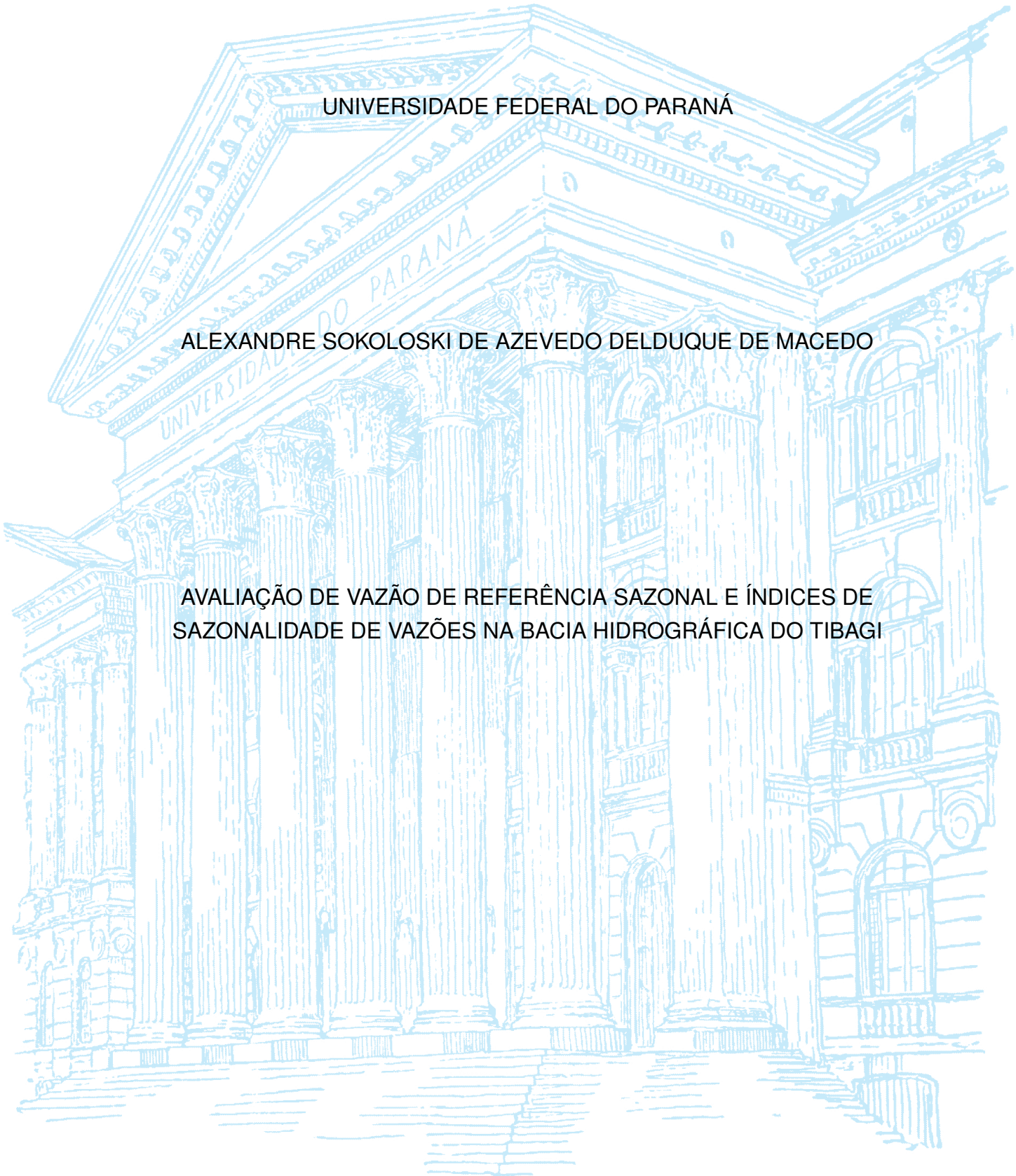

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEXANDRE SOKOLOSKI DE AZEVEDO DELDUQUE DE MACEDO

AVALIAÇÃO DE VAZÃO DE REFERÊNCIA SAZONAL E ÍNDICES DE SAZONALIDADE DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI

CURITIBA

2023

ALEXANDRE SOKOLOSKI DE AZEVEDO DELDUQUE DE MACEDO

AVALIAÇÃO DE VAZÃO DE REFERÊNCIA SAZONAL E ÍNDICES DE SAZONALIDADE DE VAZÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIBAGI

Trabalho apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental no curso de Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Michael Mannich

CURITIBA

2023

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

ALEXANDRE SOKOLOSKI DE AZEVEDO DELDUQUE DE MACEDO

AVALIAÇÃO DE VAZÃO DE REFERÊNCIA SAZONAL E ÍNDICES DE SAZONALIDADE DE VAZÕES NA BACIA DO TIBAGI

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 10, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): _____
Dr. Michael Mannich
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 1): _____
Dr. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri
Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2: _____
Dr. Daniel Henrique Marco Detzel
Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFPR

Curitiba, 06 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus por ter iluminado minha mente e orientado meu caminho ao longo desses anos de graduação.

À minha família, em especial aos meus pais e irmãos, quero agradecer pelo apoio em todos os momentos. Também, sou grato à minha namorada, Maria Clara, por ter estado presente em grande parte dessa jornada, oferecendo um apoio emocional significativo sempre que necessário.

Ao professor Michael, meu orientador no curso, e também mentor na vida, quero manifestar minha sincera gratidão. Sempre esteve ao meu lado, orientando-me não apenas nas questões acadêmicas, mas também inspirando-me com seu caráter e postura exemplares, tanto dentro como fora da sala de aula.

À Camila Stinghen, que me deu a oportunidade de ingressar no IAT e, consequentemente, meu primeiro contato com Recursos Hídricos, agradeço imensamente. Também sou grato pelos valiosos conselhos que ela compartilhou comigo, tanto profissionalmente como pessoalmente, sendo um exemplo que admiro muito.

Aos meus colegas de estágio no Lactec, expresso minha gratidão por sempre estarem dispostos a me auxiliar nos momentos necessários, bem como pelos momentos de descontração que compartilhamos durante o período em que trabalhei na empresa.

À Julia Bianek, que além de ser um exemplo de engenheira ambiental, me proporcionou a oportunidade de fazer parte de uma empresa incrível e colaborar com profissionais excepcionais na área de Recursos Hídricos, meu sincero agradecimento.

À minha psicóloga, Paloma Oliveira, que esteve presente desde o início da jornada do TCC e desempenhou um papel fundamental em meu bem-estar mental e emocional, expresso minha profunda gratidão.

Por fim, agradeço a todos os colegas e amigos que, de diversas maneiras, contribuíram para o meu desenvolvimento acadêmico. Em especial, a Ana, Brenda, Karen, Lisa, Victoria, Vitor e Felipe, que compartilharam boa parte das disciplinas ao longo desses anos.

RESUMO

A Política Nacional de Recursos Hídricos estipula o uso da outorga de recursos hídricos como um meio essencial para assegurar o acesso eficaz da população à água. Nesse contexto, compreender as vazões mínimas de referência torna-se crucial para determinar os limites outorgáveis. Na bacia do Tibagi, a vazão de referência adotada é a Q_{95}, critério do IAT - órgão ambiental do Paraná, calculada a partir da análise da vazão que o corpo hídrico deveria manter em 95% do tempo (com base em sua série histórica). No entanto, nota-se a falta de consideração da variação sazonal ao longo do ano em seu uso, o que pode levar a restringir os usuários na utilização dos recursos hídricos para diferentes propósitos (irrigação, indústria, abastecimento público, etc.), especialmente em regiões de estresse e escassez hídrica. Portanto, surge a necessidade de examinar a aplicação de vazões de referência sazonais na bacia, um enfoque semestral foi adotado neste trabalho (dividido entre seis meses "secos" e seis meses "úmidos"), a fim de avaliar os benefícios e desvantagens dessa abordagem sazonal. Os resultados mostram que a abordagem sazonal nas vazões de referência levam à ganhos significativos, de até 20% de vazão, e para uma região com um estresse hídrico elevado. Além disso, três índices de sazonalidade propostos por Laaha e Blöschl (2006) foram utilizados (SR, SI e SH) para compreender e quantificar a sazonalidade da bacia hidrográfica, visando destacar a intensidade da sazonalidade das vazões de estiagem e suas distribuições na bacia do Tibagi. Estes índices não apenas descrevem a sazonalidade, mas também se mostram úteis como ferramentas na gestão de recursos hídricos, especialmente em áreas críticas e com estresse hídrico, podendo oferecer apoio à tomada de decisões durante o processo de outorga nessas regiões, e aparentam ser potenciais ferramentas para regionalização de vazões. Os resultados mostram que não há uma sazonalidade forte, no geral, com relação a bacia do Tibagi, porém há uma certa tendência de crescimento dessa sazonalidade para o Norte da bacia.

Palavras-chaves: Sazonalidade. Outorga. Vazão de Referência. Índices de Sazonalidade.

ABSTRACT

The National Water Resources Policy mandates the use of granting as an essential means to ensure effective public access to water. In this context, understanding minimum reference flows becomes crucial for determining permissible limits. In the Tibagi basin, the adopted reference flow is Q_{95}, a criterion of the IAT - Paraná's environmental agency, calculated by analyzing the flow that the water body should maintain 95% of the time (based on its historical data). However, the lack of consideration for seasonal variation throughout the year in its usage is notable, potentially restricting users from utilizing water resources for various purposes (irrigation, industry, public supply, etc.), especially in regions facing water stress and scarcity. Therefore, there is a need to explore the application of seasonal reference flows in the basin, adopting a semi-annual approach in this research (divided into six 'dry' months and six 'wet' months) to evaluate the advantages and disadvantages of this seasonal approach. The results show that the seasonal approach to reference flows leads to significant gains, up to 20% in flow, particularly in regions with high water stress. Additionally, three seasonality indices proposed by Laaha e Blöschl (2006) (SR, SI, and SH) were employed to comprehend and quantify the seasonality of the basin, aiming to highlight the intensity of the seasonality of low flows and their distributions in the Tibagi basin. These indices not only describe seasonality but also prove valuable as tools in water resources management, especially in critical areas with water stress, offering support for decision-making during the permitting process in these regions. The results further indicate that, overall, there is no strong seasonality in the Tibagi basin, but a certain trend of growth in terms of seasonality is observed towards the North of the basin. This comprehensive study underscores the significance of considering seasonal variations in reference flows, providing valuable insights for water resource management and granting processes, particularly in regions prone to water stress and scarcity.

Key-words: Seasonality. granting. reference flow. seasonality indices.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Classificação do balanço hídrico quantitativo no Brasil (SNIRH, 2023) 17
FIGURA 2 – Demandas de captação de água no Brasil em 2020 (ANA, 2021a). 18
FIGURA 3 – Conceito teórico de Risco, aplicado à PNSH (ANA, 2019b). . . . 20
FIGURA 4 – Trechos típicos de Curvas de Permanência. Vazão Normalizada para a estação 64465000. 26
FIGURA 5 – A)Hidrograma e B) Curva de Permanência para o Rio Tibagi (64465000). 27

FIGURA 6 – Localização da área de estudo e bacia de drenagem. 37
FIGURA 7 – Localização das estações fluviométricas contidas na bacia do Tibagi (ANA, 2023). 39

FIGURA 8 – Estações fluviométricas resultantes, com os respectivos períodos com dados, respeitando o máximo de 2 meses de falhas por ano. 42
FIGURA 9 – Hidrograma (normalizado pela média) de cada estação fluviométrica selecionada para todo o período de dados. 43
FIGURA 10 – Curva de Permanência de cada estação fluviométrica selecionada para todo o período de dados. 43
FIGURA 11 – Desvios absolutos de cada estação fluviométrica, ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul) 45
FIGURA 12 – Vazões de referências específica espacializadas: a) período anual, b) período de verão, e c) período de inverno. 47
FIGURA 13 – Valores de Razão de Sazonalidade para as estações fluviométricas utilizadas, ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul) . . 49
FIGURA 14 – Distribuição espacial de SR nas 17 sub-bacias estudadas. Em a) duas classes de SR, e b) três classes. 49
FIGURA 15 – Classificação climática de Köppen na bacia do Tibagi. Adaptado de ZONAS... (2021). 50
FIGURA 16 – Boxplot dos valores de SR encontrados por classe da classificação climática de Köppen, na bacia do Tibagi. 51
FIGURA 17 – Análise de regressão e correlação de aspectos fisiográficos na bacia do Tibagi, entre o SR e A) latitude, B) longitude, C) altitude e D) área de drenagem. 52

FIGURA 18 – A) Hidrograma e B) Hidrograma Polar das vazões normalizadas pela média (Q/Qmed), de 2003—2014, para a estação 64508020. As vazões iguais ou inferiores a Q_{95} anual são as vazões de estiagem da estação. 54
FIGURA 19 – Ocorrência média das vazões de estiagem, em termos de θ e r, para as estações fluviométricas da bacía do Tibagi. 55
FIGURA 20 – Distribuição espacial do a) Dia Médio (D) de ocorrência de vazões de estiagem nas 17 sub-bacias estudadas, e b) Comprimento do vetor médio (r) 56
FIGURA 21 – Análise de regressão e correlação de aspectos fisiográficos na bacia do Tibagi, entre a latitude e A) o Dia Médio (D) e B) r, e C) r e Altitude e D) Área de drenagem e r. 58
FIGURA 22 – Distribuição espacial dos SH, representando a ocorrência de vazões menores ou iguais a Q_{95} nas sub-bacias do Tibagi, no mês de a) Janeiro, b) Fevereiro, c) Março, d) Abril, e) Maio, f) Junho, g) Julho, h) Agosto, i) Setembro, j) Outubro, k) Novembro, l) Dezembro. 61
FIGURA 23 – Falhas das estações ”ETA - PALMEIRA”, ”PONTA GROSSA MONTANTE”, ”SANTA CRUZ”, ”ETA - IRATI”, ”LAJEADO” e ”ENGENHEIRO ROSALDO LEITÃO” 73
FIGURA 24 – Falhas das estações ”SUMIDOURO - REPRESA ALAGADOS”, ”TIBAGI”, ”CASTRO”, ”FUNDÃO”, ”CHÁCARA CACHOEIRA” e ”LAVRINHA”. 74
FIGURA 25 – Falhas das estações ”UHE CAPIVARA TELÊMACO BORBA”, ”SALTO MAUÁ”, ”PCH APUCARANINHA RESERVATÓRIO”, ” PCH APUCARANINHA BARRAMENTO”, ”PORTO LONDRINA” e ”ASSAÍ MTE. ETA SANEPAR”. 74
FIGURA 26 – Falhas das estações ”LONDRINA MTE. ETA SANEPAR”, ”CHACARA ANA CLÁUDIA”, ”UHE CAPIVARA JATAIZINHO”, ”ETA IBIPORÃ (CM ECOL.)”, ”CORNÉLIO PROCÓPIO MTE.” e ”PONTE PRETA”. 75
FIGURA 27 – Curva de permanência para vazões do período integral e períodos sazonais, da estação 64440000. 76
FIGURA 28 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64441020. 76
FIGURA 29 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64442800. 77
FIGURA 30 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64447000. 77

FIGURA 31 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64450002. 78
FIGURA 32 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64450002. 78
FIGURA 33 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64475000. 79
FIGURA 34 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64477600. 79
FIGURA 35 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64480000. 80
FIGURA 36 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64501000. 80
FIGURA 37 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64504100. 81
FIGURA 38 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64504591. 81
FIGURA 39 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64506000. 82
FIGURA 40 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64507000. 82
FIGURA 41 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64507100. 83
FIGURA 42 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64508020. 83
FIGURA 43 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64508500. 84
FIGURA 44 – Correlação e coeficiente de correlação entre a latitude e as altitudes das estações fluviométricas utilizads. 85

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Vazões outorgáveis de alguns estados brasileiros e as respectivas legislações competentes. 29
TABELA 2 – Estudos que elaboraram propostas de vazão de referência sazonal, e uma síntese dos respectivos resultados. 31
TABELA 3 – Estações fluviométricas inseridas dentro da Bacia Hidrográfica do Tibagi, e suas respectivas localizações (ANA, 2023). 38
TABELA 4 – Estações fluviométricas resultantes, com os respectivos responsáveis e período de dados. 42
TABELA 5 – Vazões de referência (Q_{95}) para o período anual, de inverno e verão, e os respectivos Desvios Absolutos (DAs). As estações fluviométricas foram ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul). 44
TABELA 6 – Vazão específica anual, de inverno e de verão, para todas as estações, ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul) . . 46
TABELA 7 – Valores obtidos pelo método SI, para as todas as estações. . . . 56
TABELA 8 – Distribuição dos valores de Dia Médio (D) de ocorrência de vazões de estiagem na bacia hidrográfica do Tibagi. 57
TABELA 9 – Síntese dos resultados obtidos para todas as estações fluviométricas. 62

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

AM Amazonas

ANA Agência Nacional de Águas

IAP Instituto Ambiental do Paraná

IAT Instituto Água e Terra

ICB Indicador de Comprometimento de Bacia

IGAM Instituto Mineiro de Gestão das Águas

ISH Índice de Segurança Hídrica

Indicador de Comprometimento de Bacia ICB

MG Minas Gerais

MS Mato Grosso do Sul

OCDE Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ONU Organização das Nações Unidas

PERH Política Estadual de Recursos Hídricos

PNRH Plano Nacional de Recursos Hídricos

PNSH Plano Nacional de Segurança Hídrica

RJ Rio de Janeiro

RR Roraima

SEDEST Secretaria do Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo

SEGRH Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídrico

SNIRH Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos

SP São Paulo

UF Unidade Federativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13

2 OBJETIVOS 15

2.1 OBJETIVO GERAL 15

2.1.1 Objetivos Específicos 15

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 16

3.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS . 16

3.1.1 Disponibilidade hídrica no Brasil 16

3.1.2 Segurança Hídrica 18

3.1.3 Instrumentos aplicados à Gestão de Recursos Hídricos 21

3.2 VAZÃO DE REFERÊNCIA 23

3.2.1 Q7,10 24

3.2.2 Curva de Permanência 24

3.2.2.1 Q90,Q95 28

3.3 SAZONALIDADE 29

3.3.1 Vazão de Referência Sazonal 29

3.3.2 Índices de Sazonalidade 34

4 MATERIAL E MÉTODOS 37

4.1 ÁREA DE ESTUDO 37

4.2 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS 38

4.3 INDICADORES DE SAZONALIDADE 39

4.3.1 Vazão de Referência Sazonal 39

4.3.2 índices de Sazonalidade 39

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 41

5.1 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS 41

5.2 VAZÃO DE REFERÊNCIA SAZONAL 44

5.3 ÍNDICES DE SAZONALIDADE 48

5.3.1 Razão de Sazonalidade 48

5.3.2 Índice de Sazonalidade 52

5.3.3 Histograma de Sazonalidade 60

5.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS 60

6 CONCLUSÃO 63

REFERÊNCIAS 65

APÊNDICES 72

APÊNDICE A ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS 73

A.1 FALHAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS 73

A.2 CURVAS DE PERMANÊNCIA PARA CADA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA 75

A.3 CORRELAÇÕES 84

1 INTRODUÇÃO

"Eu também quero a volta à natureza. Mas essa volta não significa ir para trás, e sim para a frente."
Friedrich Nietzsche;

O aumento da população e o processo de urbanização em áreas naturais têm resultado em impactos ambientais diversos (ALVES et al., 2015), como escassez hídrica, cheias e alagamentos, comulativamente. Essas ocorrências também se devem à uma falta de planejamento por parte do poder público e órgãos ambientais, como medidas de prevenção e gestão dos recursos hídricos. Portanto, um dos maiores desafios para os técnicos responsáveis pelo planejamento e operação em sistemas de gestão e aproveitamento de água é fornecer quantidades adequadas, com qualidade apropriada e no momento adequado, para atender os seus múltiplos usos (AZEVEDO; PORTO; PORTO, 1998).

Com esse aumento populacional, a pressão hídrica em áreas de nascentes e córregos superficiais tende a aumentar, podendo levar a impactos diretos oriundos de atividades antrópicas, como abastecimento público, irrigação, indústria, geração de energia, turismo etc. Muitas dessas atividades, dependem da outorga de direito de recursos hídricos para sua funcionalidade que, em sua grande parte, é feita sem considerar os efeitos de sazonalidade das bacias hidrográficas (ou as considera indiretamente, pela vazão de referência que é um indicador de vazões mínimas).

Atrelado a isso, há certas atividades que possuem uma maior demanda em uma determinada época do ano, ou ainda, poderiam ser programadas para captar água e armazená-la em reservatórios, em períodos com maior disponibilidade hídrica, sendo utilizada ao longo do ano. Estas atividades sazonais têm sido limitadas por um referencial de vazão de estiagem, desconsiderando sua sazonalidade de fornecimento (CATALUNHA, 2004), ou considerando-a mas no período como um todo.

Por isso, vários pesquisadores têm avaliando os efeitos de aplicar uma outorga de direitos de recursos hídricos em uma vazão de referência sazonal, ou seja, que considera a distribuição sazonal ao longo do ano (EUCLYDES; FERREIRA; FARIA FILHO, 2006; SILVA; MARQUES; LEMOS, 2011; BOF et al., 2013; SILVA; SILVA; MOREIRA, 2015; RIBEIRO et al., 2017; ARAI et al., 2020; MOREIRA et al., 2020). Adicionalmente, a outorga sazonal já foi apresentada como uma demanda antiga do setor de recursos hídricos (IGAM, 2019).

Outra forma de analisar a sazonalidade é espacialmente, identificando regiões hidrologicamente homogêneas, também no contexto de regionalização de vazões de

estiagem. Para isso, é realizada a divisão de bacias em regiões homogêneas e aplicam-se índices de sazonalidade nessas sub-regiões da bacia, podendo assim caracterizá-la, como feito por Burn, Zrinji e Kowalchuk (1997), Young, Round e Gustard (2000), Laaha et al. (2002), Laaha e Blöschl (2006), Vezza, Comoglio, Viglione et al. (2009) e Beskow et al. (2014).

Assim, no anseio de atender à necessidade de se diversificar a análise da disponibilidade hídrica, considerando a distribuição sazonal ao longo do ano, e caracterizar as regiões hidrologicamente homogênas em parte do estado do Paraná, propôs-se este trabalho. Como objeto de estudo desse trabalho utilizou-se da bacia hidrográfica do Tibagi, e suas estações fluviométricas disponibilizadas no Hidroweb (ANA, 2023).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é determinar as vazões de referências sazonais, baseadas em um período semestral, e a aplicação de índices de sazonalidade (Razão de Sazonalidade- SR, Índice de Sazonalidade- SI e Histograma de Sazonalidade- SH), na bacia hidrográfica do Tibagi (PR), como estudo de caso, e assim fazer uma caracterização espacial da sazonalidade das regiões da bacia, relacionando com aspectos fisiológicos e climáticos locais.

2.1.1 Objetivos Específicos

1. Determinar as vazões de referência sazonais para a bacia do Tibagi;
2. Avaliar os padrões de sazonalidade regionais da bacia do rio Tibagi por meio dos índices de sazonalidade SR, SI e SH.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

“Não há conhecimento que não tenha valor.”
Edmund Burke;

Neste capítulo, será feita uma revisão teórica sobre a disponibilidade hídrica no Brasil, explorando conceitos essenciais para entender a sazonalidade. Além disso, será apresentada a produção existente sobre estudos de vazão de referência sazonal e os índices hidrológicos que serão utilizados.

3.1 DISPONIBILIDADE HÍDRICA E MANEJO DE RECURSOS HÍDRICOS

3.1.1 Disponibilidade hídrica no Brasil

Primeiramente é necessário esclarecer a diferença entre a disponibilidade hídrica do território nacional e a sua produção hídrica. A produção hídrica refere-se apenas ao incremento de vazão que é produzido em território brasileiro, enquanto que a disponibilidade hídrica em si é igual à soma da água proveniente dos países ao redor, mais a produção hídrica (LIMA, 2001).

Na América do Sul, onde se tem a segunda maior disponibilidade hídrica per capita do mundo, já se observam desequilíbrios entre a oferta e a demanda hídrica, que ocorre, em grande parte das vezes, pelo fato de os recursos hídricos não serem uniformemente distribuídos na região (PEDDE; KROEZE; RODRIGUES, 2013).

Cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta está em território brasileiro. Todavia, nem sempre os recursos hídricos estarão presentes em quantidades adequadas onde se localizam as maiores concentrações urbanas e as altas demandas (WU et al., 2008). Como no Brasil, que, enquanto a Região Norte concentra aproximadamente 80% da água disponível, regiões próximas ao Oceano Atlântico possuem menos de 3% dos recursos hídricos do país (JADE, 2018).

Tendo em vista esse cenário, ilustrado na Figura 1, é possível concluir que boa parte das áreas mais populosas do país apresentam uma classificação “Muito crítica” com relação à disponibilidade desses recursos hídricos. O balanço hídrico quantitativo é um indicador do nível de comprometimento hídrico, ou seja, com o papel de identificar quanto da disponibilidade hídrica está sendo utilizada para atendimento de usos consuntivos. Isso é dado pela razão entre a demanda e a oferta e é apresentado em termos de percentuais de comprometimento (SNIRH, 2023).

Com o intuito de auxiliar na melhor compreensão de como se configura essa demanda, a Figura 2 exibe as demandas de recursos hídricos no Brasil para o ano

de 2019. Percebe-se que quase 60% é destinado diretamente para o agronegócio (reunindo “Uso Animal” e “Irrigação”), enquanto que se têm aproximadamente 27% para o consumo humano (contando rural e humano juntos), e o resto distribuído entre setores de Indústria, Termelétricas e mineração (ANA, 2021a). Ressaltando-se ainda, que tem-se um valor médio de 61.5 trilhões (l/ano) de água demandada, no Brasil, para todas as atividades outorgadas de usos consuntivos e não consutivos somados.

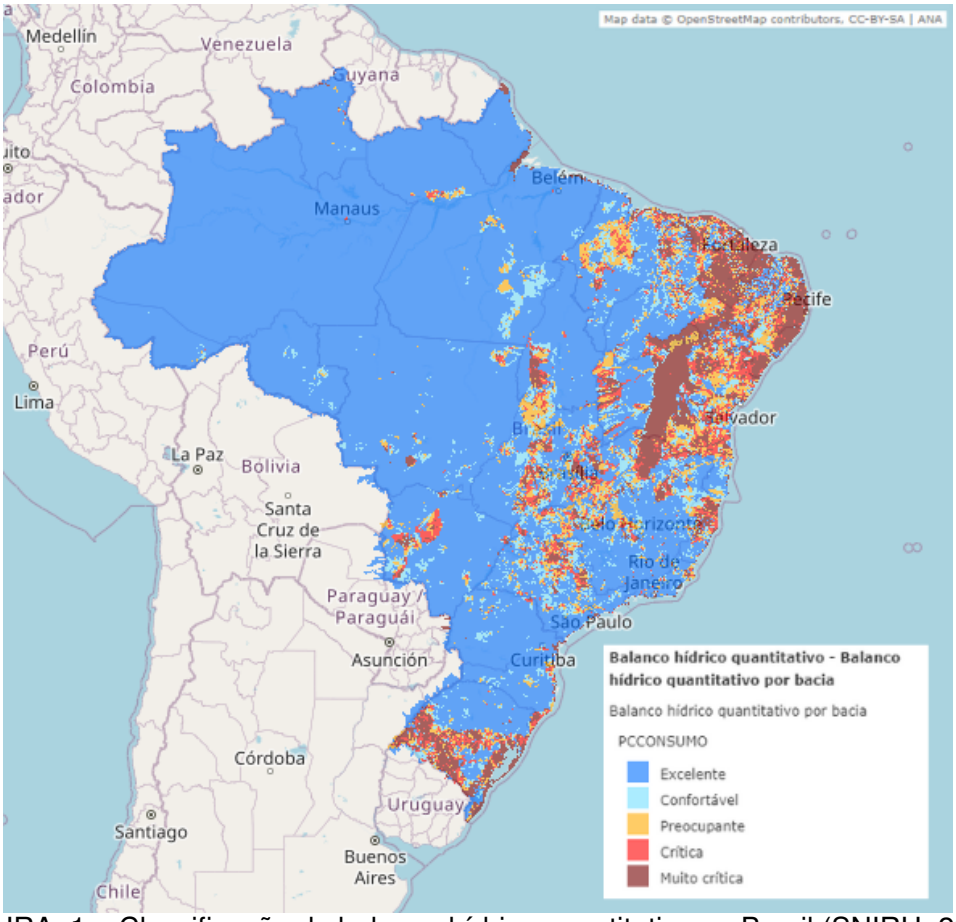

FIGURA 1 – Classificação do balanço hídrico quantitativo no Brasil (SNIRH, 2023)

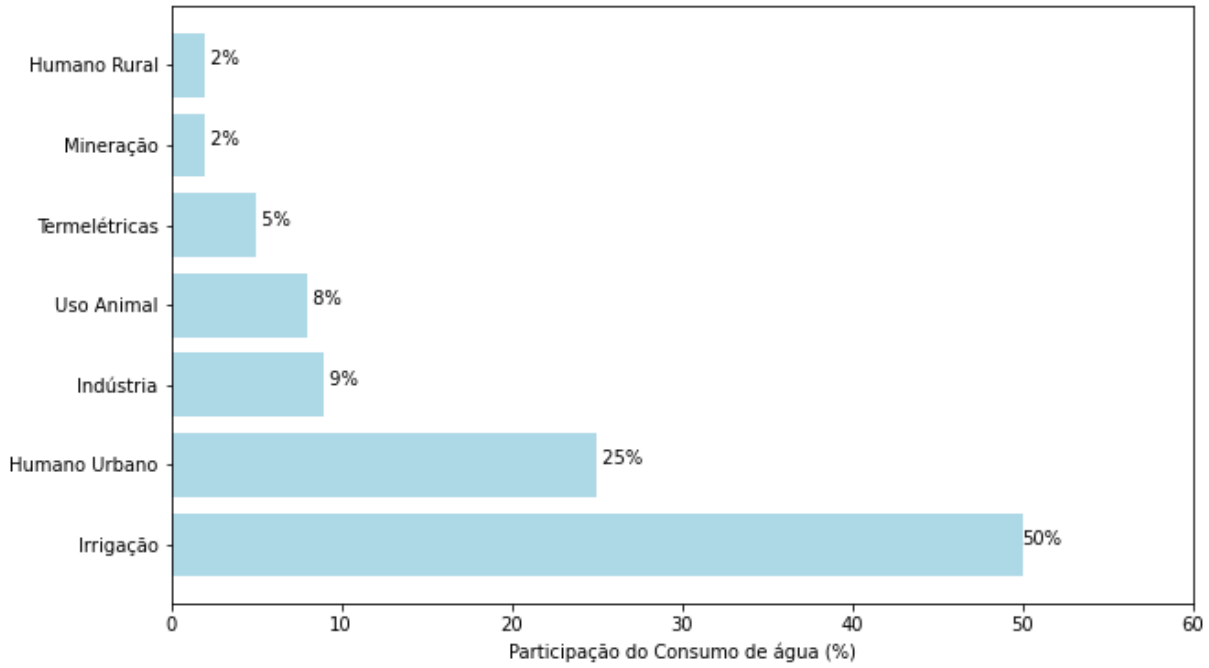

FIGURA 2 – Demandas de captação de água no Brasil em 2020 (ANA, 2021a).

