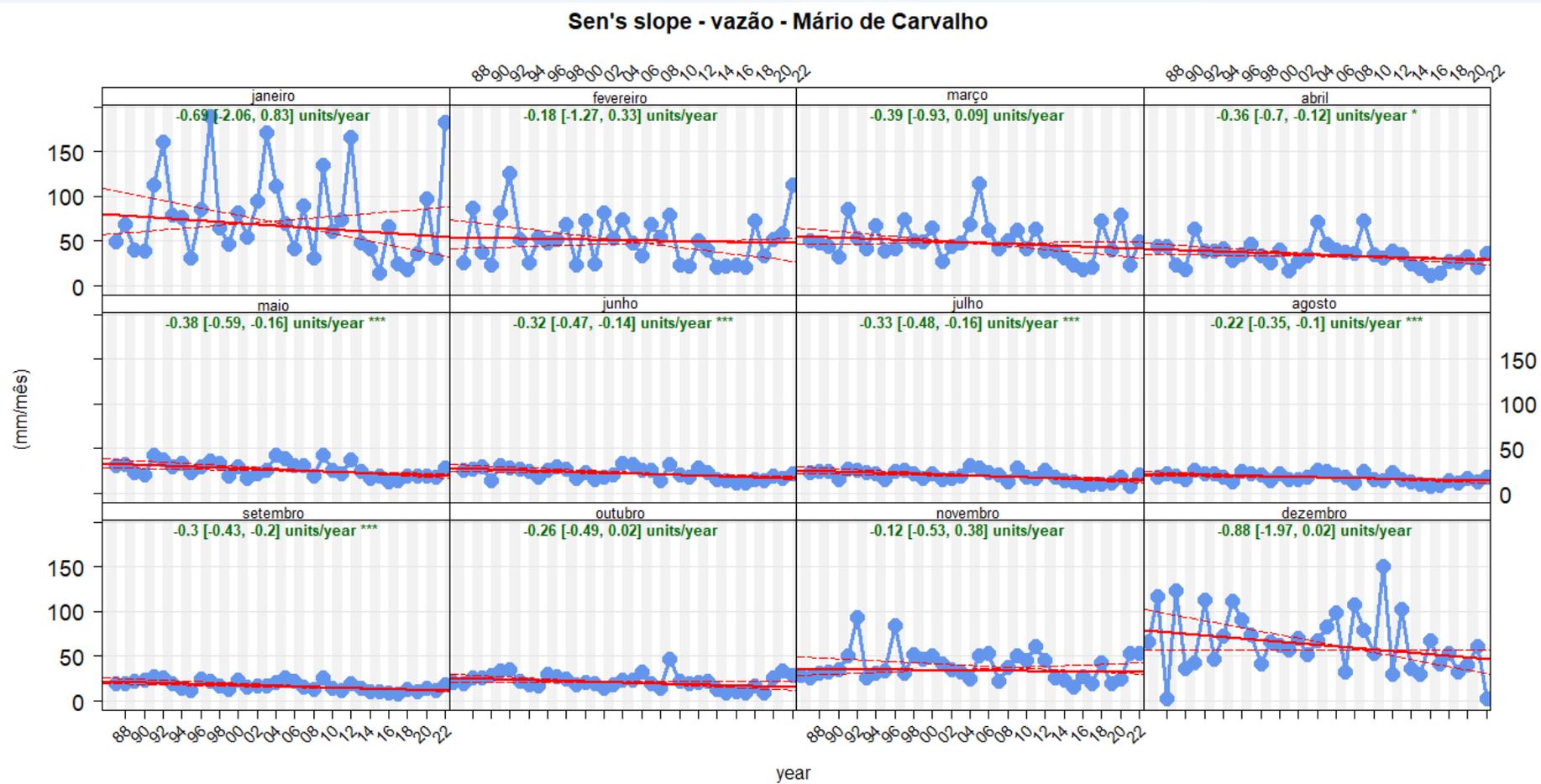


Figura 42 – Teste Theil-Sen estação Mário de Carvalho



Por outro lado, a análise da evapotranspiração potencial (ETp) mostra uma ligeira tendência de aumento, com uma magnitude positiva de 0,0397 nos 47 pontos analisados. No entanto, o p-valor elevado (0,6072) sugere que essa mudança pode não ser estatisticamente significativa, indicando que, ao contrário da vazão, as ETp não apresentou tendência significativa.

Esses resultados corroboram outros estudos recentes que também identificaram tendências de redução de vazão e precipitação em bacias hidrográficas brasileiras. Marengo *et al.* (2021) analisaram a bacia do Rio Amazonas e identificaram mudanças na vazão devido às alterações climáticas, com impactos significativos em várias áreas da bacia. De forma semelhante, Borma *et al.* (2013) investigaram a bacia do Rio Xingu e encontraram uma redução de precipitação, o que impactou significativamente a disponibilidade hídrica na região.

Tabela 10 – Dados Anuais de Vazão, precipitação e evapotranspiração pelo método TheilSen

Dados anuais TheilSen						
	Vazão				Precipitação	ETp potencial
<b>Estação</b>	CB	RP	NE	MC	14 estações	47 pontos
<b>Magnitude</b>	-1,8	-1,75	-2,78	-4,51	-3,02	0,0397
<b>p</b>	0,0301*	0,0234*	0,177	0,0835*	0,6677	0,6072

Fonte: Autora (2024).

## 6.6 Coeficiente de Runoff e Elasticidade

Na Tabela 11, a análise dos dados revela que as estações fluviométricas exibem diferentes níveis de elasticidade e coeficiente de runoff. Para Corrêa (2023), a elasticidade da vazão com relação a variações na evapotranspiração potencial na região sudeste do país é o parâmetro marcado pela maior sensibilidade quando comparado às variações na precipitação.

Logo, os resultados obtidos revelam que se a precipitação diminuir 10%, a vazão diminuirá 16,5%. Da mesma forma, se a evapotranspiração aumentar 10%, a vazão diminuirá 39,5% (3,95 x 10%). Isso demonstra que a elasticidade da vazão em relação à evapotranspiração é bastante sensível. Além disso, a estação Mário de Carvalho (MC) teve um impacto mais significativo em relação à urbanização. O abastecimento urbano, sendo o segundo maior uso em termos de

retirada de água, pode ser comprometido com o aumento da evaporação, destacando a importância de monitorar e gerenciar esses fatores para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos.

Tabela 11 – Caracterização dos postos pluviométricos pertencentes a cada região delimitada.

Estação fluviométrica	Estações pluviométricas em cada uma das áreas delimitadas	$\Sigma$ área (km <sup>2</sup> )	EQ/P	Cr	EQ/ETp
<b>CB</b>	FAL,UP,CC,C,JM,SB	2132	1,49	0,12	-1,46
<b>RP</b>	FAL,UP,CC,C,JM,SB,RP,FP	3731	1,28	0,13	-2,32
<b>NE</b>	FAL,UP,CC,C,JM,SB,RP,FP,SMI,FO	4221	1,28	0,27	-2,49
<b>MC</b>	FAL,UP,CC,C,JM,SB,RP,FP,SMI,FO,F,FCD,MC,BO	5686	1,65	0,33	-3,95

Fonte: Autora (2024).

A Figura 43 apresenta os valores de EQ/P (Elasticidade da vazão/precipitação), EQ/ETp (Elasticidade da vazão/evapotranspiração) e Cr (Coeficiente de vazão) para as regiões com as estações fluviométricas Carrapato Brumal (CB), Rio Piracicaba (RP), Nova Era (NE) e Mário de Carvalho (MC). A EQ/P é uma medida da sensibilidade da vazão às variações na precipitação, enquanto o coeficiente de vazão (Cr) é uma medida da eficiência com que a água escoia superficialmente em relação à precipitação total.

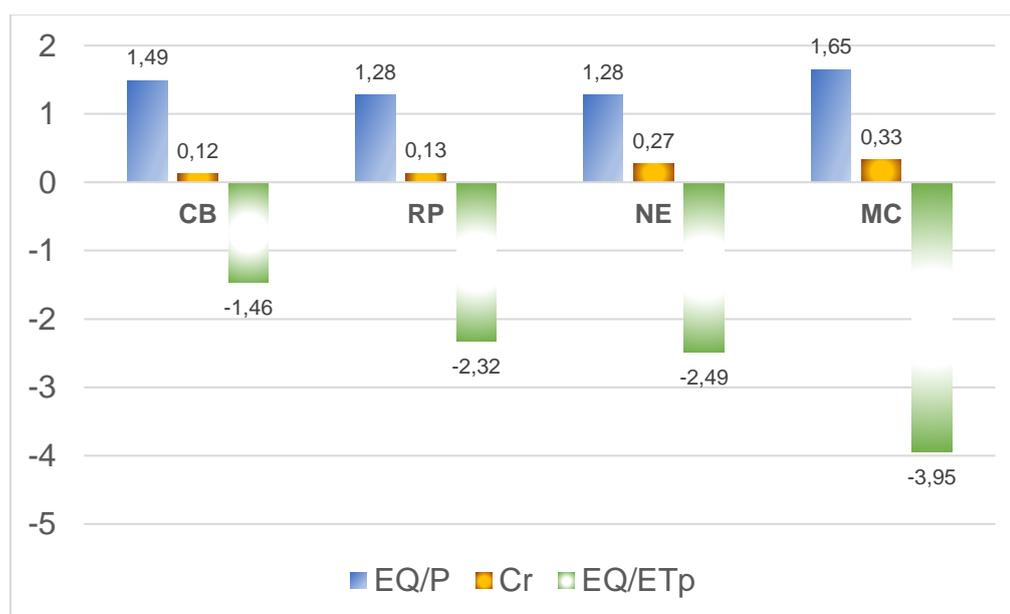
A estação fluviométrica Mário de Carvalho (MC) apresentou o maior valor de EQ/P (1,65), indicando que a vazão nessa estação é mais sensível às variações na precipitação do que nas outras estações a montante. Além disso, a mesma estação apresentou o maior valor de Cr (0,33), indicando que uma proporção maior da precipitação total escoia superficialmente em relação às outras estações. Esse aumento no valor de Cr pode ser atribuído ao aumento da urbanização na área, resultando em alta impermeabilização do solo. No caso da estação CB, o aumento foi devido à mineração, que também impacta o escoamento superficial e a vazão. Logo, o coeficiente de runoff em MC é relativamente alto, o que sugere que a área tem uma capacidade de retenção de água relativamente baixa, possivelmente devido à maior área de contribuição para drenagem e o aumento da urbanização nessa região.

Os valores da bacia de cabeceira e da bacia completa foram bem semelhantes. As bacias intermediárias também tiveram valores semelhantes, embora mais baixos que o restante. Já para a EQ/ETp, existe uma tendência de aumento quando se avança no sentido montante-jusante, pois a evapotranspiração diminui também nesse sentido. Percebe-se que a elasticidade se torna mais negativa, ou seja, a elasticidade se torna maior.

