



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESASTRES NATURAIS

Júlia Mella Massing

Propagação de Secas no Sistema Hidrelétrico em Cascata da Bacia do Rio Paraná

Florianópolis

2025

Júlia Mella Massing

Propagação de Secas no Sistema Hidrelétrico em Cascata da Bacia do Rio Paraná

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Mestre em Desastres Naturais.

Orientador(a): Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.
Coorientador: Vinícius Bogo Portal Chagas, Dr.

Florianópolis

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Massing, Júlia Mella

Propagação de Secas no Sistema Hidrelétrico em Cascata da Bacia do Rio Paraná / Júlia Mella Massing ; orientador, Pedro Luiz Borges Chaffe, coorientador, Vinícius Bogo Portal Chagas, 2025.

74 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Desastres Naturais. 2. seca socioeconômica. 3. hidrelétricas. 4. índices de seca. 5. sistema de reservatórios em cascata.. I. Chaffe, Pedro Luiz Borges. II. Chagas, Vinícius Bogo Portal. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais. IV. Título.

Júlia Mella Massing

Propagação de Secas no Sistema Hidrelétrico em Cascata da Bacia do Rio Paraná

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 22 de agosto de 2025,
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Roberto Fabris Goerl, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Daniel Bartiko, Dr.

Itaipu Binacional

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado
adequado para obtenção do título de Mestre em Desastres Naturais.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe Dr.

Orientador

Florianópolis, 2025.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Tenho imenso orgulho de ter construído minha trajetória acadêmica, desde a graduação até o mestrado, nesta instituição pública de excelência, que foi fundamental para a minha formação de tantas maneiras.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, meu sincero agradecimento pelas horas de dedicação, pelo conhecimento compartilhado e pelo comprometimento com a formação de seus discentes.

Um agradecimento especial ao Professor Pedro Chaffe, pela orientação, pelos direcionamentos e pelo apoio constante, que se estende desde a graduação até a conclusão deste mestrado. Muito do que aprendi e meu amor pela Hidrologia devo à sua orientação. Agradeço também ao meu coorientador, Vinícius Chagas, pelas contribuições, discussões e direcionamentos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À banca examinadora, composta pelo Professor Roberto Goerl e pelo Dr. Daniel Bartiko, meu profundo obrigado pela disponibilidade, pelas pertinentes contribuições e pelo rigor científico, que sem dúvida elevaram a qualidade do meu trabalho.

Aos meus colegas do Labhidro, pelo companheirismo, pelas risadas compartilhadas, pelo incentivo nos momentos desafiadores e por terem construído uma comunidade de apoio tão essencial nesse tempo que estive na UFSC. Em especial ao Gabriel, por ser um amigo incrível que me apoiou e me ajudou muito em todos esses anos.

Por fim, todo o meu amor e gratidão à minha família, Mariângela, Jackson, Joanna e Gustavo, e aos meus amigos. Obrigada pelo apoio incondicional, pela paciência e por serem minha base. Sem vocês, nada disso seria possível.

Obrigada!

RESUMO

Secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas são influenciadas e influenciam sistemas de reservatórios em cascata. Contudo, compreender os efeitos desses reservatórios na propagação das secas é complexo, dada a operação integrada e coordenada do sistema hidrelétrico. Este trabalho examina como as secas meteorológicas se propagam em secas hidrológicas e socioeconômicas dentro do sistema hidrelétrico em cascata da Bacia do Rio Paraná (890.000 km²) no Brasil. São utilizados 25 anos de dados diários, entre janeiro de 1999 e agosto de 2024, de 61 usinas hidrelétricas, parte do Sistema Integrado Nacional coordenado pelo ONS. A razão entre geração hidrelétrica e capacidade instalada, chamado de fator de capacidade, é utilizada para definir seca socioeconômica, enquanto o Índice Padronizado de Chuva (SPI) e o Índice Padronizado de Vazão (SSI) são utilizados para secas meteorológicas e hidrológicas. Foram calculados os tempos de propagação das secas de diferentes tipos e das secas entre reservatórios de acumulação e a fio d'água. Os resultados mostram que todos os tipos de seca se tornaram mais frequentes ao longo dos anos. Em média, as secas meteorológicas levam nove meses para se propagar pelo sistema de reservatórios e gerar uma seca socioeconômica, enquanto as secas hidrológicas geram uma seca socioeconômica em cinco meses. Secas socioeconômicas são eventos curtos, porém extremamente recorrentes, destacando a vulnerabilidade constante do sistema. Embora reservatórios a fio d'água experimentem secas socioeconômicas mais longas e severas, eles se recuperam mais rapidamente do que os reservatórios de acumulação. Reservatórios de acumulação alteram a propagação, atrasando a seca hidrológica, mas prolongando sua duração. Com o aumento da vulnerabilidade do sistema hidrelétrico é essencial o alerta precoce de ocorrência de secas para mitigar seus impactos.

Palavras-chave: seca socioeconômica, hidrelétricas, índices de seca, sistema de reservatórios em cascata.

ABSTRACT

Meteorological, hydrological, and socioeconomic droughts are influenced by and influence cascading reservoir systems. However, understanding the effects of these reservoirs on drought propagation is complex, given the integrated and coordinated operation of the hydroelectric system. This work examines how meteorological droughts propagate into hydrological and socioeconomic droughts within the cascading hydroelectric system of the Paraná River Basin (890,000 km²) in Brazil. Twenty-five years of daily data from 61 hydroelectric plants, part of the National Integrated System coordinated by the ONS, are used between January 1999 and August 2024. The ratio of hydroelectric generation to installed capacity, called the capacity factor, is used to define socioeconomic drought, while the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Streamflow Index (SSI) are used for meteorological and hydrological droughts. The propagation times of different types of droughts and droughts between storage and run-of-river reservoirs were calculated. The results show that all types of drought have become more frequent over the years. On average, meteorological droughts take nine months to propagate through the reservoir system and generate a socioeconomic drought, while hydrological droughts generate a socioeconomic drought within five months. Socioeconomic droughts are short but extremely recurrent events, highlighting the system's constant vulnerability. Although run-of-river reservoirs experience longer and more severe socioeconomic droughts, they recover more quickly than storage reservoirs. Storage reservoirs alter the propagation, delaying the hydrological drought but prolonging its duration. With the increased vulnerability of the hydroelectric system, early warning of drought occurrences is essential to mitigate their impacts.

Keywords: socioeconomic drought, hydropower, drought indices, cascading reservoir systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diferentes tipos de seca e propagação.	17
Figura 2.2 – Principais características das secas: início, fim, duração, tempo de recuperação, severidade e intensidade.	18
Figura 2.3 – Propagação da seca no ciclo hidrológico. A seca é iniciada por causas de variabilidade climática e atividades humanas, que provocam a seca meteorológica e é propagada para seca agrícola (baixa umidade do solo) e seca hidrológica. As atividades humanas (setas laranja) modificam os processos hidrológicos. Os impactos resultantes iniciam respostas, que por sua vez resultam em mudanças na influência humana nas secas e variabilidade climática.	21
Figura 3.1 – Área de estudo representando: (a) a localização da bacia do Rio Paraná na América do Sul e (b) a distribuição dos reservatórios da bacia do Rio Paraná, que é subdividida em 6 unidades hidrográficas: Paranaíba (laranja), Grande (roxo), Tietê (azul), Paranapanema (amarelo), Iguaçu (verde) e o rio principal, Paraná (rosa). Também estão representados os rios principais da bacia, em azul, além da elevação.	25
Figura 3.2 – Representação de características da bacia do Rio Paraná com relação a (a) cobertura e uso do solo (Mapbiomas, 2025); (b) Isoietas anuais de acordo com o Atlas Pluviométrico do Brasil (SGB, 2011); (c) classificação climática de Koppen (Alvares; Stape; Sentelhas, 2013); e (d) todos os aproveitamentos hidrelétricos em operação na bacia, incluindo UHEs, PCHs e CGHs (ANA, 2013).	26
Figura 3.3 – Diagrama contendo a localização das usinas estudadas na Bacia do Rio Paraná. Suas cores representam as regiões correspondentes. Triângulos representam usinas com reservatório de acumulação enquanto círculos representam usinas a fio d'água.	27
Figura 3.4 – Exemplo de variáveis de entrada para a UHE Salto Santiago. São utilizadas a precipitação, em mm (barras em azul claro), vazão afluente ao reservatório, em m ³ /s (linha em azul), e geração, em GWh (linha em preto).	30
Figura 3.5 – Valores de SPI-12 e SSI-12 para a UHE Salto Santiago. Valores em vermelho (negativos) representam condições de seca e valores em azul (positivos) representam condições de umidade.	31
Figura 3.6 – Série de dados da UHE Salto Santiago para a geração, em GWh, e fator de capacidade, em porcentagem, e em azul o nível do reservatório, em metros. A linha pontilhada representa o percentil 25 da série de FC.	32

Figura 3.7 – Características da propagação da seca entre um evento de seca meteorológica, representada pelo SPI e seca hidrológica, representada pelo SSI. As características de um evento são início (i), intensidade (p), fim (f), duração e tempo de recuperação..... 33

Figura 3.8 – Diferença entre o início de cada evento entre reservatórios a montante e a jusante. A diferença entre os inícios foi estimada caso o evento da usina a jusante esteja contido no tempo do evento da usina a montante..... 34