Pedde, Kroeze e Rodrigues (2013) estimavam à epoca que, apesar do crescimento da população e também um estimado crescimento da vazão previsto para as próximas décadas, esse aumento não seria suficiente para suprir a demanda populacional, o que acarretaria diretamente na diminuição da disponibilidade hídrica na América do Sul. Neste contexto, há uma demanda crescente de recursos hídricos, tendo em vista o cenário de crescimento populacional, que atualmente está em torno de 0,53% ao ano (MUNDIAL, 2021).

Por conta dessa crescente demanda, gestores e pesquisadores vêm buscando meios de aprimorar o sistema de gestão dos recursos hídricos, visando garantir o atendimento à essa demanda de um recurso limitado em quantidade no território e o qual, muitas vezes, tem sua qualidade impactada por atividades antrópicas (JOHNSSON et al., 2018).

3.1.2 Segurança Hídrica

Apesar da Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997) apresentar intrinsecamente o conceito de Segurança hídrica, com suas diretrizes e instrumentos, conforme apresentados na seção 3.1.3, somente anos depois, com as crises hídricas que ocorreram no país (2014 e 2021), que esse conceito veio de fato a ganhar espaço e ser debatido.

Em 2013, no Dia Mundial da Água, a Organização das Nações Unidas - ONU reforçou o tema da água na agenda de debates do Conselho de Segurança ao anunciar o seu conceito de segurança hídrica (ESCAP et al., 2013):

> “A capacidade de uma população de salvaguardar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para garantir os meios de subsistência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico; para garantir a proteção contra a poluição e desastres relacionados à água, e para a preservação de ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política”.

Para a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a segurança hídrica é gerir os riscos associados à água, incluindo riscos de armazenamento de água, excesso, poluição da água e riscos de enfraquecer ou debilitar a resiliência dos sistemas de água doce (OECD., 2013).

Com o objetivo de assegurar um planejamento integrado aplicável considerando a segurança hídrica, a ANA , juntamente com o Ministério do Desenvolvimento Regional, elaborou o Plano Nacional de Segurança Hídrica - PNSH , de natureza estratégica e relevância regional, tendo como planejamento até o horizonte de 2035, para redução dos impactos de secas e cheias. O Plano foi estruturado baseado nos graus de segurança hídrica em todo o país, definidos pelo Índice de Segurança Hídrica – ISH , que incorpora o conceito de risco aos usos da água de maneira simplificada e de fácil entendimento dos níveis de segurança hídrica.

No contexto do PNSH, o risco hídrico, melhor representado na Figura 3, tratado mediante balanços hídricos entre demanda e oferta de água, é caracterizado em duas tipologias: i) Risco pós-déficit - corresponde ao valor em risco quando uma parcela da demanda não está sendo suprida (relação entre demanda e disponibilidade hídrica superior a 100%); e, ii) Risco iminente - corresponde ao valor em risco que pode ocorrer no limiar do déficit, porém, ainda antes de sua ocorrência (sendo progressivamente maior à medida que o resultado da relação entre demanda e disponibilidade hídrica se aproxima de 100%).

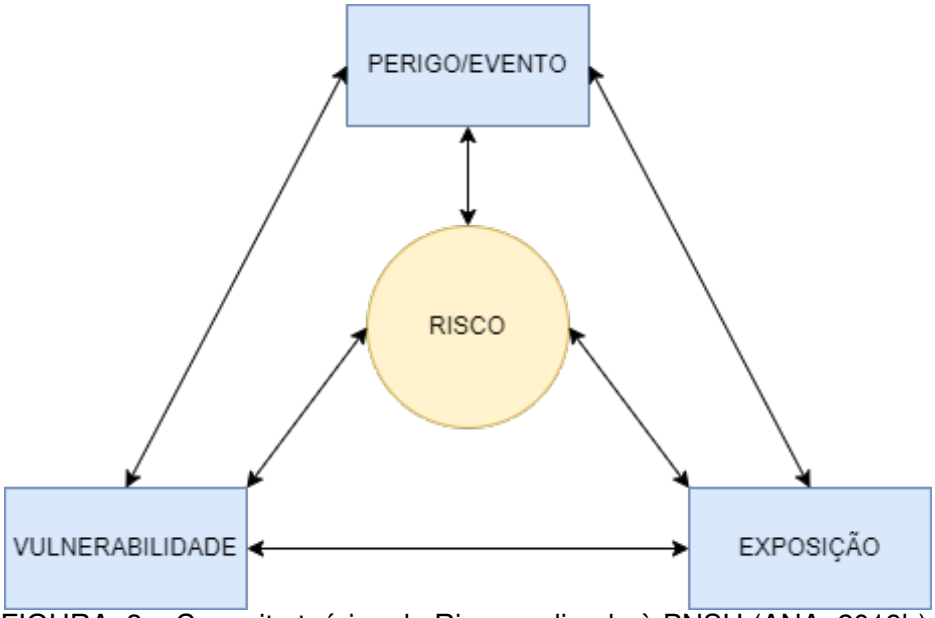

FIGURA 3 – Conceito teórico de Risco, aplicado à PNSH (ANA, 2019b).

Esses riscos são calculados em termos de população exposta a déficits hídricos (dimensão humana do ISH) e de valores monetários de produção econômica perdida devido a demandas não atendidas (dimensão econômica) (ANA, 2019b).

O ISH considera as quatro dimensões do conceito de segurança hídrica (humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência), agregadas para compor o índice distribuiído para o Brasil, representativo da diversidade nacional (ANA, 2019b). Cada dimensão é composta de um ou mais indicadores, capazes de quantificar aspectos pertinentes a ela.

O ISH apresentado pela ANA (2019b) é definido por cinco faixas de graduação, de 1 a 5, em ordem decrescente do nível de segurança hídrica. Cada indicador do Índice é formado por uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis. E para cada dimensão são atribuídos pesos a esses indicadores para o cálculo de média ponderada e da normalização do índice. As quatro dimensões então são combinadas para formar o ISH, como supracitado.

Uma das principais variáveis para o estabelecimento do ISH é o balanço hídrico, já apresentado na Seção 3.1.1 (ilustrado na figura 1), dado pela razão entre a demanda e a disponibilidade nas bacias. A variável fornece o nível de comprometimento da oferta de água e é aplicado às dimensões Humana, Econômica e Ecossistêmica do Brasil.

Portanto, o ISH, nas diferentes dimensões traz simplicidade no que se refere a identificação das regiões que merecem maior atenção, criando um direcionamento dos esforços tanto na esfera local como nacional.

3.1.3 Instrumentos aplicados à Gestão de Recursos Hídricos

A água é um elemento essencial para a garantia da qualidade e dignidade da vida humana. Portanto, fez-se necessário o estabelecimento de políticas, instrumentos e legislações para a sua gestão. No Brasil, instituída pela Lei Federal n^{o} 9.433, de 8 de janeiro de (1997)- a ”Lei das Águas”-, como é popularmente conhecida, estabelece a implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), e dispõe, no Capítulo IV, os respectivos instrumentos, sendo eles: i) Os Planos de Recursos Hídricos; ii) O enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; iii) A outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; iv) A cobrança pelo uso de recursos hídricos; v) A compensação a municípios; vi) O Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Os planos de recursos hídricos são definindos, pela própria Lei das Águas, como planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos.

O enquadramento é um instrumento de planejamento, pois não se baseia apenas na classificação do estado atual de qualidade em um segmento do corpo d’água, mas estabelece a meta de qualidade de água a ser mantida ou alcançada, ou seja, a qualidade de água que o corpo hídrico deve manter ou que deveria apresentar e precisa ser alcançada para atender às necessidades estabelecidas pela sociedade, de acordo com os usos pretendidos (ANA, 2020).

Ainda, o Art.^{o} 30 da Lei 9.433/2001, deixa claro que a competência de implementação do PNRH cabe aos Poderes Executivos Estaduais e do Distrito Federal, sendo algumas delas: outorgar os direitos de uso de recursos hídricos e regulamentar e fiscalizar os seus usos. Assim como, o enquadramento dos recursos hídricos e fiscalização também há a competência do órgão estadual.

Portanto, a Lei n^{o} 9.433/1997, instituí a Política Nacional de Recursos Hídricos e estabelece como um de seus instrumentos a Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos. Tratando-se de um ato administrativo mediante o qual o Poder Público outorgante (União, Estados ou Distrito Federal) faculta ao outorgado (usuário da água) o uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nas condições expressas no respectivo ato (SILVA; MONTEIRO, 2004).

Segundo a referida Lei, o instrumento da outorgas de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.

A Lei n.^{o} 9.984 de (2000), que criou a Agência Nacional de Águas (ANA), conferiu a esta Agência a competência para emitir outorgas de direito de uso dos recursos hídricos de domínio da União, isto é, aqueles que passam por mais de um

estado brasileiro ou por território estrangeiro (transfronteiriços). A maioria dos Estados e o Distrito Federal possui órgãos próprios com competência legal para emitir as outorgas de direito de uso das águas de seus domínios.

Com relação à cobrança pelo uso de recursos hídricos sujeitos à Outorga de Direito de Uso, estabelecida pela própria Lei das Águas (BRASIL, 1997), têm-se como seus objetivos: i) reconhecer a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor; ii) incentivar a racionalização do uso da água; e iii) obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos Planos de Recursos Hídricos (ANA, 2021b).

Por fim, a última ferramenta disposta na Lei nº 9.433/1997 é o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos- SNIRH , que é a base para disponibilização das informações sobre águas no Brasil, contribuindo para a difusão do conhecimento sobre recursos hídricos. Com o SNIRH, é possível consultar relatórios, navegar em mapas, explorar indicadores, fazer o *download* de dados hidrológicos, consultar os sistemas e obter acesso em geoserviços (SNIRH, 2023), ou seja, o sistema dispõe todas as informações publicamente e ferramentas à respeito dos recursos hídricos para a sociedade civil.

No estado do Paraná, em cumprimento à Lei das Águas, no dia 26 de novembro de (1999) foi instituída a Lei n.º 12.726 que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos- PERH e criou o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídrico - SEGRH .

O PERH-PR têm como objetivos: i) assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de águas em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; ii) a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável; iii) a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Os objetivos do SEGRH são: i) reunir, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos do Estado do Paraná, sem prejuízo de informações sócio-econômicas relevantes para o seu gerenciamento; ii) atualizar, permanentemente, as informações sobre disponibilidade e demanda de recursos hídricos e sobre ecossistemas aquáticos em todo o território do Estado; iii) fornecer subsídios para a elaboração de Plano de Bacia Hidrográfica; iv) apoiar as ações e atividades de gerenciamento de recursos hídricos no Estado do Paraná.

Em 13 de Outubro de (2009), por meio da Lei n.º 16.242, foi criado o Instituto das Águas do Paraná, encubida a função órgão executor do Sistema Estadual de

Gerenciamento de Recursos Hídricos. Conquanto, 10 anos depois, em 18 de dezembro de 2019, ocorreu a incorporação do Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná e do Instituto das Águas do Paraná, pelo Instituto Ambiental do Paraná - IAP . Além disso, a entidade passou a se denominar Instituto Água e Terra - IAT , vinculada à Secretaria do Estado do Desenvolvimento Sustentável e do Turismo - SEDEST .

Sendo assim, a competência das outorgas no estado do Paraná são atribuídas ao IAT, sendo sujeitas as análises técnicas e jurídicas, com os procedimentos para isto descritos no Decreto 9.957, que dispõe então sobre o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos (PARANa, 2014).

A autoridade pública concede a utilização da água de tal maneira que permita seu emprego bem como assegure ao gestor o controle qualitativo e quantitativo de seu uso (FERREIRA, 2010). A vazão outorgada, apresentada na equação 3.1, para os usuários será dada por uma porcentagem da vazão mínima de referência do corpo hídrico, que será explicada na Seção 3.2,

$$Q_{MAX} = P \cdot Q_{REF} - \sum (Q_M + Q_J) \ , \tag{3.1}$$

na qual: Q_{MAX} é a vazão máxima disponível para ser outorgada, em $m^3 s^{-1}$; P é uma percentual da vazão máxima outorgavel, variando de 0 à 1; Q_{REF} é a vazão de referência estimada na seção de interesse, em $m^3 s^{-1}$; Q_M é a vazão concedida a montante da seção de interesse, em $m^3 s^{-1}$; Q_J é a vazão concedida a jusante, que dependem da vazão na seção de interesse, em $m^3 s^{-1}$;

Em maio de 2022, foi publicada a Portaria IAT n.^{o} 125 de 06/05/2022, que dispõe sobre a atualização do Manual Técnico de Outorgas, especificadamente sobre os prazos máximos permitidos para cada modalidade de uso através dos documentos de outorga prévia, outorga de direito, declaração de uso independente de outorga e declaração de anuência prévia (PARANÁ, 2022).

3.2 VAZÃO DE REFERÊNCIA

A vazão de referência pode ser definida como um valor de vazão que passa a representar o limite superior de utilização da água em um curso d'água e é, como supracitado, um dos principais critérios à implementação de um sistema de outorga (SILVA; OLIVEIRA et al., 2006).

A vazão de referência ainda pode ser dada, por exemplo, como um valor único para todos os meses do ano e todos os anos, ou como 12 valores de vazão, um para cada mês do ano, para todos os anos, o que torna a implementação e a fiscalização mais complexas que no caso anterior (CAMARA, 2003).

De modo geral, duas abordagens têm sido usadas nacionalmente como critério para definição de vazões mínimas de referência: vazões mínimas com determinado tempo de recorrência e vazões de curva de permanência (ANA, 2019a).

Em rios perenes ou rios de regime permanentes, a outorga é usualmente feita com base na Q_{90} ou Q_{95}, que são vazões baseadas nas curvas de permanência de rios (pelo menos 90% e 95% do tempo o corpo hídrico tenderão a ter uma vazão igual ou superior a estas, respectivamente[1]) ou a $Q_{7,10}$ (média das vazões de 7 dias consecutivos da estiagem com tempo de retorno de 10 anos).

Portanto, conforme a dominialidade do curso d'água a ser analisado, Estados ou a União têm autonomia para definir qual deverá ser a vazão de referência para balizar o ato da outorga (ANA, 2019a).

As análises técnicas das solicitações de outorga de recursos hídricos, em grande parte dos órgãos gestores, se baseiam em duas vertentes: balanço hídrico do empreendimento; e, balanço hídrico da bacia hidrográfica. A segunda vertente é a que fornece indicadores de comprometimento, que expressam em que medida o usuário se apropria da vazão de referência (indicador de comprometimento individual) e em que medida o conjunto de usuários já compromete esta vazão (indicador de comprometimento coletivo) (ANA, 2019a).

Ainda, conforme ANA (2019a), com base na interpretação dos indicadores, o tomador de decisão dá o encaminhamento adequado à solicitação de outorga. Por exemplo, em alguns órgãos gestores, os comprometimentos individual e coletivo não podem superar 20% e 80% da vazão de referência, respectivamente . É também por meio do indicador que o tomador de decisão avalia o cumprimento a eventuais normativos referentes a vazões mínimas que devem ser mantidas no rio.

3.2.1 Q7,10

A $Q_{7,10}$, como mencionado, é a mínima associada a vazão média de 7 dias consecutivos, com um período de retorno de 10 anos (FERREIRA, 2010). Para essa vazão de referência, a estatística de vazão mínima é obtida por meio do ajuste de uma distribuição estatística, como a de Gumbel, Weibull ou outras (ANA, 2019a).

3.2.2 Curva de Permanência

A elaboração da curva de permanência de um corpo hídrico é uma das análises estatísticas mais simples e mais importantes na hidrologia (COLLISCHONN; DORNEL-

[1] Como as curvas de permanência são baseadas na série histórica do corpo hídrico, os valores de vazões registrados poderão ser observados novamente no futuro, em termos estatísticos, caso a série se mantenha estacionária (parâmetros estatísticos como média e variância se mantenham inalterados).

LES, 2013). Com ela, é possível fazer análises de como se comporta a vazão do rio ao longo do tempo, como por exemplo a porcentagem do tempo em que um rio apresenta vazões em um determinado intervalo, ou no caso de uma análise de gestão, se um rio é capaz de atender a uma determinada demanda.

Para compreender a curva de permanência, é necessário estabelecer a frequência relativa acumulada. A frequência acumulada é dada pela equação 3.2, na qual x é o valor de corte de vazão estabelecido e P é a probabilidade, conforme

$$F(x) = P(Q \leq x). \tag{3.2}$$

Para obter os valores empíricos, ordena-se as vazões Q_x e obtém-se a frequência relativa acumulada, como mostra a equação 3.3, onde n é o número de dados observados:

$$F(Q_x) = \sum_{x=0}^{n} \frac{x}{n+1} \tag{3.3}$$

A curva de permanência é uma variação do diagrama de frequências relativas acumuladas, na qual a frequência de não superação é substituída pela porcentagem de um intervalo de tempo específico em que o valor da variável, indicado em abscissas, foi igualado ou superado (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Esta porcentagem do tempo é usualmente denominada garantia (ANA, 2019a).

Geralmente essas curvas apresentam inflexões que as definem em três trechos: o primeiro e o último descrevem o comportamento das vazões de máximas e mínimas, respectivamente, enquanto que o trecho médio representa a faixa dominante de vazões (CPRM/ANEEL, 2001), como ilustra a Figura 4.

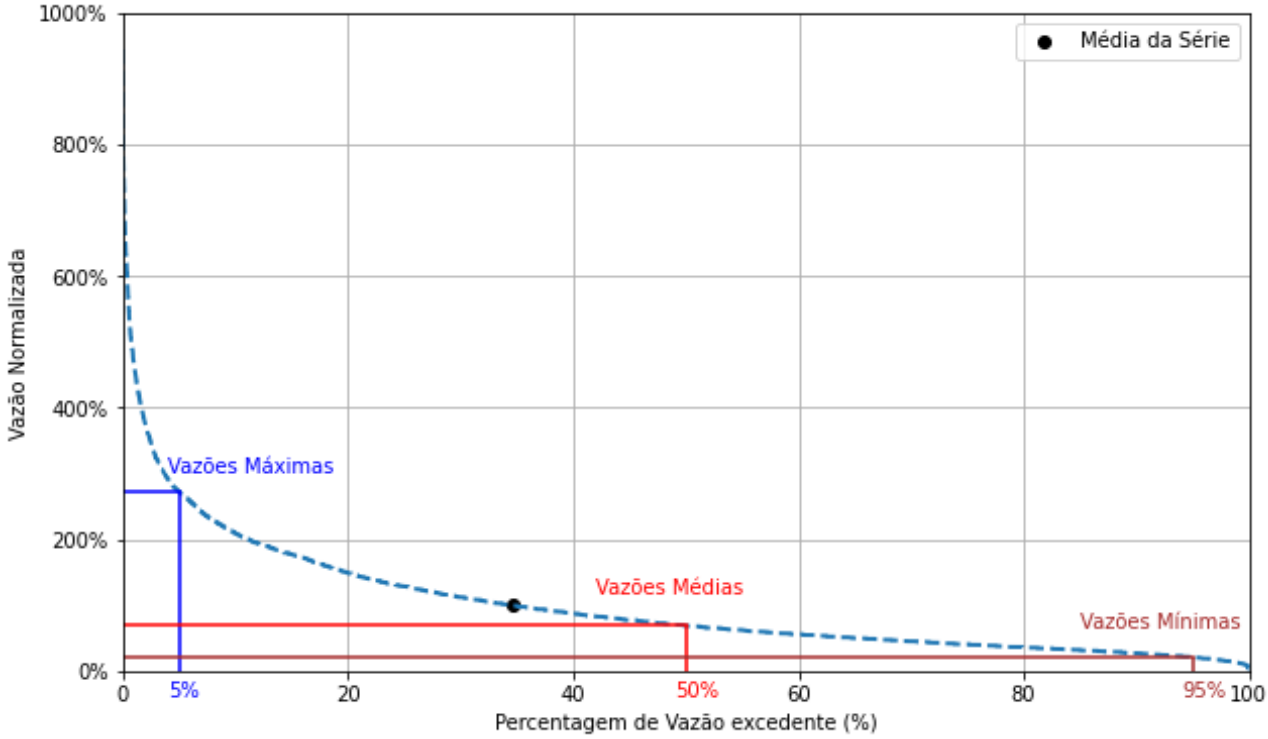

FIGURA 4 – Trechos típicos de Curvas de Permanência. Vazão Normalizada para a estação 64465000.

Como exemplo, a Curva de Permanência para a Estação 64465000 (Tibagi) é elaborada (Figura 5), para o período de 01/01/2005 à 31/12/2010, com as vazões diárias— obtidas pelo Hidroweb (ANA, 2023).

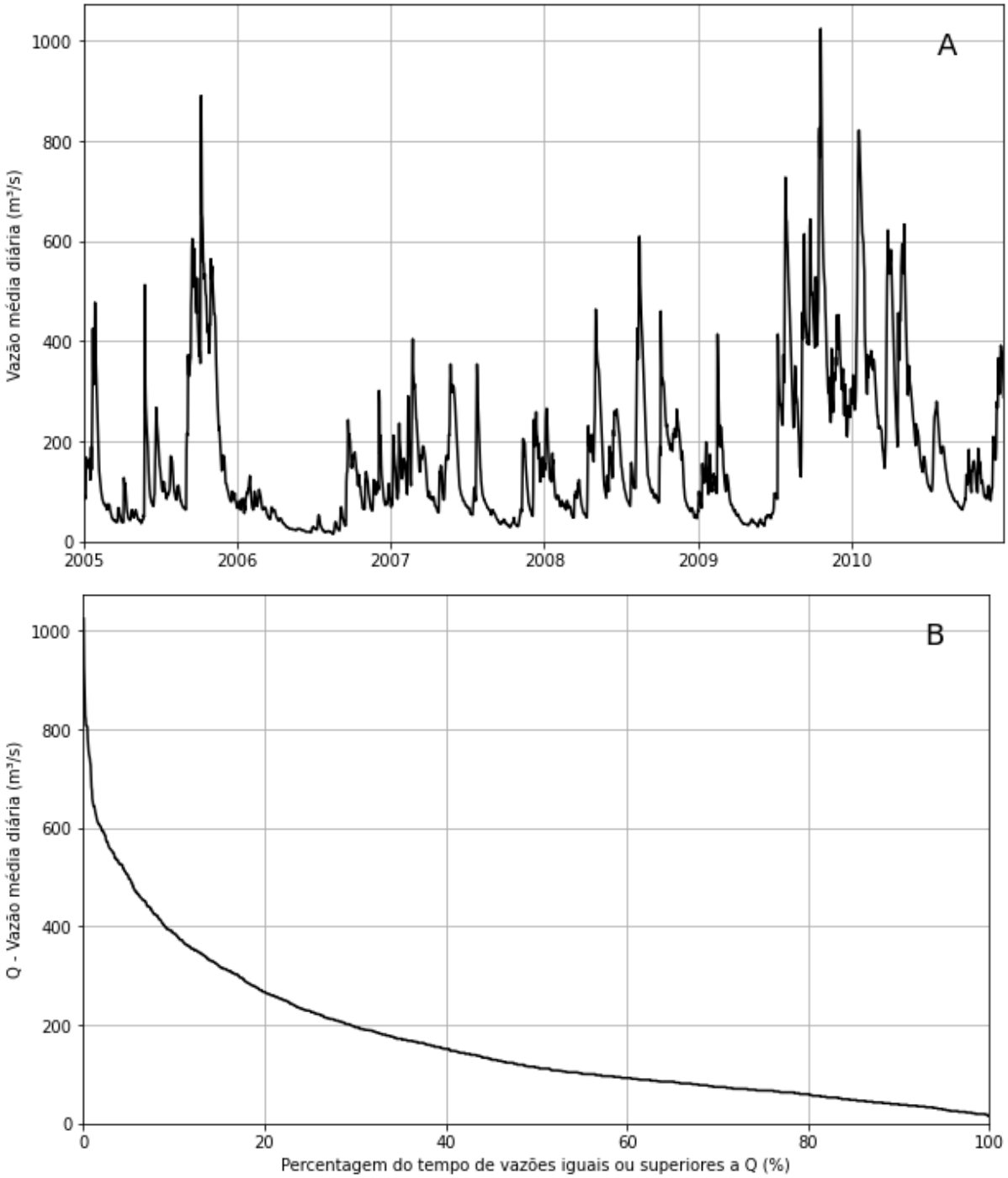

FIGURA 5 – A)Hidrograma e B) Curva de Permanência para o Rio Tibagi (64465000).

Após a elaboração da curva de permanência, obtém-se a vazão correspondente desejada à porcentagem do tempo de superação desejado. Ao levar este raciocínio no limite, para o caso de uma vazão de referência, a vazão mínima do rio é a Q_{100}, ou seja, que nunca foi observada vazão inferior àquela, e portanto, com a qual pode-se contar sem risco de falha. No entanto, a Q_{100} é uma vazão extremamente baixa, que limitaria significativamente o uso da água(ANA, 2019a).

Além disso, a maioria dos usuários tolera um certo nível de risco de não ter a

sua demanda atendida. Por exemplo, a maior parte das culturas irrigadas pode tolerar alguns dias sem água. Já usuários como abastecimento público têm uma tolerância menor ao risco, ou seja, devem ser atendidos em uma porcentagem maior do tempo (ANA, 2019a). E por isso, a vazão de referência adotada em muitos estados e pela própria Agência Nacional de Águas é a Q_{90} ou a Q_{95}.

3.2.2.1 Q90,Q95

A curva de permanência relaciona os valores de vazão e a frequência com que esses valores ocorreram ao longo do tempo do histórico de observações, retratando assim as características de regularização natural do rio (SILVA; FARIAS; COELHO, 2011).

Com uma curva de permanência elaborada, a Q_{95} pode ser definida como a vazão mínima que espera-se estar em um corpo hídrico em, pelo menos, 95% do tempo. Ou seja, tendo em vista ser igualada ou superada em 95% do tempo. Assim, o poder concedente assume arbitrariamente que, em média, os usuários têm uma tolerância de 5% ao risco de desatendimento hídrico (ANA, 2019a). O mesmo raciocínio vale para a obtenção da Q_{90}, ou seja, seria o valor de vazão superado em 90% do tempo, com uma tolerância de 10% ao risco de desatendimento hídrico.

Portanto, conforme Silva, Farias e Coelho (2011), a Q_{95} e a Q_{90} têm sido utilizadas como valores de referência para concessão de outorgas de uso da água e na caracterização da disponibilidade hídrica dos cursos d'água, além de terem aplicações na área de biologia, hidráulica, navegação e aproveitamentos hidrelétricos.

No Paraná, de acordo com o Manual técnico de Outorgas (SUDERHSA, 2006), a vazão de referência adotada é a vazão natural do corpo hídrico com permanência de 95% do tempo, a Q_{95}. As vazões utilizadas de critérios de outorgas (baseadas nas vazões mínimas de referência), conforme mostra o produto $P \cdot Q_{REF}$ da equação 3.1, de alguns estados do Brasil, são apresentadas na Tabela 1.