Simões (2021) constatou que a sensibilidade da vazão varia com a disponibilidade hídrica da região, sendo que em áreas mais áridas os valores de EQ/P aumentam, aumentando a variação do fluxo, enquanto os valores de EQ/ETp diminuem, reduzindo a variação do fluxo. Essa tendência também foi confirmada na bacia do rio Piracicaba. No entanto, na região da estação CB, em comparação aos outros postos fluviométricos, há um valor de EQ/P relativamente mais alto, causado pelos altos acumulados de precipitação nessa região.

Notou-se valores negativos de elasticidade na relação EQ/ETp nas estações CB, RP, NE e MC, o que denota uma relação inversa entre essas variáveis. Ou seja, a diminuição da evapotranspiração nesses pontos, verificada na **Erro! Fonte de referência não encontrada**, acarreta o aumento da vazão.

Figura 43 – Elasticidades e coeficiente de Runoff.



Fonte: Autora (2024).

## 7 Considerações finais

O estudo em questão realizou uma análise detalhada dos dados de precipitação, vazão e evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Piracicaba. Com 36 anos de dados, foram identificados padrões e tendências que fornecem informações valiosas para compreender o comportamento hidrológico da região.

Os dados de precipitação revelaram uma notável variabilidade ao longo dos anos, evidenciando a complexidade do clima na bacia do rio Piracicaba. A estação do Colégio Caraça se destacou com os maiores registros de precipitação, próximos a 3000 mm em alguns anos. No entanto, houve uma redução no valor acumulado de chuva ao longo dos últimos anos.

As curvas de permanência de vazão proporcionaram uma visão importante sobre o comportamento hidrológico das estações estudadas. Notavelmente, as estações Mário de Carvalho e Nova Era apresentaram vazões significativamente superiores em 90% e 95% do tempo, em comparação com as outras estações. Isso sugere uma maior disponibilidade de água nessas áreas. A partir de 2010, foi observada uma diminuição na vazão dos rios, com significância estatística em três das quatro estações fluviométricas estudadas ( $p = 0,0301^*$ ,  $0,0234^*$ ,  $0,177$  e  $0,0835^*$ ). Essa tendência de redução na vazão pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo mudanças climáticas, aumento da evapotranspiração e alterações no uso do solo, como a expansão urbana e da mineração.

A análise da evapotranspiração potencial revelou variações marcantes ao longo dos anos, influenciadas por fatores como a cobertura vegetal. A análise dos dados de uso da terra na bacia do rio Piracicaba entre 1985 e 2022 revelou tendências distintas: a área florestal permaneceu relativamente estável, enquanto a agricultura diminuiu. A mudança mais notável ocorreu no crescimento de áreas urbanizadas e de mineração. A intensificação das atividades de mineração, em particular, pode estar diretamente relacionada à queda da vazão do rio Piracicaba a partir de 2010, devido aos impactos negativos da mineração sobre os recursos hídricos da região.

A análise das curvas de vazão, representadas por  $U(t)$  e  $U(t')$ , revelou uma tendência decrescente a partir de 2010 nas estações hidrológicas estudadas. Essa tendência foi particularmente notável nas estações RP e MC, onde a vazão  $U(t)$  caiu significativamente abaixo da linha de confiança. A linha de confiança é um limite

estatístico que ajuda a determinar se as variações observadas são significativas ou se podem ser atribuídas ao acaso. A queda abaixo dessa linha indica uma redução consistente e confiável na quantidade de água fluindo nesses pontos.

Em 2012, houve uma mudança na tendência de precipitação. A curva de precipitação, também representada por  $U(t)$ , apresentou uma inclinação negativa, indicando que a quantidade de chuva começou a diminuir a partir desse ano. Essa mudança na precipitação pode ter contribuído para a redução da vazão observada anteriormente, uma vez que menos chuva resulta em menos água disponível para escoamento superficial e recarga dos rios.

Em contraste com as tendências de vazão e precipitação, a curva  $U(t)$  mostrou uma tendência positiva após 2009, indicando um aumento na evapotranspiração potencial. A evapotranspiração é o processo pelo qual a água é transferida do solo e das plantas para a atmosfera. O aumento na evapotranspiração potencial sugere que mais água está sendo perdida para a atmosfera, o que pode reduzir ainda mais a quantidade de água disponível nos rios e córregos.

A análise estatística revelou que essa tendência de aumento na evapotranspiração potencial foi estatisticamente significativa, com um p-valor de 0,0002. A análise do coeficiente de vazão e elasticidade forneceram informações valiosas sobre a resposta da bacia hidrográfica às chuvas. A estação MC se destacou pela sua sensibilidade à precipitação e evapotranspiração, além de ter apresentado o maior coeficiente de runoff, sugerindo maior escoamento superficial.

Este estudo oferece uma visão abrangente da dinâmica hidrológica na bacia do rio Piracicaba. As tendências observadas nas séries temporais e as variações nas variáveis climáticas são indicadores cruciais para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região. Para mitigar os impactos identificados no estudo, recomenda-se que os resultados sejam considerados na formulação de políticas e práticas voltadas para a sustentabilidade hídrica e a adaptação às mudanças climáticas. Uma abordagem interessante seria explorar soluções baseadas na natureza, como a implementação de jardins de chuva ou agroflorestas, especialmente em áreas degradadas e próximas a zonas urbanas. Essas soluções podem ajudar a aumentar a infiltração de água no solo, reduzir o escoamento superficial e melhorar a resiliência das bacias hidrográficas às variações climáticas.

Por fim, é importante ressaltar que este trabalho é uma contribuição inicial e sugere oportunidades para pesquisas futuras, como a investigação mais aprofundada

das causas das tendências observadas e a avaliação do impacto dessas mudanças no meio ambiente e nas comunidades locais.

### Referências bibliográficas

ABBASPOUR, K. C.; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLOVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733-752, 2015.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., & SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711-728. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso em: 30 dez. 2023.

ANA, Agência Nacional de Águas (Brasil). Outorga de direito de uso de recursos hídricos. Brasília: SAG, **Cadernos de capacitação em recursos hídricos**; v.1 vol. 6. 50 p. 2011.

ANDRÉASSIAN, VAZKEN & CORON, LAURENT & LERAT, JULIEN & MOINE, NICOLAS. (2016). Climate elasticity of streamflow revisited - An elasticity index based on long-term hydrometeorological records. **Hydrology and Earth System Sciences**. 20. 4503-4524. 10.5194/hess-20-4503-2016.

ARCAND, Kimberly; WATZKE, Megan. Magnitude. 2017. Disponível em: <https://www.amazon.com/Magnitude-Scale-Universe-Megan-Watzke/dp/031650291X>. Acesso em: 1 set. 2024.

ASSAD, Eduardo Delgado; CORDEIRO, Luiz Adriano Maia; MARCHAO, Robelio Leandro; ALMEIDA, Roberto Giolo de; GUIMARAES JUNIOR, Roberto; BERNDT, Alexandre; SALTON, Julio Cesar; EVANGELISTA, Balbino Antonio. Potencial de mitigação da emissão de gases de efeito estufa por meio da adoção da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta. **Embrapa Gado de Corte-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1023603/1/9000033ebookpdf.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2023.

AZEVEDO, Eduardo Bessa. Ciclos Biogeoquímicos. **O solo: estrutura e composição**, 2022.

ASSIS, Wellington Lopes; JÚNIOR, Antônio Pereira Magalhães; DE AZEVEDO LOPES, Frederico Wagner. A DINÂMICA DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS. **Recursos hídricos: as águas na interface sociedade-natureza**, 2023. *E-book*. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=m065EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT77&dq=a+importancia+da+intercepta%C3%A7%C3%A3o+no+ciclo+hidrol%C3%B3gico&ots=rqOfvPzw7M&sig=4RTLsN0hjh2OnQIXPd6R3a8w46c#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 5 ago. 2023.

BARROS, J. A.; SILVA, M. R.; PEREIRA, L. F. Análise Comparativa das Precipitações Diárias Interpoladas e Dados de Estações na Região dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 123-135, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/191447/1/Artigo2.pdf>. Acesso em: 22 set. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRU/MMA). Águas subterrâneas, um recurso a ser conhecido e protegido. Brasília, 2007. 40 p.

BORMA, L. S.; NOBRE, C. A. Secas na Amazônia: Causas e consequências. *Ciência e Cultura*, v. 65, n. 3, p. 27-30, 2013. DOI: 10.21800/S0009-67252013000300011.

CARVALHO, Daniel Fonseca de; SILVA, Leonardo Duarte Batista da. **Apostila de hidrologia: Escoamento superficial**. 2006. 21p. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>. Acesso em 15 ago.2023.

CASAGRANDE, Tassiana Cristina. **Diretrizes Urbanísticas Específicas (DIUPES) sensíveis à água: Infraestrutura Socioecológica (IS) para novos parcelamentos do solo urbano no Distrito Federal**. 2022. 122 p. Dissertação Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (Profágua)-Unb, Brasília. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/46275>. Acesso em 14 ago. 2023.

CHAGAS, Vinícius B. P.; CHAFFE, Pedro L. B.; ADDOR, Nans; FAN, Fernando M.; FLEISCHMANN, Ayan S.; PAIVA, Rodrigo C. D.; SIQUEIRA, Vinícius A. CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil. **Earth System Science Data**, v. 12, n. 3, p. 2075-2096, 2020.

CHAGAS, VBP; CHAFFE, PLB; BLÖSCHL, G. O clima e a gestão do solo aceleram o ciclo da água no Brasil. **Nat Commun**, v. 13, p. 5136, 2022. doi <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>

CHANG, R.; GOLDBY, K. A. **Chemistry**. 12a. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

CHIEW, Francis H. S.; PEEL, Murray C.; MCMAHON, Thomas A.; SIRIWARDENA, Lionel W. Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. In: DEMUTH, Siegfried; GUSTARD, Alan; PLANOS, Enrique; SCHEIBLER, Frank; SHAKYA, Nawa Raj (Ed.). *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts*. Wallingford, UK: IAHS Press, 2006. p. 256-262. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Murray-Peel/publication/265111019\\_Precipitation\\_elasticity\\_of\\_streamflow\\_in\\_catchments\\_a\\_cross\\_the\\_world/links/546eb450cf2b5fc17607bb9/Precipitation-elasticity-of-streamflow-in-catchments-across-the-world.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Murray-Peel/publication/265111019_Precipitation_elasticity_of_streamflow_in_catchments_a_cross_the_world/links/546eb450cf2b5fc17607bb9/Precipitation-elasticity-of-streamflow-in-catchments-across-the-world.pdf). Acesso em 10 ago.2023.