Figura 3.9 – Co-ocorrência de eventos de seca para os índices. São avaliados e contabilizados os meses em que a seca ocorre em várias usinas..... 34

Figura 4.1 - Heatmap ilustrando as séries temporais para (a) seca meteorológica, (b) seca hidrológica e (c) seca socioeconômica, representadas por SPI-12, SSI-1 e fator de capacidade, respectivamente, de cima para baixo. As usinas hidrelétricas estão organizadas de norte a sul e de montante a jusante. A intensidade do SPI e SSI é classificada de 0 a -1 (seca leve), -1 a -1,5 (seca moderada), -1,5 a -2 (seca severa) e menor que -2 (seca extrema). Valores maiores que zero indicam condições úmidas, e valores em cinza correspondem a dados faltantes ou inexistentes. Para o fator de capacidade, os valores são classificados para seca socioeconômica como 25 a 50 (seca amena), 10 a 25 (seca moderada), 1 a 10 (seca severa) e 0 a 1 (seca extrema). Valores acima do percentil 50 não são considerados seca socioeconômica (condições úmidas)..... 38

Figura 4.2 - Séries temporais medianas para cada região da Bacia do Rio Paraná referentes à seca meteorológica (SPI-12, em vermelho), hidrológica (SSI-12, em azul) e socioeconômica (FC, em cinza). As áreas sombreadas representam a variação interquartil para cada série temporal..... 41

Figura 4.3 – Número de eventos ativos para a Bacia do Rio Paraná, para seca meteorológica (vermelho), hidrológica (azul) e socioeconômica (cinza). O *heatmap* representa a correlação entre os tipos de seca (M = meteorológica, H = hidrológica e S = socioeconômica), com o vermelho mais intenso indicando maior correlação. 42

Figura 4.4 – Padrões espaciais de duração (em tons de rosa), número de eventos (em tons de azul) e tempo de recuperação (em tons de vermelho) para as usinas da Bacia do Rio Paraná. Quanto mais intensa a cor, maior o valor da variável. Círculos representam reservatórios a fio d'água e triângulos representam reservatórios de acumulação. 43

Figura 4.5 - Duração média (em meses), número de eventos, tempo de recuperação (em meses) e severidade dos eventos de seca meteorológica, hidrológica e socioeconômica. A

seca meteorológica é representada pelo SPI-12, a hidrológica pelo SSI-1 e a socioeconômica pelo fator de capacidade.45

Figura 4.6 - Tempo de propagação da seca para o início (Δt) dos eventos de seca. Da esquerda para a direita, tempo de propagação de meteorológico para hidrológico, de meteorológico para socioeconômico e de hidrológico para socioeconômico. Tons mais escuros de roxo representam maior tempo de propagação.47

Figura 4.7 - Duração média (em meses), número de eventos, tempo de recuperação (em meses) e severidade dos eventos de seca meteorológica, hidrológica e socioeconômica. A seca meteorológica é representada pelo SPI-12, a hidrológica pelo SSI-1 e a socioeconômica pelo fator de capacidade.47

Figura 4.8 – Gráfico representando as secas (a) meteorológicas, (b) hidrológicas e (c) socioeconômicas, com diferenciação dos tipos de reservatório: reservatório a fio d'água (amarelo) e de acumulação (azul).48

Figura 4.9 - Eventos de propagação, representando todos os eventos que ocorrem para cada tipo de seca, totalizando 1.182 eventos e excluindo *outliers*. Nesse contexto, as caixas vermelhas representam secas meteorológicas, as caixas azuis indicam secas hidrológicas e as caixas cinzas representam secas socioeconômicas. Cada categoria ilustra uma combinação única de arranjos a montante e a jusante: RES-RES (reservatório de armazenamento para reservatório de armazenamento, 313 eventos), RES-FIO (reservatório de armazenamento para fio d'água, 353 eventos), FIO-FIO (fio d'água para fio d'água, 335 eventos) e FIO-RES (fio d'água para reservatório de armazenamento, 181 eventos). O gráfico superior representa o tempo de atraso em meses entre o início da seca do reservatório de montante e jusante, e o gráfico inferior representa a sobreposição temporal de eventos, em porcentagem.50

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Índices encontrados na literatura para a caracterização das secas. Parâmetros de entrada: P=precipitação; T=temperatura; DH=disponibilidade hídrica; R=dados de reservatório/operação; Múltiplo=múltiplos índices utilizados; Mod=modelado; Sat=dados de satélite; Q=dados de vazão. Tipos de seca: M=meteorológica; H=hidrológica; A=agrícola e S=socioeconômica.	20
Quadro 2.2 – Relação de trabalhos recentes sobre secas que contemplam a Bacia do Rio Paraná.....	23
Quadro 3.1 – Características das usinas hidrelétricas analisadas. RES = usinas com reservatórios de acumulação, FIO = usinas com reservatórios a fio d'água.	27
Quadro 3.2 - Valores do SPI ou SSI e condições que representam.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores médios de intensidade, duração, tempo de recuperação e número de eventos para cada tipo de seca e seu respectivo índice..... 39

Tabela 4.2 – Valores de intensidade, duração, tempo de recuperação e número de eventos médios para cada tipo de reservatório em secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas.....49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	TIPOS DE SECAS	16
2.2	ÍNDICES DE SECA.....	19
2.3	SECA SOCIOECONÔMICA.....	20
2.4	SECAS NO BRASIL.....	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	ÁREA DE ESTUDO	24
3.2	DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS	29
3.3	SECA METEOROLÓGICA E SECA HIDROLÓGICA	30
3.4	SECA SOCIOECONÔMICA.....	32
3.5	ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DA SECA.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1	PADRÕES TEMPORAIS	36
4.2	PADRÕES ESPACIAIS.....	42
4.3	PROPAGAÇÃO DA SECA	45
4.4	IMPACTOS DO TIPO DE RESERVATÓRIO NAS SECAS	47
5	CONCLUSÃO.....	51
6	REFERÊNCIAS.....	52
7	ANEXOS.....	57

1 INTRODUÇÃO

A seca socioeconômica resulta de interações complexas dentro de sistemas socio-hidrológicos interconectados (AghaKouchak et al., 2021; Van Loon et al., 2016). No contexto de reservatórios artificiais, a seca socioeconômica ocorre quando a escassez de água interrompe a demanda, afetando o abastecimento de água e a geração de energia hidrelétrica (Wilhite, 2000; Wilhite; Glantz, 1985). A interdependência entre barragens em um sistema de reservatório em cascata frequentemente amplifica os efeitos da seca, visto que a redução da vazão a montante pode agravar a escassez de água a jusante (Ribeiro Neto et al., 2022; Van Langen et al., 2021). Restringir as análises de seca apenas a fatores meteorológicos ou hidrológicos ignora o impacto socioeconômico das secas (AghaKouchak et al., 2021; Van Dijk et al., 2013; Wang et al., 2023). À medida que a demanda social aumenta e os reservatórios artificiais se tornam mais vulneráveis a eventos de seca, cuja frequência tem crescido nos últimos anos (Chagas; Chaffe; Blöschl, 2024b), é necessário compreender como os sistemas de reservatórios respondem a secas socioeconômicas e como as secas meteorológicas e hidrológicas se propagam nesses sistemas.

Secas meteorológicas são definidas como épocas de precipitação abaixo do esperado e secas hidrológicas são definidas por vazões abaixo do esperado (Wilhite; Glantz, 1985). Seca meteorológica é tipicamente avaliada usando o Índice Padronizado de Precipitação (SPI, e.g., Młyński; Książek; Bogdał, 2024; Van Langen et al., 2021), enquanto a seca hidrológica é avaliada usando o Índice Padronizado de Vazão (SSI, e.g., Cuartas et al., 2022; Zhao et al., 2023). As secas socioeconômicas, que são definidas de quando a demanda excede a disponibilidade hídrica (Wilhite; Glantz, 1985), são mais complexas e frequentemente ignoradas. Por exemplo, o Índice Padronizado Multivariado de Confiabilidade e Resiliência define secas socioeconômicas quando o suprimento do reservatório não atende à demanda (Mehran; Mazdiyasn; AghaKouchak, 2015). Este método é aplicado no contexto de reservatórios de geração de energia e abastecimento de água (Huang et al., 2016; Zhao et al., 2019). Um índice aprimorado abordou a questão da agregação de informações sobre a operação do reservatório e a demanda e oferta reais de água (Guo et al., 2019). Alternativamente, o Índice Socioeconômico de Seca concentra-se na escassez hídrica e na duração da seca, categorizando diferentes níveis de seca para analisar eventos de seca socioeconômica (Shi et al., 2018). Estes índices podem ser aplicados como alerta precoce de seca foram usados para identificação de secas e decisões sobre a operação de reservatórios (Huang; Chou, 2005).

Secas socioeconômicas ocorrem mesmo quando os reservatórios não estão em um período de secas meteorológicas ou hidrológicas, particularmente devido a fatores como

aumento da demanda de água a jusante ou maiores demandas de energia. Além disso, ao avaliar secas socioeconômicas em reservatórios, o tipo de reservatório (ou seja, reservatório de armazenamento ou a fio d'água) frequentemente não é considerado. Reservatórios de armazenamento dependem de grandes barragens para armazenar o volume de água e regular o fluxo dos rios, enquanto sistemas a fio d'água utilizam o fluxo natural para gerar eletricidade (Egre; Milewski, 2002). Tradicionalmente, as análises focam em impactos isolados de reservatórios individuais (Pachore et al., 2024; Rangecroft et al., 2019; Wu et al., 2016), negligenciando seus efeitos cumulativos em uma cascata de reservatórios.