Estado	Vazão Outorgável	Legislação Referente
Rio Grande do Sul	50% da Q_{90}	Resolução CRH nº 141/2014
Santa Catarina	50% da Q_{98}	Portaria SDS nº 43/2010
Paraná	50% da Q_{95}	Decreto n.º 4.646/2001
São Paulo	50% da $Q_{7,10}$	Lei n.º 9.034/1994
Minas Gerais	50% da $Q_{7,10}$	Portaria IGAM nº 48/2019
Rio de Janeiro	40% da Q_{95}	Resolução INEA nº 162/2018
Espírito Santo	50% da Q_{90}	Instrução Normativa nº 13/2009
Mato Grosso do Sul	70% da Q_{95}	Resolução CERH/MS nº 25/2015
Mato Grosso	70% da Q_{95}	Resolução CEHIDRO nº 27/2009
Goiás	50% da Q_{95}	Resolução CERHí nº 22/2019
Distrito Federal	80% da $Q_{7,10}$, Q_{90}, Q_{95}, Q_{mmm}[2]	Resolução Adasa nº 350/2006
Bahia	80% da Q_{90}	Instrução Normativa SRH/BA nº 01/2007
Amazonas	75% da Q_{95}	Resolução CERH-AM nº 01/2016

TABELA 1 – Vazões outorgáveis de alguns estados brasileiros e as respectivas legislações competentes.

3.3 SAZONALIDADE

As séries temporais, geralmente possuem componentes estocásticos e determinísticos[3]. As flutuações naturais, como as presentes em escoamento em rios, precipitações, evapotranspiração, níveis piezométricos de águas subterrâneas, umidade de solo, e outras variáveis hidrológicas— geralmente anuais— são devido as sazonalidades, ou seja, componentes de periodicidade (CRUZ, 2001).

A sazonalidade refere-se a padrões repetitivos e previsíveis que ocorre em um determinado intervalo de tempo, como estações do ano, meses ou dias. No contexto de corpos hídricos, a sazonalidade desempenha um papel importante na influência dos fluxos de água e nas condições hidrológicas ao longo do tempo. Essa distribuição natural da quantidade de água e a sazonalidade dos eventos pluviais são responsáveis por problemas como inundações, impactos na biodiversidade, qualidade da água, e principalmente de escassez hídrica (MOREIRA et al., 2020).

3.3.1 Vazão de Referência Sazonal

Para lidar com esse fenômeno presente nos escoamentos em corpos hídricos superficiais, diversos autores como Euclydes, Ferreira e Faria Filho (2006), Silva,

[2] A Q_{mmm} representa a vazão média das mínimas mensais.

[3] Uma série estocástica pode ser definida como uma sequência de observações aleatórias que seguem funções de probabilidade, e variam (ou podem variar) com o tempo. Já uma série determinística pode ser observada quando depende de observações passadas produzidas por alguma função matemática (SHUMWAY; STOFFER; STOFFER, 2000). Uma série com comportamento estocástico e determinístico, irá apresentar um comportamento aleatório, porém também irá apresentar um comportamento determinístico, com os valores apresentando dependência com as observações históricas.

Marques e Lemos (2011), Bof et al. (2013), Silva, Silva e Moreira (2015), Ribeiro et al. (2017), Arai et al. (2020) e Moreira et al. (2020) elaboraram estudos e propostas com a finalidade de melhorar a gestão e a distribuição desse recurso, propondo uma outorga dos direitos de uso de recursos hídricos baseada em uma vazão de referência sazonal, ou seja, construir uma Q_{95}, Q_{90} ou $Q_{7,10}$ para diferentes períodos do ano, ao invés de um valor único para o ano todo.

Os estudos compararam as bases de vazão de referência dos órgãos, que é anual, para a vazão sazonal proposta, como indicado na equação:

$$DR = \frac{Q_{sazonal} - Q_{anual}}{Q_{anual}} \cdot 100 \ , \tag{3.4}$$

no qual DR é uma diferença relativa percentual da disponibilidade hídrica, %; $Q_{sazonal}$ é a vazão estimada em base sazonal, em $m^3 s^{-1}$; Q_{anual} é a vazão estimada em base anual, em $m^3 s^{-1}$.

Ao realizar o cálculo da relação entre as vazões sazonais e as vazões anuais por meio da DR, obtêm-se os resultados que são representados, pelos autores, em gráficos para possibilitar uma análise mais aprofundada. Uma síntese dos principais estudos nacionais encontrados sobre vazões de referências sazonais é apresentada na Tabela 2.

Observa-se que dos 8 estudos levantados, 6 localizam-se inteira ou parcialmente dentro do estado de Minas Gerais, um no Amazonas, um no Mato Grosso do Sul, um no Rio de Janeiro e dois parcialmente em São Paulo. Ainda, três dos cinco estados com estudos elaborados ocupam o ”top 10” no ranking de estados de valor bruto de produção agrícola no país, sendo São Paulo em 3º, Minas Gerais em 4º e Mato Grosso do Sul em 7º (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2020).

Na região sudeste, na qual se concentra boa parte dos estudos citados, o período das chuvas coincide com o verão, em que o meio urbano necessita de maior quantidade de água para sua manutenção (CATALUNHA, 2004). Portanto, faz-se essencial a realização de estudos que analisem e levem em consideração a sazonalidade no fornecimento de água, levando em conta as demandas atuais de cada região, tanto para uso agrícola, urbano e industrial.

Muitas das bacias hidrográficas estudadas são caracterizadas por áreas com uma significativa dependência agrícola. Nesse contexto, a busca pela compreensão da sazonalidade das vazões mínimas de referência ganha ainda mais relevância.

Nos trabalhos apresentados na Tabela 2, principalmente os que analisaram períodos sazonais semestrais, com posse das séries históricas de cada estação fluvio-

UF	Autores	Período sazonal analisado	Síntese dos resultados dos estudos
MG, SP e RJ	Catalunha (2004)	Período Mensal, Bimestral, Trimestral e Semestral	Dos períodos analisados, o trimestral apresentou melhores características em relação aos valores mínimos de vazão, podendo ser adotado como referência no processo de outorga.
MG	Euclydes, Ferreira e Faria Filho (2006)	Período Semestral	Utilizando-se o critério da outorga sazonal, foi possível aumentar a vazão a ser outorgada em até 61,8% (35,6 m^3/s no período seco para 57,6 m^3/s no período chuvoso).
MG	Silva, Marques e Lemos (2011)	Período Trimestral	A consideração da sazonalidade da disponibilidade hídrica implicou (na média) aumento da vazão outorgável de 379%, no primeiro trimestre, 174,5%, no segundo trimestre, 36,1%, no terceiro trimestre e 14,7%, no quarto trimestre.
MG	Bof et al. (2013)	Período Mensal	Analisando pelo critério do IGAM[4], observou-se que houve um aumento que variou entre 91,0% e 168,6%. Enquanto que pelo critério da ANA, o aumento do volume captado foi de 26,7% a 67,1%.
MG	Silva, Silva e Moreira (2015)	Período Quadrimestral e Semestral	Não houve diferença relativa da $Q_{7,10}$ no semestre e quadrimestre secos em relação a base anual, enquanto que as vazões Q_{90} e Q_{95} nestes dois períodos sazonais foram menores comparadas ao período anual.
AM[5]	Ribeiro et al. (2017)	Período Semestral e Anual	A adoção das vazões mínimas no período chuvoso $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90}, em substituição às vazões mínimas de referência considerando período anual, permite aumentos percentuais de 145,3%, 132,4%, e 138,7% respectivamente.
MS	Arai et al. (2020)	Período Mensal	A substituição do critério anual (que é padrão no Brasil) para concessão de água, pelo critério mensal, aumentaria potencialmente o uso e aproveitamento na gestão de recursos hídricos.
MG e SP	Moreira et al. (2020)	Período Mensal	Tanto para $Q_{7,10}$ mensais, quanto para Q_{90} e Q_{95} mensais, implicam em alterações significativas para uso potencial de recursos hídricos. Variando de valores de cerca de 10% (meses com menor disponibilidade de água) a valores superiores a 393% (meses com maior disponibilidade), para a $Q_{7,10}$. Para Q_{90} e Q_{95} há desde reduções de 33% (meses com menor disponibilidade de água) até aumentos superiores a 100% (meses com maior disponibilidade).

TABELA 2 – Estudos que elaboraram propostas de vazão de referência sazonal, e uma síntese dos respectivos resultados.

[4] O Instituto Mineiro de Gestão das Águas é vinculado à Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). No âmbito federal, a entidade integra o Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama) e o Sistema Nacional de Recursos Hídricos (SNGREH). Na esfera estadual, o IGAM integra o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema) e o Sistema Estadual de Recursos Hídricos (SEGRH).(GERAIS, 2020)

[5] A bacia hidrográfica estudada encontra-se na divisa entre Brasil, Guiana Francesa e Venezuela.

métrica utilizada, os autores buscam primeiramente identificar e segregar o período chuvoso e o seco, reunindo meses com comportamento hidrológico semelhante, para fins de avaliação de disponibilidade hídrica.

Com a determinação dos períodos chuvosos e secos, é possível então, como em todos os casos estudados, otimizar o critério da outorga nos períodos chuvosos, pois como uma maior disponibilidade hídrica é possível outorgar valores maiores de vazão. Porém, em alguns casos a vazão sazonal, tende a restringir o uso no período mais seco.

Catalunha (2004) e Euclydes, Ferreira e Faria Filho (2006) buscaram elaborar a vazão sazonal, com o objetivo principal de otimizar, principalmente, no que diz respeito ao uso para resolução de conflitos hídricos devido à irrigação, considerando as diferentes disponibilidades hídricas ao longo do ano. Catalunha (2004) concluiu que a adoção de período mensal como referencial para estimar uma vazão disponível para outorga não é uma escolha muito sensata, devido à estas fortes variações que a mesma apresenta. Ainda, esclarece portanto que a vazão mínima do período trimestral parece ser uma adoção razoável, pois com as informações apresentadas no estudo permitem uma melhor distribuição da outorga, considerando a capacidade sazonal de fornecimento.

Euclydes, Ferreira e Faria Filho (2006) obtiveram um aumento significativo na adoção do critério da outorga sazonal, com captação a fio d'água[6], com o aumento da vazão outorgada em até 61,80%. Fazendo uma série de recomendações para plantios, para que a vazão mínima prevista ocorra em mais de 90% do tempo no período seco. Adicionalmente, recomendaram a aplicação desta metodologia em regiões onde já existem conflitos instalados de uso de água em função da escassez de recursos hídricos em épocas de estiagens.

Uma forma viável de visualizar e estabelecer em que regiões de uma bacia hidrográfica requerem maior atenção, por conta de conflitos e estresse hídrico, é a aplicação do Indicador de Comprometimento de Bacia - ICB[7]. O Indicador apresenta com simplicidade os níveis de criticidade e permite a visualização de forma direcionada dos problemas e excepcionalidades das bacias, auxiliando na gestão dessas regiões de conflitos (STINGHEN; CARVALHO; MANNICH, 2022).

Bof et al. (2013) obtiveram resultados que mostram que as diferenças entre a vazão de referência (se for utilizado $Q_{7,10}$ ou Q_{95}) e o percentual da vazão admissível

[6] Uma captação a fio d'água refere-se a um sistema de captação de água de um corpo hídrico, como um rio ou riacho, onde a água é retirada sem a formação de reservatórios ou represas, sendo captada diretamente da correnteza natural do curso d'água.

[7] O ICB auxilía na determinação de uma área crítica de uma bacia hidrográfica, sendo calculado pelo resultado da razão entre a demanda e a disponibilidade hídrica de uma determinada bacia (STINGHEN; CARVALHO; MANNICH, 2022).

tendem a ser menos significativas quando se utilizam vazões mensais. A utilização do critério mensal permite a possibilidade de utilização de um percentual maior da vazão mínima, aumentando a importância econômica e reduzindo o risco ambiental da bacia hidrográfica em períodos mais secos.

Indo ao encontro com todos os outros trabalhos, Silva, Silva e Moreira (2015) obtiveram os valores obtidos por vazões mínimas de referência, baseada em períodos trimestrais, proporcionando considerável aumento na disponibilidade hídrica, flexibilizando o processo de outorga de uso de água, principalmente nos períodos mais chuvosos do ano. Desta forma, ao considerarem a sazonalidade, obtiveram um aumento em comparação à $Q_{7,10}$ anual de: 379,2% no primeiro trimestre, 174,5% no segundo trimestre, 36,1% no terceiro e 14,7% no quarto trimestre.

Ribeiro et al. (2017) concluíram que a adoção da Q_{95} e da Q_{90} como vazão de referência, ao invés da $Q_{7,10}$, aumenta em 74% e 122,2% a vazão passiva a ser outorgada, respectivamente, na bacia do rio Branco (RR). Fazendo o cálculo para o mesmo posto fluviométrico, a adoção das vazões mínimas de referência no período chuvoso $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}, em substituição às vazões mínimas de referência considerando período anual, permitiu aumentos percentuais de 145,3%, 132,4% e 138,7% respectivamente,

Arai et al. (2020) analisaram o período sazonal semestral, e também tiveram resultados positivos, concluíndo que a $Q_{7,10}$ mensal é o melhor critério, pois, apesar de ser mais restritivo, permite maiores vazões quando há excesso de água, e menores taxas nos meses de baixa disponibilidade hídrica. Com aumentos de até 47% de DR com relação a anual em uma estação na bacia do rio Ivinhema (MS).

Moreira et al. (2020) obtiveram resultados de vazões Q_{90} e Q_{95} mensais, que implicam em alterações significativas no uso potencial de recursos hídricos quando comparados com os valores anuais de vazões de referência. Essas mudanças resultam em reduções de 33%, em meses com menor disponibilidade, até aumentos superiores a 100%, para meses com maior disponibilidade hídrica. A restrição, como destacado por Moreira et al. (2020), não deve ser necessariamente encarada de forma negativa, mas sim como um mecanismo de garantia ambiental e suprimento das demandas de recursos hídricos.

Dos órgãos ambientais presentes no Brasil, apenas o estado de Goiás, pela Resolução CERHí nº 22 de 2019 em seu Art.08º. garante abertamente, porém como cessão diferenciada, a outorga sazonal (CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE GOIÁS - CERHI, 2019). Minas Gerais, por exemplo, estabelece a outorga sazonal apenas para a Bacia do Rio Doce, conforme a Portaria IGAM nº 32 de 2022 (IGAM, 2022).

Dessa maneira, a consideração da vazão mínima de referência sazonal revela-se de suma importância em situações que englobam períodos de escassez hídrica, bem como em regiões afetadas por conflitos e estresse hídrico, visando assegurar a resiliência hídrica e a segurança hídrica da bacia hidrográfica em análise.

3.3.2 Índices de Sazonalidade

Com o objetivo de auxiliar na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas, diversos pesquisadores têm proposto metodologias no contexto da regionalização das vazões de estiagem. Entre essas abordagens, as medidas de sazonalidades, destacadas por Laaha e Blöschl (2006), têm sido aplicadas com sucesso em diversos estudos, como em Burn, Zrinji e Kowalchuk (1997), Young, Round e Gustard (2000), Laaha et al. (2002), Laaha e Blöschl (2006), Vezza, Comoglio, Viglione et al. (2009), Vezza, Comoglio, Rosso et al. (2010) e Beskow et al. (2014).

Os três índices que são usualmente utilizados para identificar as regiões homogêneas são: Razão de Sazonalidade (SR), índice de Sazonalidade (SI) e Histograma de Sazonalidade (SH). Para os três métodos, a vazão de estiagem (a vazão mínima de referência) é calculada a partir das séries de vazões médias diárias, sendo que normalmente utiliza-se a Q_{90} ou Q_{95}.

O método da Razão de Sazonalidade (SR), proposto por Laaha e Blöschl (2006), consiste em dividir a vazão de referência obtida a partir da série parcial do período de verão (Q_{95s}), pela vazão de referência obtida a partir da série parcial do período de inverno (Q_{95w}). Desta forma, se a vazão de referência for a Q_{95}, o SR é dado por

$$SR = \frac{Q_{95s}}{Q_{95w}} \, . \tag{3.5}$$

A presença de um regime de vazões de estiagem de inverno é indicada quando $SR > 1$, e caso contrário ($SR < 1$), há a indicação da presença de um regime de verão. Quando $SR = 1$, não há indicação de sazonalidade. Portanto, há a necessidade de dividir a série em dois períodos semestrais, como indicado por Laaha e Blöschl (2006).

O Índice de Sazonalidade (SI), proposto por Burn, Zrinji e Kowalchuk (1997), foi desenvolvido para representar a distribuição sazonal das ocorrências de vazões de estiagem. O método consiste em empregar 5 equações (da 3.6 a 3.10) e ser obtido por meio de dois parâmetros: ângulo direcional (θ) e comprimento médio do vetor (r). Desta forma utilizam-se de uma estatística circular, sendo esses parâmetros calculados a partir das datas do calendário Juliano, considerando todos os dias do período de observação em que as vazões foram iguais ou inferiores à vazão de referência.

O parâmetro θ está relacionado ao dia médio de ocorrência das vazões mínimas, medido em radianos, sendo uma medida de sazonalidade média das vazões de estiagem. O parâmetro θ assume valores entre 0 e 2π: $\theta = 0$ está relacionado a 1 de janeiro, $\theta = \pi/2$ está relacionado a 1 de abril, $\theta = \pi$ está relacionado a 1 de julho, $\theta = 3\pi/2$ corresponde a 1 de outubro, e, $\theta = 2\pi$ está relacionado a 30 (ou 31) de dezembro[8] .

Já o parâmetro r é o resultado médio dos dias de ocorrência, sendo também uma medida adimensional da variabilidade da sazonalidade das vazões de estiagem. Valores possíveis de r variam de zero a um, sendo que $r = 1$ corresponde a uma forte sazonalidade (todos os eventos de estiagem ocorreram exatamente no mesmo dia do ano) e $r = 0$ corresponde a ausência de sazonalidade (eventos de estiagem estão uniformemente distribuídos ao longo do ano).

Inicialmente, como supracitado, transformam-se os dias em que a vazão foi menor ou igual a vazão de referência (no caso, Q_{95}) em datas do calendário Juliano (D_j). Assim, obtêm-se o ângulo direcional (θ_j) relacionado à D_j, como

$$\theta_j = \frac{2\pi}{365} D_j \ . \tag{3.6}$$

Com os θ_js, a média aritmética das coordenadas cartesianas x_θ, y_θ em um total de n dias j é obtida por

$$\begin{aligned} x_\theta &= \frac{1}{n} \sum_j cos(\theta_j) \text{ , e} \\ y_\theta &= \frac{1}{n} \sum_j sen(\theta_j) \ . \end{aligned} \tag{3.7}$$

Com as coordenadas cartesianas, o ângulo direcional do vetor médio é obtido como

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) \text{ , Para o 1º e 4º quadrante: } x > 0, \text{ ou} \\ \theta &= \tan^{-1}\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) + \pi \text{ , Para o 2º e 3º quadrante: } x < 0 \ . \end{aligned} \tag{3.8}$$

O dia médio de ocorrência é obtido, transformando de volta o ângulo médio em um dia Juliano, empregando a equação

$$D = \frac{365}{2\pi} \theta \ . \tag{3.9}$$

[8] Em anos normais, os dias variam de 1 a 365, porém em anos bissextos a variação é de 1 a 366.

O comprimento r do vetor médio é a indicação da variabilidade dos dias de ocorrência das vazões de estiagem como

$$r = \sqrt{x_\theta^2 + y_\theta^2} \, . \tag{3.10}$$

O terceiro e último método, Histograma de Sazonalidade (SH), proposto por Laaha et al. (2002), resulta em um histograma de sazonalidade na escala mensal. O SH permite uma descrição mais detalhada da distribuição sazonal de vazões de estiagem do que o SI (LAAHA; BLÖSCHL, 2006). Sendo novamente, baseada no Calendário juliano, de todos os dias em que a vazão de uma bacia hidrográfica (ou de uma sub-bacia) fica abaixo do limite (Q_{95}).

O SH ilustra a ocorrência de vazões de estiagem em cada mês e fornece informações complementares ao SI. Em particular, ele indica quais meses são afetados pelas vazões de estiagem e fornece uma boa representação da forma da distribuição sazonal, incluindo distribuições multimodais[9] e assimétricas[10].

Realizando um estudo no território da Áustria, Laaha e Blöschl (2006) concluíram que os índices SH's são os índices mais detalhados, mas técnicas de classificação são necessárias para comparar a sazonalidade entre um grande número de bacias hidrográficas. Também relatam que o SI é um índice mais compacto, e os padrões espaciais podem ser mais facilmente visiveis, quando delineados por inspeção visual de um mapa de vetor do SI. Com relação ao SR, ressaltam que é o índice mais condensado, e os padrões espaciais são claramente discerníveis quando plotados em um mapa. Adicionalmente, Laaha e Blöschl (2006) mostraram que os padrões dos 3 índices obtidos para a Áustria correspondem muito bem às principais unidades de paisagens do território analisado (Alpes, terras baixas e paisagens de transição).

Beskow et al. (2014), de modo similar a Laaha e Blöschl (2006), conduziram um estudo utilizando os três índices (SR, SI e SH) e conseguiram chegar a conclusões significativas sobre a distribuição espacial da sazonalidade das vazões de estiagem no estado do Rio Grande do Sul, sendo observada uma sazonalidade forte em boa parte do estado, e variável espacialmente. Além disso, os pesquisadores concluíram que os três métodos têm o potencial de identificar regiões com características hidrológicas semelhantes, o que é de grande importância para a compreensão da distribuição sazonal de eventos hidrológicos, como escass ez hídrica, e para gestão dos recursos hídricos.

---

[9] Uma distribuição multimodal pode ser definida como uma distribuição de probabilidade contínua com mais de duas modas diferentes (CASTRO; FERNANDES; ALMEIDA, 2015)

[10] Uma distribuição pode ser chamada de assimétrica quando possuí dados tendendo para a esquerda ou para a direita da média. Pode-se medir a assimetria de uma distribuição, calculando os coeficientes de assimetria. Sendo o mais utilizado o Coeficiente de Assimetria de Pearson (LOPES, 2003)

4 MATERIAL E MÉTODOS

“A ciência progride quando as observações nos forçam a mudar as nossas ideias preconcebidas.”
Vera Rubin;

Neste capítulo, são apresentados: o contexto do estudo, destacando o local de pesquisa, as estações fluviométricas, e a metodologia adotada para estimar a vazão de referência sazonal. Além disso, é feita menção aos índices de sazonalidade, cuja explicação detalhada pode ser encontrada na Seção 3.3.2

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para a elaboração do estudo é a bacia hidrográfica do Tibagi, pela dimensão longitudinal de sua extensão, e seu notável gradiente de condições climáticas que se estendem no eixo Norte/Sul.

A Bacia do rio Tibagi está entre as maiores bacias hidrográficas do Estado do Paraná, com uma área total de 24.530 km^2. Localizada na porção centro leste do Estado, apresenta uma paisagem bem variada, composta por inúmeros ambientes (UEL, s.d.). Sua localização é mostrada na Figura 6.

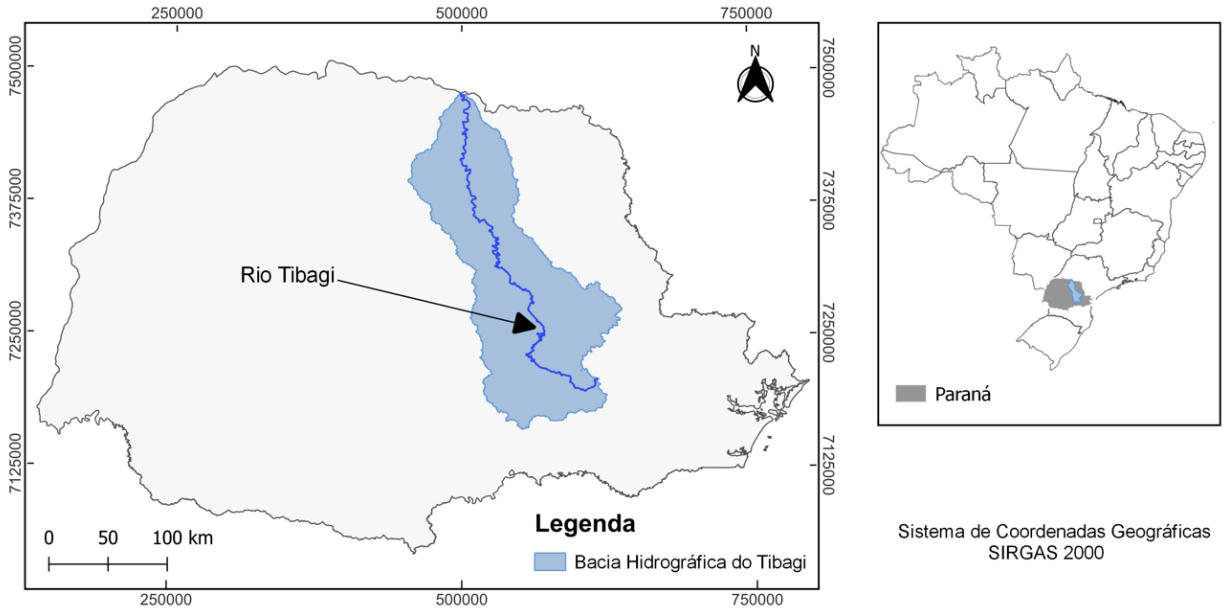

FIGURA 6 – Localização da área de estudo e bacia de drenagem.

A escolha da bacia do Tibagi para a aplicação desses índices e a elaboração

de vazões sazonais se justifica pela oportunidade de aprimorar os critérios de escolha das vazões de referência identificadas anteriormente, como discutido por Stinghen, Carvalho e Mannich (2022), e por ter um plano de bacia consolidado que pode ser aprimorado com os resultados dessa discussão.

Além disso, a principal atividade econômica desenvolvida na Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi é a agropecuaria (PEREIRA; SCROCCARO, 2009; MANNICH; STINGHEN, 2019), fortemente presente na extensão de toda a bacía, fator este que pode ser explorado, pelo fato de que boa parte dos estudos de vazões de referências sazonais aplicam-se em áreas de interesse agrícola, como mostrado na seção 3.3.1. Portanto, é uma oportunidade significativa para aprimorar o processo de definição dos critérios ou, pelo menos, elaborar novas indagações que abordem a sazonalidade anual das vazões de referência na bacia do Tibagi.

4.2 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS

Ao todo foram selecionadas inicialmente 24 estações fluviométricas, na base de dados da ANA (2023), com dados consistidos, dentro da área da Bacia do Tibagi, sendo elas apresentadas na Tabela 3, e as respectivas localizações no mapa da Figura 7.

Código	Nome da Estação	Corpo Hídrico	AD[1] (km²)	Latitude	Longitude
64507100	ETA IBIPORÃ (ICM ECOL)	RIBEIRÃO JACUTINGA	178	23°14'56,4"S	51°4'1,2"W
64506000	CHACARA ANA CLAÚDIA	RIO TIBAGI	21900	23°18'43,2"S	50°59'42,0"W
64450002	SUMIDOURO - REPRESA ALAGADOS	RIO PITANGUI	433	25°1'58,8"S	50°4'58,8"W
64504591	LONDRINA MTE, ETA SANEPAR	RIBEIRÃO CAFEZAL	134	23°21'14,4"S	51°11'45,6"W
64480000	LAVRINHA	RIO IAPÓ	1660	24°43'1,2"S	50°7'58,8"W
64429000	ETA - PALMEIRA	RIO PUGAS	25	25°25'33,6"S	49°58'40,8"W
64508020	CORNÉLIO PROCÓPIO MTE	RIO CONGONHAS	943	23°13'55,2"S	50°43'58,8"W
64490000	SALTO MAUÁ	RIO TIBAGI	15400	24°3'32,4"S	50°42'36,0"W
64497000	PCH APUCARANINHA RESERVATÓRIO FIU	RIO APUCARANINHA	536	23°44'56,4"S	50°56'27,6"W
64440000	SANTA CRUZ	RIO TIBAGI	1340	25°12'0,0"S	50°9'0,0"W
64482000	UHE CAPIVARA TELÊMACO BORBA	RIO TIBAGI	13800	24°21'36,0"S	50°35'38,4"W
64504100	ASSAÍ MTE, ETA SANEPAR	RIBEIRÃO JATAIZINHO	29,6	23°26'20,4"S	50°49'26,4"W
64465000	TIBAGI	RIO TIBAGI	8840	24°30'32,4"S	50°24'36,0"W
64477600	CHÁCARA CACHOEIRA	RIO IAPÓ	1590	24°45'0,0"S	50°5'20,4"W
64441020	ETA - IRATI	RIO IMBITUVA	226	25°27'50,4"S	50°31'58,8"W
64475000	CASTRO	RIO IAPÓ	1190	24°46'55,2"S	50°0'21,6"W
64442800	LAJEADO	RIO IMBITUVA	1340	25°11'56,4"S	50°31'30,0"W
64447000	ENGENHEIRO ROSALDO LEITÃO	RIO TIBAGI	5710	24°56'49,2"S	50°23'27,6"W
64501000	PORTO LONDRINA	RIO TIBAGI	18700	23°38'13,2"S	50°55'22,8"W
64508500	PONTE PRETA	RIO CONGONHAS	1050	23°10'12,0"S	50°47'16,8"W
64430200	PONTA GROSSA MONTANTE	RIO TIBAGI	418	25°19'1,2"S	49°58'58,8"W
64497010	PCH APUCARANINHA BARRAMENTO	RIO APUCARANINHA	547	23°44'56,4"S	50°54'28,8"W
64476000	FUNDÃO	RIO IAPÓ	1220	24°46'1,2"S	50°4'1,2"W
64507000	UHE CAPIVARA JATAIZINHO	RIO TIBAGI	21900	23°15'0,0"S	50°59'2,4"W

TABELA 3 – Estações fluviométricas inseridas dentro da Bacia Hidrográfica do Tibagi, e suas respectivas localizações (ANA, 2023).