COELHO, Caio Augusto dos Santos; OLIVEIRA, Cristiano Prestrelo de; AMBRIZZI, Tércio; REBOITA, Michelle Simões; CARPENEDO, Camila Bertoletti; CAMPOS, José

Leandro Pereira Silveira; TOMAZIELLO, Ana Carolina Nobile; PAMPUCH, Luana Albertani; CUSTÓDIO, Maria de Souza; DUTRA, Livia Marcia Mosso; ROCHA, Rosmeri Porfirio da; REHBEIN, Amanda. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11–12, p. 3737–3752, 15 jun. 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-015-2800-1>. Acesso em 27 de ago. 2023.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013, 336p.

COMITÊS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Mapa da UPGRH DO2. Disponível em: [https://comites.igam.mg.gov.br/images/mapas/Mapas\\_2020\\_/Mapas\\_PDF/DO2\\_A3\\_2020.pdf](https://comites.igam.mg.gov.br/images/mapas/Mapas_2020_/Mapas_PDF/DO2_A3_2020.pdf). Acesso em: 13 ago. 2024.

CORREIA, Caroline Matos da Cruz; RESENDE, Lilian Marcia Domingues de; RIBEIRO, Morel Queiros da Costa. Gestão e situação das águas de Minas Gerais 2020. Belo Horizonte: **Instituto Mineiro de Gestão das Águas**, 2020. 230 p. il. ISBN 978-65-88079-01-0. Disponível em: [GESTÃO\\_E\\_SITUAÇÃO\\_DAS\\_ÁGUAS\\_DE\\_MINAS\\_GERAIS\\_2020\\_-\\_SEGURANÇA\\_HÍDRICA.pdf](https://comites.igam.mg.gov.br/images/mapas/Mapas_2020_/Mapas_PDF/DO2_A3_2020.pdf) (igam.mg.gov.br). Acesso em 13 de ago. 2023.

DANG, Xin; PENG, Hanxiang; WANG, Xueqin; ZHANG, Heping. *The Theil-Sen Estimators in a Multiple Linear Regression Model*. 2015. Disponível em: [https://math.iupui.edu/~hanxpeng/MTSE\\_0415.pdf](https://math.iupui.edu/~hanxpeng/MTSE_0415.pdf). Acesso em: 1 set. 2024.

DE OLIVEIRA CORRÊA, Gustavo; OLIVEIRA E SILVA, Francisco Eustáquio; FIGUEIREDO COSTA, Veber Afonso; REIS JÚNIOR, Dirceu Silveira; CHAFFE, Pedro Luiz Borges. **Estrutura de modelos hidrológicos e sua inter-relação com atributos físicos e assinaturas hidrológicas**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/60717>. Acesso em: 4 jun. 2024.

COSTA, G.K.L; WAGNER, P.D; SOUZA, T.P; SILVA, L.M; MOURA, M.F; SILVA, R.R. Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 2023, 2023.

CUMPLIDO, MEIRIELE ALVARENGA; INOCENTE, MARIANE CRISTINA; MEDEIROS, THAÍS PEREIRA DE; OLIVEIRA, GILVAN SAMPAIO DE; MARENGO, JOSE ANTONIO. Secas e crises hídricas no Sudeste do Brasil: um histórico comparativo entre os eventos de 2001, 2014 e 2021 com enfoque na bacia do rio Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 129-153, 2023.

DE MELO, STEFESON BEZERRA; BRILHANTE, ERYKA EVELYN MEDEIROS; ARAÚJO, JÚLIA PAULA LIMA DE; MEZZOMO, IVAN; MENEZES, MATHEUS DA SILVA. Análise de Trilha da Evapotranspiração Real (ETR) para o Caicó-RN.

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**, v. 9, n. 1, 2022.

DE SÁ JÚNIOR, A.; DE CARVALHO, L. G.; DA SILVA, F. F.; ALVES, M. C. Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do estado de Minas Gerais, Brasil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, p. 1–7, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0507-8>.

DEUSDARÁ-LEAL, K., MOHOR, G. S., CUARTAS, L. A., SELUCHI, M. E., MARENGO, J. A., ZHANG, R., GONÇALVES, J. A. (2022). “Trends and Climate Elasticity of Streamflow in South-Eastern Brazil Basins”. **Water**, 14(14), 2245. <https://doi.org/10.3390/w14142245>

DIAS, A. P.; STAUFFER, A. B.; MOURA, L. G. H.; VARGAS, M. C. **Dicionário de Agroecologia e Educação**. 1. ed. São Paulo: Expressão Popular; Rio de Janeiro: Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio, 2021. Disponível em: [https://www.epsjv.fiocruz.br/sites/default/files/dicionario\\_agroecologia\\_nov.pdf](https://www.epsjv.fiocruz.br/sites/default/files/dicionario_agroecologia_nov.pdf). Acesso em: 10 jul. 2023.

DORNELES, GABRIELA DA COSTA RIBEIRO. **Atribuição das Mudanças na Vazão Média de Longo Período devido às Atividades Humanas e Alterações no Clima**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília.

EMBRAPA. Classificação de Solos do Estado de São Paulo. 1999.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestión de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.

FONSECA, Eliny Rodrigues. **Análise das estimativas de precipitação baseadas em satélites para estudo de eventos extremos na Bacia Hidrográfica do rio Piracicaba/MG**. 2022. 97 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2022.

GODSEY, S. E.; KIRCHNER, J. W. (2014). **Dynamic, discontinuous stream networks: Hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order**. *Hydrological Processes* 28(23), pp. 5791–5803.

GOMES, Welisson Wendel Eufrásio. **Modelagem espaço-temporal da evapotranspiração de referência na Bacia Amazônica em um cenário de crescimento na emissão de gases do efeito estufa**. 2020. 71 p. Dissertação (Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais)-UFMG, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64204/1/2022\\_dis\\_ceslima.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64204/1/2022_dis_ceslima.pdf). Acesso em 10 ago. 2023.

GONCALVES, MARCO VINICIUS CASTRO; SOUZA, SAULO AIRES DE; TAVARES, FELIPE DE SÁ. Nota Técnica nº 4/2023/SHE. Documento no 02500.010881/2023-66. Brasília, 9 de março de 2023. **Impacto das Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos do Brasil**. Disponível em: [chrome-](https://chrome-)

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://metadados.snirh.gov.br/geonet/work/srv/api/records/5c4ad4e0-1b7c-45b4-9cb3-1893e44c20d6/attachments/NT\_4\_2023\_SHE\_Impacto%20das%20Mudan%C3%A7as%20Clim%C3%A1ticas%20nos%20Recursos%20H%C3%ADricos%20do%20Brasil.pdf. Acesso em 11 jul.2024.

GREGORY, S. *The definition of wet and dry periods for discrete regional units. Weather*, v. 34, 1979.

GUEDES, HUGO ALEXANDRE SOARES; PRIEBE, PRISCILA DOS SANTOS; MANKE, EMANUELE BAIFUS. Tendências em séries temporais de precipitação no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 283-291, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/84QsHfz7hq39RVpZmdmXsTN/?lang=pt>. Acesso em 16 nov. 2023.

HU, SHANSHAN; LIU, CHANGMING; ZHENG, HONGXING; WANG, ZHONGGEN; YU, JINGJIE. Assessing the impacts of climate variability and human activities on streamflow in the water source area of Baiyangdian Lake. **Journal of Geographical Sciences**, v. 22, p. 895-905, 2012.

IPCC. Climate Change: **Climate change widespread, rapid, and intensifying**. 2021. Postagem. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>. Acesso em: 8 ago. 2023.

IPCC. Climate Change 2023: **Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva: IPCC, 2023. 184 p. doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

JACOBI, P. R.; BUCKERIDGE, M.; RIBEIRO, W. C. Governança da água na Região Metropolitana de São Paulo-desafios à luz das mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 209-226, 2021. doi: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.013>

KENDALL, M.G. **Rank Correlation Methods**. London, UK: Griffin, 1975.

KUMAR, R.; RANI, A.; SINGH, S.P.; MAHARAJ, K.; SRIVASTAVA, S.S. **A long term study on chemical composition of rainwater at Dayalbagh, a suburban site of semiarid region**. *J. Atmos. Chem.*, v. 41, p. 265-279, 2002.

LIMA, Jean; CUPOLILLO, Fulvio; MAGALHÃES JÚNIOR, Antônio. **Panorama da Sazonalidade Climática da Bacia do Rio Doce: Subsídios à Gestão das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos**. 2023. Disponível em: <<https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/geografia-desenvolvimento-cientifico-e-tecnologico-4.>0422316052>. Acesso em: 30 jun. 2024. Doi: 10.22533/at.ed..0422316052.

LIMA, Péricles Souza; DE MORAIS, Fernando. Caracterização da Paisagem Cárstica em Natividade e Chapada da Natividade–TO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 02, p. 723-740, 2023.

MACHADO, C. B.; FREITAS, E. D. Projeções de Uso e Cobertura da Terra na Macrometrópole Paulista. **Diálogos Socioambientais na Macrometrópole Paulista**, v. 4, n. 11, p. 36–39, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufabc.edu.br/index.php/dialogossocioambientais/article/view/556> .

MACHADO, Carolyne Bueno. **Mudanças históricas de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Paraná e seus impactos em eventos extremos de precipitação**. 2023. Tese (Doutorado em Ciências- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023).

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise Hídrica em São Paulo em 2014: Seca e Desmatamento. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485, 6 dez. 2015. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/100879>.

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon Basin: A historical review and current. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 1-19, 2006.

MARENGO, José A.; SOUZA JR, Carlos. **Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: ALANA, 2018.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. *Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review*. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, n. 1, p. 5–20, 13 fev. 2020. Disponível em: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nyas.14307>. Acesso em: 08 ago. 2023.

MARENGO, J. A.; SOUZA, C. M.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R. A.; ... & SOARES, W. R. *Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Impacts on the Hydrological Cycle and Extreme Hydrometeorological Events*. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 169, 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.643202.

MARQUES, F. A. **Sistema de controle dinâmico para a gestão dos usos múltiplos da água**. 2010. Doutorado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, UFV, Brasil.

MARTINS, Fabrina Bolzan; ROCHA, José Sales Mariano da; ROBAINA, Adroaldo Dias; KURTZ, Silvia Margareti de Juli Moraes; KURTZ, Fabio Charão; GARCIA, Sandra Maria; SANTOS, Alessandro Herbert de Oliveira; DILL, Paulo Roberto Jaques; NOAL, Tatiana Nardon. **Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS): Estudo de caso**. CERNE, Lavras, v.11, n.3, p.315-322, jul./set. 2005. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74411310.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2023.