A Bacia do Rio Paraná é um dos maiores sistemas hidrelétricos interligados do mundo e é fundamental para a geração de energia no Brasil. Ele abrange a UHE Itaipu, a segunda maior usina hidrelétrica em capacidade de geração energética mundial. Nos últimos anos, a bacia enfrentou dois episódios de seca severos: a seca de 2014 (Melo et al., 2016) e a seca de 2019 (Cuartas et al., 2022; Santos et al., 2021). A seca de 2019, impactou significativamente a geração hidrelétrica, com níveis historicamente baixos de produção em diversas usinas (Naumann et al., 2021) levando o Brasil a depender de outras fontes energéticas para suprir a demanda. Além disso, esse evento prejudicou inúmeros setores que dependem da hidrovia para o escoamento de produtos, com um impacto de R\$ 3,5 bilhões (BBC, 2021). Foi estabelecida uma nova bandeira tarifária da conta de luz devido a esse período, denominada “Escassez Hídrica”, com valores de R\$ 14,20 /100 kWh, que ficou vigente de setembro de 2021 a abril de 2022 (Brasil, 2022).

O objetivo deste trabalho é examinar como as secas meteorológicas se propagam para secas hidrológicas e socioeconômicas dentro do sistema hidrelétrico em cascata da Bacia do Rio Paraná, no sudeste do Brasil. A investigação deste trabalho se concentra em como a seca impacta tanto os reservatórios a fio d'água quanto os reservatórios de armazenamento em um sistema em cascata. Como indicador para a seca socioeconômica, é proposto o uso do fator de capacidade de cada usina, definido como a razão entre a geração real de energia e a capacidade total instalada. Para a seca meteorológica e a seca hidrológica, os índices SPI e SSI são utilizados.

1.1 OBJETIVO GERAL

Examinar a propagação das secas meteorológicas para secas hidrológicas e secas socioeconômicas no sistema hidrelétrico em cascata da Bacia do Rio Paraná.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analisar padrões temporais e espaciais das secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas na Bacia do Rio Paraná.
2. Investigar os padrões de propagação das secas na cascata de reservatórios.
3. Avaliar o impacto do tipo de reservatório na propagação de secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TIPOS DE SECAS

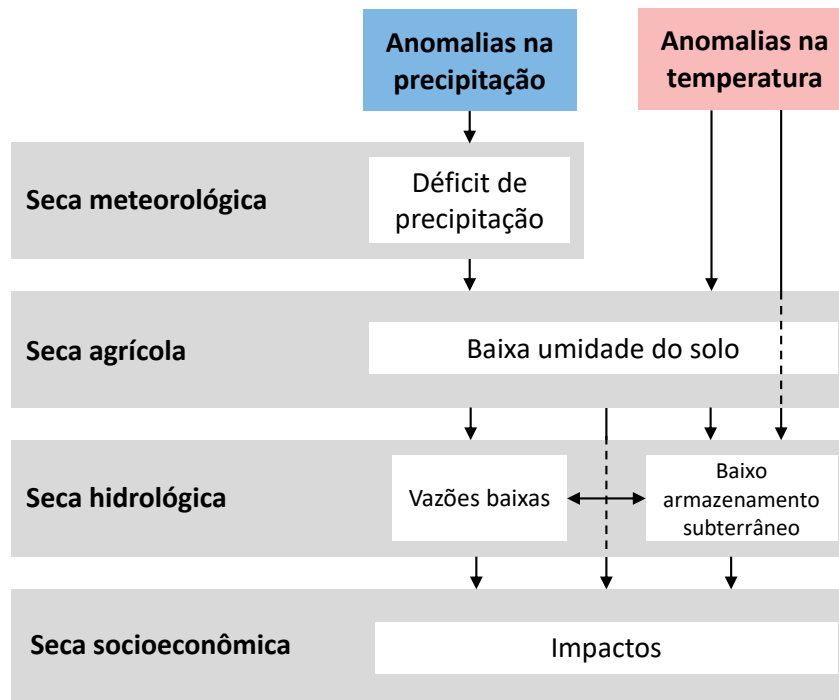
A seca pode ser definida como um período prolongado de déficit de precipitação em relação à média histórica de uma região, podendo ocorrer em qualquer parte do mundo (OMM, 2023). Segundo o Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC, 2012), trata-se de um termo relativo, cuja definição varia conforme o contexto, mas que pode ser caracterizado como um período anormalmente seco, suficientemente prolongado para causar desequilíbrio hidrológico. Entre as definições clássicas, Gumbel (1963) descreveu secas como “os menores valores anuais de vazões médias diárias de um rio”, enquanto Palmer (1965) as definiu como déficit de umidade prolongado e anormal. Tallaksen e van Lanen (2004) ampliaram o conceito, descrevendo a seca como um período de baixa disponibilidade hídrica, com alteração das condições normais de variáveis como precipitação, vazão, umidade do solo e águas subterrâneas.

Embora muitas definições enfatizem a falta de chuvas como principal fator desencadeante, uma compreensão abrangente exige considerar dimensões hidrológicas, agrícolas, ecológicas e socioeconômicas. Assim, o conceito de seca pode incluir aspectos relacionados à disponibilidade de água no solo, nos reservatórios e nas fontes subterrâneas, bem como seus impactos sobre atividades humanas como agricultura, abastecimento público e geração de energia.

É importante distinguir seca de escassez ou estresse hídrico, visto que neste último a influência humana é determinante (Van Loon et al., 2016). A seca é um fenômeno natural de baixa disponibilidade hídrica, enquanto a escassez resulta da incapacidade de atender à demanda de água devido à gestão inadequada ou à superexploração do recurso (Van Loon; Van Lanen, 2013). Ambos podem ocorrer simultaneamente, e a distinção é essencial para orientar políticas de prevenção e mitigação (Wilhite, 2002).

Wilhite e Glantz (1985) propuseram quatro categorias principais de seca: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica. A Figura 2.1 ilustra estes tipos e suas interações, mostrando como a deficiência de precipitação pode se propagar, afetando umidade do solo, disponibilidade hídrica superficial e subterrânea, e, por fim, setores socioeconômicos.

Figura 2.1 – Diferentes tipos de seca e propagação.



Fonte: Adaptado de Van Loon (2015)

A seca meteorológica é definida como a deficiência de chuva, agravada pela alta evapotranspiração potencial, avançando pelo espaço e por um período prolongado (Vogt et al., 2018). As secas meteorológicas são o primeiro tipo de seca do ciclo hidrológico e podem ser propagadas quando se desenvolvem por tempo suficiente para secas hidrológicas, além de outros impactos socioeconômicos e ambientais.

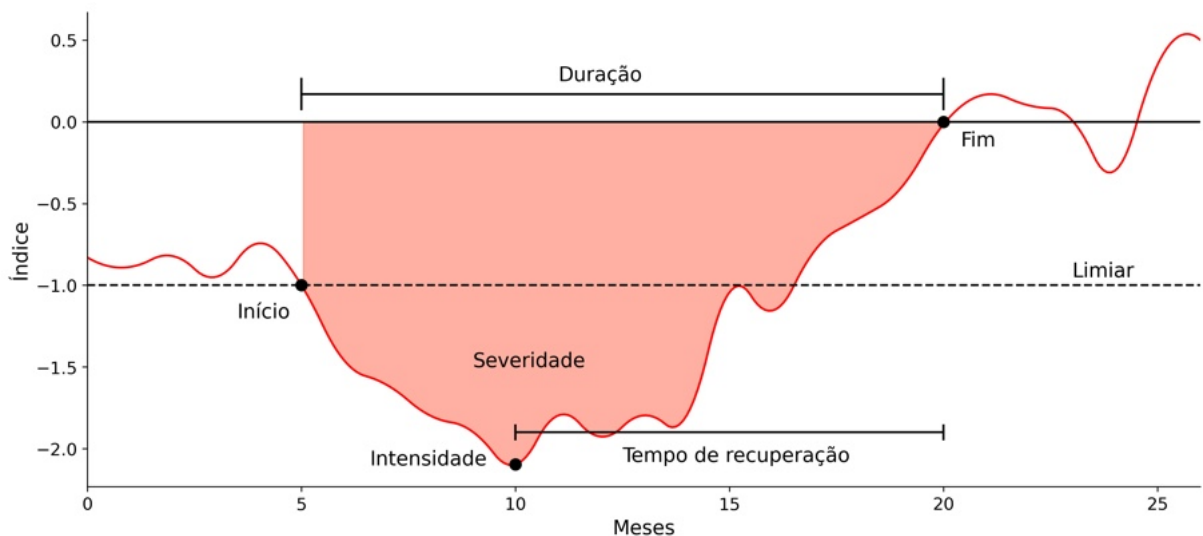
Van Loon (2015) define seca hidrológica como um termo amplo para anomalias na água superficial e subsuperficial, que, por vezes, são definidas separadamente, mas são correlacionadas. Este tipo de seca pode ser visto como um perigo natural em que a seca meteorológica foi intensa ou duradoura o suficiente para que afete os níveis de rios, lagos e reservatórios. Esta é a etapa em que a escassez hídrica começa a se evidenciar. No Brasil, regiões úmidas podem levar até 4 vezes mais tempo para se recuperar de secas hidrológicas comparado a secas meteorológicas (Bevacqua et al., 2021).