[1] Área de Drenagem

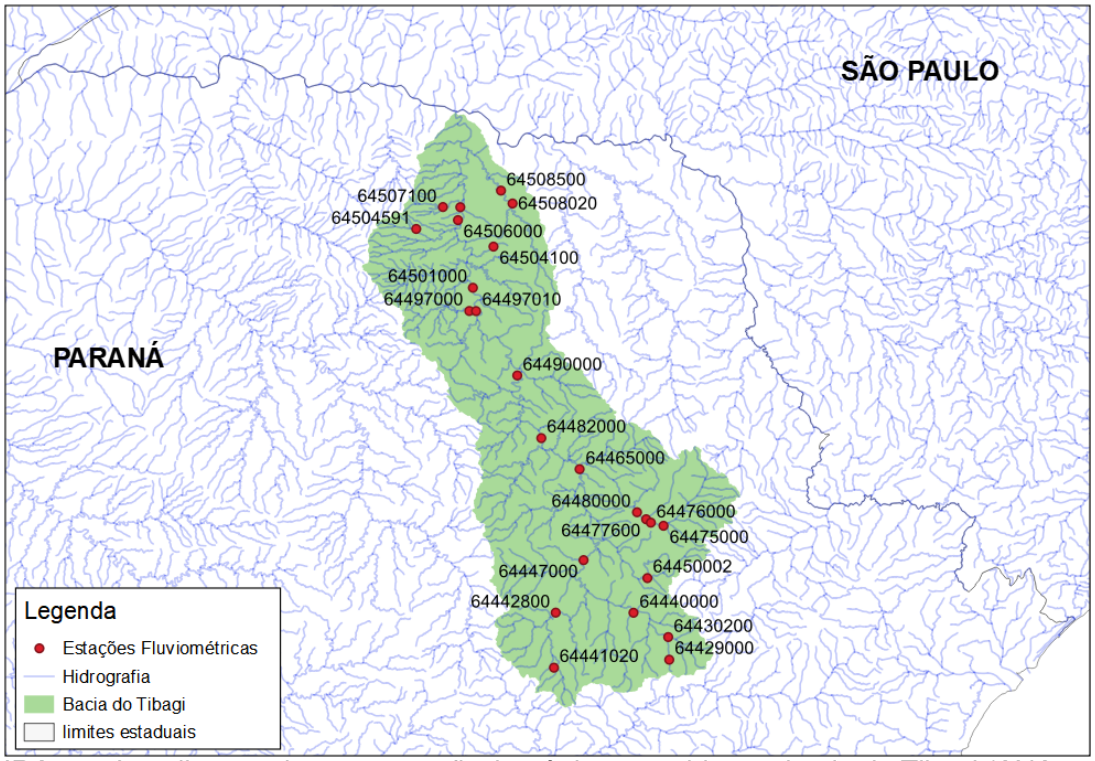

FIGURA 7 – Localização das estações fluviométricas contidas na bacia do Tibagi (ANA, 2023).

4.3 INDICADORES DE SAZONALIDADE

4.3.1 Vazão de Referência Sazonal

Foram calculadas vazões de referência sazonal para o período semestral, baseadas nas curvas de permanência das estações fluviométricas escolhidas, para a permanência de vazão em 95% do tempo (Q_{95}) como base, pois é a vazão de referência utilizada no estado do Paraná.

Os valores de desvios absolutos (DA) das vazões de referência sazonal para a anual, também foram calculados e apresentados, conforme:

$$DA = Q_{95sazonal}/Q_{95anual} \ . \tag{4.1}$$

Adicionalmente, os valores de vazão de referência específicos também foram obtidos, fazendo a divisão de cada valor de vazão pela respectiva área de drenagem dos exutórios, e então convertendo de m^3 para l, assim obtendo os valores de q_{95}, em $l/(s \cdot km^2)$.

4.3.2 índices de Sazonalidade

Foram aplicados os 3 métodos de caracterização espacial de bacias hidrologicamente homogêneas, sazonalmente: Razão de Sazonalidade (SR), Índice de

Sazonalidade (SI) e Histograma de Sazonalidade (SH). Todos apresentados e explicados na Seção 3.3.2.

Para o método SR foram utilizadas as vazões Q_{95} de verão Q_{95s} e inverno Q_{95w}, calculadas para as vazões de referência sazonal, e então elaborada uma discussão relacionando com as características climáticas predominantes na região. Para os calculos relacionados aos métodos SI e SH, foi utilizada a Q_{95} anual calculada para as vazões de referência sazonal.

Em seguida, as distribuições e perfis encontrados são apresentados em mapas e gráficos, utilizando o software *QGis*, e a linguagem *Python*, mostrando a variação espacial desses índices na bacia hidrográfica do Tibagi, e fazendo relações com os aspectos climáticos da bacia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

“Tenha vergonha de morrer até você ter conquistado alguma vitória para a humanidade.”
Horace Mann;

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos no cálculo das vazões de referência sazonais e na aplicação dos índices de sazonalidade. O foco está em revelar os dados numéricos e as interpretações decorrentes da análise.

5.1 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS

Para a seleção, as estações foram selecionadas considerando o critério destacado por Vezza, Comoglio, Rosso et al. (2010), os quais ressaltam a necessidade da existência de um período mínimo de 10 anos de dados observados de vazões diárias, sem falhas.

Em seguida, os anos que apresentaram mais de 2 meses de falhas foram descartados da análise, considerando que para os cálculos das vazões de referências sazonais, e para a razão de sazonalidade, o ano foi dividido em 2 semestres (período de “inverno” e “verão”, como exibido na equação 3.5), representando 1/6 de falha ”tolerável” em cada período.

Após a aplicação desses critérios, que podem ser melhores visualizados no Apêndice A.1, resultaram 17 estações fluviométricas a serem utilizadas dentro da bacia hidrográfica do Tibagi, sendo elas mostradas na Figura 8 e na Tabela 4. O gráfico da Figura 8 representa um *lollipop plot*, em que cada circulo corresponde à um ano de dados.

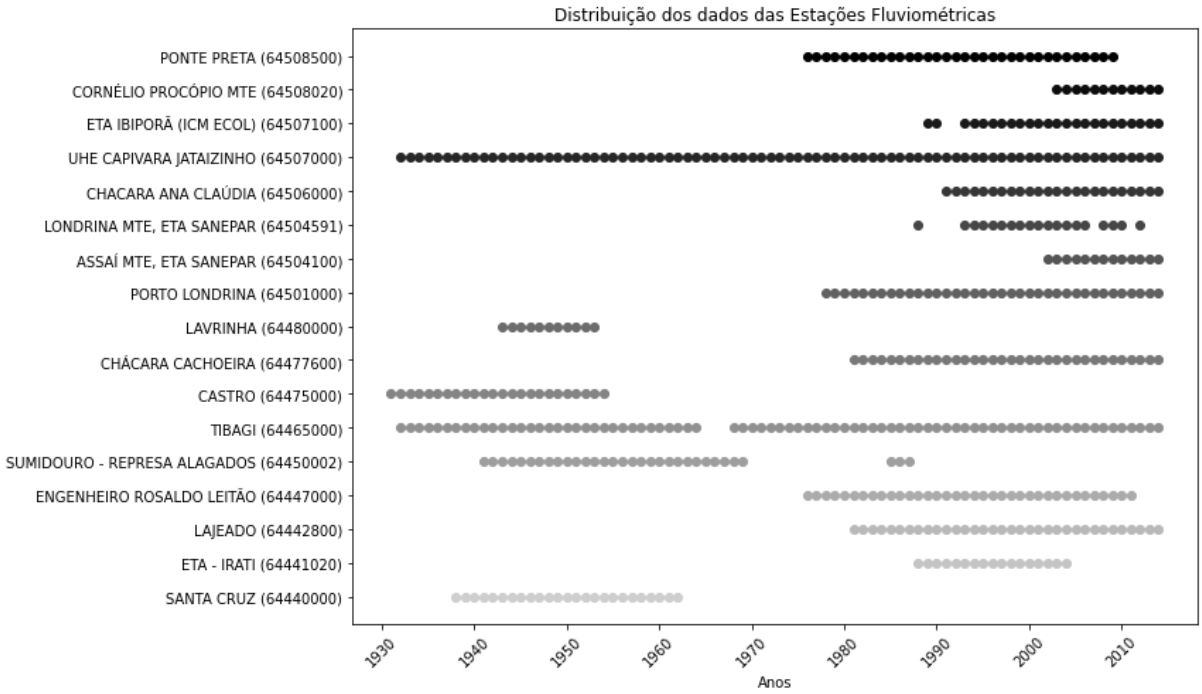

FIGURA 8 – Estações fluviométricas resultantes, com os respectivos períodos com dados, respeitando o máximo de 2 meses de falhas por ano.

Código	Estação	Responsável	Período de Dados
64440000	SANTA CRUZ	ANA	1938 – 1962
64441020	ETA - IRATI	ANA	1988 – 2004
64442800	LAJEADO	ANA	1981 – 2014
64447000	ENGENHEIRO ROSALDO LEITÃO	IAT	1976 – 2011
64450002	SUMIDOURO - REPRESA ALAGADOS	ANA	1941 – 1969 e 1985 – 1987
64465000	TIBAGI	IAT	1932 – 1964 e 1968 – 2014
64475000	CASTRO	ANA	1931 – 1954
64477600	CHÁCARA CACHOEIRA	ANA	1981 – 2014
64480000	LAVRINHA	ANA	1943 – 1953
64501000	PORTO LONDRINA	ANA	1978 – 2014
64504100	ASSAÍ MTE. ETA SANEPAR	ANA	2002 – 2014
64504591	LONDRINA MTE. ETA SANEPAR	ANA	1988 e 1993 – 2006 e 2008 – 2010 e 2012
64506000	CHÁCARA ANA CLAÚDIA	ANA	1991 – 2014
64507000	UHE CAPIVARA JATAIZINHO	IAT	1932 – 2014
64507100	ETA IBIPORÃ (ICM ECOL)	ANA	1989 – 1990 e 1993 – 2014
64508020	CORNÉLIO PROCÓPIO MTE.	ANA	2003 – 2014
64508500	PONTE PRETA	ANA	1976 – 2009

TABELA 4 – Estações fluviométricas resultantes, com os respectivos responsáveis e período de dados.

O Hidrograma de cada estação e a sua respectiva curva de permanência são mostradas nas Figuras 9 e 10. Ressalta-se que as estações 64508500 (Ponte Preta), 64506000 (Chácara Ana Cláudia) e 64447000 (Engenheiro Rosaldo Leitão) são consideradas estações estratégicas para o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PARANÁ, 2013).

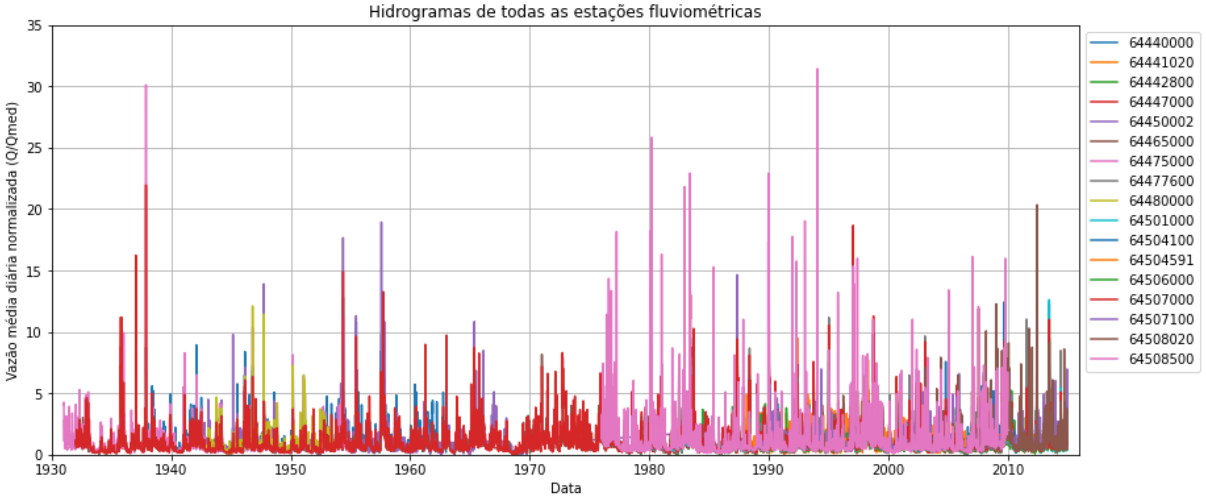

FIGURA 9 – Hidrograma (normalizado pela média) de cada estação fluviométrica selecionada para todo o período de dados.

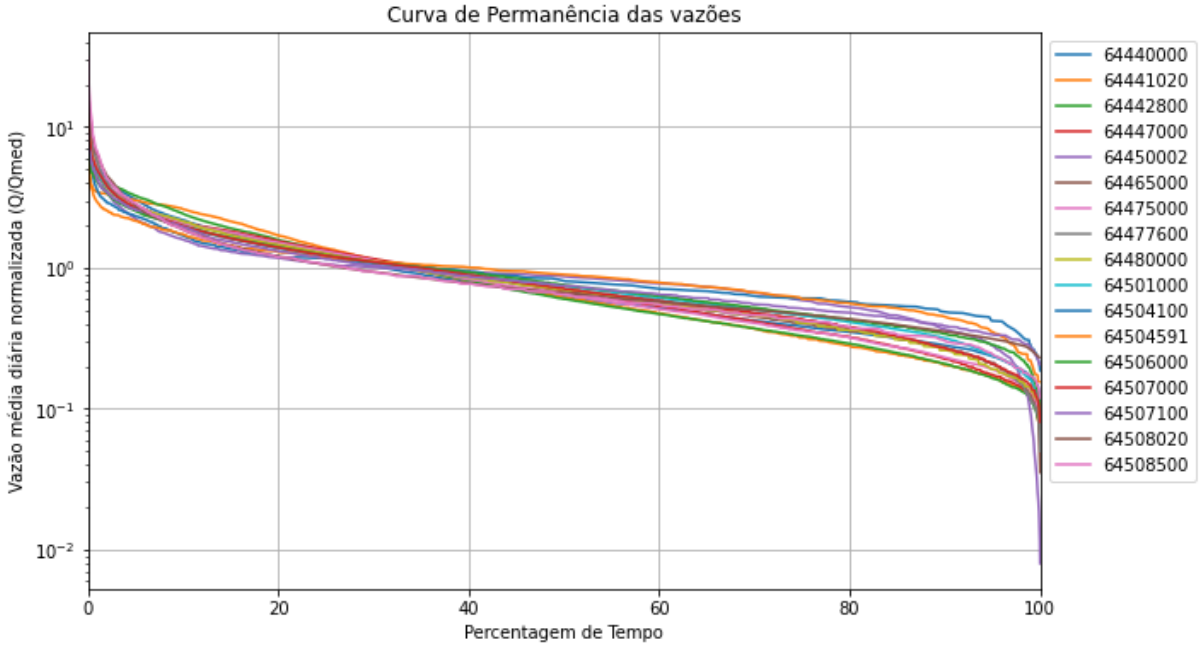

FIGURA 10 – Curva de Permanência de cada estação fluviométrica selecionada para todo o período de dados.

A curva de permanência, representada na Figura 10, revela um comportamento peculiar na bacia hidrográfica. Nota-se uma significativa variabilidade nos valores de vazões na região de mínimas, característica essa geralmente observada na região de máximas da curva.

5.2 VAZÃO DE REFERÊNCIA SAZONAL

Para o cálculo da vazão de referência sazonal, foi escolhido o período semestral, pois considerou-se ser um período razoável de separação, tendo em vista que o período ”seco” no estado do Paraná caracteriza-se em 5 meses (de maio até começo de outubro). Além disso, ter apenas dois valores para a aplicação da vazão de referência na outorga torna-se mais prático e eficiente (quando comparados à valores mensais, bimestrais, trimestrais ou quadrimestrais), e pode ser uma primeira abordagem para avaliar a viabilidade da adoção de vazões de referência sazonais.

Desta forma, foram definidas duas vazões de referência sazonais: uma para o ”Verão” (outubro a março), abrangendo o período chuvoso, e outra para o ”Inverno” (abril a setembro), que representa o período seco. A escolha do mesmo período também foi utilizada em outros estudos hidrológicos, como o estudo elaborado por Nery, Vargas e Martins (1996).

Os resultados das vazões de permanência obtidos são exibidos na Tabela 5 e, adicionalmente, foram incluidos os valores dos desvios absolutos com relação a cada um dos valores de Q_{95}, obtidos por meio da equação

$$DA = \frac{Q_{95sazonal}}{Q_{95anual}}. \tag{5.1}$$

Estação	Anual (m^3/s)	Inverno (m^3/s)	DA$_{inv}$ (m^3/s)	Verão (m^3/s)	DA$_{ver}$ (m^3/s)
64508500	3,83	3,73	0,97	3,98	1,04
64508020	4,03	4,03	1,00	4,35	1,08
64507100	0,71	0,75	1,06	0,68	0,96
64507000	77,36	71,47	0,92	86,95	1,12
64506000	121,31	108,20	0,89	138,47	1,14
64504591	0,93	1,12	1,21	0,78	0,84
64504100	0,21	0,21	1,00	0,21	1,00
64501000	89,40	83,94	0,94	101,54	1,14
64465000	34,10	30,83	0,90	39,94	1,17
64480000	4,11	4,11	1,00	4,11	1,00
64477600	7,88	7,34	0,93	8,31	1,05
64475000	3,55	3,55	1,00	3,66	1,03
64447000	20,94	18,79	0,90	25,17	1,20
64450002	1,82	1,72	0,95	1,82	1,00
64442800	4,85	4,52	0,93	5,58	1,15
64440000	5,10	4,99	0,98	5,10	1,00
64441020	0,72	0,67	0,93	0,80	1,10

TABELA 5 – Vazões de referência (Q_{95}) para o período anual, de inverno e verão, e os respectivos Desvios Absolutos (DAs). As estações fluviométricas foram ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul).

Os valores dos desvios são apresentados no gráfico da Figura 11:

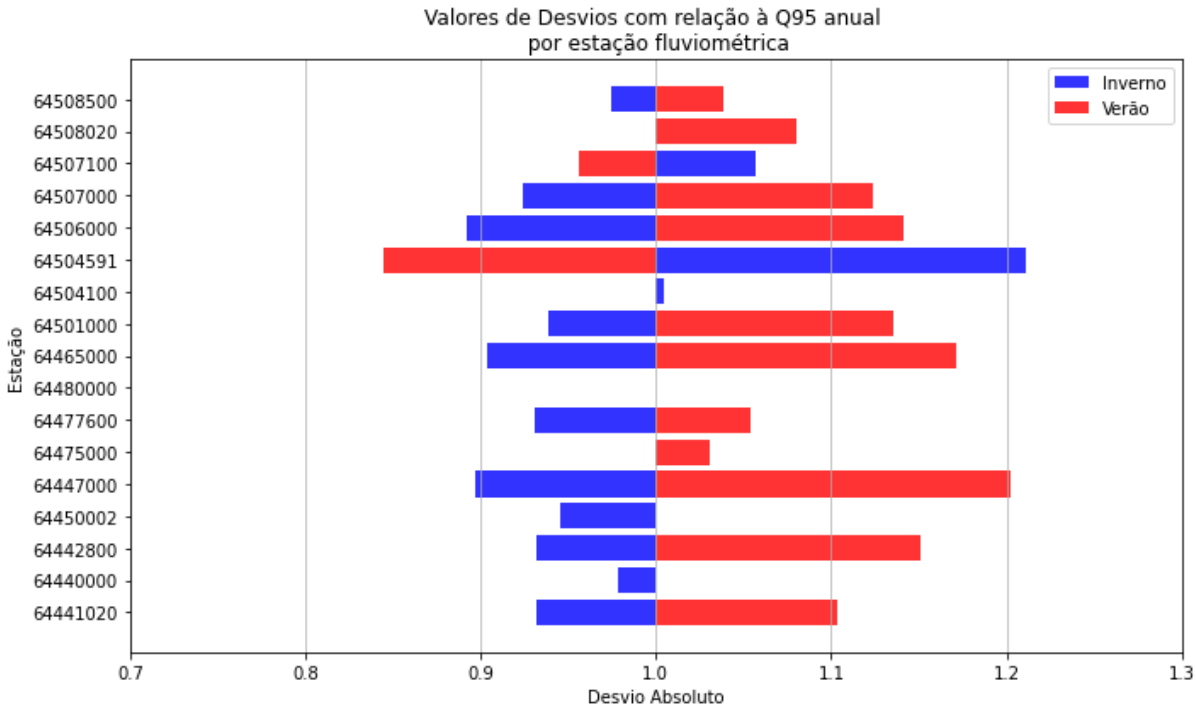

FIGURA 11 – Desvios absolutos de cada estação fluviométrica, ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul)

Pode-se observar que os valores de vazão de referência anual variaram entre 0,21 (estação 64504100) e 121,31 (estação 64506000), e que o valor médio para a região é de 22,4 m^3/s. As mesmas estações apresentaram os maiores e os menores valores para o período de verão e de inverno, respectivamente: correspondendo à 138.47 m^3/s (verão) e 108.20 m^3/s (inverno) para a estação 64506000; e 0,21 m^3/s (para ambos os períodos), na estação 64504100.

Nota-se que o DA_{inv} variou de 0,89 — 1,21 e DA_{ver} de 0,96 — 1,178, com medianas de 0,95 e 1,05, respectivamente. Revelando que $DA_{ver} > DA_{inv}$. De tal forma que, no geral, $DA_{ver} > 1$ e $DA_{inv} < 1$. Este comportamento revela que, conforme esperado, as estações na bacia do Tibagi tendem a ter maior disponibilidade hídrica no período de verão.

Para fins de melhor comparação, também foram calculados os valores de vazão de referência sazonal específica (variável hidrológica de relação entre a vazão e a área da bacia), em $l/(s \cdot km^2)$, normalizando para cada uma das áreas de drenagem das estações, como mostra a Tabela 6, e espacializadas na Figura 12.

Estação	Anual ($l/s/km^2$)	Inverno ($l/s/km^2$)	Verão ($l/s/km^2$)
64508500	3,65	3,56	3,79
64508020	4,27	4,27	4,61
64507100	3,97	4,19	3,79
64507000	3,53	3,26	3,97
64506000	5,54	4,94	6,32
64504591	6,93	8,39	5,85
64504100	6,96	6,99	6,96
64501000	4,78	4,49	5,43
64465000	3,86	3,49	4,52
64480000	2,48	2,48	2,48
64477600	4,96	4,61	5,23
64475000	2,98	2,98	3,08
64447000	3,67	3,29	4,41
64450002	4,20	3,97	4,20
64442800	3,62	3,37	4,17
64440000	3,81	3,72	3,81
64441020	3,19	2,98	3,53

TABELA 6 – Vazão específica anual, de inverno e de verão, para todas as estações, ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul)

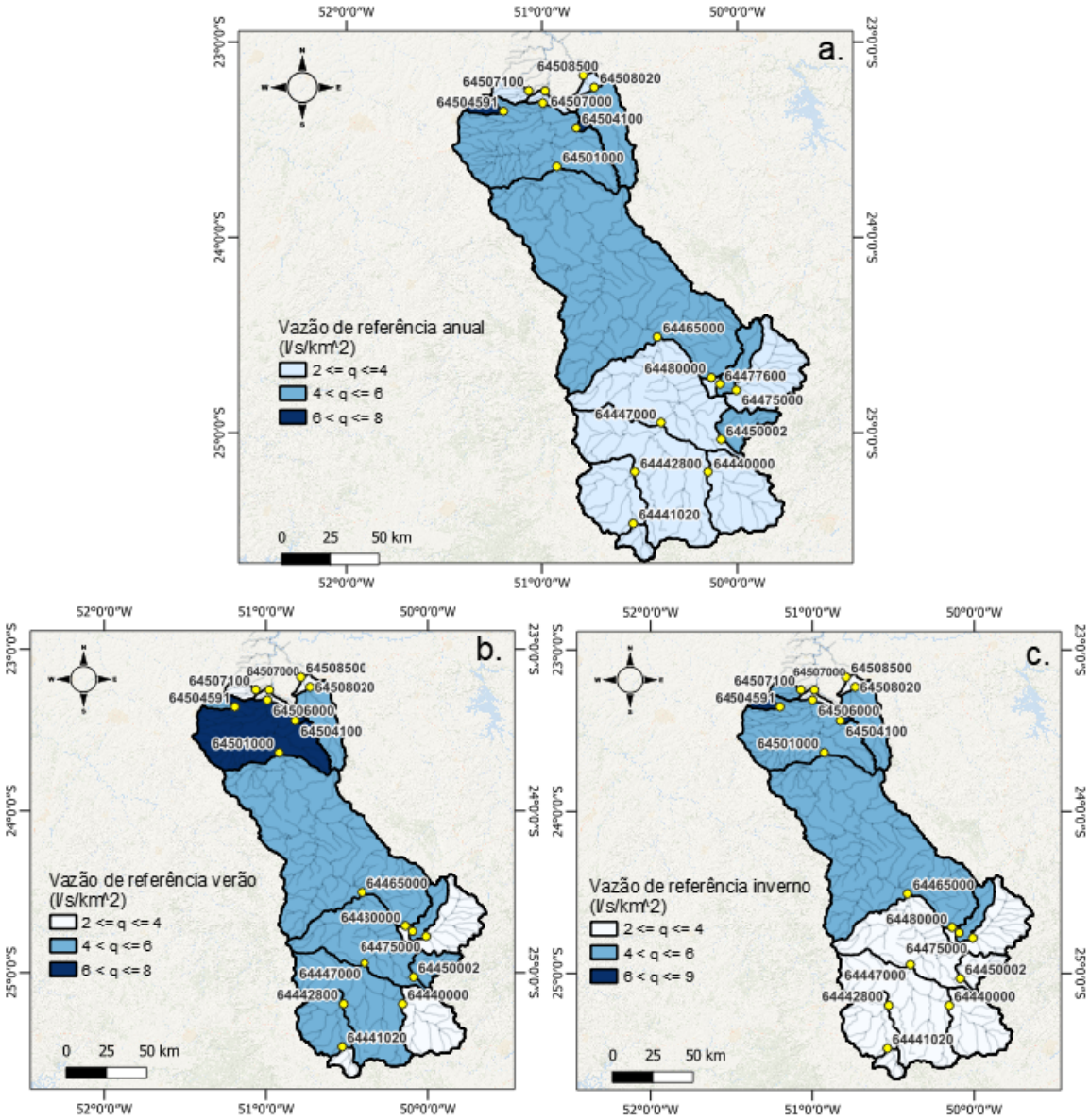

FIGURA 12 – Vazões de referências específica espacializadas: a) período anual, b) período de verão, e c) período de inverno.

Pode-se observar uma tendência de flexibilização na vazão durante o verão e uma restrição no inverno na região, o que é esperado devido à precipitação durante esse período. A restrição na vazão durante o período mais seco, como discutido na Seção 3.3.1, não é necessariamente algo negativo. Pode ser interpretada, por uma perspectiva mais conservadora, como uma medida para manter as funções ecossistêmicas da biota menos impactadas do que seriam se mais volume estivesse disponível para a outorga. Nesse contexto, essa restrição pode ser vista como uma estratégia para preservar o equilíbrio ambiental da região.

Quando um dos valores de Desvio Absoluto é igual a 1.0 (Tabela 5) significa que para aquele período sazonal, a vazão de referência sazonal (Q_{95} de inverno ou

verão) coincide com a permanência anual, como mostra a Equação 5.1.

Para o período de inverno, houve duas ocorrências de diferença absoluta igual à unidade: estação 64508020 (CORNÉLIO PROCÓPIO MTE.) e 64475000 (CASTRO). Para o período de verão, houve apenas uma estação com diferença absoluta igual à um: 64450002 (SUMIDOURO - REPRESA ALAGADOS). Todavia, houve duas estações que apresentaram valores de DA igual à 1.0 para ambos os períodos selecionados, ou seja, não há diferença na vazão de referência em nenhuma época do ano: 64504100 (ASSAÍ MTE. ETA SANEPAR) e 64480000 (LAVRINHA).

A análise sazonal das vazões permite potencialmente uma exploração mais eficiente da água durante as chuvas, mas exige restrições necessárias nos períodos secos. Nas outorgas, é vital considerar tanto os aspectos quantitativos quanto qualitativos da água, especialmente devido à sazonalidade das atividades empresariais, que devem coincidir com a disponibilidade hídrica.

O Indicador de Comprometimento de Bacia (ICB), estudado por Stinghen, Carvalho e Mannich (2022), mostra que boa parte da bacia encontra-se com uma criticidade alta, para parte significativa das áreas outorgadas. Essa situação poderia ser potencialmente melhorada se as vazões de referência sazonais fossem aplicadas nessas concessões, proporcionando uma gestão mais adaptável e sustentável dos recursos hídricos.

5.3 ÍNDICES DE SAZONALIDADE

5.3.1 Razão de Sazonalidade

O índice Razão de Sazonalidade (SR) foi calculado com os valores previamente definidos de vazão de referência sazonal de inverno e de verão, apresentados na Tabela 5, determinado para cada estação conforme:

$$SR = \frac{Q_{95s}}{Q_{95w}} \, , \tag{5.2}$$

em que Q_{95s} representa a vazão de permanência em 95% do tempo do período de ”verão”, e a Q_{95w} de inverno. Os resultados de SR são apresentados na Figura 13.