MELO, M. C.; VON SPERLING, M. (2007). Avaliação de Metodologias para concessão de outorga de lançamento de efluentes em corpos d'água. Estudo de caso: Bacia do Ribeirão Marmelada. In: **24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Belo Horizonte. Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

MELO, L. S. **Distribuições e tendências de vazões na bacia hidrográfica do Rio das Velhas**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Universidade Federal de São João Del Rei, Sete Lagoas, 2016. Disponível em: [https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgca/Dissertacao%20Larissa%20Melo\\_29\\_07\\_2016.pdf](https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgca/Dissertacao%20Larissa%20Melo_29_07_2016.pdf) Acesso em: 27 nov. 2020. Acesso em: 16 nov. 2023.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Resolução Conjunta nº 1548, de 29 de março de 2012. Dispõe sobre a vazão de referência para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do Estado. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG, 31 de mar. 2012. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/CTIG/4-r-c-semad-igam-no-1548-versao-publicada.pdf>. Acesso em: 9 de ago. 2023.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Portaria nº 32, de 06 de setembro de 2022. Institui a Q7,10 mensal como base de disponibilidade hídrica oficial do IGAM para a Bacia Hidrográfica do Rio Doce e dá outras providências. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, MG, 10 de set. 2022. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56404>. Acesso em: 9 de ago. 2023.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. da. Ciclo hidrográfico planetário: abordagens e conceitos. *Geo UERJ*, v. 1, n. 21, p. 109-119, 2010.

MOURA, Thiago Allain Martins Siqueira. **Influência de variáveis biométricas de espécies florestais na interceptação pluvial da floresta urbana tropical**. 2023. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Departamento de Ciência Florestal, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2023.

NEVES, Danilo de Souza. **Uso do solo na bacia do rio Doce: relações com o clima e com o desastre da SAMARCO/BHP Billiton/VALE**. 2022. 72 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

NOAA. Trends in CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/>. Acesso em: 01 ago. 2023.

NOBRE, Antonio Donato. O futuro climático da Amazônia. **Relatório de Avaliação Científica**. São José dos Campos, São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, Thamyres Cardoso Chaves; GONÇALVES, Flávio Aparecido. Tamanho ideal de séries históricas de vazões mínimas anuais e suas aplicações em estudos hidrológicos: estudo de caso nas regiões hidrográficas Paraná e São Francisco. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 805-816, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210232>

TATSCH, Jônatan **Notas de aula da disciplina Hidrometeorologia A (FSC1087)**. Do curso de Graduação em meteorologia oferecido no Departamento de Física da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Disponível em: <https://lhmet.github.io/hidrometeobook/>. Acesso em: 9 ago. 2023.

MEDEIROS, FELIPE JEFERSON DE; OLIVEIRA, CRISTIANO PRESTRELO DE; AVILA-DIAZ, ALVARO. *Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6*. **Weather and Climate Extremes**, v. 38, 2022. ISSN 2212-0947. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100511>. Acesso em: 22 ago. 2024.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). Mudanças Climáticas e Cidades. In: RIBEIRO, S.K.; SANTOS, A.S. (Eds.). Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2016. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9. Disponível em: [http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/Relatorio\\_UM\\_v10-2017-1.pdf](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/Relatorio_UM_v10-2017-1.pdf) . Acesso em: 16 nov. 2023.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Climate Change 2007**: Synthesis Report. Genebra, 2007. Summary for Policymakers.

PARH PIRACICABA. **Plano de Ação de Recursos Hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Piracicaba**. Consórcio Ecoplan – Lume, Junho, 2010. Disponível em: <<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/856>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

PAZ, A. R., 2004. **Hidrologia Aplicada**. Texto Básico. Disponível em <[http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila\\_HIDROLOGIA\\_APLICADA\\_UERG S.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERG S.pdf)>. Acesso em 20 jul. de 2023.

PAWLOWSKI, A.; PAWLOWSKA, M.; PAWLOWSKI, L. **Mitigation of greenhouse gases emissions by management of terrestrial ecosystem**. Ecological Chemistry and Engineering S-Chemia I Inzynieria Ekologiczna S, v. 24, p. 213-221, 2017. <https://doi.org/10.1515/eces-2017-0014>.

PENEREIRO, J. C., BADINGER, A., MACCHERI, N. A., & MESCHIATTI, M. C. (2018). **Distribuições de Tendências Sazonais de Temperatura Média e Precipitação nos Biomas Brasileiros**. Revista Brasileira De Meteorologia, 33(1), 97–113. DOI: 10.1590/0102-7786331012

PIRH-Doce. **Prognóstico e alternativas de enquadramento**. Revisão e atualização do plano integrado de recursos hídricos da bacia do rio doce (PIRH doce), incluindo seus respectivos planos diretores de recursos hídricos (PDRHs)/planos de ações de

recursos hídricos (PARHs), e proposta de enquadramento dos corpos de água da bacia em classes segundo os usos preponderantes e atualização do enquadramento dos cursos d'água da bacia do rio piracicaba. Brasília, DF: ANA, 437p. 2022. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2022/04/1454-ANA-04-RH-RT-0001-R0.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

RAO, V.B.; FRANCHITO, S.H.; SANTO, C.M.E; GAN, M.A. An update on the rainfall characteristics of Brazil: seasonal variations and trends in 1979-2011. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 291-302, 2016.

ROCHA, Juliano Marcos da. **Caracterização da bacia hidrográfica Rio Piracicaba-MG utilizando ferramentas de geoprocessamento**. 2021. 73 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/3508>. Acesso em: 17 jun. 2023.

RODRIGUES, R.S.S; OLIVEIRA, A.S; SILVA, A.C; SANTOS, G.M; PINTO, F.E.G; ALMEIDA, L.F. Análise de séries temporais hidrológicas em uma pequena bacia hidrográfica rural da Amazônia. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, p. 233-250, 2020. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/64058>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SANKARASUBRAMANIAN, A.; VOGEL, R. M.; LIMBRUNNER, J. F. Climate elasticity of streamflow in the United States. **Water Resources Research**, v. 37, n. 6, p. 1771-1781, 2001.

SANTOS, Marques Souza dos. Precipitação total e interna no platô, encosta e baixio em floresta natural–MANAUS–AM. In: **Anais do XIX Congresso de Iniciação Científica do INPA-CONIC**. 2020.

SAWICZ, K. A.; KELLEHER, C.; WAGENER, T.; TROCH, P.; SIVAPALAN, M.; CARRILLO, G. Characterizing hydrologic change through catchment classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, n. 1, p. 273-285, 2014.

SILVA, R. A.; OLIVEIRA, P. H.; SANTOS, T. F. Homogeneidade, Eventos Extremos e suas Causas na Bacia do Rio São Francisco. **Journal of Hydrology**, v. 45, n. 3, p. 456-470, 2019. DOI: 10.1002/joc.7731. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/skjbWbYmMHR5FnSq3DjJx5m/>.

SILVEIRA, Gabriel Rondina Pupo da. Geomática aplicada na caracterização conservacionista de uma bacia hidrográfica no município de São Manuel (SP). 2016. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

SIMÕES, Fabricio Tadeu Alves. **Sensibilidade da vazão média anual ao clima na bacia hidrográfica do Rio São Francisco**. 2021. Monografia (Engenharia Ambiental) - UnB, Brasília, 2021.

SIQUEIRA, B.; NERY, J. T. Tendências das séries temporais de precipitação no estado do Paraná. **GEOSP Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 616-633, 2021. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2020.160434. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/160434>. Acesso em: 16 nov. 2023.

SMITH, C.; BAKER, JCA; SPRACKLEN, DV. O desmatamento tropical causa grandes reduções na precipitação observada. **Nature**, v. 615, p. 270-275, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05690-1#citeas> . Acesso em: 13 ago. 2023.

SOUZA FILHO, JOSÉ DANILO DA COSTA; MIRANDA, ÊNIO PEREIRA DE; LOPES, FRANCISCO DO VALE; ROCHA, HUMBERTO RIBEIRO DA. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 223-229, 2005.

TERADA, Rafael Kenji. **Influência da infraestrutura urbana nas águas subterrâneas na cidade de Urânia (SP)**. 2022. Tese (Doutorado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 2022. doi:10.11606/T.44.2022.tde-08092022-091748. Acesso em: 2024-01-04.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da água no Brasil** - Brasília : UNESCO, 156p. 2001.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia. Ciências e aplicação**. 4. Ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 2009.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed.Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. - 4ª ed. 5ª reimp. - Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2013.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, p. 669. 1998.

UNESCO– IHP. **Ciclo Processos e Interações**. Em: MARSALEK,J.,JIMÉNEZ-CISNEROSB.,KARAMOUZ M.,MALMQUIST P., GOLDENFUMJ. & CHOCAT B. Urban Watsérie er. Taylor & francis, Londres (2008).

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 6, n. 2, p. 215–228, 1976. DOI: 10.1590/1809-43921976062215

WILHELM, Florian. Theil-Sen Regression. 2021. Disponível em: [https://scikit-learn.org/stable/auto\\_examples/linear\\_model/plot\\_theilsen.html](https://scikit-learn.org/stable/auto_examples/linear_model/plot_theilsen.html). Acesso em: 1 set. 2024.

WWAP. **The United Nations. World Water Development Report: Water for a Sustainable World.** Paris, UNESCO. 122p. 2015.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

XAVIER, ALEXANDRE & SCANLON, BRIDGET & KING, CAREY & ALVES, ALINE. (2022). New Improved Brazilian Daily Weather Gridded Data (1961-2020). *International Journal of Climatology*. 42. 10.1002/joc.7731.

XU, QIAN; CHEN, JI; PEART, MERVYN R.; NG, CHO-NAM; HAU, BILLY C. H.; LAW, WINNIE W. Y. Exploration of severities of rainfall and runoff extremes in ungauged catchments: A case study of Lai Chi Wo in Hong Kong, China. ***Science of the Total Environment***, v. 634, p. 640–649, 2018.

ZEILHOFER, P.; LIMA, E.B.R.; SANTOS, F.M.; RIGO JÚNIOR, L.O. O. Um ambiente SIG para modelagem integrada da qualidade da água utilizando QUAL2e. **Revista Caminhos da Geografia**, v. 4, n. 10, p. 107-125, 2003.