A seca agrícola é definida como a condição em que a umidade presente no solo não é o suficiente para suprir a demanda da plantação (Wilhite; Glantz, 1985). Essa categoria de seca ocorre após um período prolongado de seca meteorológica que, além da ausência de chuva, a evapotranspiração aumenta e ocorre o déficit da umidade do solo. Normalmente a agricultura é o primeiro setor a sentir os impactos da seca, principalmente se associado a altas temperaturas e condições específicas de vento (Wilhite, 2000).

A seca socioeconômica, por outro lado, ocorre quando a demanda por água excede a oferta (Wilhite; Glantz, 1985), levando a dificuldades econômicas e redução da disponibilidade de água para diversas atividades, como agricultura, indústria e uso doméstico (Liu et al., 2020). Esse tipo de seca é intrinsecamente relacionado com o aumento da demanda, que por sua vez está relacionada com o aumento da população, principalmente. Portanto, a incidência da seca pode aumentar devido a uma mudança na frequência do evento físico, a uma mudança na vulnerabilidade da sociedade à escassez de água, ou a ambos (Wilhite; Glantz, 1985).

Com relação as suas características, secas podem ser representadas em termos de intensidade, severidade, duração, frequência e extensão espacial (Vogt et al., 2018; Wilhite, 2000). A Figura 2.2 apresenta os aspectos normalmente considerados para caracterizar os eventos de seca. De acordo com Vogt et al. (2018) severidade é definida como a soma das diferenças entre o indicador de seca e o limiar. A intensidade ou pico é o menor valor durante o evento. A duração é o tempo decorrido entre o início, quando o índice atinge -1, e o fim de um evento, delimitado pelo limiar especificado do índice. O início é considerado -1 por ser quando o sistema atinge uma condição de seca propriamente dita. Estatisticamente o índice com o valor de -1,0 significa que a precipitação está um desvio padrão abaixo da média. O fim é considerado quando o índice tem valores acima de 0, para garantir que o sistema esteja completamente recuperado e condições de normais de umidade estejam estabelecidas (McKee; Doesken; Kleist, 1993; Mishra; Singh; Desai, 2009; Mtilatila et al., 2020; WMO, 2012). A frequência é o número de eventos num intervalo de tempo específico. Por fim, a extensão é definida como a delimitação geográfica em que os eventos ocorrem.

Figura 2.2 – Principais características das secas: início, fim, duração, tempo de recuperação, severidade e intensidade.



2.2 ÍNDICES DE SECA

Os índices de seca podem auxiliar a compreender diferentes aspectos de impactos das secas. Diferentes períodos de acumulação são associados a diferentes tipos de impactos. Tomando o SPI como exemplo (Naumann et al., 2021): 1 a 3 meses podem indicar impactos mais imediatos, como redução da umidade do solo, de vazões em rios pequenos e de neve acumulada; 3 a 12 meses indicar a redução de vazões em rios e níveis mais baixos em reservatórios; já de 12 a 28 meses os impactos podem ser mais severos, como redução da recarga de reservatórios e águas subterrâneas. Entretanto, cada região possui particularidades como tipo e uso do solo.

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI, McKee; Doesken; Kleist, 1993) é muito utilizado para a seca meteorológica, e se concentra na distribuição de precipitação em uma determinada área e período. Ele é de fácil obtenção e recomendado pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM para a detecção da seca (Svoboda; Hayes; Wood, 2012). O SPI calcula a probabilidade estatística da ocorrência de valores de precipitação em relação à média histórica, atribuindo valores positivos para condições úmidas e valores negativos para condições secas.

Outro índice que aborda a seca meteorológica é o Índice de Precipitação-Evapotranspiração Padronizado (SPEI, Vicente-Serrano; Beguería; López-Moreno, 2010) que incorpora a evapotranspiração para avaliar o equilíbrio entre a oferta e a demanda de água no solo. O SPEI leva em consideração as variações de temperatura e umidade, tornando-o sensível às mudanças climáticas e útil para a gestão da água a longo prazo (Stagge et al., 2015).

Para o caso da seca socioeconômica, Hashimoto, Stedinger e Loucks (1982) foram pioneiros ao apresentar modos de avaliar um sistema de reservatório, utilizando critérios de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. O Índice de Resiliência Multivariado - MSRRI (*Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index*, Mehran; Mazdhyasni; AghaKouchak, 2015) busca abranger aspectos socioeconômicos de um evento de seca utilizando dados de operação de um reservatório. Ele possui duas componentes: IDR e WSR. O índice de confiabilidade na demanda - IDR (*Inflow-Demand Reliability*) examina a segurança da vazão que chega ao reservatório em suprir a demanda, que, neste caso, é a vazão defluente, que é utilizada para geração de energia. Já o índice de resiliência no armazenamento - WSR (*Water Storage Resilience*) abrange a capacidade do reservatório suprir a demanda exigida a jusante, ou seja, manter o nível em nível normal de operação.

O Quadro 2.1 abaixo contém alguns índices encontrados na literatura e seus parâmetros de entrada.

Quadro 2.1 – Índices encontrados na literatura para a caracterização das secas. Parâmetros de entrada: P=precipitação; T=temperatura; DH=disponibilidade hídrica; R=dados de reservatório/operação; Múltiplo=múltiplos índices utilizados; Mod=modelado; Sat=dados de satélite; Q=dados de vazão. Tipos de seca: M=meteorológica; H=hidrológica; A=agrícola e S=socioeconômica.

Nome	Parâmetros de entrada	Referência
<i>Standardized Precipitation Index</i> (SPI)	P	McKee, Doesken e Kleist (1993)
<i>Weighted Anomaly Standardized Precipitation</i> (WASP)	P, T	Lyon (2004)
<i>Aridity Index</i> (AI)	P, T	Martonne (1925)
<i>NOAA Drought Index</i> (NDI)	P	Strommen e Motha (1987)
<i>Palmer Drought Severity Index</i> (PDSI)	P, T, DH	Palmer (1965)
<i>Standardized Precipitation Evapotranspiration Index</i> (SPEI)	P, T	Vicente-Serrano, Beguería e López-Moreno (2010)
<i>Soil Moisture Anomaly</i> (SMA)	P, T, DH	Bergman, Sabol e Miskus (1988)
<i>Evapotranspiration Deficit Index</i> (ETDI)	Mod	Narasimhan e Srinivasan, (2005)
<i>Standardized Reservoir Supply Index</i> (SRSI)	R	Gusyeve et al. (2015)
<i>Standardized Streamflow Index</i> (SSI ou SSFI)	Q	Modarres (2007)
<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	Sat	Kogan (1995)
<i>Vegetation Health Index</i> (VHI)	Sat	Kogan (1990)
<i>Global Integrated Drought Monitoring and Prediction System</i> (GIDMaPS)	Múltiplo, Mod	Hao et al. (2014)
<i>Multivariate Standardized Drought Index</i> (MSDI)	Múltiplo, Mod, Sat	Hao e AghaKouchak (2013)
<i>United States Drought Monitor</i> (USDM)	Múltiplo, Mod	Svoboda; Hayes e Wood, (2012)
<i>Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index</i> (MSRRI)	R	Mehran, Mazdiyasi e AghaKouchak (2015)

2.3 SECA SOCIOECONÔMICA

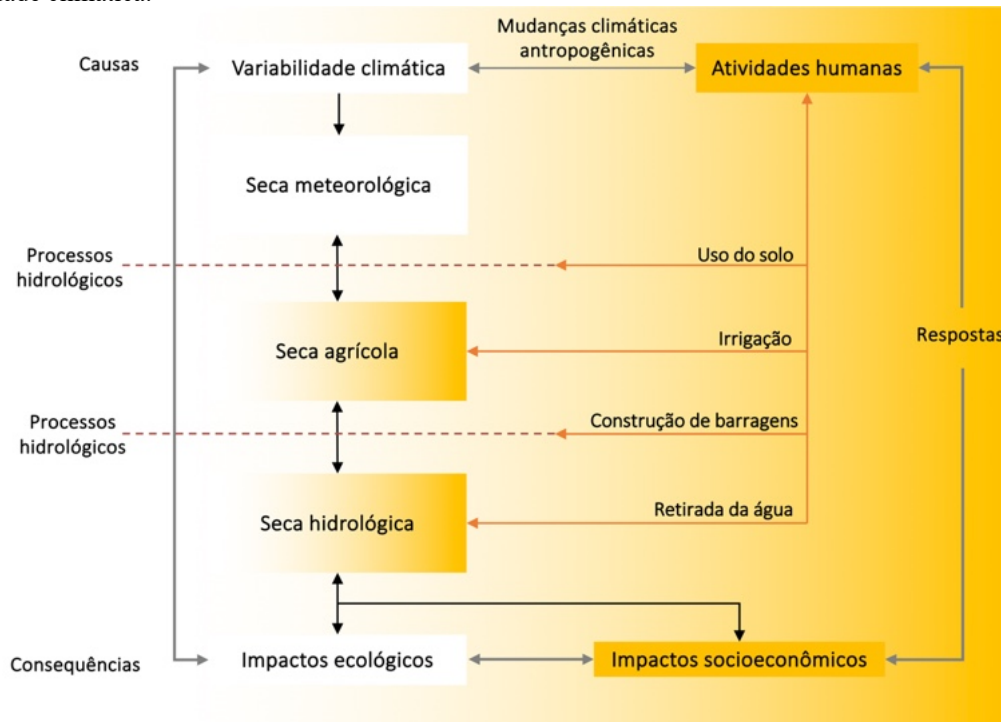
A quantificação e identificação dos impactos de eventos de seca pode ser difícil devido as próprias características desse desastre. Secas são chamadas de “fenômeno rastejante” (Wilhite; Vanyarkho, 2000) por ser um fenômeno que ocorre lentamente e não possui impactos estruturais tão visíveis quanto outros desastres, e.g. furacões e enxurradas. Os impactos podem ser diretos, como a perda de uma plantação com a falta de umidade no solo e disponibilidade hídrica, ou indiretos, como a perda de lucros com a redução da produtividade de uma plantação para um fazendeiro. Quanto mais distante do evento o impacto é sentido, maior sua complexidade (Wilhite; Vanyarkho, 2000), por se perpetuar ao longo da cadeia produtiva.