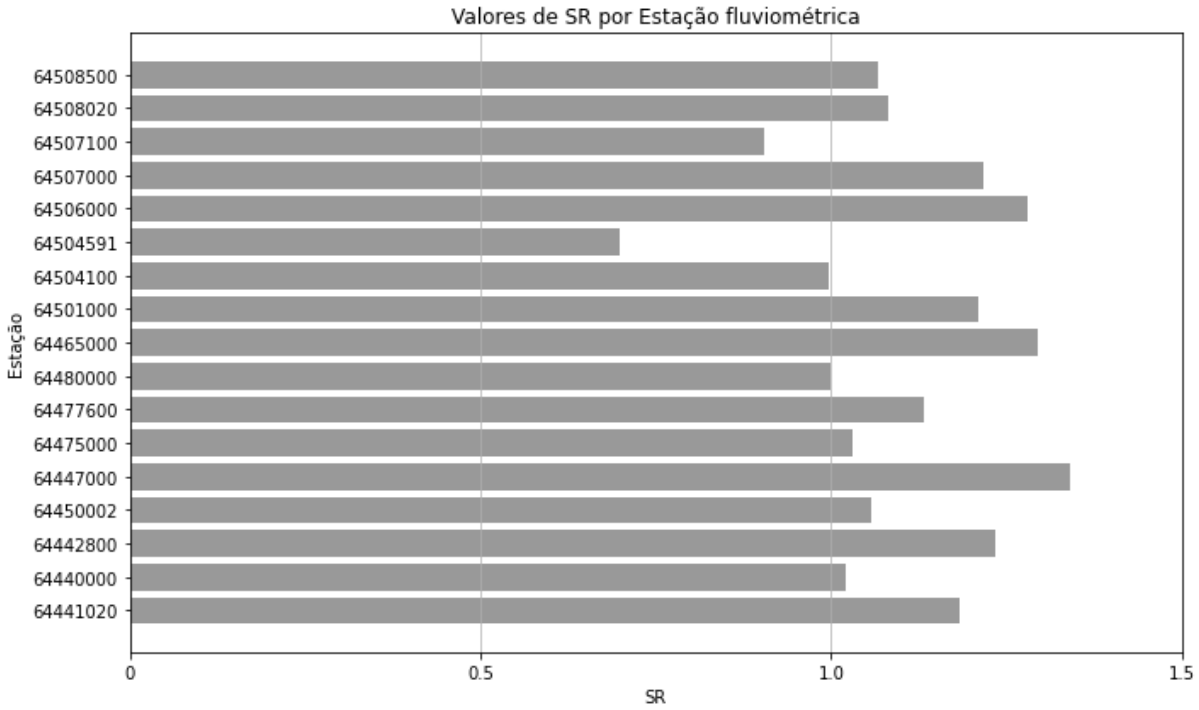

FIGURA 13 – Valores de Razão de Sazonalidade para as estações fluviométricas utilizadas, ordenadas conforme a latitude (De Norte para Sul)

Os valores de SR encontrados variam de 0.7 a 1.3, sendo exibidos na espacialmente na Figura 14.

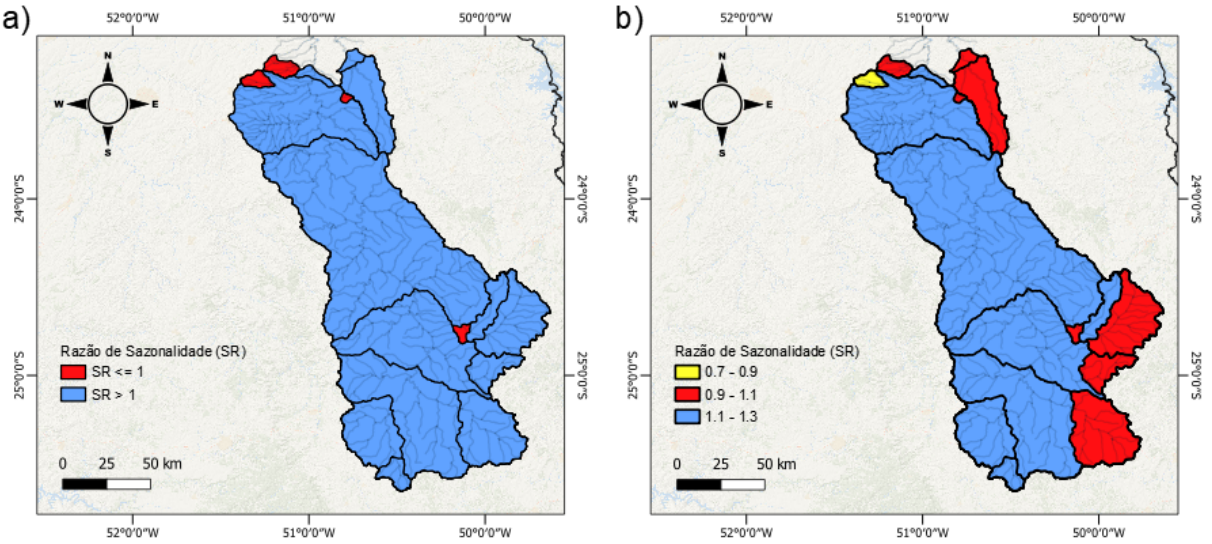

FIGURA 14 – Distribuição espacial de SR nas 17 sub-bacias estudadas. Em a) duas classes de SR, e b) três classes.

Como pode ser observado na Figura 13, das estações monitoradas, 77% apresentam um regime de vazões de estiagem de inverno, ou seja, possuem a Q_{95w} menor do que a de verão (Q_{95s}). Essa característica pode ser observada na distribuição

espacial do índice, na Figura 14a, contendo 13 bacias com $SR > 1$ e 4 bacias com o $SR \leq 1$.

Na Figura 14b é possível classificar as bacias em intervalos igualmente espaçados, para melhor visualizar o fenômeno da sazonalidade. Na Figura, é possível visualizar que 8 bacias estão contidas na classe de (1.1,1.3], 8 bacias estão entre (0.9,1.1], e 1 bacia apenas na classe de [0.7,0.9].

Apesar das vazões de estiagem serem menores no inverno, nota-se que boa parte dos valores estão no entorno de 1.0, apresentando uma média e mediana de 1.1, apontando que não há uma grande diferença, em boa grande parte das bacias estudadas, nas vazões de estiagem de verão e inverno, indo ao encontro com os resultados apresentados na Tabela 6.

Os valores de SR revelam-se coerentes, quando leva-se em conta as características climáticas do estado do Paraná, segundo Köppen (PAROLIN; VOLKMER-RIBEIRO; LEANDRINI, 2010), sendo a bacía do Tibagi classificada em Cfa (mais ao Norte) e Cfb (na porção Sul), conforme ilustra o Mapa da Figura 15.

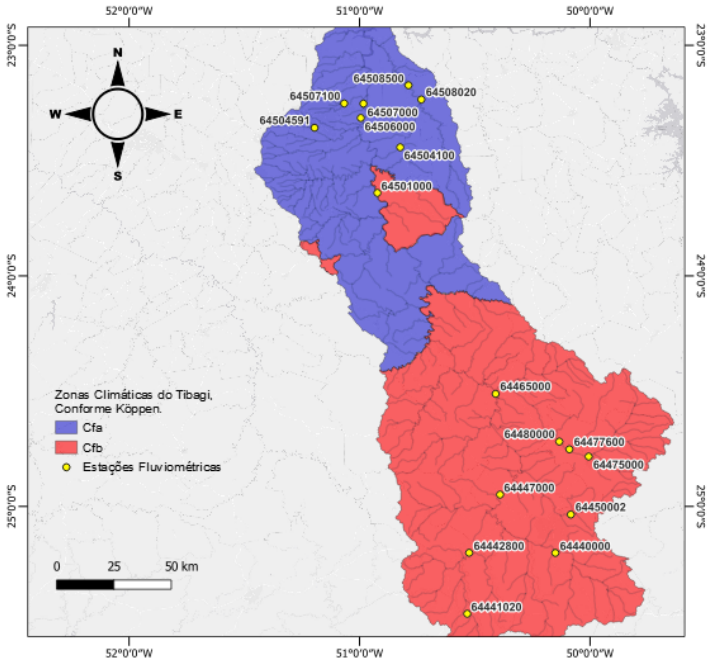

FIGURA 15 – Classificação climática de Köppen na bacia do Tibagi. Adaptado de ZONAS... (2021).

A classificação Cfa indica um clima subtropical úmido com uma tendência à concentração das chuvas nos meses de verão, mas sem uma estação seca rigorosamente definida. Por outro lado, Cfb representa um clima temperado úmido, também sem uma estação seca claramente definida ao longo do ano (PAROLIN; VOLKMER-RIBEIRO; LEANDRINI, 2010). Assim, a distribuição relativamente homogênea das chuvas ao

longo do ano está de acordo com os valores de SR encontrados, refletindo o padrão esperado para essas classificações climáticas (MELLO et al., 2013).

A distribuição dos valores de SR também podem ser mais bem visualizadas com relação à classificação de Köppen quando observa-se a Figura 16, em que é possível claramente ver essa relação da sazonalidade com a zona climática.

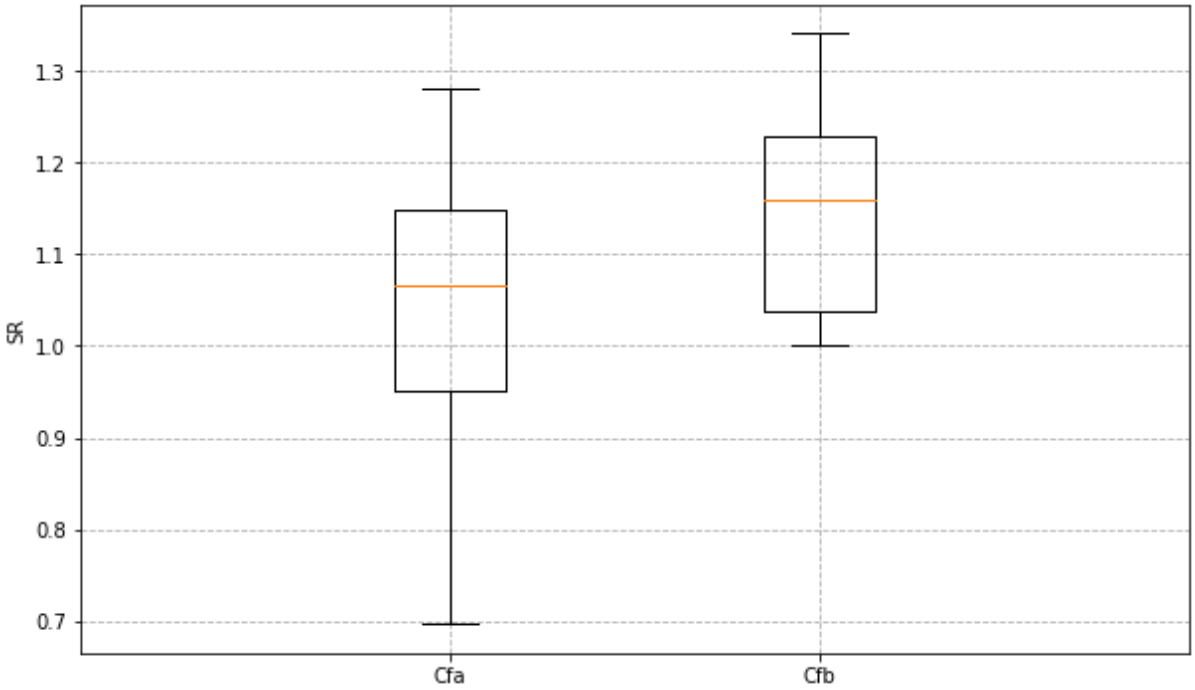

FIGURA 16 – Boxplot dos valores de SR encontrados por classe da classificação climática de Köppen, na bacia do Tibagi.

Os valores de SR encontrados por Beskow et al. (2014) no Rio Grande do Sul foram observados também próximos à unidade. Isso também ocorreu possivelmente devido a um regime de chuvas bem distribuído ao longo do ano, como também indicado pela classificação de Köppen (sendo a mesma que a bacia do Tibagi, Cfa/Cfb).

Nos estudos de Laaha et al. (2002) é observada uma forte relação entre a altitude das bacias estudadas e seus respectivos valores de vazões de estiagem, o que se reflete no índice SR. Nas bacias austriacas de altitudes mais elevadas, é evidente um padrão distinto de estiagem no inverno. Isso ocorre devido ao congelamento dos rios durante esse período, resultando no abastecimento desses rios pelo derretimento da neve na primavera e pelas chuvas no verão (LAAHA et al., 2002).

Para a análise da bacia do Tibagi, assim como nos estudos realizados por Beskow et al. (2014), não foi identificada uma relação clara e substancial entre a altitude e as vazões de estiagem, conforme avaliado pelo índice SR, além de outros aspectos fiosiográficos da bacia, possível de visualizar na Figura 17.

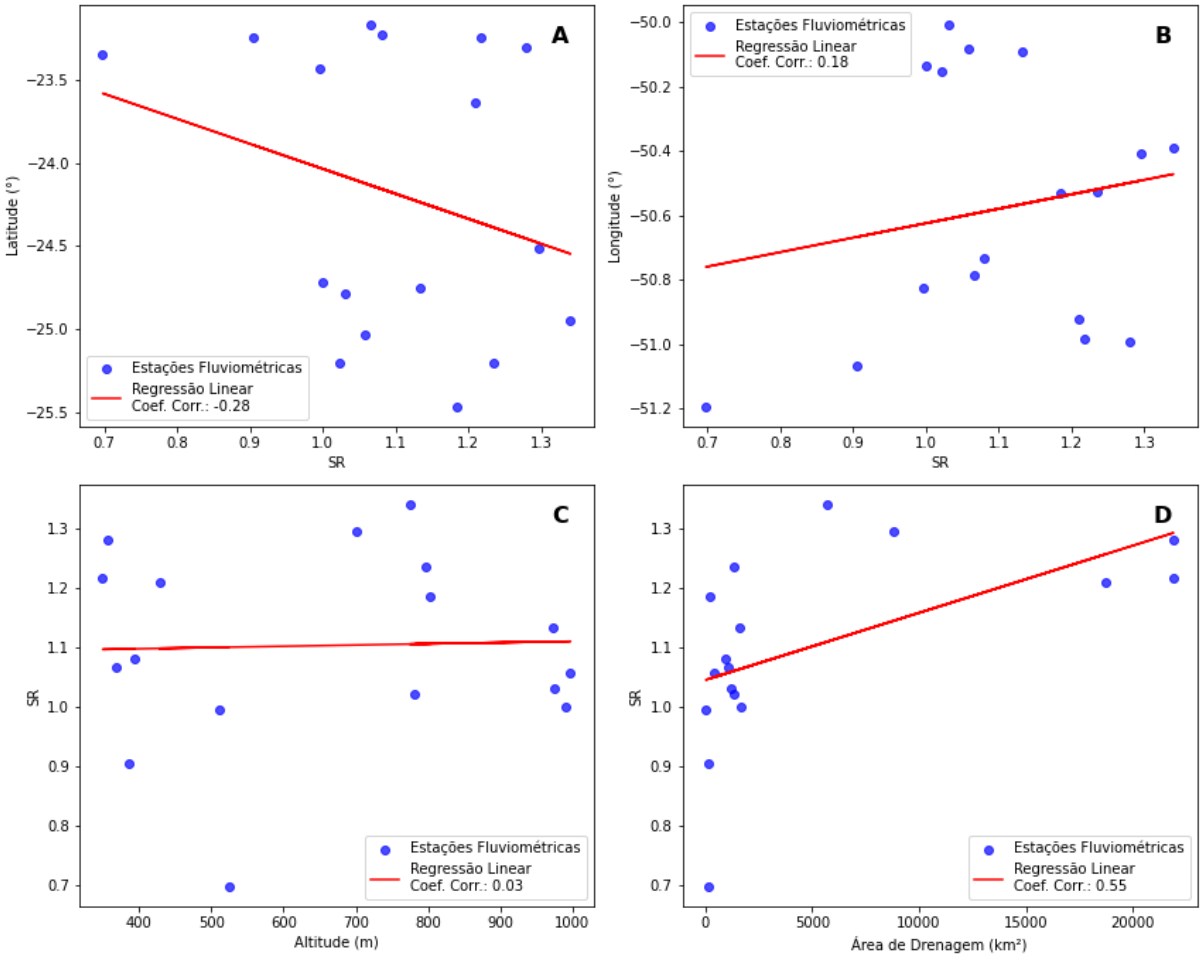

FIGURA 17 – Análise de regressão e correlação de aspectos fisiográficos na bacia do Tibagi, entre o SR e A) latitude, B) longitude, C) altitude e D) área de drenagem.

O método SR se destaca por sua simplicidade, já que requer o menor número possível de parâmetros para classificar regiões hidrologicamente semelhantes sazonalmente. Para uma análise prévia da sazonalidade de vazões, ele se mostra eficaz ao identificar o regime predominante de vazões de estiagem na região em análise.

5.3.2 Índice de Sazonalidade

O foco do método Índice de Sazonalidade (SI) é determinar é o dia médio de ocorrência das vazões de estiagem D, e a sua respectiva intensidade da sazonalidade, por meio do vetor r, que é uma medida da variabilidade da sazonalidade das vazões de estiagem, variando de zero a um.

Uma das formas de se explorar o método SI é a possibilidade de apresentar o Hidrograma convencional em um gráfico Polar, de tal forma que transformam-se os dias em ângulo, conforme indicado pela equação 3.6, e plotam-se os dias pelas vazões médias diárias, como ilustrado pela Figura 18.

Essa representação, torna-se útil especialmente quando o objetivo é dar ênfase nas vazões mínimas ou máximas de uma determinada série histórica, como o representado na Figura 18b. Fica evidente que, para a Estação 64508020, as vazões de estiagem (menores ou iguais a Q_{95}, sendo as vazões de referência ”anual”, da Tabela 5) encontram-se concentradas, grande parte, no segundo semestre do ano. Análise esta, não tão evidente de se obter por inspeção visual do Hidrograma convencional.

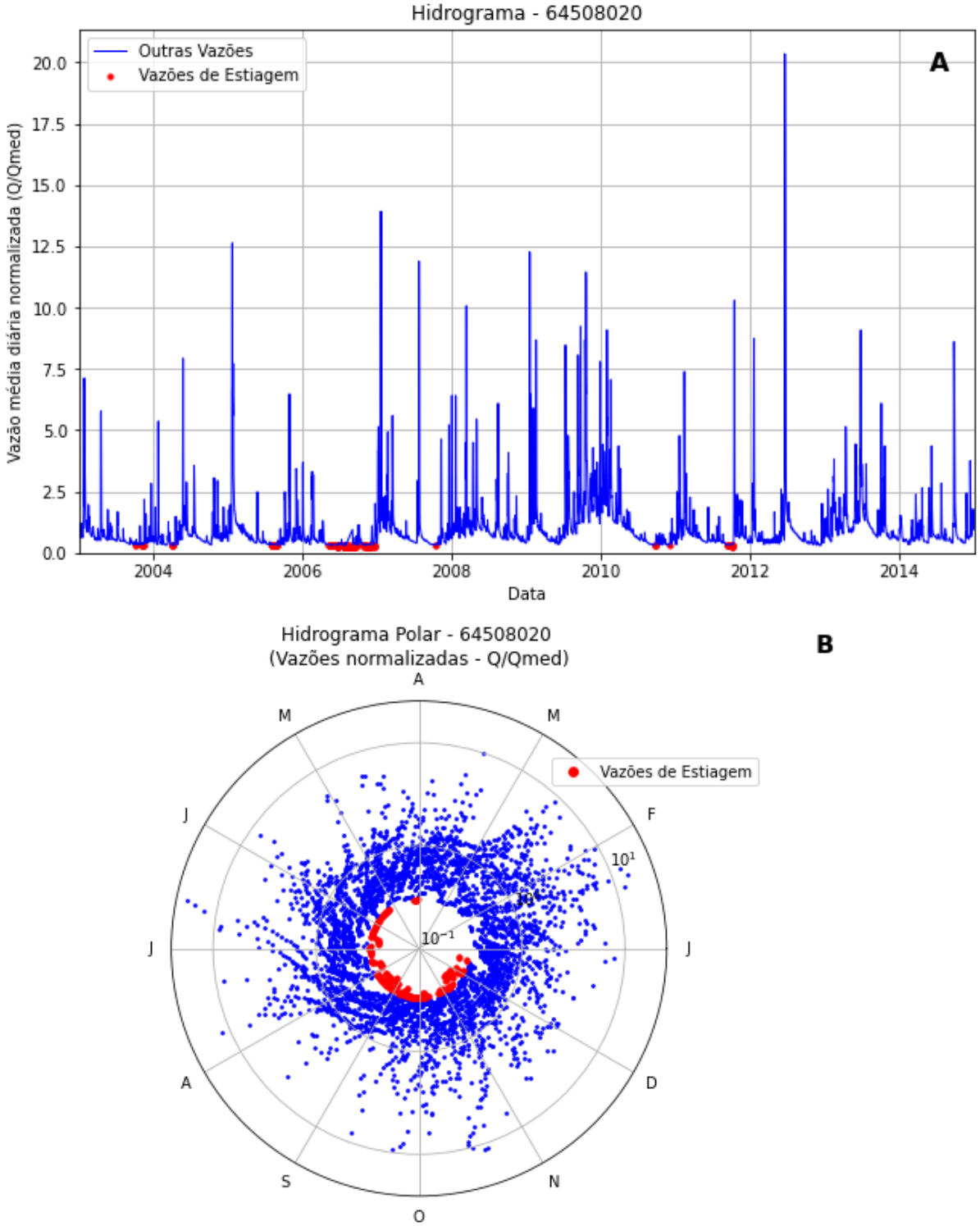

FIGURA 18 – A) Hidrograma e B) Hidrograma Polar das vazões normalizadas pela média (Q/Qmed), de 2003—2014, para a estação 64508020. As vazões iguais ou inferiores a Q_{95} anual são as vazões de estiagem da estação.

Outro produto possível de se obter do índice SI, quando calculados os valores de θ e r para cada uma das estações da bacia (conforme as equações 3.8 e 3.10), é a elaboração de um “Calendário” de sazonalidade, conforme ilustra a Figura 19.

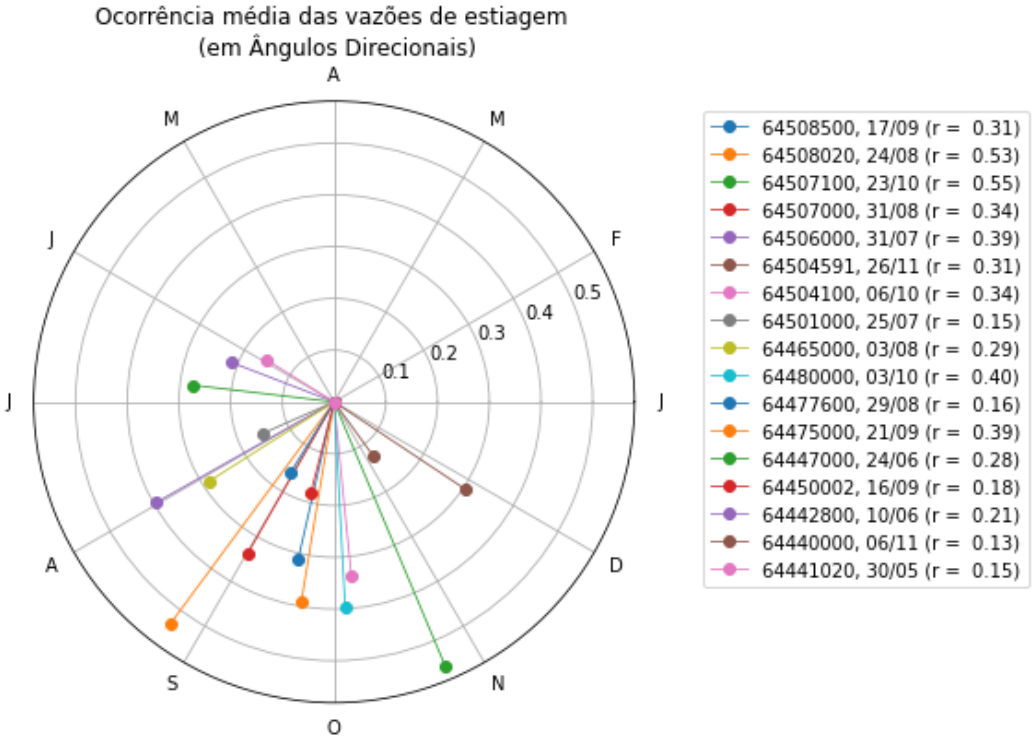

FIGURA 19 – Ocorrência média das vazões de estiagem, em termos de θ e r, para as estações fluviométricas da bacía do Tibagi.

A análise da Figura 19 possibilita extrair informações importantes sobre a bacia hidrográfica como um todo. Ele revela não apenas as datas em que as ocorrências de vazões de estiagem estão concentradas, mas também suas intensidades. Essas informações são visualmente representadas pelo vetor dia médio de ocorrência (r).

No caso da bacia do Tibagi, conforme representado na Figura 19, é perceptível que as ocorrências de vazões de estiagem em 14 das 17 estações na bacia tendem a concentrar-se no segundo semestre do ano. Além disso, a intensidade dessa sazonalidade, representada pelos valores de r, varia de 0.13 na estação 64440000 a 0.55 na estação 64507100.

Os valores calculados no índice SI e seus parâmetros - o vetor de intensidade do dia médio (r) e D, que representa o dia médio de ocorrência (em dia Juliano) - são apresentados na Tabela 7. Essas informações também são representadas espacialmente na Figura 20.

Estação	N (Dias de estiagem)[1]	r	D	Dia médio (dd/mm)	Altitude (m)
64508500	621	0,31	260,7	17/09	368,5
64508020	227	0,53	236,8	24/08	394,3
64507100	466	0,55	296,9	23/10	384,8
64507000	1560	0,34	243,6	31/08	349,5
64506000	450	0,39	212,4	31/07	356,6
64504591	361	0,31	330,9	26/11	524,1
64504100	240	0,34	279,5	06/10	510,8
64501000	683	0,15	206,6	25/07	427,8
64465000	1487	0,29	215,3	03/08	700,3
64480000	227	0,40	276,9	03/10	990,6
64477600	706	0,16	241,6	29/08	973,9
64475000	460	0,39	264,3	21/09	974,7
64447000	658	0,28	175,7	24/06	774,8
64450002	643	0,18	259,2	16/09	997,3
64442800	623	0,21	161,2	10/06	797,1
64440000	497	0,13	310,2	06/11	781,6
64441020	317	0,15	150,2	30/05	803,2

TABELA 7 – Valores obtidos pelo método SI, para as todas as estações.

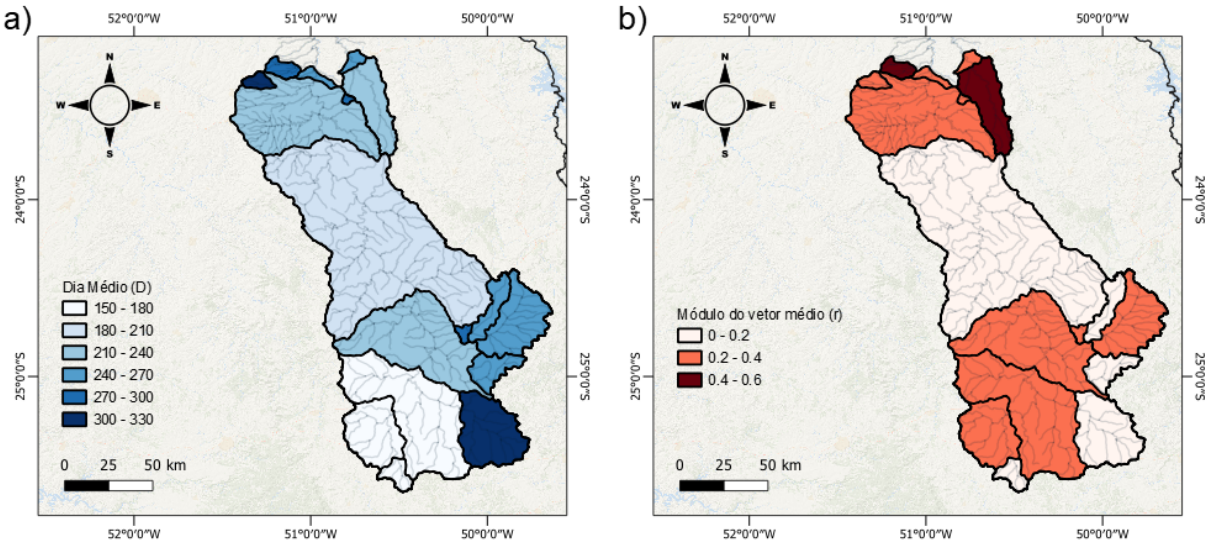

FIGURA 20 – Distribuição espacial do a) Dia Médio (D) de ocorrência de vazões de estiagem nas 17 sub-bacias estudadas, e b) Comprimento do vetor médio (r) .

Os valores de D variam de 150 a 330 (30 de maio a 26 de novembro), podendo ser enquadrados em 6 classes de 30 dias ($\approx$ 1 mês), conforme ilustra o mapa da Figura 20a: $150 \leq D \leq 180$, $180 < D \leq 210$, $210 <$ D ≤ 240, $240 < D \leq 270$, $270 < D \leq 300$ e $300 < D \leq 330$.