## Apêndice A

### Testes Mann Kendall de cada estação pluviométrica da bacia do rio Piracicaba de 1987 a 2022.

Figura 44 – Análise de tendência para a estação pluviométrica MC-Mário de Carvalho

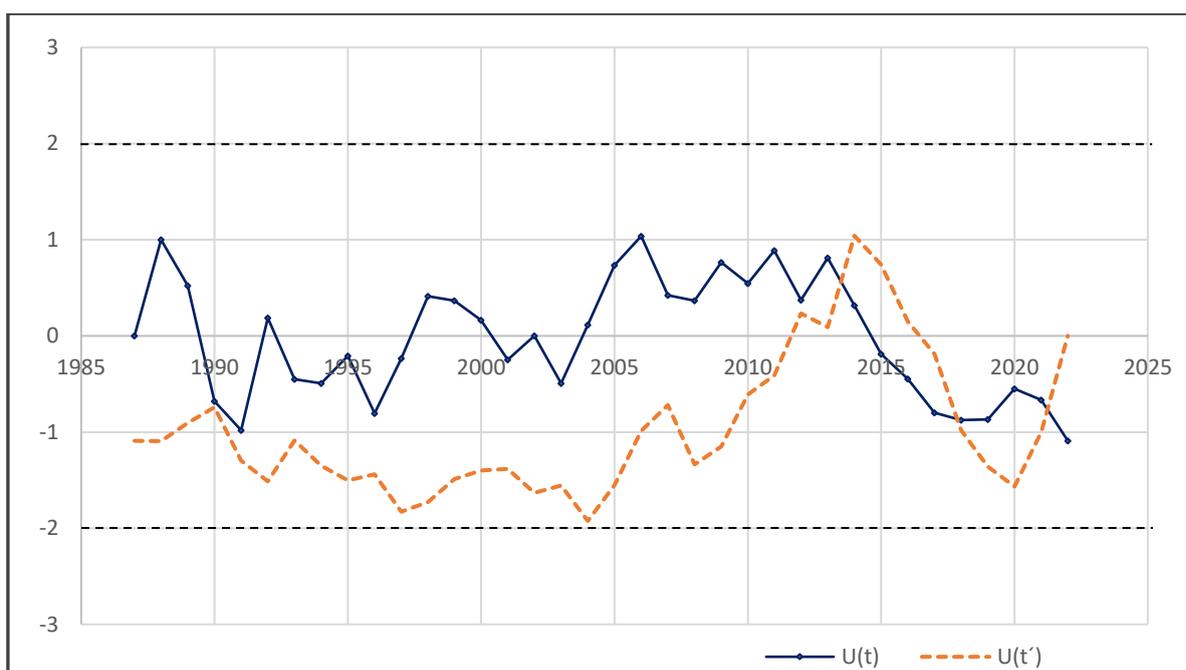


Figura 45 – Análise de tendência para a estação pluviométrica SMI-Santa Maria de Itabira

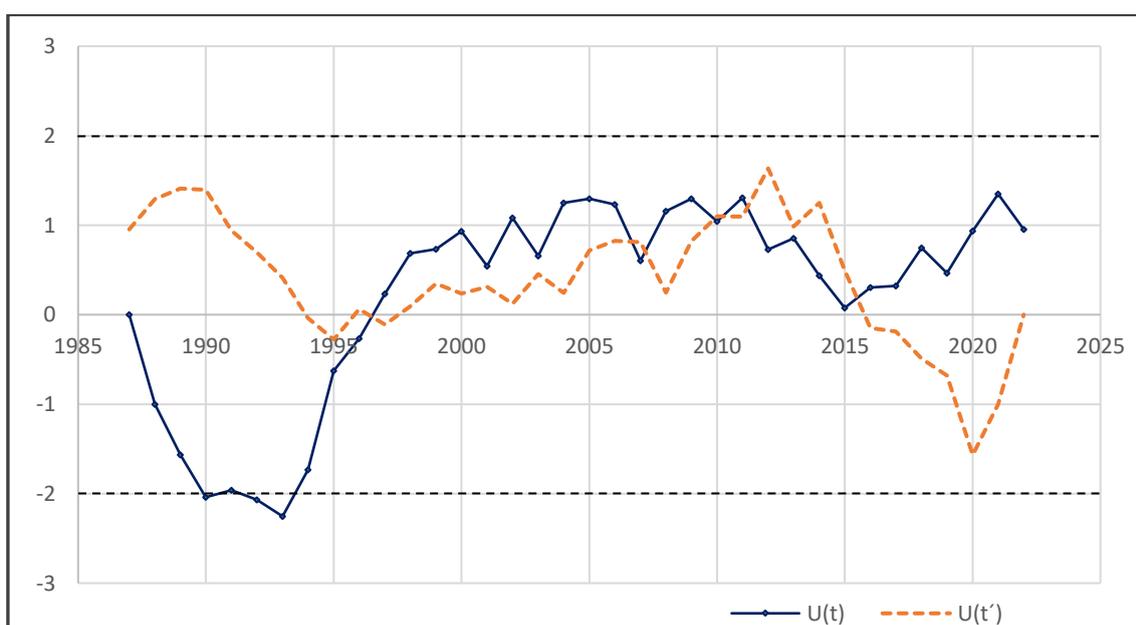


Figura 46 – Análise de tendência para a estação pluviométrica UP-Usina Peti

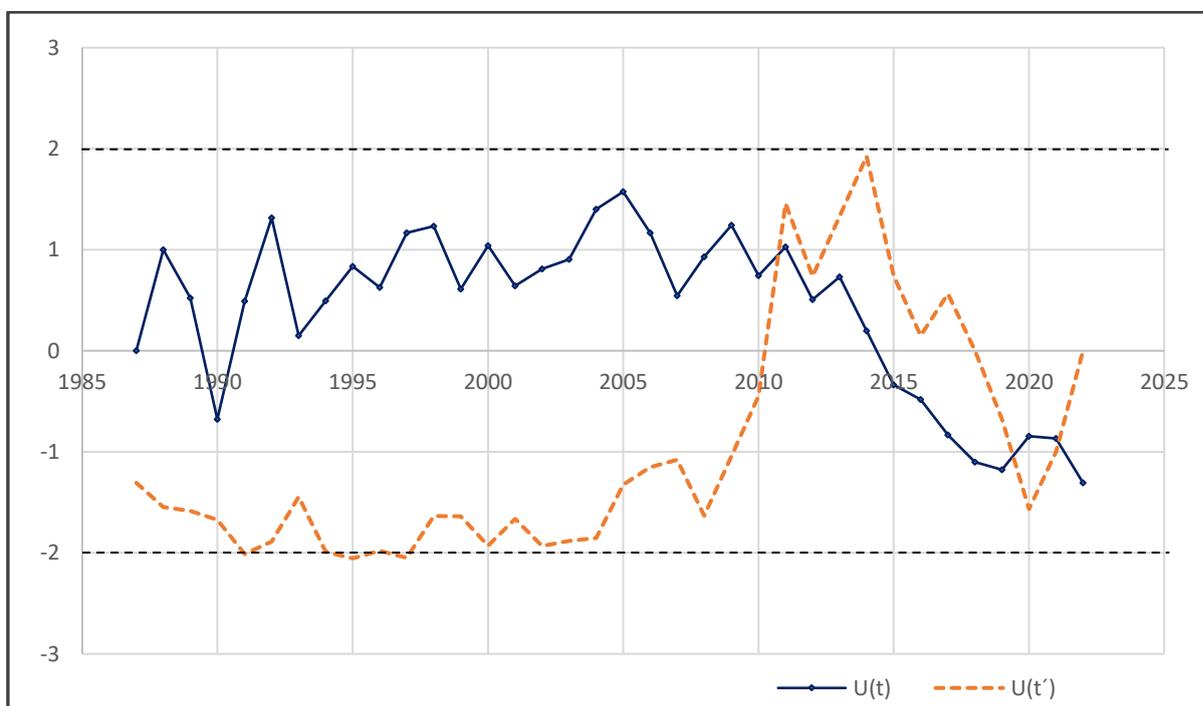


Figura 47 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FCD-Fazenda Cachoeira Dantas

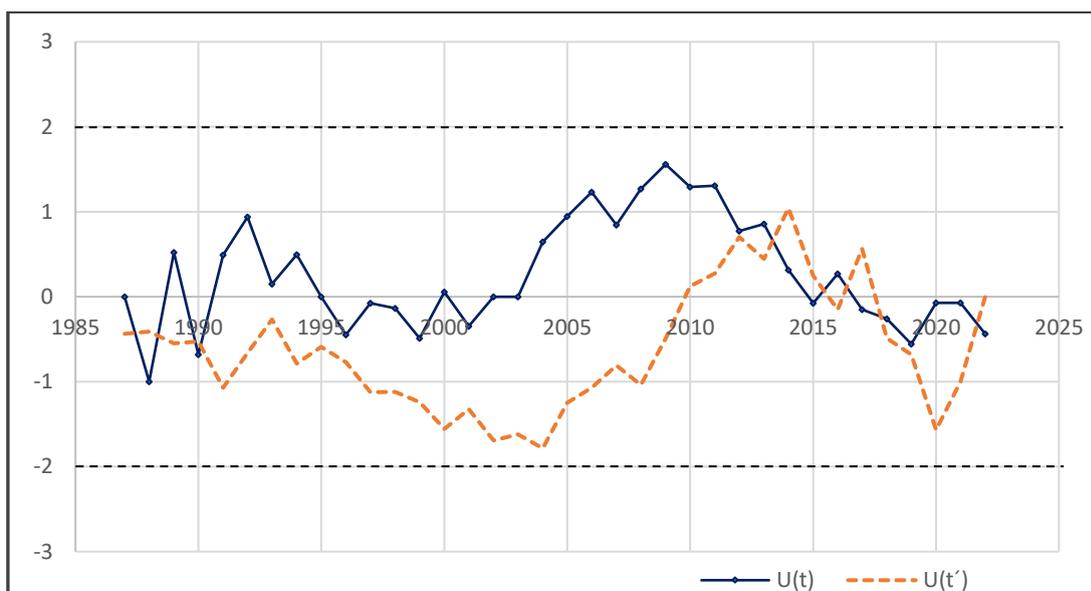


Figura 48 – Análise de tendência para a estação pluviométrica CC-Colégio Caraça

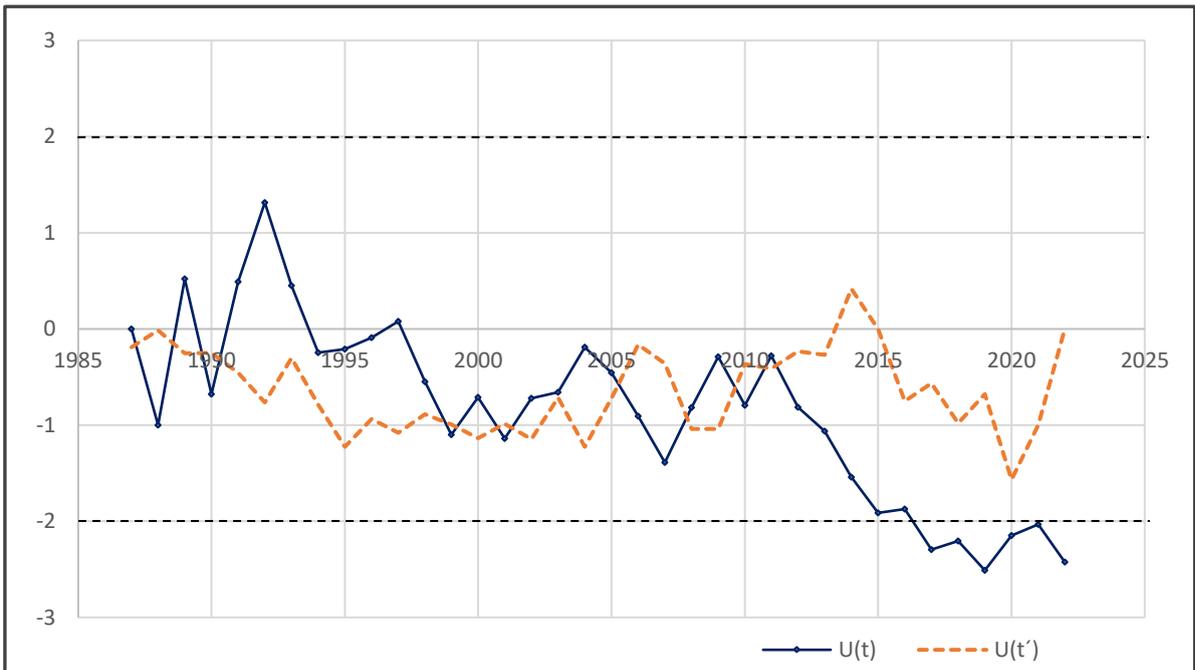


Figura 49 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FAL-  
Fazenda Água Limpa