A análise simultânea de causas e impactos de secas é essencial, dado que efeitos podem se propagar entre setores. Impactos em cascata seguem padrões multissetoriais, frequentemente interconectados (De Brito, 2021; Shyrokaya et al., 2024). A Figura 2.3 apresenta a propagação

da seca no ciclo hidrológico com as mudanças antropogênicas no próprio ciclo. Atividades como agricultura, abastecimento e geração de energia estão entre as mais afetadas. Em casos extremos, a migração forçada pode aumentar a pressão sobre recursos em outras regiões, gerando tensões sociais (Ceola; Mård; Baldassarre, 2024; Van Dijk et al., 2013).

No setor energético, a redução das vazões afeta diretamente a acumulação de água pelos reservatórios de usinas hidrelétricas (Jääskeläinen et al., 2018). Em locais com alta sazonalidade, os reservatórios armazenam a água durante a estação chuvosa para utilizar na estação de seca, ou com menores volumes pluviométricos. A seca limita a produção de energia hidrelétrica, especialmente em casos de seca prolongada. Isso impacta o setor diretamente, aumentando os custos de eletricidade, uma vez que são utilizadas matrizes mais caras, como termoeletricas, para suprir a demanda energética (Ferraz De Campos et al., 2021; Melo et al., 2019).

Figura 2.3 – Propagação da seca no ciclo hidrológico. A seca é iniciada por causas de variabilidade climática e atividades humanas, que provocam a seca meteorológica e é propagada para seca agrícola (baixa umidade do solo) e seca hidrológica. As atividades humanas (setas laranja) modificam os processos hidrológicos. Os impactos resultantes iniciam respostas, que por sua vez resultam em mudanças na influência humana nas secas e variabilidade climática.



Fonte: Adaptado de Van Loon et al. (2016)

2.4 SECAS NO BRASIL

Entre 1991 e 2023, secas e estiagens causaram prejuízos acumulados de R\$ 376 bilhões no Brasil, com cerca de 29 mil ocorrências (CEPED/UFSC, 2024). Embora todas as regiões sejam afetadas, o Nordeste apresenta ocorrência histórica, influenciada por clima semiárido e fenômenos como *El Niño*-Oscilação Sul (Marengo; Torres; Alves, 2017; Melo, 1999). Eventos marcantes incluem a “Grande Seca” de 1877–1879 (Secreto, 2020) e a de 2012, considerada a pior em 30 anos (Rodrigues; McPhaden, 2014). A Amazônia também registra secas severas, associadas a episódios de *El Niño* (Marengo et al., 2013).

O Sudeste, apesar da elevada disponibilidade hídrica, enfrenta eventos significativos, como a seca de 2014–2015, que reduziu o Sistema Cantareira a 5% da capacidade, devido ao verão mais quente e seco desde 1951 (Nobre et al., 2016). Outras secas ocorreram entre 2011 a 2012 (Rodrigues; McPhaden, 2014) além da mais recente, de 2020 a 2021 (Cai et al., 2020; Naumann et al., 2021; Santos et al., 2021), em que a bacia do Rio Paraná, devido a altas temperaturas e tempo seco, teve uma de suas piores secas registradas, e afetou o setor elétrico em escala nacional, já que a bacia é responsável por boa parte da produção de energia do país.

A Bacia do Rio Paraná, portanto, é de grande interesse para diversos setores do país. O Quadro 2.2 sintetiza trabalhos sobre secas na bacia. Observa-se que, apesar da importância da região para a geração hidrelétrica nacional, há escassez de trabalhos voltados à seca socioeconômica, especialmente aqueles com enfoque exclusivo em reservatórios.

Quadro 2.2 – Relação de trabalhos recentes sobre secas que contemplam a Bacia do Rio Paraná.

Referência	Área de estudo	Período de análise	Método	Resultados relevantes
Melo et al. (2016)	37 reservatórios da Bacia do Rio Paraná	1995-2015	SPI, SDI	Reservatórios a montante são controlados pelo clima enquanto reservatórios a jusante reflete a operação das barragens.
Cunha et al. (2019)	Brasil, inclusão de reservatórios na análise	2011-2019	SPI, VHI, IDI, SMI, Vazão, Nível, Volume, focos de incêndio	Entre 2011 e 2017, o Brasil enfrentou secas severas e generalizadas, com destaque para o ano hidrológico de 2014/2015.
Santos et al. (2021)	Bacia do Rio Paraná; 953 estações pluviométricas	1982-2016	SPI, SST, PCA	Apesar de o fenômeno ENSO não ser o fator principal que controla os eventos úmidos ou de seca, <i>El Niño</i> tende a contribuir para excesso de chuva, enquanto <i>La Niña</i> está associada a déficit pluviométrico.
Bevacqua et al. (2021)	457 bacias do Brasil	1981-2015	SPEI, SSI, propagação de secas meteorológicas para hidrológicas	No Brasil, secas hidrológicas são mais longas, severas e levam mais tempo para se recuperar que secas meteorológicas. Na bacia do Paraná, tempo de propagação é em torno de 2 meses.
Cuartas et al. (2022)	Reservatórios do Brasil	1981-2021	SPI, SPEI, SSFI	A seca de 2014 foi extensa no país, mas a seca de 2020 afetou a geração de energia, que operou muito abaixo da capacidade total.
Cuartas et al. (2024)	8 reservatórios da bacia do Rio Paraná	2002-2022	SPI, SSFI, TSI, TWS	O índice TSI demonstrou-se mais eficaz que os indicadores SPI e SSI, termos de gravidade (severidade) e duração. Escalas de 12 e 24 meses são as mais adequadas para monitorar secas hidrometeorológicas com o TSI.

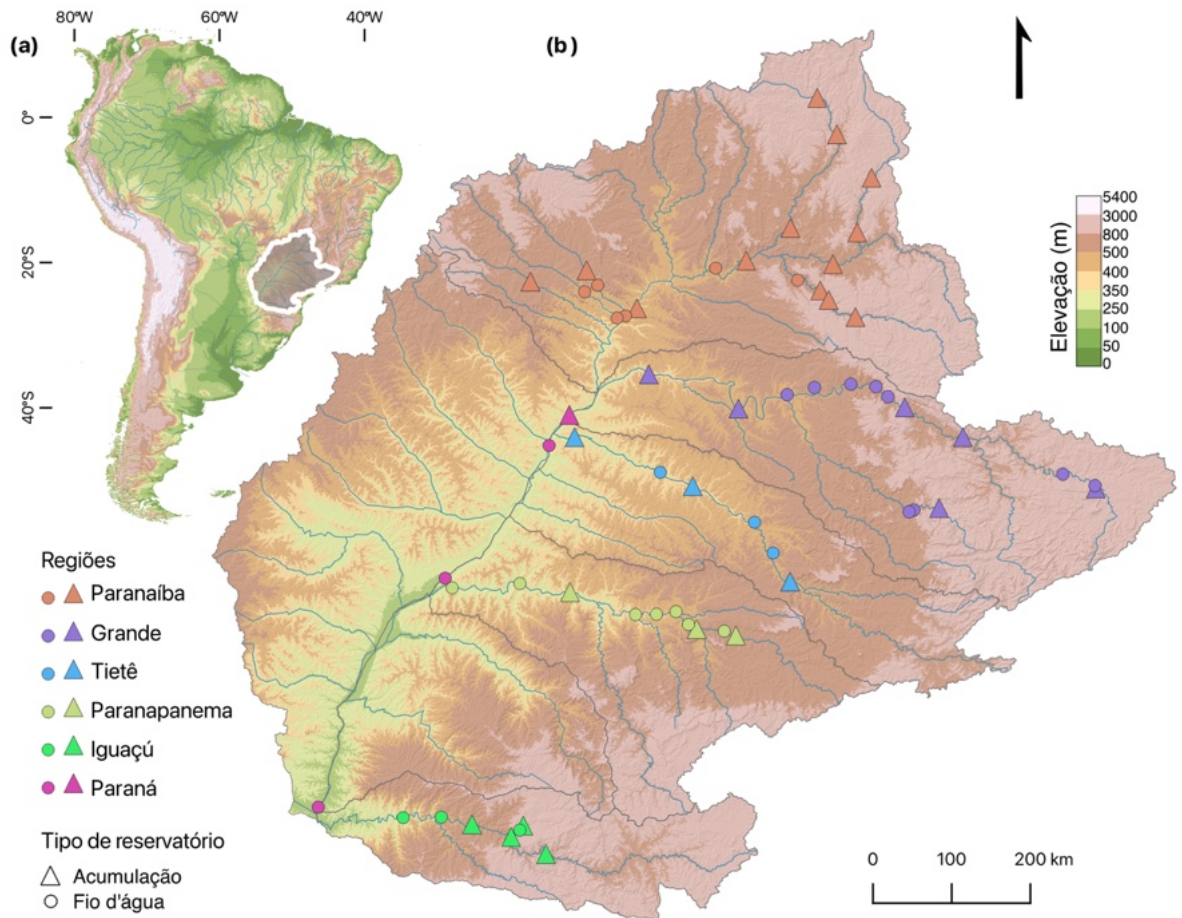
3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Paraná é um dos maiores sistemas hidrelétricos interligados do mundo, essencial para a geração de energia hidrelétrica no Brasil. Está localizada em sua maior parte no Brasil, com a porção oeste contida no Paraguai e Argentina. Ela possui uma extensa rede de rios e afluentes que drenam uma área de aproximadamente 880 mil km² (ANA, 2015). O rio principal nasce no Brasil, na Serra do Mar, e percorre cerca de 4.880 quilômetros até desaguar no Rio da Prata, na Argentina. A bacia apresenta 40% da potência instalada de UHEs do país (ANA, 2016) e as demandas hídricas na bacia se dividem entre 42% de demanda para irrigação, 28% de demanda industrial e 24% de abastecimento urbano (ANA, 2015).