Conforme ilustrado na Figura 20a, a bacia do Tibagi exibe uma distribuição bem diversificada do Dia Médio (D) ao longo da região, com uma ocorrência média global

[1] Dias que foram observados valores de vazões menores ou iguais a Q_{95} (vazões de estiagem)

na bacia no dia 30/08. Em um ano não bissexto, seguindo um calendário convencional, os dados revelam a distribuição na bacia hidrográfica do Tibagi segundo a Tabela 8. Os resultados na bacia corroboram com o padrão de estiagem descrito por Salton, Morais e Lohmann (2021).

Dia Médio	Ocorrência (%)
28/08 — 27/09	29,4%
27/09 — 27/10	17,6%
30/05 — 29/06	17,6%
29/07 — 28/08	17,6%
27/10 — 26/11	11,8%
29/06 — 29/07	5,9%

TABELA 8 – Distribuição dos valores de Dia Médio (D) de ocorrência de vazões de estiagem na bacia hidrográfica do Tibagi.

O cenário de distribuição não homogênea do parâmetro D indica que na bacia do Tibagi não há uma sazonalidade forte e marcada nas vazões mínimas. Essa observação torna-se evidente ao analisar o vetor de intensidade do Dia Médio (r). Porém, é possível observar que quanto mais a jusante da bacia, maior é sua sazonalidade, evidenciada pela Fígura 21b, pois quanto mais ao Norte (maior a latitude), maior o r (coeficiente de correlação de 0,61).

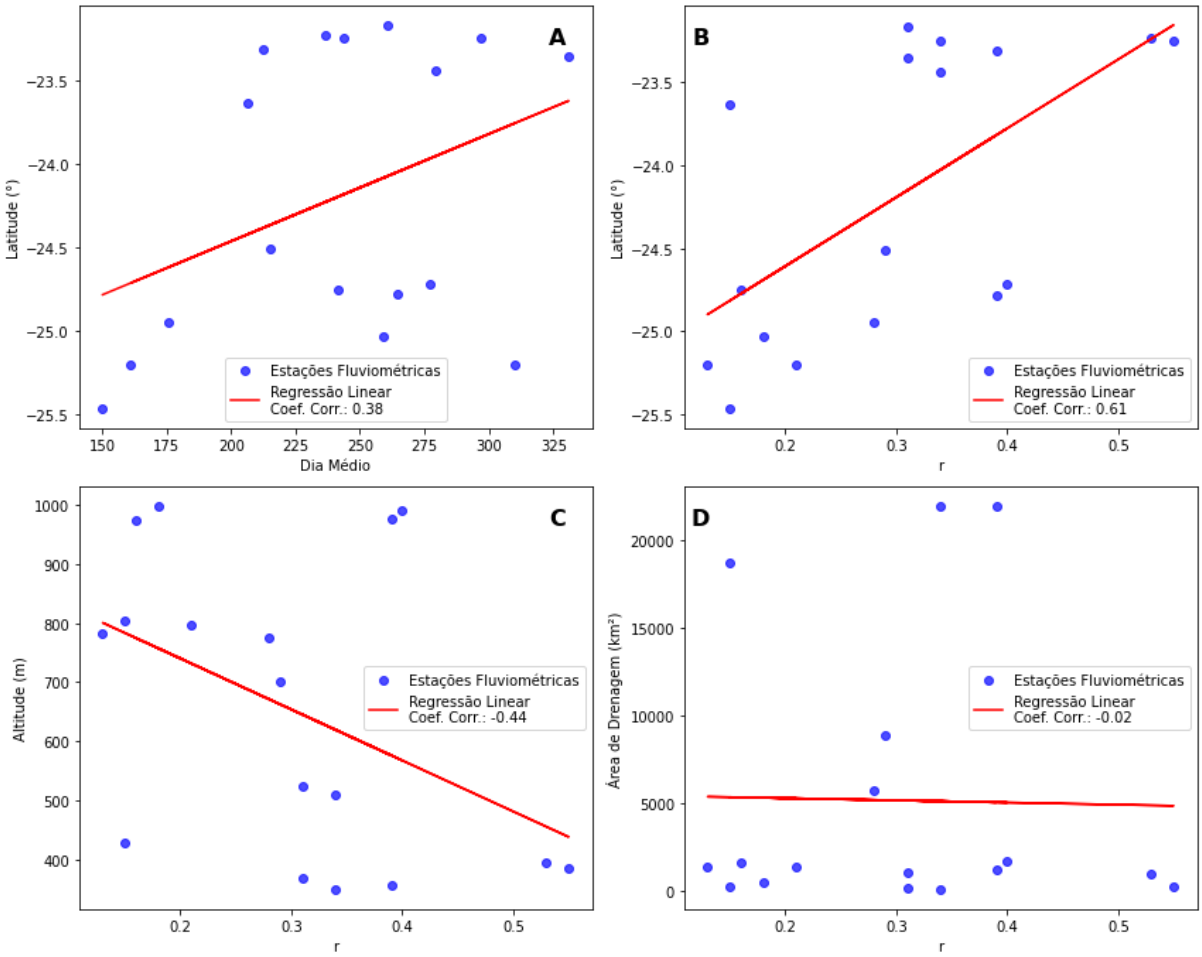

FIGURA 21 – Análise de regressão e correlação de aspectos fisiográficos na bacia do Tibagi, entre a latitude e A) o Dia Médio (D) e B) r, e C) r e Altitude e D) Área de drenagem e r.

A análise da Tabela 7, nas Figuras 20b e 21b revela que, para as bacias situadas mais ao Norte, com exutórios em latitudes superiores a $-23{,}5°$, todas as estações apresentam valores de r acima de 0.3. Isso indica uma sazonalidade ligeiramente mais intensa nessa região. Valores de r iguais a 1.0 indicam uma sazonalidade forte, significando que todas as vazões de estiagem ocorreram no mesmo dia. Por outro lado, r igual a zero representa a ausência de sazonalidade, indicando que todas as vazões de estiagem ocorrem em dias alternados.

No entanto, como observado por Beskow et al. (2014), valores de r superiores a 0.4 podem ser interpretados como indicativos de uma sazonalidade de média a forte. Ao examinar a Figura 20b, nota-se que apenas duas bacias apresentaram valores de r que se enquadram nessa categoria, ambas localizadas mais a jusante da bacia do Tibagi, no norte do estado.

Essa maior sazonalidade, evidenciada por um período de seca mais pronunciado, foi discutida por Salton, Morais e Lohmann (2021), que demonstrou um período

de seca mais acentuado nas regiões ao norte do Paraná. Esta observação também foi destacada por outros estudos, como Caramori et al. (2006), Costa et al. (2009) e Fritzsons et al. (2011), sublinhando que o norte do estado é caracterizado por uma menor pluviosidade. Além disso, Wrege et al. (1999) verificou que as regiões norte e noroeste do Paraná apresentam um elevado risco de deficiência hídrica.

Salton, Morais e Lohmann (2021) concluíram que houve mais secas a medida que se distanciou do oceano e a altitude do estado decresceu, também evidênciando uma maior sazonalidade. Ainda, Vanhoni e Mendonça (2008) e Mendonça e Danni-Oliveira (2017) relatam que a ocorrência de períodos secos está fortemente associada ao relevo e a maritimidade/continentalidade, que por sua vez influencia as massas de ar atuante em cada região. Assim como regiões com altitudes mais elevadas registram maiores índices de pluviosidade ao longo do ano (SALTON; MORAIS; LOHMANN, 2021), levando à uma menor sazonalidade, como é observado na Tabela 7 e na Figura 20b.

Os resultados de r e D estão em consonância com as observações de Nery, Vargas e Martins (1996), que descreveram o regime de chuvas na região como uma precipitação mais uniforme ao longo do ano em grande parte da bacia do Tibagi, contrastando com uma precipitação menos intensa no Norte, refletindo-se no índice de sazonalidade mais acentuado. Além disso, o período de secas, conforme descrito por Salton, Morais e Lohmann (2021), também confirma o comportamento observado na Figura 20a. Essas tendências serão ainda são claramente delineadas no índice SH, proporcionando uma compreensão mais profunda dos padrões climáticos na região.

Portanto, tanto r quanto D, os parâmetros associados ao índice SI, revelam-se úteis para caracterizar a região e identificar áreas hidrologicamente homogêneas (como precipitação, altitude, características de solo) em termos de sazonalidade das vazões de estiagem, podendo ser adotados como critérios para regionalização de vazões mínimas.

O índice SI oferece informações mais detalhadas do que o índice SR, como ressaltado por Beskow et al. (2014). Além disso, o SI não apenas é valioso para avaliar a sazonalidade das vazões de estiagem, mas também pode ser empregado na análise da sazonalidade das vazões de cheias, conforme indicado por Burn, Zrinji e Kowalchuk (1997), Young, Round e Gustard (2000), Laaha et al. (2002) e Laaha e Blöschl (2006).

Por fim, os parâmetros do método SI também podem se mostrar úteis ao delinear as regiões hidrologicamente homogêneas em relação à sazonalidade. Seus parâmetros (D e r) podem oferecer importante suporte na tomada de decisões para outorga de recursos hídricos, especialmente em contextos de conflito hídrico e alta criticidade, como é o caso do observado em diversas áreas da bacia do Tibagi (STINGHEN; CARVALHO; MANNICH, 2022).

5.3.3 Histograma de Sazonalidade

O método SH apresenta a ocorrência de vazões de estiagem (menores ou iguais a Q_{95}) para cada um dos mêses do ano, em todas as estações fluviométricas. Essas frequências são apresentadas na Figura 22.

Este método se destaca por sua riqueza de detalhes em comparação aos outros dois índices de sazonalidade, podendo ser visto como uma “síntese"mais elaborada dos outros métodos. Ao exibir a ocorrência de eventos em cada mês do ano, utilizando 12 parâmetros, ele permite uma análise mais minuciosa e detalhada da distribuição hidrológica sazonal das ocorrências. Essa abordagem detalhada oferece uma visão mais completa e específica dos padrões sazonais, sendo interessante para uma compreensão do comportamento hidrológico ao longo do ano, com relação as vazões de estiagem.

Observa-se na Figura 22 que os meses que apresentaram maiores ocorrências de vazões de estiagem são: agosto, setembro, outubro e maio, respectivamente. Esses valores se comportam de forma muito similar, ao obtido pelo parâmetro D, no SI, ao observar a distribuição espacial por reigões.

5.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS

Para complementar o entendimento dos resultados obtidos, e facilitar visualizações de tendências, a Tabela 9 é disposta com todos os principais resultados obtidos.

A análise da Tabela 9 revela que as estações não apresentam uma sazonalidade extremamente pronunciada. No entanto, é evidente uma tendência de intensificação dessa sazonalidade no sentido norte da bacia, como indicado pelo parâmetro r.

Outro aspecto facilmente perceptível na Tabela 9 é a predominância de regimes de inverno ($SR > 1$) na bacia, o que também é corroborado pelo vetor de Dia Médio (D). Este último destaca claramente que os dias de maior concentração estão, em sua maioria, distribuídos no segundo semestre do ano (150 a 330).

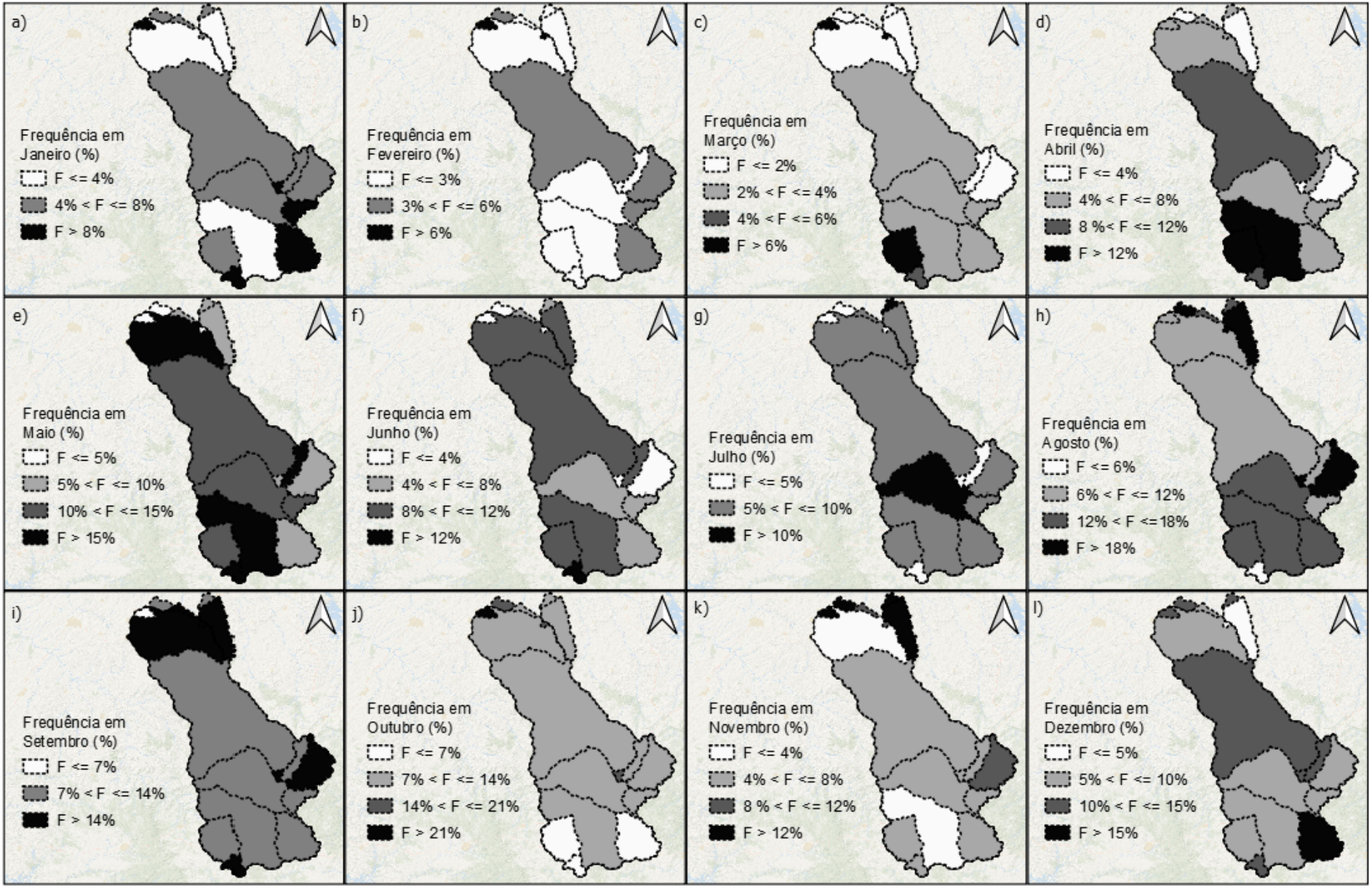

FIGURA 22 – Distribuição espacial dos SH, representando a ocorrência de vazões menores ou iguais a Q_{95} nas sub-bacias do Tibagi, no mês de a) Janeiro, b) Fevereiro, c) Março, d) Abril, e) Maio, f) Junho, g) Julho, h) Agosto, i) Setembro, j) Outubro, k) Novembro, l) Dezembro.

Código	Estação	$q_{95anual}(l/s \cdot km^2)$	$q_{95w}(l/s \cdot km^2)$	$q_{95s}(l/s \cdot km^2)$	SR	D	r
64508500	PONTE PRETA	3,65	3,56	3,79	1,07	260,7	0,31
64508020	CORNÉLIO PROCÓPIO MTE.	4,27	4,27	4,61	1,08	236,78	0,53
64507100	ETA IBIPORÃ (ICM ECOL)	3,97	4,19	3,79	0,90	296,91	0,55
64507000	UHE CAPIVARA JATAIZINHO	3,53	3,26	3,97	1,22	243,6	0,34
64506000	CHÁCARA ANA CLÁUDIA	5,54	4,94	6,32	1,28	212,37	0,39
64504591	LONDRINA MTE. ETA SANEPAR	6,93	8,39	5,85	0,70	330,92	0,31
64504100	ASSAÍ MTE. ETA SANEPAR	6,96	6,99	6,96	1,00	279,49	0,34
64501000	PORTO LONDRINA	4,78	4,49	5,43	1,21	206,65	0,15
64465000	TIBAGI	3,86	3,49	4,52	1,30	215,32	0,29
64480000	LAVRINHA	2,48	2,48	2,48	1,00	276,89	0,4
64477600	CHÁCARA CACHOEIRA	4,96	4,61	5,23	1,13	241,57	0,16
64475000	CASTRO	2,98	2,98	3,08	1,03	264,3	0,39
64447000	ENGENHEIRO ROSALDO LEITÃO	3,67	3,29	4,41	1,34	175,65	0,28
64450002	SUMIDOURO - REPRESA ALAGADOS	4,20	3,97	4,20	1,06	259,19	0,18
64442800	LAJEADO	3,62	3,37	4,17	1,23	161,18	0,21
64440000	SANTA CRUZ	3,81	3,72	3,81	1,02	310,19	0,13
64441020	ETA - IRATI	3,19	2,98	3,53	1,18	150,22	0,15

TABELA 9 – Síntese dos resultados obtidos para todas as estações fluviométricas.

6 CONCLUSÃO

“Nada é permanente, exceto a mudança.”
Heráclito;

Os valores das vazões de referência sazonais determinados para a bacia hidrográfica do Tibagi oferecem um ganho significativo, podendo chegar a 20% da vazão de referência anual quando adotadas as vazões de referências para o período semestral, com uma restrição de até 15%. Esta restrição, especialmente observada em 11 das 17 bacias hidrográficas durante o período seco, destaca a importância de ajustar as outorgas para garantir a disponibilidade hídrica necessária. Em contrapartida, durante o período chuvoso, 11 das 17 bacias apresentaram ganho de vazão disponível ao adotar a permanência semestral, enquanto 4 não apresentaram diferença em relação à vazão de referência anual.

Ao analisar o Indicador de Comprometimento de Bacias (ICB) na bacia do Tibagi, conforme descrito por Stinghen, Carvalho e Mannich (2022), fica evidente que várias sub-bacias enfrentam uma criticidade considerável. No entanto, a aplicação de vazões sazonais pode auxiliar a mitigar esses conflitos em muitas partes da bacia, especialmente em áreas com alta demanda, como o noroeste da bacia, em que deve-se avaliar se certos empreendimentos utilizam mais água em certos períodos do ano, e então usufruir da vazão de referência sazonal na outorga. A região norte e noroeste é também onde a bacia apresenta os maiores valores de r, indicando a região com a sazonalidade mais forte.

Pode-se concluir que, apesar da bacia do Tibagi não apresentar uma forte sazonalidade, em boa parte das bacias (apenas duas, das 17 apresentam valores de r acima de 0.4), observa-se que há uma tendência de concentração de vazões de estiagem em um período do ano, como indicado pelo parâmetro D, e melhor observado pelo método SH, em que os meses de agosto, setembro, outubro e maio apresentaram as maiores ocorrências de vazões de estiagem, respectivamente.

Para melhor orientar a tomada de decisões, o uso dos índices de sazonalidade se apresenta como uma alternativa valiosa, proporcionando uma compreensão mais aprofundada do comportamento espacial da disponibilidade hídrica, considerando o critério de outorga do estado do Paraná, por meio de Q_{95}. Estes índices podem ser uma ferramenta importante para empresas e órgãos gestores, como para o processo de outorga, ao decidir sobre locais de captação (ou diluição, no caso de lançamentos), permitindo uma análise mais precisa das demandas sazonais e frequência de uso do recurso hídrico.

Além disso, os índices podem auxiliar a definir regiões homogêneas, junto com outras características que possam ter importância nas bacias (geografia, altitude, etc.), no que diz respeito a vazões de estiagem, visando à regionalização hidrológica de forma adequada e auxiliando a gestão de recursos hídricos no Paraná.

Apesar de métodos como SI e SH se destacarem como as melhores opções para descrever sazonalmente as regiões hidrológicas e auxiliar na gestão de recursos hídricos, incluindo a outorga e a aplicação de vazões de referências sazonais quando necessário, o método SR também se mostra uma alternativa útil. Ele pode oferecer uma análise inicial das diferenças entre os períodos chuvosos e secos dos anos, oferecendo entendimentos importantes para análises subsequentes.

REFERÊNCIAS

ALVES, Patrícia Layne et al. Capacidade de interceptação pelas árvores e suas influências no escoamento superficial urbano. Universidade Federal de Goiás, 2015. Citado 1 vez na página 13.

ANA. **Conjuntura dos recursos hıdricos no Brasil 2021: informe anual**. [S.l.]: ANA: Brasília, DF, 2021. Citado 1 vezes nas páginas 17, 18.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. [S.l.]: ANA: Brasília, DF, 2019. Citado 9 vezes nas páginas 24, 25, 27, 28.

_____. **Enquadramento dos corpos d'água em classes**. [S.l.: s.n.], 2020. Conjuntura recursos hídricos brasil. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/encarte_enquadramento_conjuntura2019.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2023. Citado 1 vez na página 21.

_____. **Hidroweb - Sistema de Informações Hidrológicas**. [S.l.: s.n.], mar. 2023. https://www.snirh.gov.br/hidroweb/download. Acesso em: 08/04/2023. Citado 3 vezes nas páginas 14, 26, 38, 39.

_____. **ORIENTAÇÕES GERAIS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA COBRANÇA PELO USO DE RECURSOS HIDRICOS EM BACIAS HIDROGRAFICAS**. [S.l.: s.n.], 2021. Guia de orientações Gerais para Cobrança. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos/cobranca/arquivos-cobranca/documentos-relacionados/guia-de-orientacoes-gerais-cobranca.pdf>. Acesso em: 7 mai. 2023. Citado 1 vez na página 22.

_____. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília - DF, 2019. ISBN 978-85-8210-059-2. Citado 3 vez na página 20.

ARAI, Fabiane Kazue et al. Seasonality and criteria for concession of water in the Ivinhema basin. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, e1969108391–e1969108391, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 13, 29–31, 33.

AZEVEDO, Luiz Gabriel T; PORTO, Rubem LL; PORTO, Monica. Sistema de Apoio à Decisão para o Gerenciamento Integrado de Quantidade e Qualidade da água: Metodologia e Estudo de Caso. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 1, p. 21–51, 1998. Citado 1 vez na página 13.

BESKOW, Samuel et al. Índices de sazonalidade para regionalização hidrológica de vazões de estiagem no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 18, p. 748–754, 2014. Citado 7 vezes nas páginas 14, 34, 36, 51, 58, 59.

BOF, Luiz Henrique Nobre et al. Analysis of appropriate timescales for water diversion permits in Brazil. **Environmental Management**, Springer, v. 51, p. 492–500, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 13, 29–32.

BRASIL. **Lei n. 9.433 de 8 de janeiro de 1997**. [S.l.: s.n.], jan. 1997. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Citado 2 vezes nas páginas 18, 21, 22.

_____. **Lei n. 9.984 de 17 de julho de 2000**. [S.l.: s.n.], jul. 2000. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, integrante do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (Singreh) e responsável pela instituição de normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico. (Redação dada pela LEI 14.026, DE 15/07/2020). Citado 0 vez na página 21.

BURN, Donald H; ZRINJI, Zolt; KOWALCHUK, Michael. Regionalization of catchments for regional flood frequency analysis. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 2, n. 2, p. 76–82, 1997. Citado 4 vezes nas páginas 14, 34, 59.

CAMARA, Ana Carolina Farias Coêlho. Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB), 2003. Citado 1 vez na página 23.

CARAMORI, P. H. et al. Análise Histórica do Clima Paranaense, 2006. Citado 1 vez na página 59.

CASTRO, Jorge Luiz de; FERNANDES, Silva Maria Wilda;
ALMEIDA, Rosa Lívia Freitas de. Estatística e Probabilidade. **História**, v. 9, p. 3, 2015. Citado 1 vez na página 36.

CATALUNHA, Márcio José. **Sistema integrado em rede para gestão do uso múltiplo da água e regionalização da Q7,10 para os períodos mensal, bimestral, trimestral e anual**. 2004. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do

título de “Doctor Scientiae” – Universidade Federal de Viçosa. Citado 4 vezes nas páginas 13, 30–32.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. **Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, p. 336, 2013. Citado 1 vez na página 24.

CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE GOIÁS - CERHI. **Resolução CERHí nº 22/2019**. Goiás: [s.n.], 2019. Estabelece o Regulamento do Sistema de outorga das águas de domínio do Estado de Goiás e dá outras providências. Citado 1 vez na página 33.

COSTA, Ângela Beatriz F da et al. Análise climatológica de dias consecutivos sem chuva no Estado do Paraná, 2009. Citado 1 vez na página 59.

CPRM/ANEEL, CPRM-SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Regionalização de vazões da sub-bacia 24**. [S.l.], 2001. Convênio CPRM/ANEEL nº015/2000 – 013/CPRM/00. Citado 1 vez na página 25.

CRUZ, Jussara Cabral. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais, 2001. Citado 1 vez na página 29.

ESCAP, UN et al. **Water security & the global water agenda: A UN-water analytical brief**. [S.l.]: United Nations University (UNU), 2013. Citado 1 vez na página 18.

EUCLYDES, Humberto Paulo; FERREIRA, Paulo Afonso; FARIA FILHO, RF. Critério de outorga sazonal para a agricultura irrigada no estado de Minas Gerais–Estudo de Caso. **Revista Item–Irrigação e Tecnologia Moderna. Brasília**, n. 71/72, p. 42–50, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 13, 29, 31, 32.

FERREIRA, Gláucia Machado. Regionalização de vazões de referência Q7, 10 e Q90, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 23, 24.

FRITZSONS, Elenice et al. Análise da pluviometria para definição de zonas homogêneas no Estado do Paraná. **RA’E GA-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, 2011. Citado 1 vez na página 59.

GERAIS, Minas. **Decreto Estadual nº 47866, de 19/02/2020**. [S.l.: s.n.], fev. 2020. Estabelece o Regulamento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas e dá outras providências. Citado 0 vez na página 31.

IGAM. **Estado aprimora gestão hídrica com acompanhamento da regionalização de vazões**. [S.l.: s.n.], 2019.
http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/2120-estado-aprimora-gestao-hidrica-com-acompanhamento-da-regionalizacao-de-vazoes. Acesso em: 08/06/2023. Citado 1 vez na página 13.

IGAM. **Portaria IGAM Nº 32, de 06 de setembro de 2022**. [S.l.: s.n.], 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. Citado 1 vez na página 33.

JADE, Líria. **Onde está a água no Brasil?** [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.ebc.com.br/especiais-agua/agua-no-brasil/#:~:text=Cerca%5C%20de%5C%2012%5C%25%5C%20da%5C%20disponibilidade,dos%5C%20recursos%5C%20h%5C%C3%5C%ADdricos%5C%20do%5C%20pa%5C%C3%5C%ADs.>. Acesso em: 18 abr. 2023. Citado 1 vez na página 16.

JOHNSSON, Rosa Maria Formiga et al. O conceito emergente de segurança hídrica. **Sustentare**, v. 1, n. 1, p. 72–92, 2018. Citado 1 vez na página 18.

LAAHA, Gregor et al. Modelling summer and winter droughts as a basis for estimating river low flows. **International Association of Hydrological Sciences, Publication**, n. 274, p. 289–296, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 14, 34, 36, 51, 59.

LAAHA, Gregor; BLÖSCHL, Günter. Seasonality indices for regionalizing low flows. **Hydrological Processes: An International Journal**, Wiley Online Library, v. 20, n. 18, p. 3851–3878, 2006. Citado 12 vezes nas páginas 4, 5, 14, 34, 36, 59.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck. Recursos hídricos no Brasil e no mundo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001., 2001. Citado 1 vez na página 16.

LOPES, Luis Felipe Dias. Apostila de Estatística. DE–UFSM, 2003. Citado 1 vez na página 36.

MANNICH, Michael; STINGHEN, Camila Marin. Diagnóstico de outorgas de captação e lançamento de efluentes no Paraná e impactos dos usos insignificantes. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, n. 2019, 2019. Citado 1 vez na página 38.

MELLO, CR de et al. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, Elsevier, v. 202, p. 88–102, 2013. Citado 1 vez na página 51.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. [S.l.]: Oficina de textos, 2017. Citado 1 vez na página 59.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agropecuaria brasileira em numeros**. Esplanada dos Ministérios, Bloco D, Edifício Sede, Brasília/DF: [s.n.], abr. 2020. Valor Bruto da Produção (VBP) – março/2020. Citado 1 vez na página 30.

MOREIRA, Heitor Soares et al. Cenários de disponibilidade hídrica para concessão de outorga: estudo de caso da Bacia Vertentes do Rio Grande, Estados de Minas Gerais e São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 7, n. 15, p. 341–350, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 13, 29–31, 33.

MUNDIAL, Banco. **Population growth (annual %)**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW?end=2021&start=1961&view=chart>. Acesso em: 4 mai. 2023. Citado 1 vez na página 18.

NAGHETTINI, Mauro; PINTO, Éber José de Andrade. **Hidrologia estatística**. [S.l.]: CPRM, 2007. Citado 1 vez na página 25.

NERY, Jonas Teixeira; VARGAS, Walter Mario; MARTINS, MLOF. Caracterização da precipitação no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, n. 2, p. 81–89, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 44, 59.

OECD. **Water security for better lives**. [S.l.]: OECD, 2013. Citado 1 vez na página 19.

PARANa. **Decreto Estadual 9.957 de 23 de Janeiro de 2014.** [S.l.: s.n.], jan. 2014. Diário Oficial Nº 9.131. Dispõe sobre o regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos e adota outras providências. Citado 1 vez na página 23.