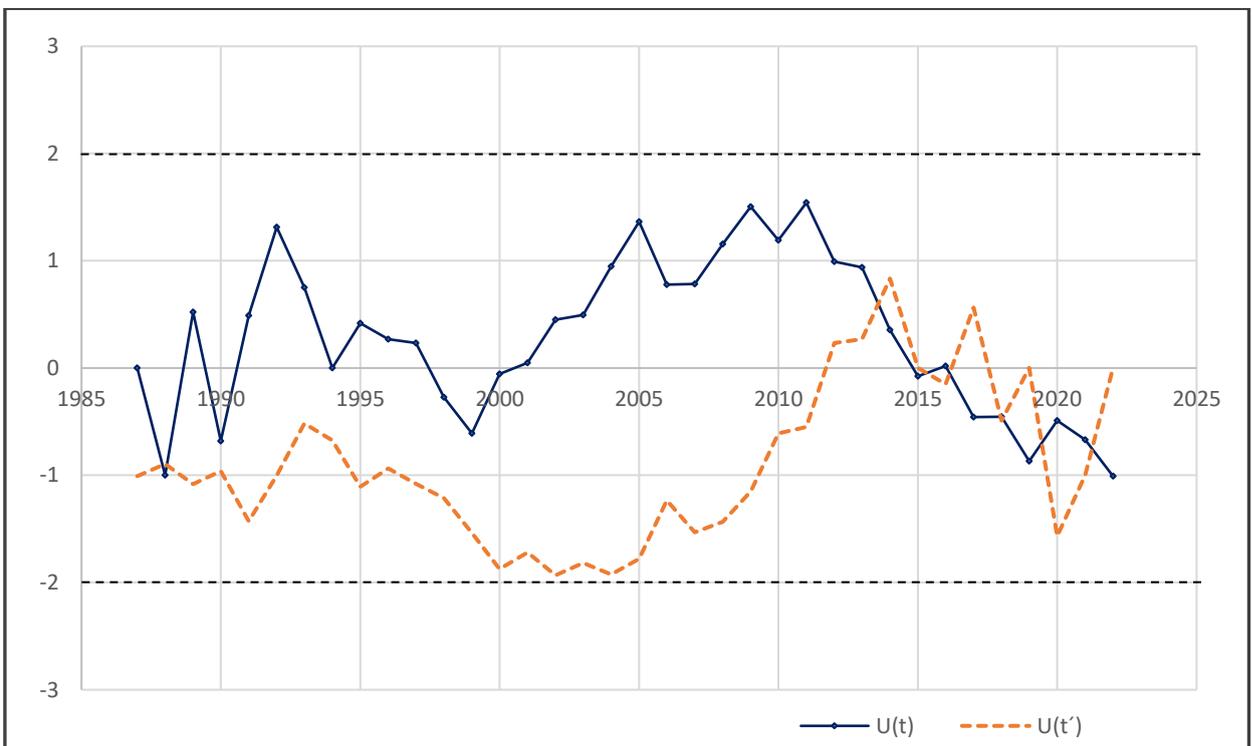


Figura 50 – Análise de tendência para a estação pluviométrica SB-Santa Bárbara

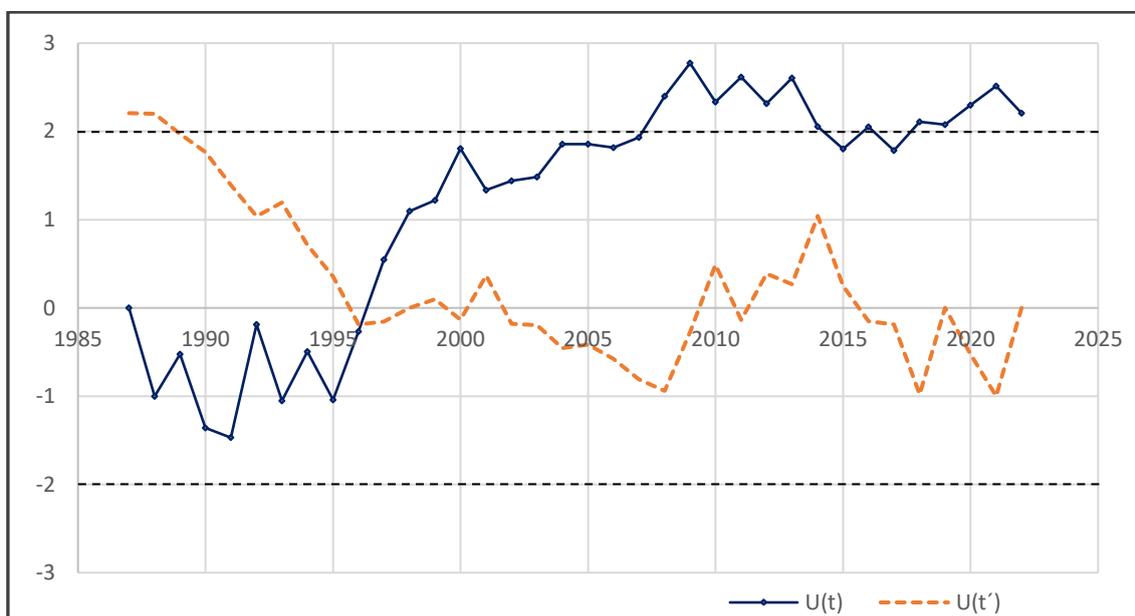


Figura 51 – Análise de tendência para a estação pluviométrica RP-Rio Piracicaba

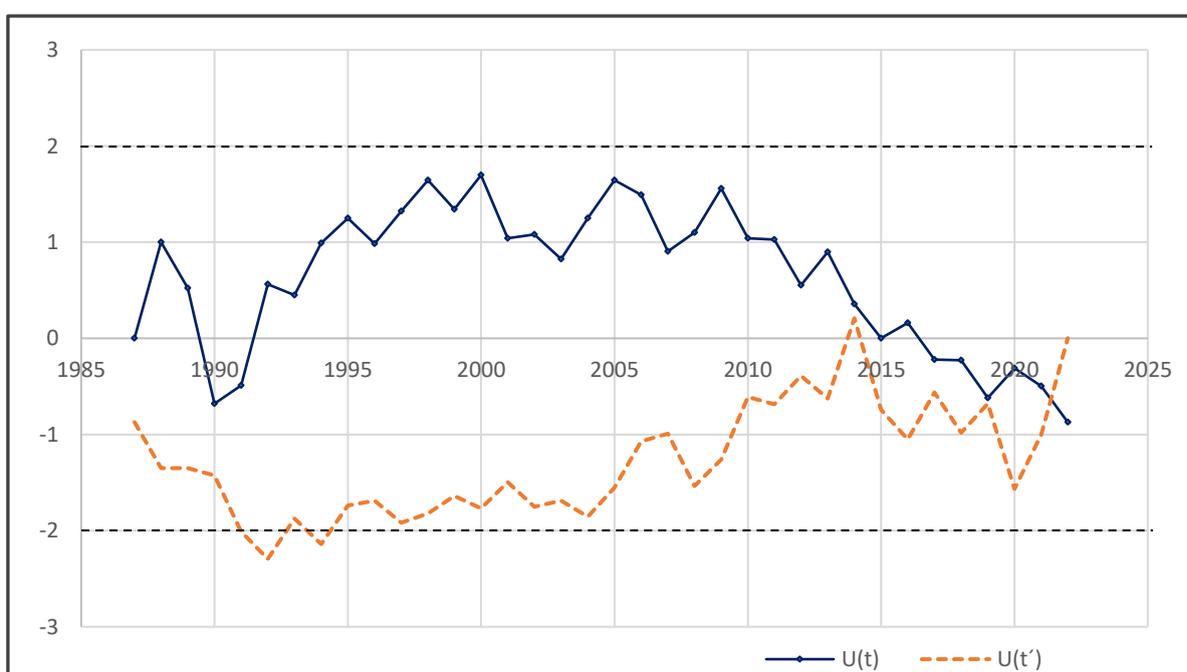


Figura 52 – Análise de tendência para a estação pluviométrica C-Caeté

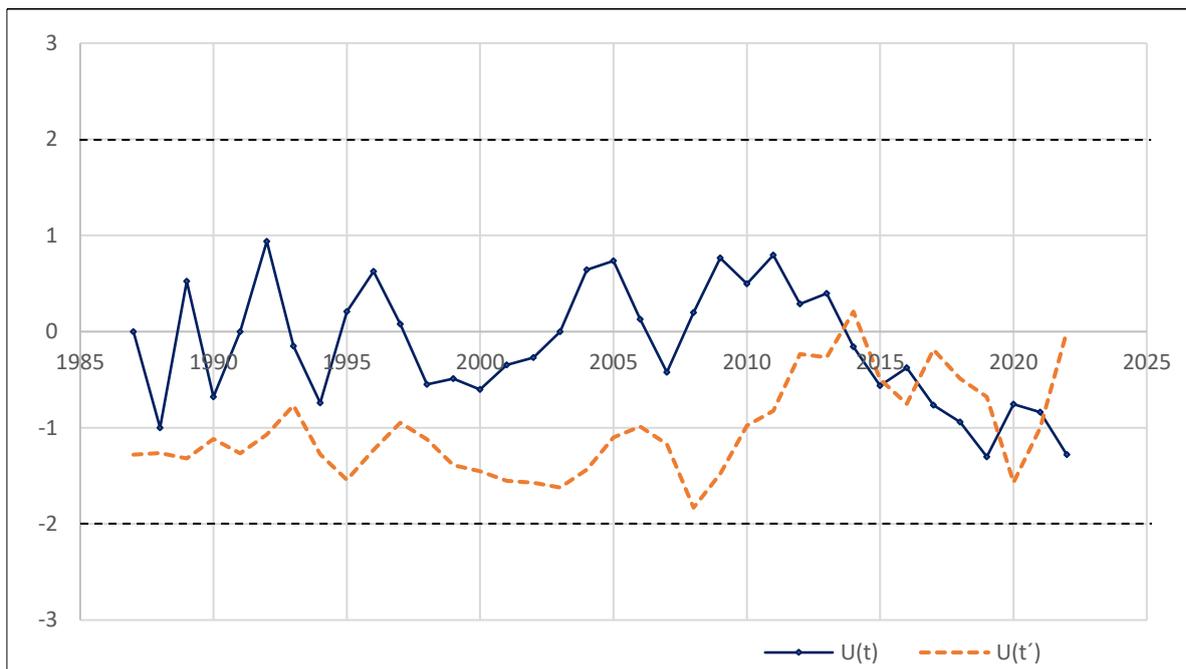