Neste trabalho foram avaliadas 61 usinas hidrelétricas (UHE) na Bacia do Rio Paraná (Figura 3.1), com 31 reservatórios fio d'água e 30 reservatórios de acumulação (ANA, 2025). As usinas foram selecionadas com base na disponibilidade dos dados. A área de estudo abrange cerca de 890.000 km², tendo como rio principal o Rio Paraná. Ela foi subdividida em regiões com base em seus principais afluentes: Iguaçu (67.600 km²), Paranapanema (107.300 km²), Tietê (97.800 km²), Grande (149.600 km²) e Paranaíba (223.200 km²).

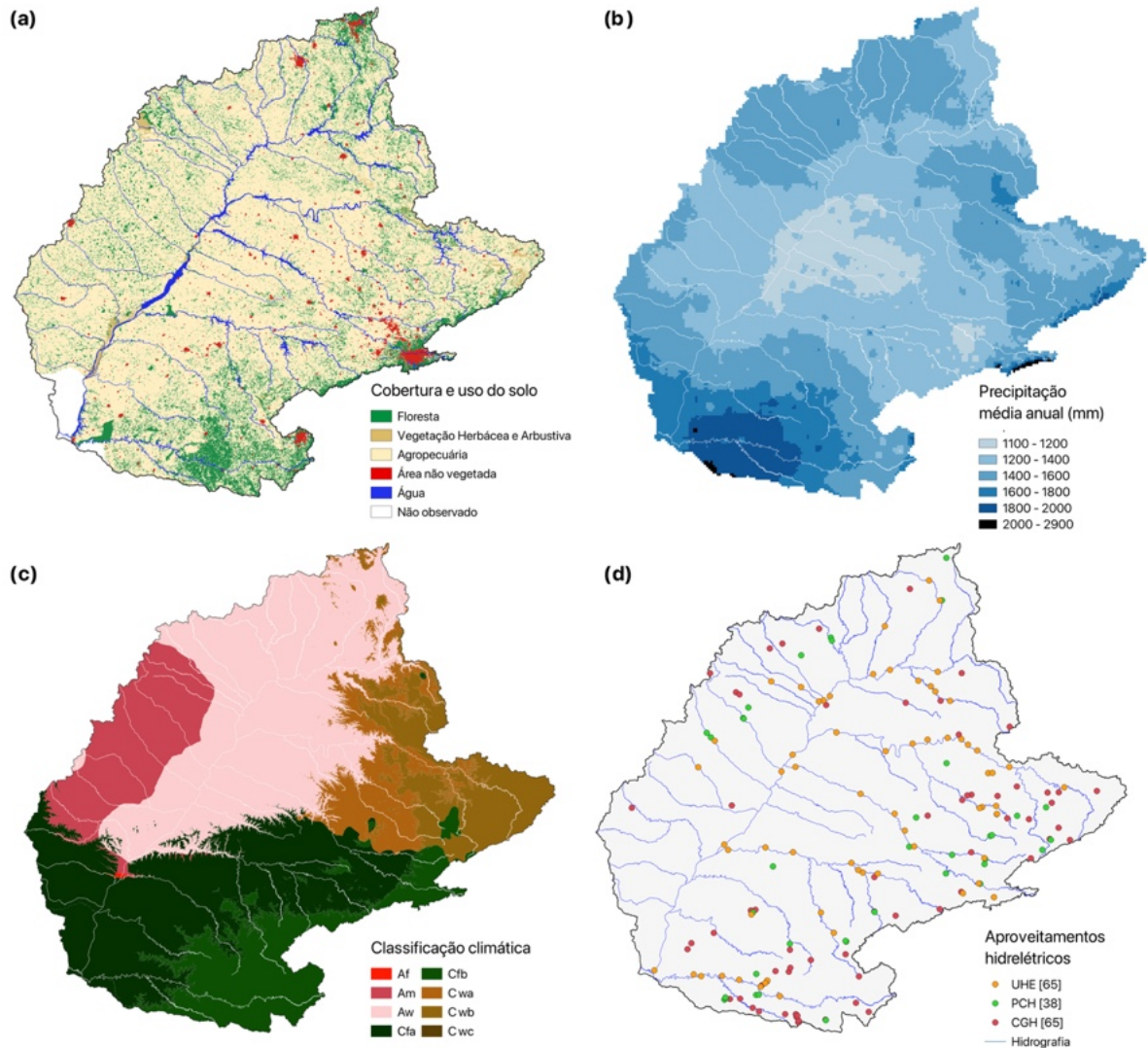
Figura 3.1 – Área de estudo representando: (a) a localização da bacia do Rio Paraná na América do Sul e (b) a distribuição dos reservatórios da bacia do Rio Paraná, que é subdividida em 6 unidades hidrográficas: Paranaíba (laranja), Grande (roxo), Tietê (azul), Paranapanema (amarelo), Iguaçu (verde) e o rio principal, Paraná (rosa). Também estão representados os rios principais da bacia, em azul, além da elevação.



Na Bacia do Rio Paraná, com relação ao uso e cobertura do solo, 75% da área é utilizada para agricultura, em que 31% é pastagem, 23% são mosaicos de usos (em que não é possível distinguir entre pastagem e agricultura) e 5% é silvicultura (Figura 3.2a). Apenas 17% da área total da bacia é coberta por florestas.

O regime pluviométrico da Bacia do Rio Paraná varia entre 1300 e 3500 mm, com destaque para a região do Rio Iguaçu, com a maior parte da bacia tem acumulados anuais acima de 1700 mm (Figura 3.2b). A região é fortemente afetada pelo fenômeno *El Niño*, que influencia a ocorrência de tanto secas quanto cheias (Santos et al., 2021). Com relação a classificação climática da bacia (Figura 3.2c), ao sul da área da bacia predomina clima Cfa, clima subtropical de verão quente, e Cfb, clima temperado de verão ameno. A leste predomina Cwa, clima subtropical de inverno seco, e Cwb, clima subtropical de altitude. A região norte e oeste predominantemente possuem clima Am, clima tropical úmido ou subúmido, e Aw, clima tropical com inverno seco.

Figura 3.2 – Representação de características da bacia do Rio Paraná com relação a (a) cobertura e uso do solo (Mapbiomas, 2025); (b) Precipitação média anual, em milímetros, de 1999 a 2024 (Funk et al., 2015); (c) classificação climática de Koppen (Alvares; Stape; Sentelhas, 2013); e (d) todos os aproveitamentos hidrelétricos em operação na bacia, incluindo UHEs, PCHs e CGHs (ANA, 2013).



Na Figura 3.3 pode-se observar em detalhe o diagrama das UHEs que são avaliadas neste trabalho e o Quadro 3.1 e o Anexo 1 contém informações relevantes de cada usina. A região do Rio Paranaíba é a região com maior quantidade de usinas, com cinco rios afluentes que contém UHEs, além do rio principal. A região possui 13 usinas com reservatórios de acumulação e 6 reservatórios a fio d'água. Já a região do Rio Grande possui 9 usinas a fio d'água e 6 de reservatório de acumulação, com apenas um rio tributário que contém UHEs. A região do Rio Tietê possui 3 a fio d'água e 3 de acumulação, sem tributários com UHEs. A região do Rio Paranapanema, assim como a anterior, não possui tributários com UHE, e possui

7 usinas a fio d'água e 3 reservatórios de acumulação. Por fim, a região do Rio Iguaçu possui apenas um tributário, com 3 reservatórios a fio d'água e 4 de acumulação.