PARANÁ. **Lei Estadual 12.726 - 26 de Novembro de 1999**. [S.l.: s.n.], nov. 1999. Publicado no Diário Oficial no. 5628 de 29 de Novembro de 1999. Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências. Citado 0 vez na página 22.

_____. **Lei n. 16.242 de 13 de Outubro de 2009**. [S.l.: s.n.], 2009. Publicado no Diário Oficial de 13 de Outubro de 2009. CRIA O INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, CONFORME ESPECIFICA E ADOTA OUTRAS PROVIDÊNCIAS. Citado 0 vez na página 22.

_____. **Plano da Bacia do Rio Tibagi**. [S.l.: s.n.], 2013. https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-05/tibagi-produto_06_programa_de_intervencoes_na_bacia_rev0.pdf. Citado 1 vez na página 42.

_____. **Portaria IAT n. 125 DE 06/05/2022**. [S.l.: s.n.], 2022. Publicado no Diário Oficial em 9 de maio de 2022. Dispõe sobre a atualização do Manual Técnico de Outorgas, especificadamente sobre os prazos máximos permitidos para cada modalidade de uso através dos documentos de outorga prévia, outorga de direito, declaração de uso independente de outorga e declaração de anuência prévia. Citado 1 vez na página 23.

PAROLIN, Mauro; VOLKMER-RIBEIRO, Cecília; LEANDRINI, Josimeire Aparecida. **Abordagem ambiental interdisciplinar em bacias hidrográficas no Estado do Paraná**. [S.l.]: Editora da Fecilcam Campo Mourão, 2010. Citado 2 vez na página 50.

PEDDE, Simona; KROEZE, Carolien; RODRIGUES, Lineu N. Escassez hídrica na América do Sul: situação atual e perspectivas futuras. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 16, 18.

PEREIRA, Mauri César Barbosa; SCROCCARO, José Luiz. **Bacias hidrográficas do Paraná: uma série histórica [online]. Curitiba: SUDERHSA, 2009. [viewed 16 fev. 2016]**. [S.l.: s.n.], 2009. Citado 1 vez na página 38.

RIBEIRO, Thiago Barboza et al. Estimativa Das Vazões Mínimas De Referência (Q7, 10, Q95 E Q90) Anuais E Semestrais Para A Bacia Do Rio Branco. **Anais XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 13, 29–31, 33.

SALTON, Flávia Galvanini; MORAIS, Heverly; LOHMANN, Marciel. Períodos secos no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 36, p. 295–303, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 57–59.

SHUMWAY, Robert H; STOFFER, David S; STOFFER, David S. **Time series analysis and its applications**. [S.l.]: Springer, 2000. v. 3. Citado 1 vez na página 29.

SILVA, Antônio M da; OLIVEIRA, Polyanna M de et al. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 10, p. 374–380, 2006. Citado 1 vez na página 23.

SILVA, Bruno Marcel Barros da; SILVA, Demetrius David da; MOREIRA, Michel Castro. Influência da sazonalidade das vazões nos critérios de outorga de uso da água: estudo de caso da bacia do rio Paraopeba. **Revista Ambiente & Água**, SciELO Brasil, v. 10, p. 623–634, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 13, 29–31, 33.

SILVA, Demétrius David da; MARQUES, Felipe Azevedo; LEMOS, Alysson Feliciano. Flexibilidade das vazões mínimas de referência com a adoção do período trimestral. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 19, n. 3, p. 244–254, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 13, 29, 31.

SILVA, José Francisco Rêgo e; FARIAS, Jose Alexandre Moreira; COELHO, Luiz da Silva. Regionalização de vazões no estado do Maranhão. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011. Citado 2 vez na página 28.

SILVA, Luciano Meneses Cardoso da; MONTEIRO, Roberto Alves. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens**. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 1 vez na página 21.

SNIRH. **Balanço Hídrico Quantitativo**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=ac0a9666e1f340b387e8032f64b2b85a>. Acesso em: 18 abr. 2023. Citado 2 vezes nas páginas 16, 17, 22.

STINGHEN, Camila Marin; CARVALHO, João Marcos; MANNICH, Michael. Aplicação de indicador de estresse hídrico na Bacia do Rio Tibagi para a identificação de bacias críticas quanto ao uso dos recursos hídricos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 19, n. 2022, 2022. Citado 6 vezes nas páginas 32, 38, 48, 59, 63.

SUDERHSA. **Manual Técnico de Outorgas**. Revisão 01. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - DEOF, nov. 2006. Citado 1 vez na página 28.

UEL. **Bacia do Rio Tibagi**. [S.l.: s.n.]. http://www.uel.br/projetos/tibagi/BACIA.HTM. Acesso em: 08/06/2023. Citado 1 vez na página 37.

VANHONI, Felipe; MENDONÇA, Francisco. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, 2008. Citado 1 vez na página 59.

VEZZA, Paolo; COMOGLIO, Claudio; ROSSO, Maurizio et al. Low flows regionalization in north-western Italy. **Water resources management**, Springer, v. 24, p. 4049–4074, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 34, 41.

VEZZA, Paolo; COMOGLIO, Claudio; VIGLIONE, Alberto et al. The influence of soil characteristics in low flows regionalization. **American Journal of Environmental Sciences**, Science Publications, v. 5, n. 4, p. 536–546, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 14, 34.

WREGE, Marcos Silveira et al. Risco de deficiência hídrica na cultura do milho no estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, v. 34, p. 1119–1124, 1999. Citado 1 vez na página 59.

WU, Shaohong et al. Climate change and water. **Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva**, 2008. Citado 1 vez na página 16.

YOUNG, AR; ROUND, CE; GUSTARD, Alan. Spatial and temporal variations in the occurrence of low flow events in the UK. **Hydrology and Earth System Sciences**, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 4, n. 1, p. 35–45, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 14, 34, 59.

ZONAS Climáticas do Brasil, conforme KÃ¶ppen. [S.l.]: Centro de Estudos da Metropole, jun. 2021. DOI: 10.55881/cem.db.clk001. Disponível em: <https://doi.org/10.55881%2Fcem.db.clk001>. Citado 0 vez na página 50.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS SELECIONADAS

Nesse Apêndice serão apresentados os dados de monitoramento das estações fluviométricas.

A.1 FALHAS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS

Os períodos de monitoramento de todas as estações fluviométricas com dados consistidos encontradas dentro da Bacia do Tibagi, com o respectivo percentual de falhas ao longo da série histórica:

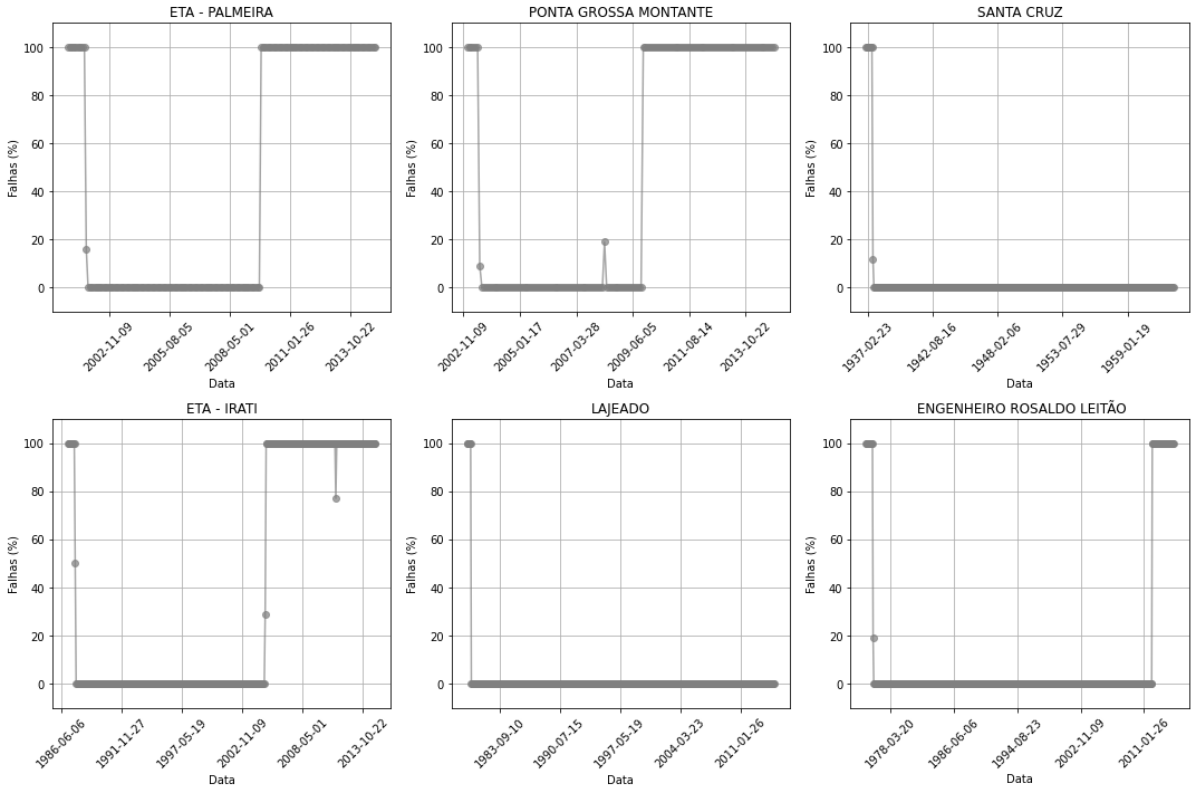

FIGURA 23 – Falhas das estações ”ETA - PALMEIRA”, ”PONTA GROSSA MONTANTE”, ”SANTA CRUZ”, ”ETA - IRATI”, ”LAJEADO” e ”ENGENHEIRO ROSALDO LEITÃO”

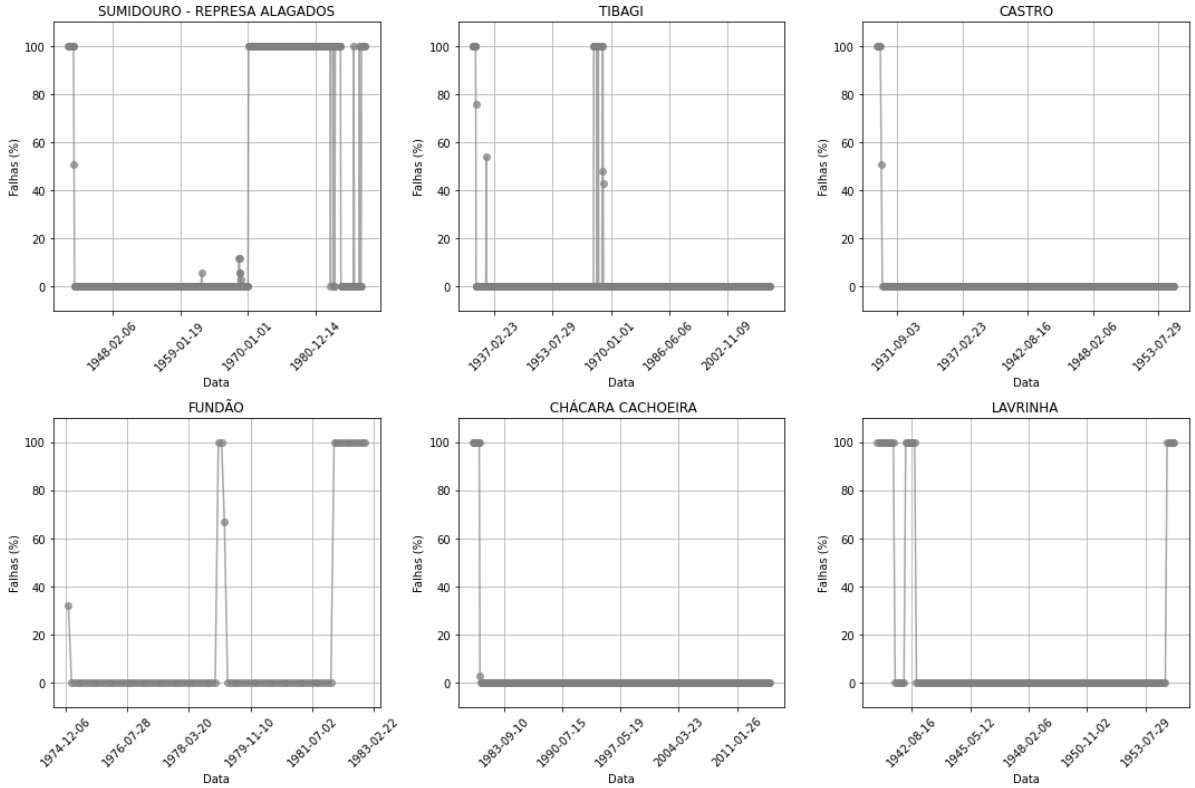

FIGURA 24 – Falhas das estações ”SUMIDOURO - REPRESA ALAGADOS”, ”TIBAGI”, ”CASTRO”, ”FUNDÃO”, ”CHÁCARA CACHOEIRA” e ”LAVRINHA”.

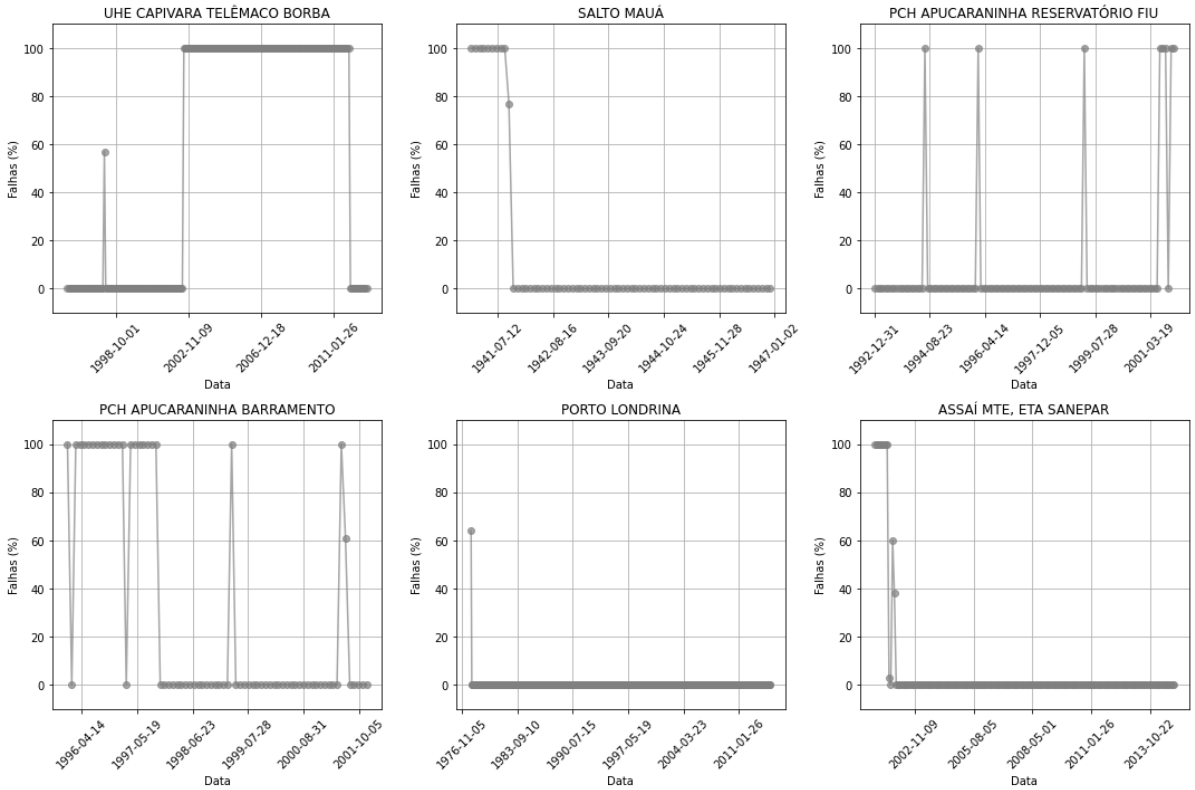

FIGURA 25 – Falhas das estações ”UHE CAPIVARA TELÊMACO BORBA”, ”SALTO MAUÁ”, ”PCH APUCARANINHA RESERVATÓRIO”, ” PCH APUCARANINHA BARRAMENTO”, ”PORTO LONDRINA” e ”ASSAÍ MTE. ETA SANEPAR”.

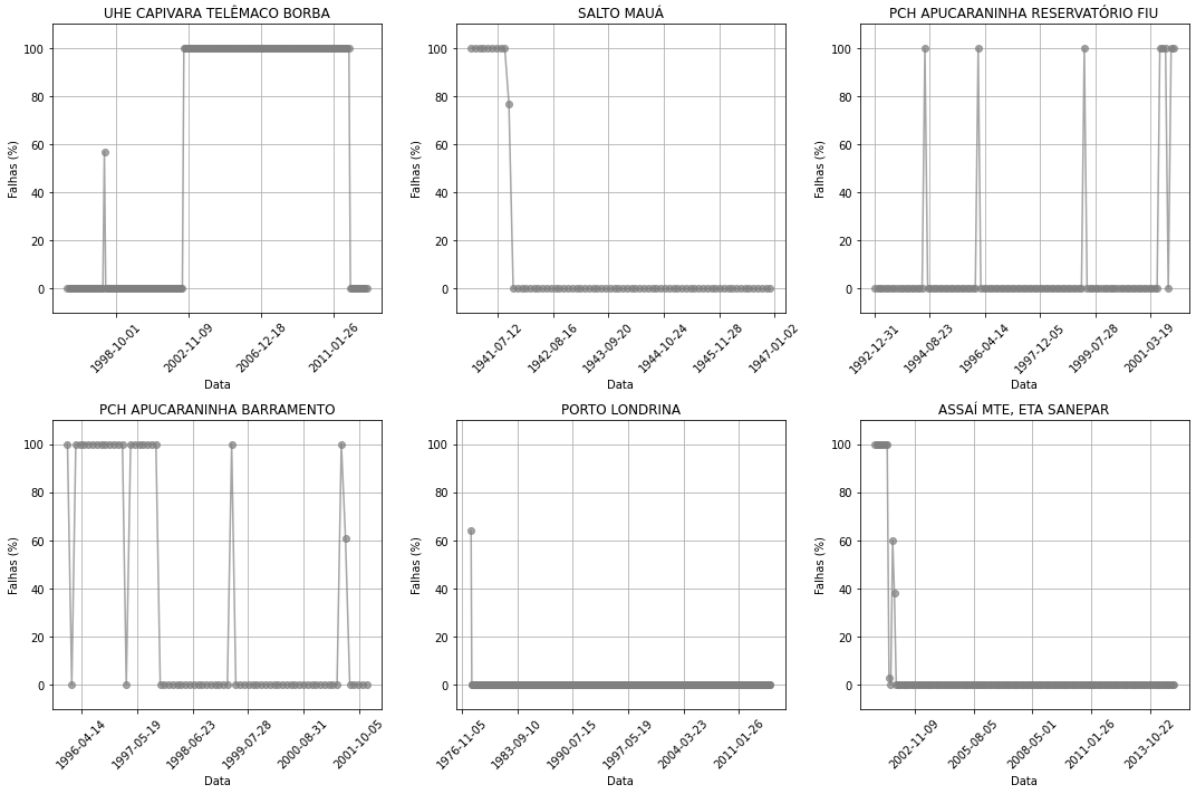

FIGURA 26 – Falhas das estações ”LONDRINA MTE. ETA SANEPAR”, ”CHACARA ANA CLÁUDIA”, ”UHE CAPIVARA JATAIZINHO”, ”ETA IBIPORÃ (CM ECOL.)”, ”CORNÉLIO PROCÓPIO MTE.” e ”PONTE PRETA”.

A.2 CURVAS DE PERMANÊNCIA PARA CADA ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

As curvas de permanência para cada uma das estações fluviométricas utilizadas são representadas abaixo:

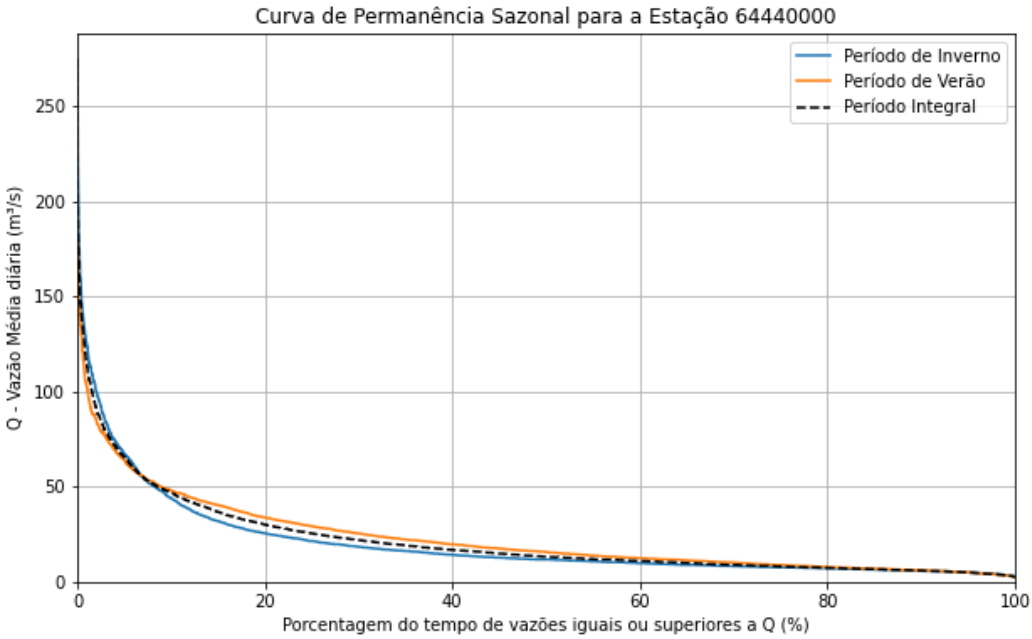

FIGURA 27 – Curva de permanência para vazões do período integral e períodos sazonais, da estação 64440000.

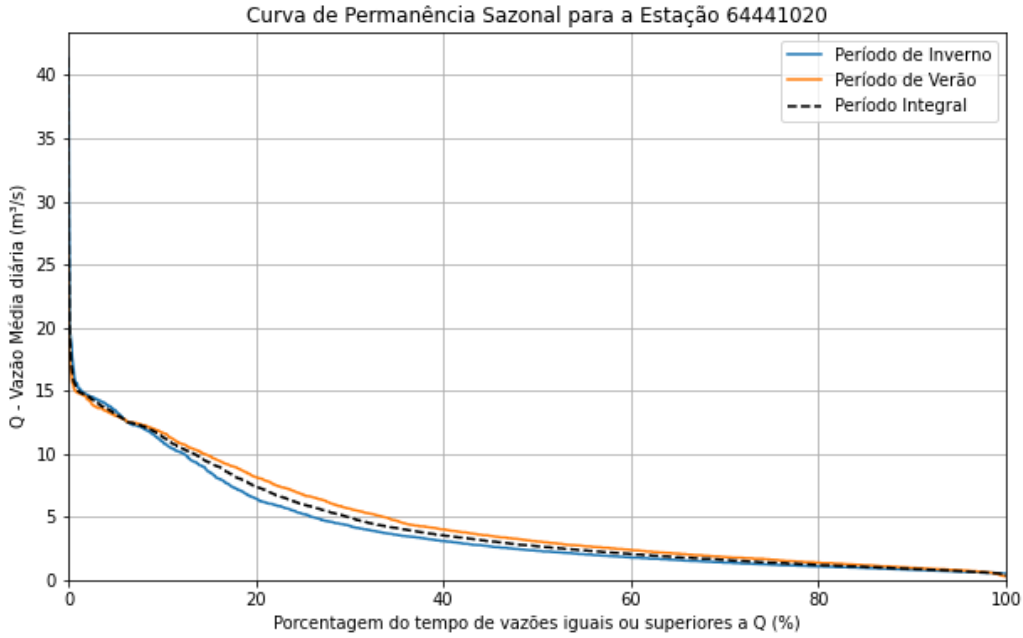

FIGURA 28 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64441020.

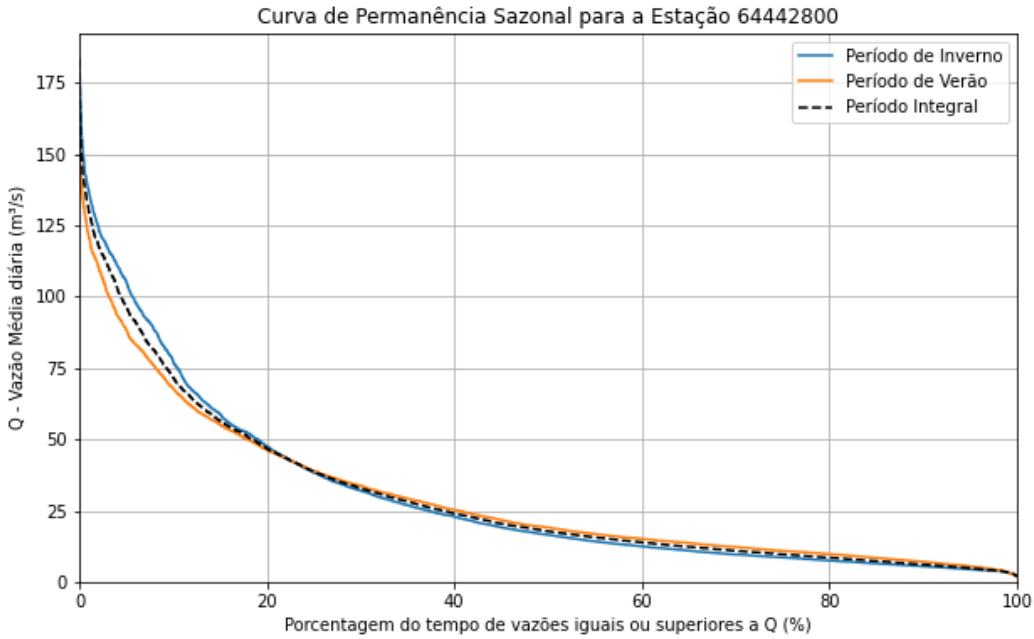

FIGURA 29 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64442800.

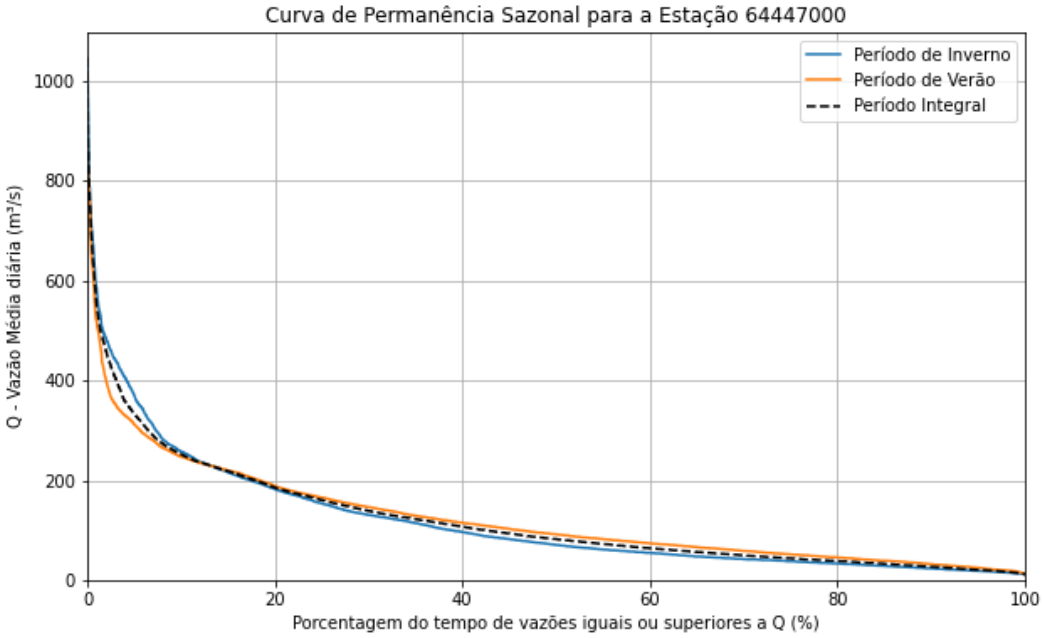

FIGURA 30 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64447000.

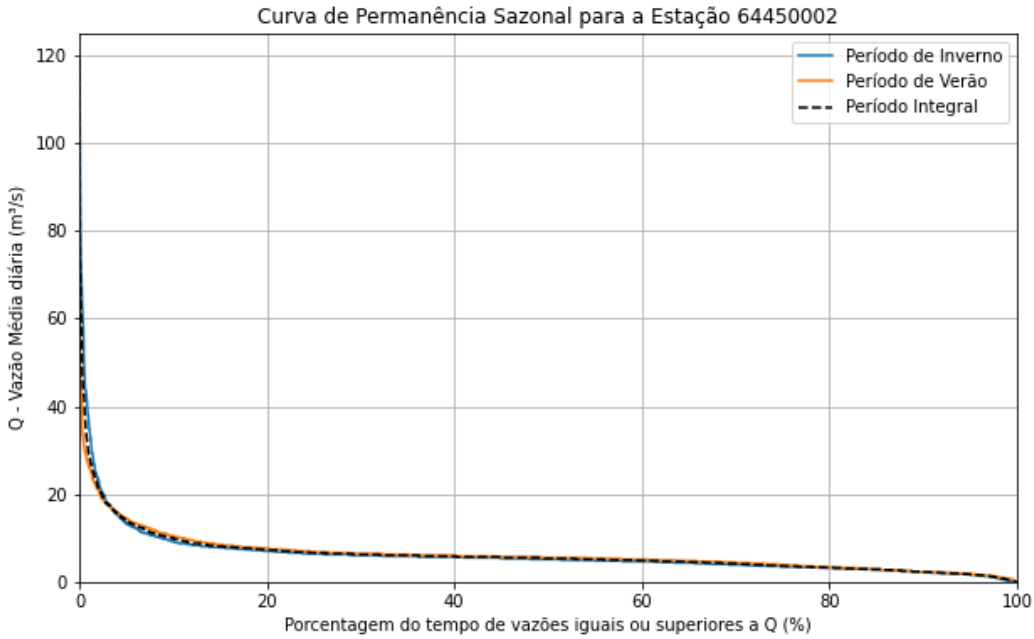

FIGURA 31 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64450002.