Figura 53 – Análise de tendência para a estação pluviométrica JM-José de Melo

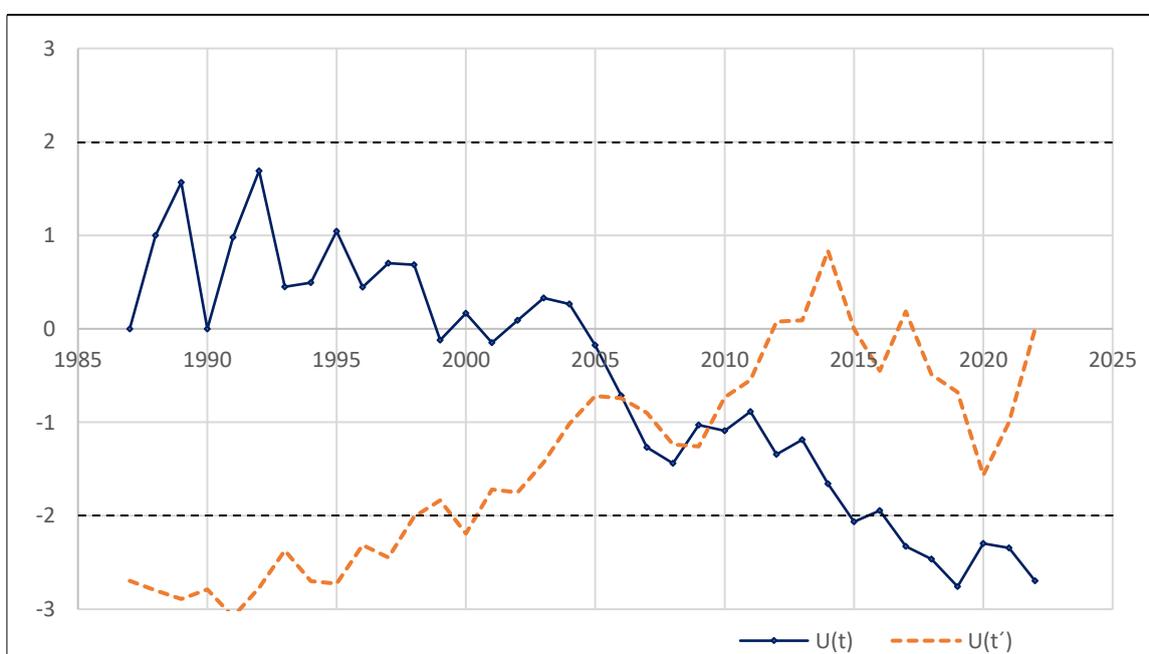


Figura 54 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FO-  
Fazenda Ocidente

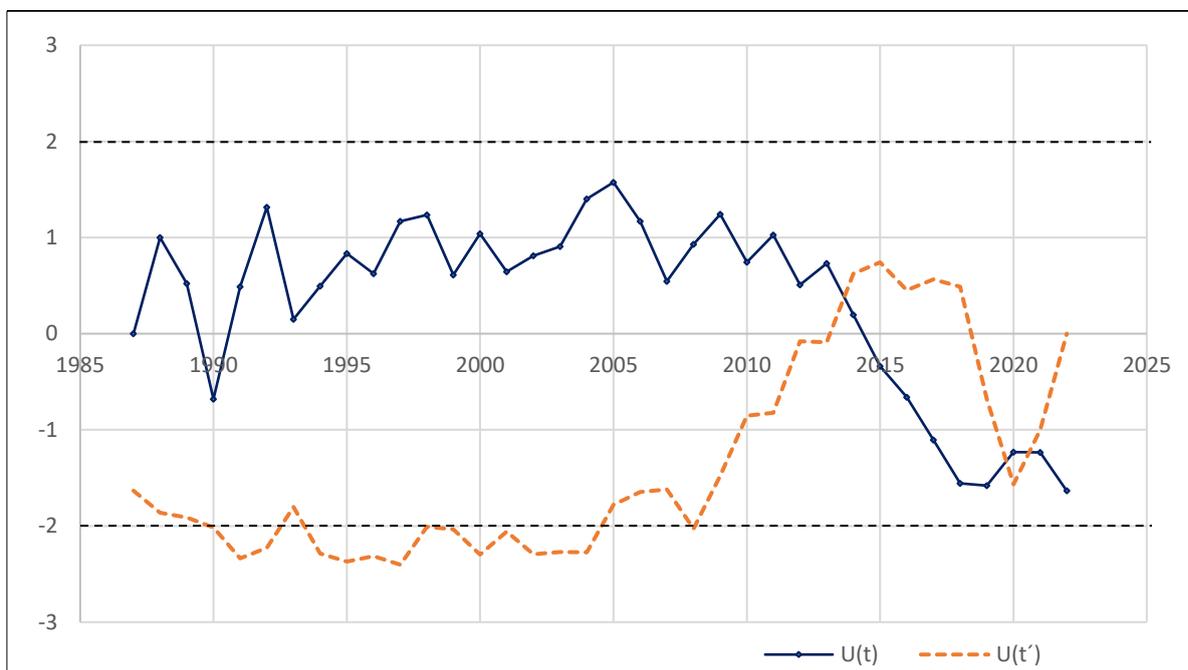


Figura 55 – Análise de tendência para a estação pluviométrica BO-Belo  
Oriente

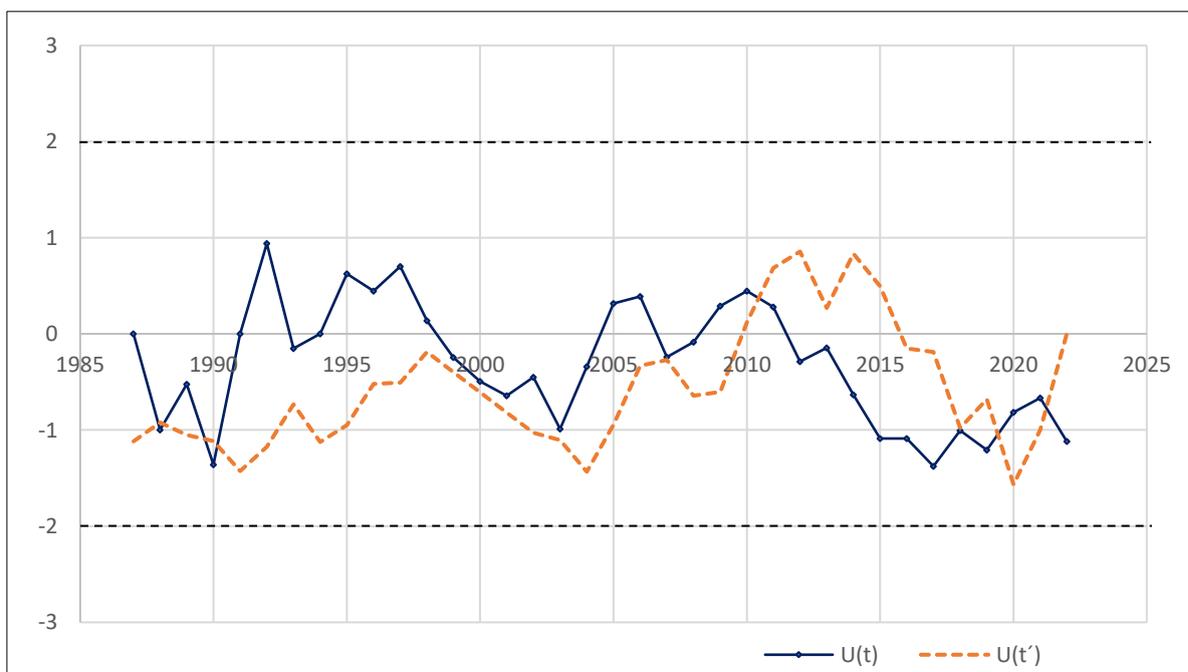
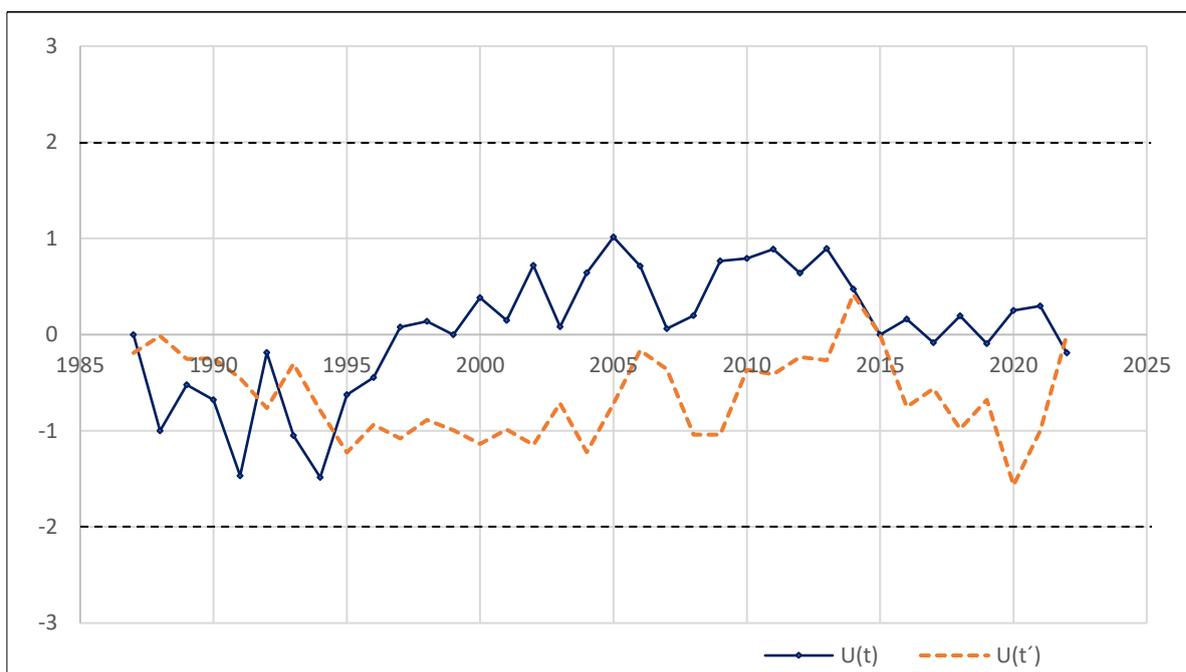
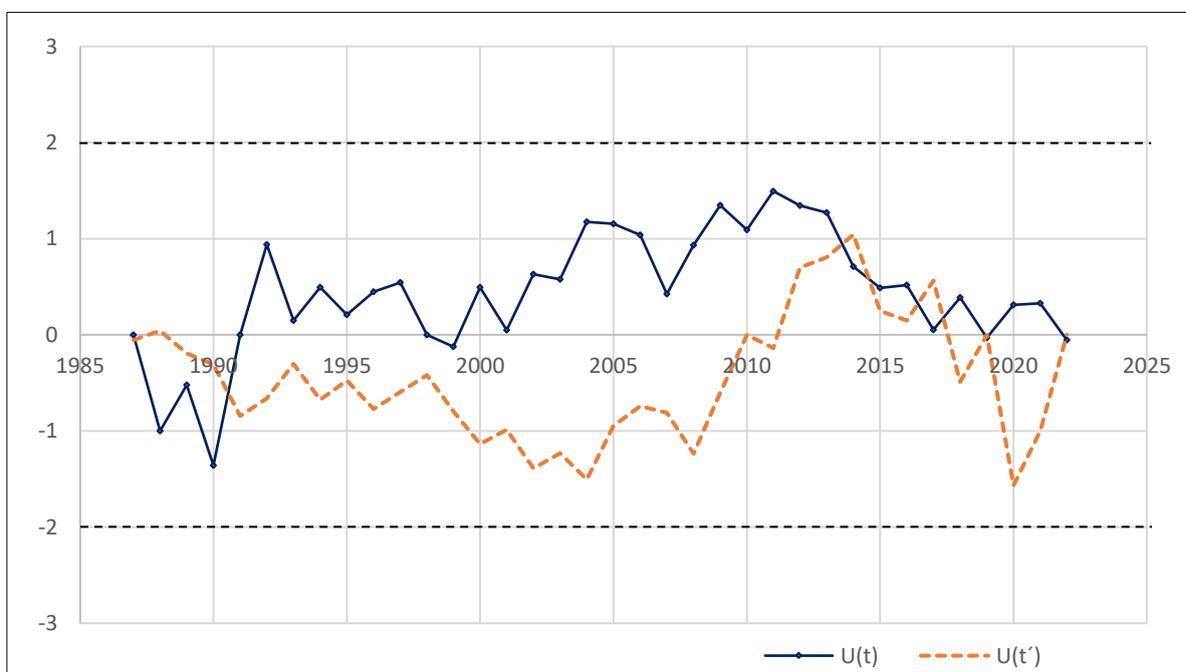