Figura 3.3 – Diagrama contendo a localização das usinas estudadas na Bacia do Rio Paraná. Suas cores representam as regiões correspondentes. Triângulos representam usinas com reservatório de acumulação enquanto círculos representam usinas a fio d'água.



Quadro 3.1 – Características das usinas hidrelétricas analisadas. RES = usinas com reservatórios de acumulação, FIO = usinas com reservatórios a fio d'água.

Usina	Tipo	Região	Rio	Potência MW	Área Km ²	Vol. útil hm ³
Nova Ponte	RES	Paranaíba	Araguari	510	15.325	10.612
Miranda	RES	Paranaíba	Araguari	408	18.000	143
Capim Branco 1	RES	Paranaíba	Araguari	240	18.369	13
Capim Branco 2	FIO	Paranaíba	Araguari	210	19.165	12
Caçu	RES	Paranaíba	Claro	65	12.118	27
Barra dos Coqueiros	FIO	Paranaíba	Claro	90	12.636	47
Foz do Rio Claro	FIO	Paranaíba	Claro	68	13.612	15
Espora	RES	Paranaíba	Corrente	32	4.061	138
Corumbá 4	RES	Paranaíba	Corumbá	129	7.017	917
Corumbá 3	RES	Paranaíba	Corumbá	96	8.885	256
Corumbá	RES	Paranaíba	Corumbá	375	27.766	969
Batalha	RES	Paranaíba	São Marcos	53	6.670	1.352
Serra do Facão	RES	Paranaíba	São Marcos	213	10.597	3.474
Salto	FIO	Paranaíba	Verde	116	10.822	12
Salto do Rio Verdinho	FIO	Paranaíba	Verde	93	11.806	41

Usina	Tipo	Região	Rio	Potência MW	Área Km ²	Vol. útil hm ³
Emborcação	RES	Paranaíba	Paranaíba	1.192	29.062	12.788
Itumbiara	RES	Paranaíba	Paranaíba	2.082	94.678	12.454
Cachoeira Dourada	FIO	Paranaíba	Paranaíba	658	99.733	222
São Simão	RES	Paranaíba	Paranaíba	1.710	171.433	5.666
Camargos	RES	Grande	Grande	46	6.224	636
Itutinga	FIO	Grande	Grande	52	6.247	8
Funil	FIO	Grande	Grande	180	15.714	6
Furnas	RES	Grande	Grande	1.216	51.895	17.217
M. Moraes	RES	Grande	Grande	476	59.482	2.588
L. C. Barreto	FIO	Grande	Grande	1.050	61.023	185
Jaguara	FIO	Grande	Grande	424	61.459	97
Igarapava	FIO	Grande	Grande	210	63.443	15
Volta Grande	FIO	Grande	Grande	380	67.441	264
Porto Colômbia	FIO	Grande	Grande	320	77.166	222
Marimondo	RES	Grande	Grande	1.440	118.138	5.279
A. Vermelha	RES	Grande	Grande	1.396	139.188	5.220
Caconde	RES	Grande	Pardo	80	2.562	505
Euclides da Cunha	FIO	Grande	Pardo	109	4.355	3
Limoeiro	FIO	Grande	Pardo	32	4.435	17
Barra Bonita	RES	Tietê	Tietê	141	32.506	2.476
Bariri	FIO	Tietê	Tietê	143	36.062	49
Ibitinga	FIO	Tietê	Tietê	131	44.285	48
Promissão	RES	Tietê	Tietê	264	57.383	2.346
N. Avanhandava	FIO	Tietê	Tietê	347	62.009	399
Três Irmãos	RES	Tietê	Tietê	808	70.525	3.214
Jurumirim	RES	Paranapanema	Paranapanema	101	17.886	3.220
Piraju	FIO	Paranapanema	Paranapanema	80	18.339	3
Chavantes	RES	Paranapanema	Paranapanema	414	27.757	3.059
Ourinhos	FIO	Paranapanema	Paranapanema	44	28.155	2
Salto Grande	FIO	Paranapanema	Paranapanema	74	38.766	35
Canoas II	FIO	Paranapanema	Paranapanema	72	39.574	20
Canoas I	FIO	Paranapanema	Paranapanema	83	41.322	26
Capivara	RES	Paranapanema	Paranapanema	643	84.774	6.285
Taquaruçu	FIO	Paranapanema	Paranapanema	525	100.888	159
Rosana	FIO	Paranapanema	Paranapanema	354	100.888	400
Jurumirim	RES	Paranapanema	Paranapanema	101	17.886	3.220
Piraju	FIO	Paranapanema	Paranapanema	80	18.339	3
Chavantes	RES	Paranapanema	Paranapanema	414	27.757	3.059
Ourinhos	FIO	Paranapanema	Paranapanema	44	28.155	2
Salto Grande	FIO	Paranapanema	Paranapanema	74	38.766	35
Canoas II	FIO	Paranapanema	Paranapanema	72	39.574	20
Canoas I	FIO	Paranapanema	Paranapanema	83	41.322	26
Capivara	RES	Paranapanema	Paranapanema	643	84.774	6.285
G. B. Munhoz	RES	Iguaçu	Iguaçu	1.676	30.153	3.609
Segredo	RES	Iguaçu	Iguaçu	1.260	34.387	384
Salto Santiago	RES	Iguaçu	Iguaçu	1.420	43.902	4.074
Salto Osorio	FIO	Iguaçu	Iguaçu	1.104	45.843	400
Salto Caxias	FIO	Iguaçu	Iguaçu	1.240	57.084	271
Santa Clara	RES	Iguaçu	Jordão	120	3.910	262
Fundão	FIO	Iguaçu	Jordão	120	4.093	1
Ilha Solteira	RES	Paraná	Paraná	3.444	377.299	5.372
Jupiaá	FIO	Paraná	Paraná	1.551	476.050	855
Porto Primavera	FIO	Paraná	Paraná	1.540	570.936	603
Itaipu	FIO	Paraná	Paraná	14.000	822.371	19.000

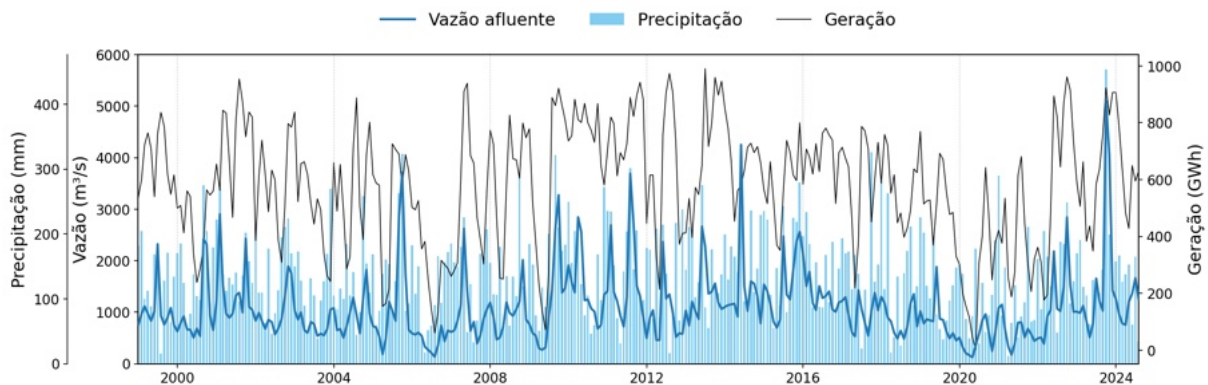
3.2 DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) possui um extenso banco de dados de reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN), incluindo vazões de entrada, saída, volume, nível e geração de energia para todas as UHEs do sistema integrado (ONS, 2024). A análise deste trabalho se limita àquelas para as quais dados abrangentes sobre vazões de entrada e geração de energia estão disponíveis, isto é, 61 UHEs, embora a Bacia do Rio Paraná contenha 70 UHEs que fazem parte do SIN (ANA, 2024).

No contexto do controle de qualidade dos dados para reservatórios, o ONS já realiza previamente o controle de qualidade antes da divulgação dos dados. No entanto, as séries foram avaliadas uma a uma, garantindo a remoção dos meses com geração ou vazão zero. Isso foi pertinente durante o início da série temporal de algumas usinas em que sua operação inicia em algum momento nos últimos 25 anos, visto que, quando as usinas iniciam suas operações passam por ajustes e testes de equipamentos. Assim, os dados do início da operação foram removidos quando eram valores muito baixos ou muito altos, contrastando com o restante da série de dados, o que pode representar valores enganosos. Os períodos de enchimento do reservatório foram identificados como momentos críticos, justificando a exclusão de valores que poderiam comprometer a integridade dos dados na representação da operação real. Quando a série sofreu uma mudança abrupta na geração, não foi contabilizado todo o período de geração devido a potenciais mudanças no projeto da usina ou outros problemas operacionais. Em vez disso, manteve-se os períodos mais recentes e excluiu-se a parte inicial da série.