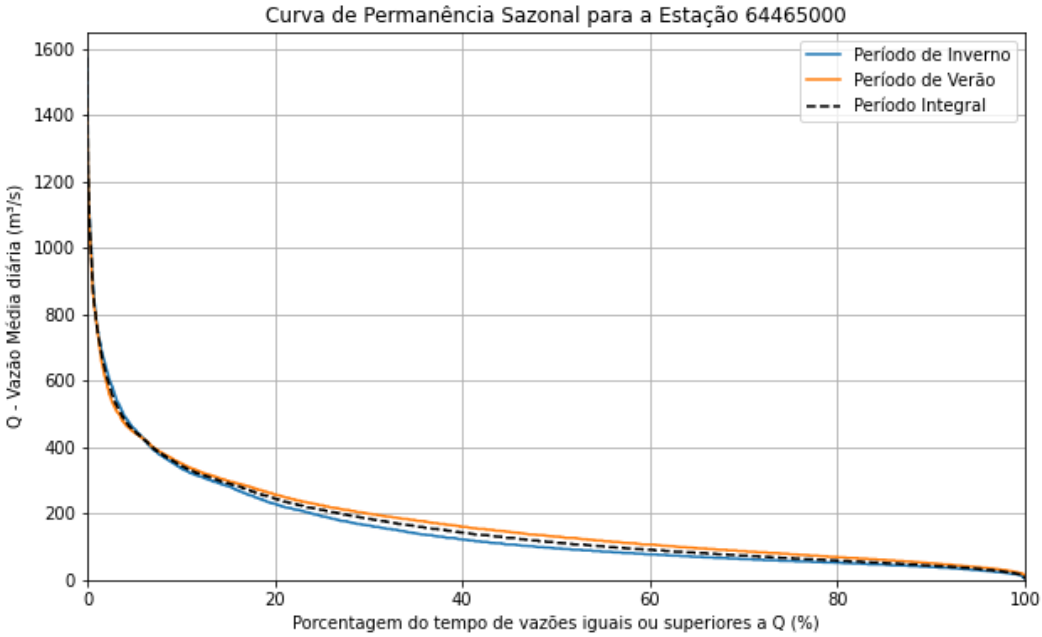

FIGURA 32 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64450002.

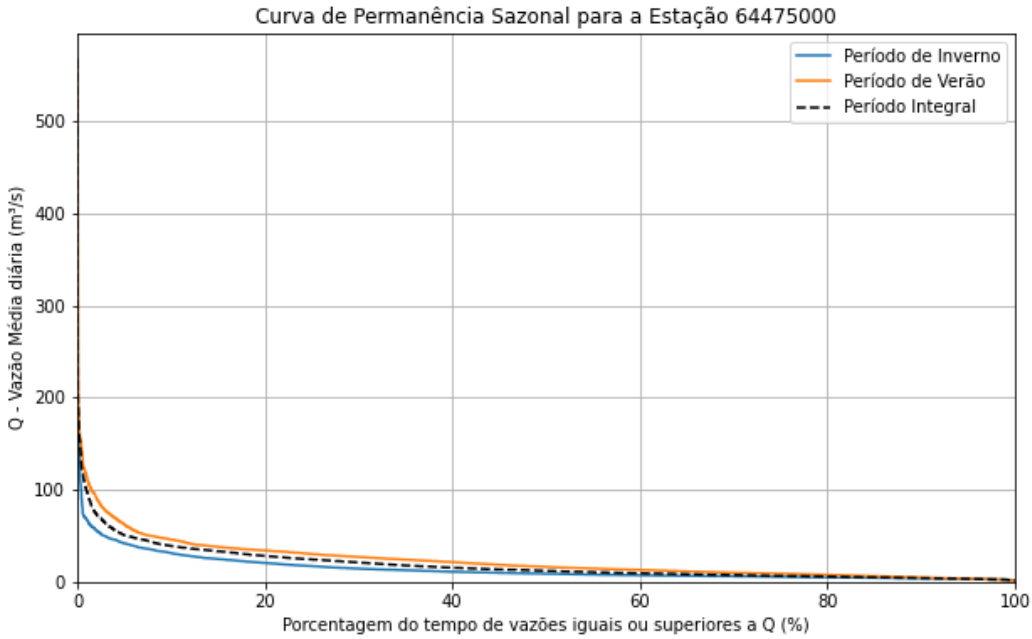

FIGURA 33 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64475000.

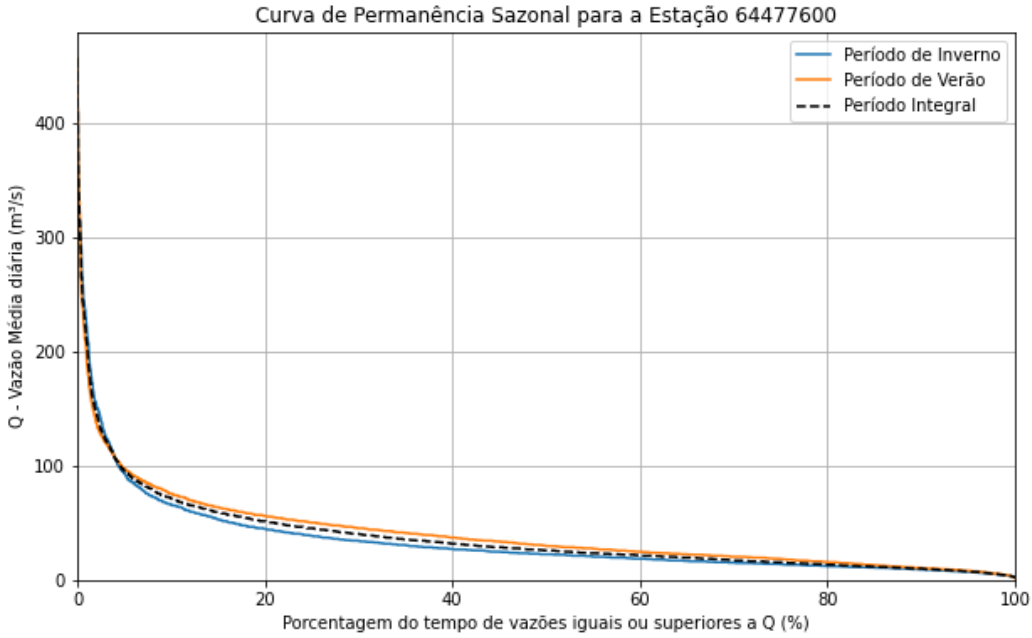

FIGURA 34 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64477600.

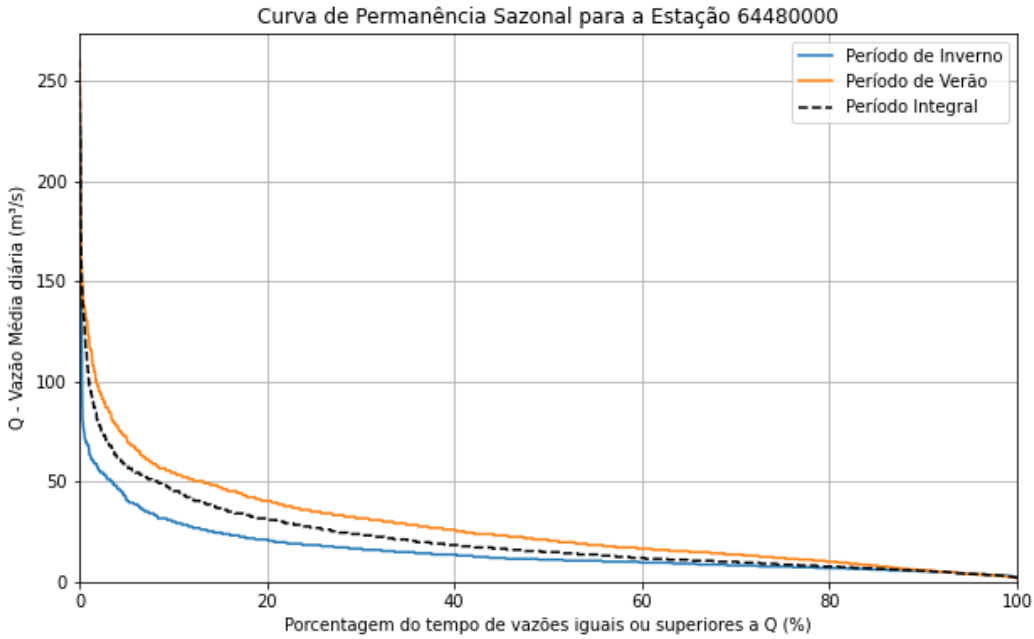

FIGURA 35 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64480000.

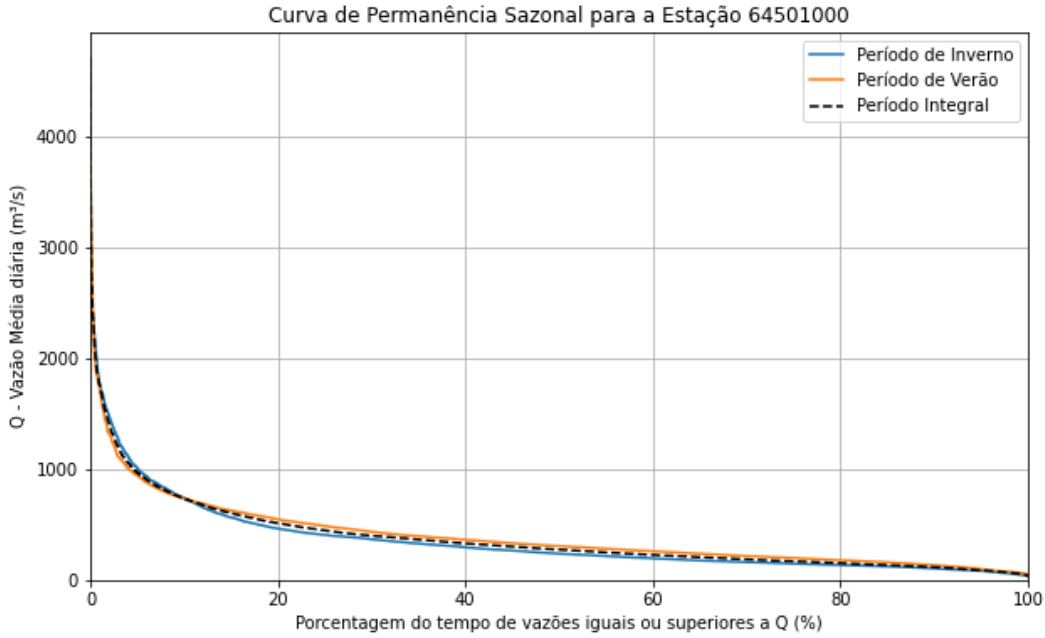

FIGURA 36 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64501000.

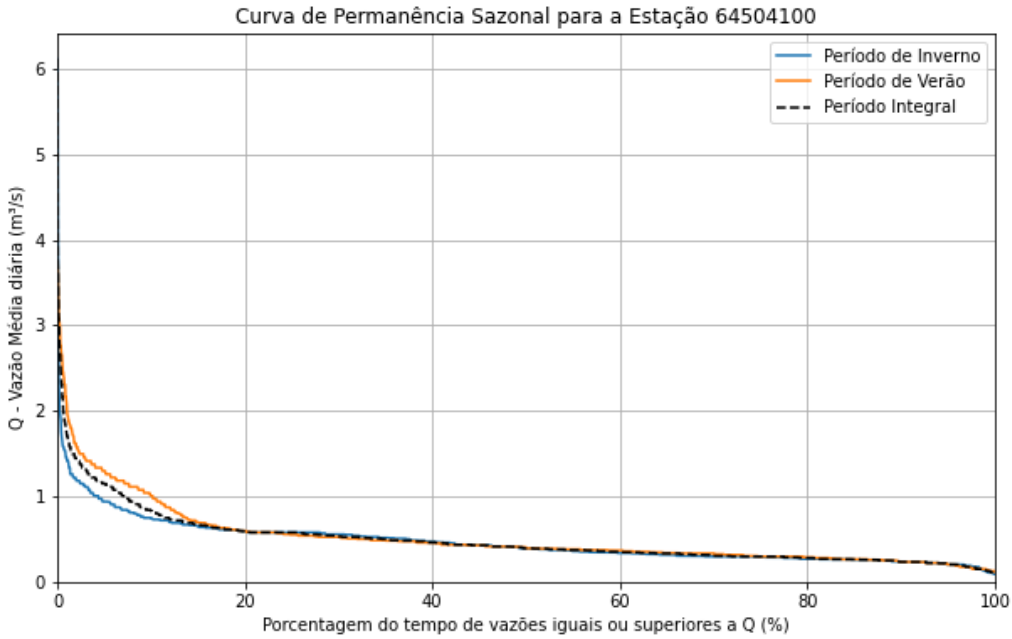

FIGURA 37 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64504100.

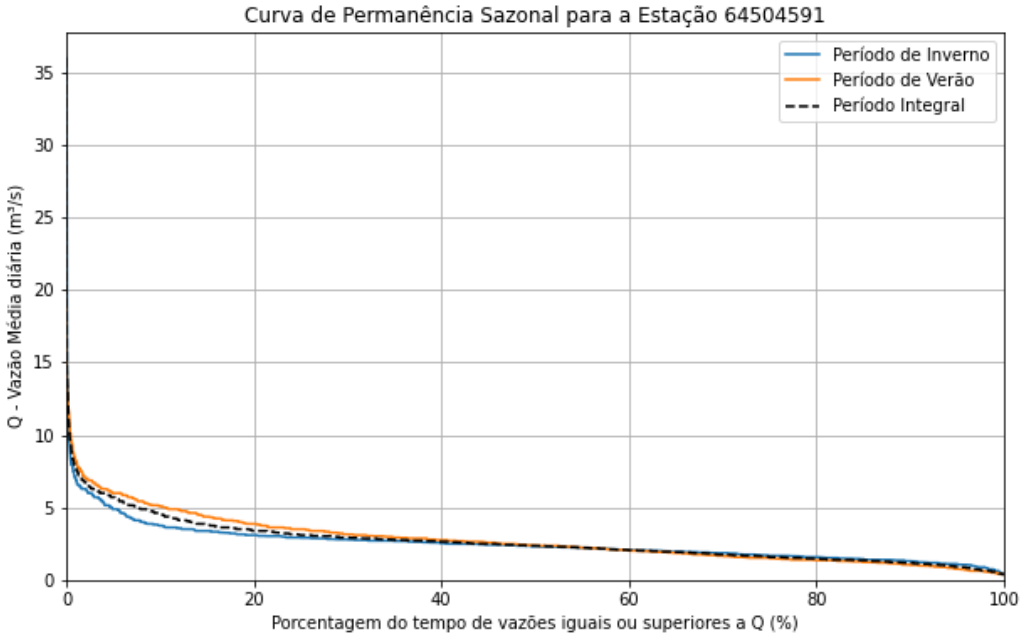

FIGURA 38 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64504591.

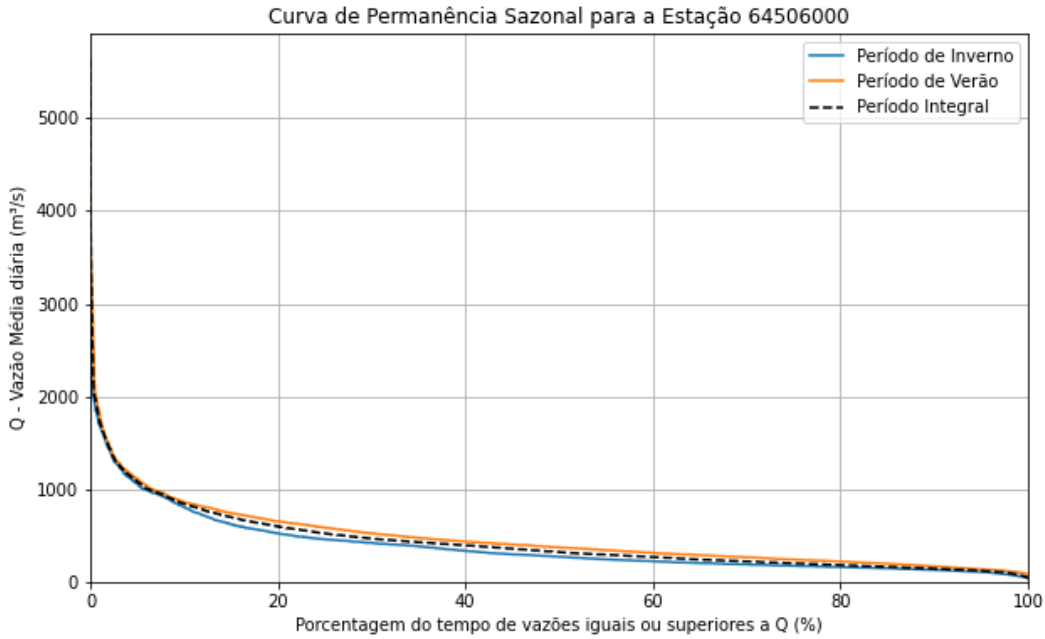

FIGURA 39 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64506000.

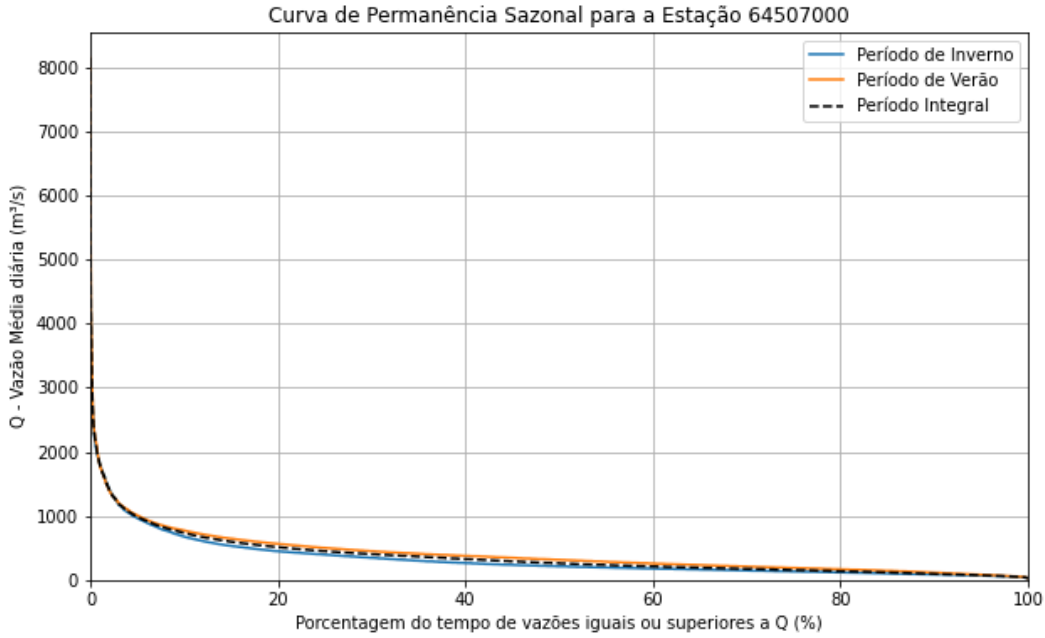

FIGURA 40 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64507000.

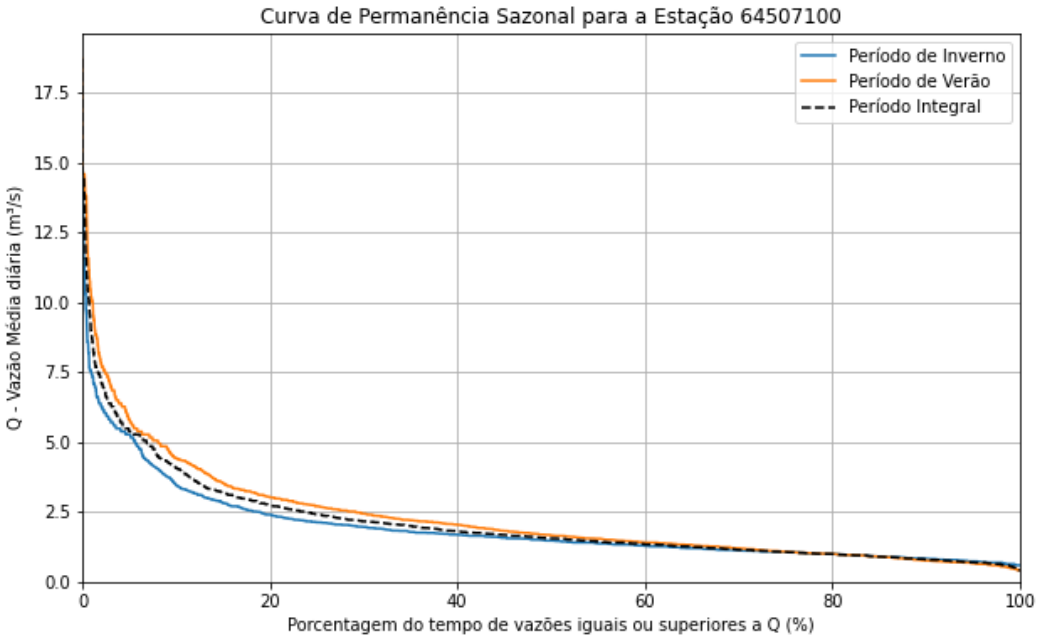

FIGURA 41 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64507100.

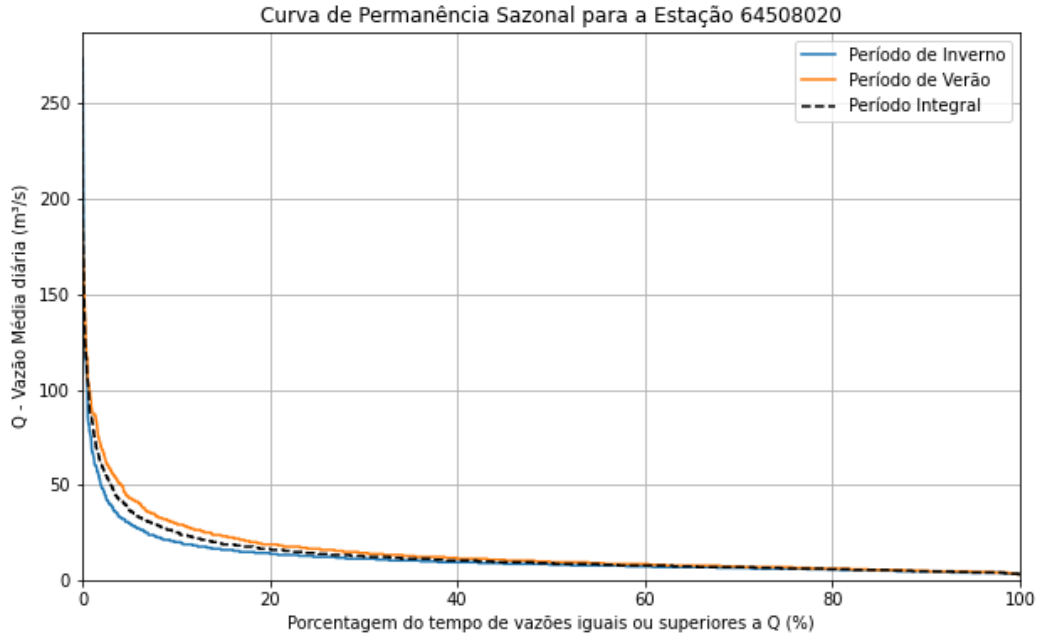

FIGURA 42 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64508020.

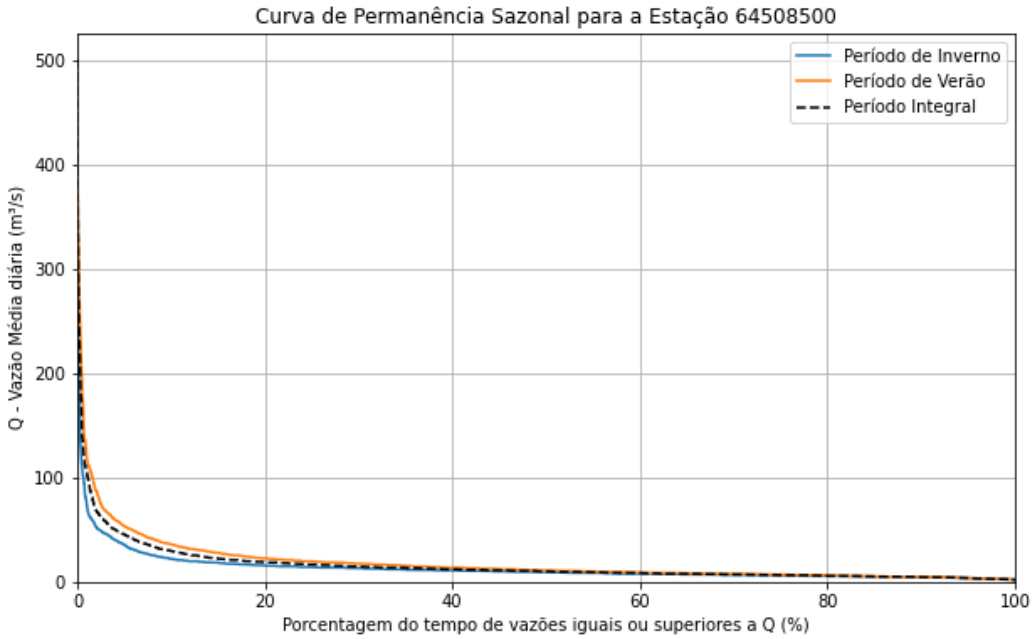

FIGURA 43 – Curva de permanência para vazões do período integral e os períodos sazonais, da estação 64508500.

A.3 CORRELAÇÕES

A correlação entre as altitudes das estações fluviométricas estudadadas e suas latitudes são apresentadas na Figura 44, exibindo um acentuado gradiente no eixo Norte — Sul.

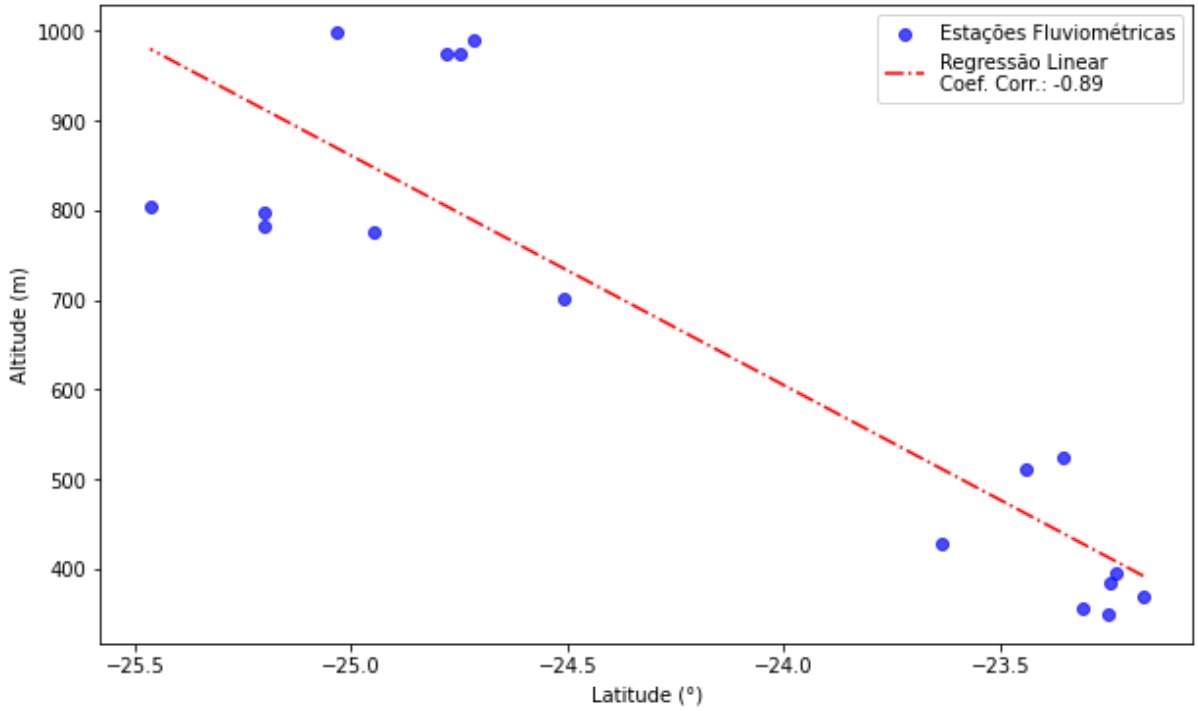

FIGURA 44 – Correlação e coeficiente de correlação entre a latitude e as altitudes das estações fluviométricas utilizads.