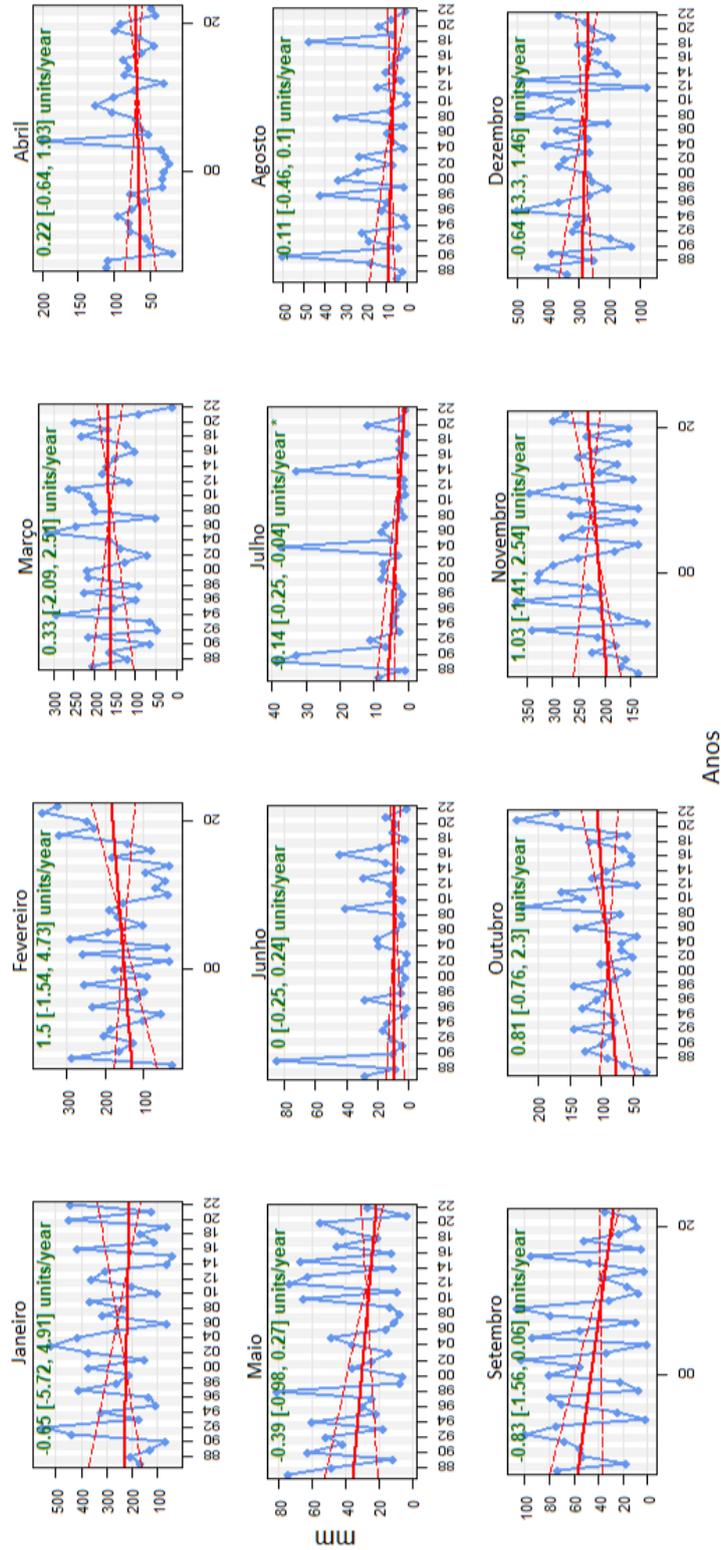
Figura 56 – Análise de tendência para a estação pluviométrica F-Ferros

Figura 57 – Análise de tendência para a estação pluviométrica FP-  
Fazenda Paraíso

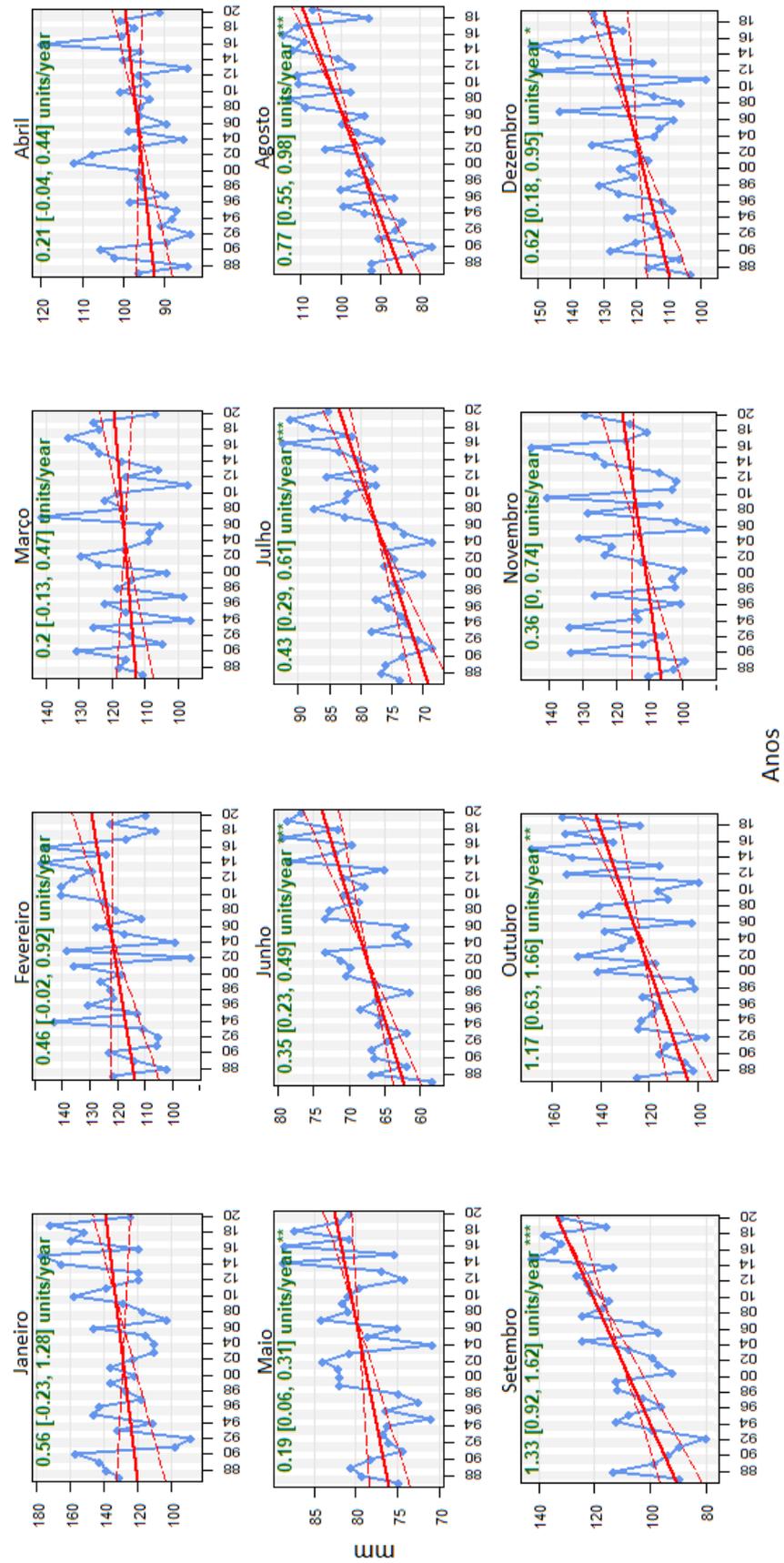
## Apêndice B

### Magnitudes do teste estatístico de Theil-sen

#### Precipitação



### Evapotranspiração potencial



Anos

mm