Os dados de precipitação foram obtidos do conjunto de dados CHIRPS 2.0 (Funk et al., 2015), uma coleção global de precipitação pluvial com resolução de 0,05 grau (aproximadamente 5 km x 5 km), de 1981 até os dias atuais. A precipitação média mensal foi estimada para cada bacia hidrográfica, considerando as UHEs como exutório. A série de dados tanto para chuva quanto para vazão estende de janeiro de 1999 a agosto de 2024, totalizando 25 anos de dados. Pode haver variações no início da série, a depender quando a usina inicia sua operação, no caso de UHEs mais recentes. A Figura 3.4 apresenta um exemplo de dados de entrada.

Figura 3.4 – Exemplo de variáveis de entrada para a UHE Salto Santiago. São utilizadas a precipitação, em mm (barras em azul claro), vazão afluente ao reservatório, em m³/s (linha em azul), e geração, em GWh (linha em preto).



3.3 SECA METEOROLÓGICA E SECA HIDROLÓGICA

Para identificar períodos de seca meteorológica foi utilizado o Índice Padronizado de Precipitação (SPI), que requer somente a precipitação como variável de entrada (McKee; Doesken; Kleist, 1993; WMO, 2012). O SPI permite quantificar a intensidade e duração de eventos de seca meteorológica em diferentes escalas. Similarmente, definiu-se a seca hidrológica utilizando o Índice Padronizado de Vazão (SSI), e que utiliza vazão como variável de entrada (Shukla; Wood, 2008). Ambos os índices são agregados em 1, 3, 6, 9, 12, e 24 meses de acumulação.

Ambos os índices são estimados de forma similar: (i) a variável de entrada é agregada no intervalo de acumulação desejado. Assim:

$$X_{i,k} = \sum_{j=i}^{i+k-1} X_j \quad \text{Equação 3.1}$$

em que X_j é a variável desejada (precipitação ou vazão) no mês j , k é a escala de acumulação e i é o índice do mês; a seguir, (ii) os dados são ajustados a distribuição Gama, comumente utilizada para o SPI (MCKEE; DOESKEN; KLEIST, 1993; STAGGE *et al.*, 2015):

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}, x > 0 \quad \text{Equação 3.2}$$

em que $f(x)$ é a função PDF da Gama, com dois parâmetros, sendo eles α o parâmetro de escala e β o parâmetro de forma. Trata-se os zeros pela abordagem de distribuição mista, em que:

$$P(X = 0) = q = \frac{m}{n}, P(X \leq x) = q + (1 - q)G(x; \alpha, \beta) \quad \text{Equação 3.3}$$

em que $G(x; \alpha, \beta)$ é a CDF da Gama; e, por fim, (iii) converte-se os dados a distribuição padrão normal usando a inversa da distribuição normal:

$$SI = \Phi^{-1}(P(X \leq x)) \quad \text{Equação 3.4}$$

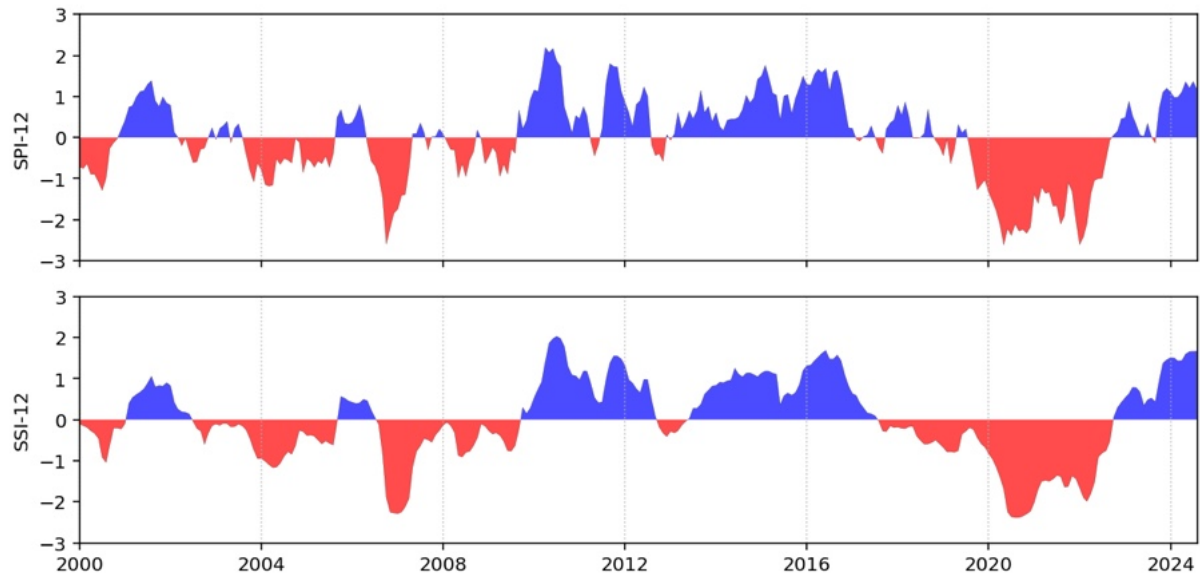
em que Φ^{-1} é a inversa da normal, e $P(X \leq x)$ é a probabilidade acumulada. Os valores e as condições representadas estão no Quadro 3.2 e um exemplo está ilustrado na Figura 3.5. Valores a partir de -1 foram considerados como o início do evento de seca, com a finalização quando o índice retorna ao seu valor positivo, como já abordado no item 2.1.

Quadro 3.2 - Valores do SPI ou SSI e condições que representam.

Condição	Valor
Extremamente úmido	>2,00
Muito úmido	1,50 a 1,99
Moderadamente úmido	1,00 a 1,49
Condição normal	-0,99 a 0,99
Moderadamente seco	-1,00 a -1,49
Muito seco	-1,50 a -1,99
Extremamente seco	<-2,00

Fonte: Adaptado de Manual do Usuário do SPI, Svoboda, Hayes e Wood (2012).

Figura 3.5 – Valores de SPI-12 e SSI-12 para a UHE Salto Santiago. Valores em vermelho (negativos) representam condições de seca e valores em azul (positivos) representam condições de umidade.



3.4 SECA SOCIOECONÔMICA

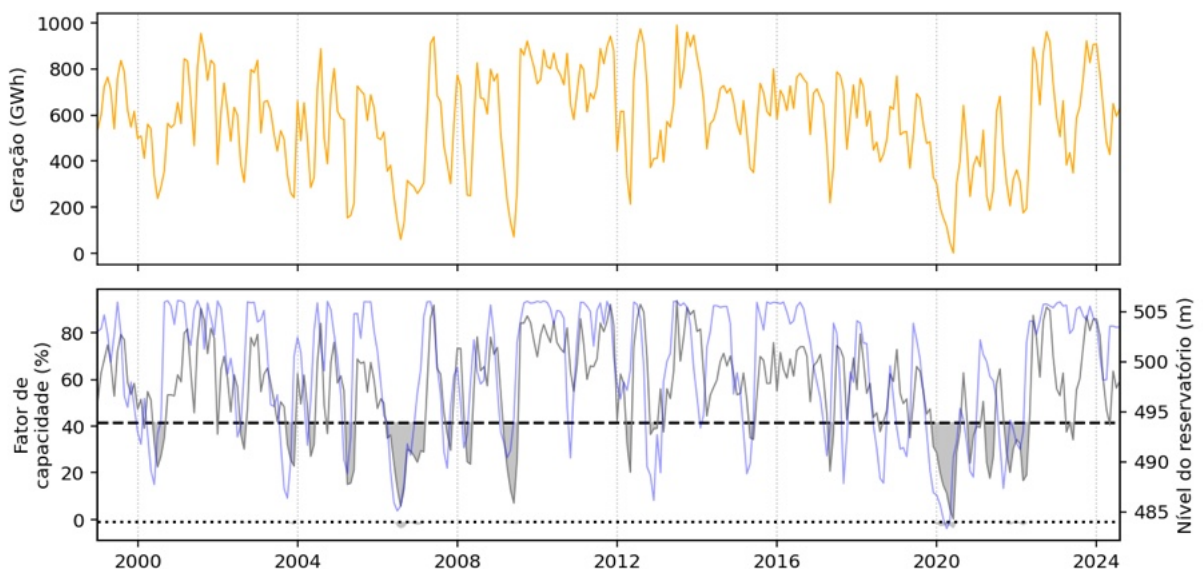
A seca socioeconômica resulta da interação entre fatores naturais e demandas humanas (Van Loon et al., 2016). Diferencia-se de outros tipos por frequentemente ser avaliada por indicadores de operação de sistemas, como o MSRRI. Neste trabalho, adota-se o Fator de Capacidade (FC) das usinas hidrelétricas como indicador, por refletir a proporção entre energia efetivamente gerada e o potencial máximo de produção (Bolson; Prieto; Patzek, 2022; Turner et al., 2024). O fator de capacidade é estimado com base na geração mensal da UHE dividida por sua capacidade instalada. Assim:

$$FC = \frac{G}{CI.t} \quad (1)$$

em que FC é o fator de capacidade, em porcentagem, G é a geração mensal, em GWh; CI é a capacidade instalada da usina, em MW, e t são as horas do mês.

Assume-se que, para cada reservatório, o percentil 25 do fator de capacidade indica uma seca socioeconômica moderada, valores entre os percentis 25 e 5 indicam seca socioeconômica severa e valores abaixo do percentil 5 indicam uma seca socioeconômica extrema. Assim, o evento se inicia quando o valor de FC está no percentil 25, assim, cada usina possui um valor de limiar diferente.

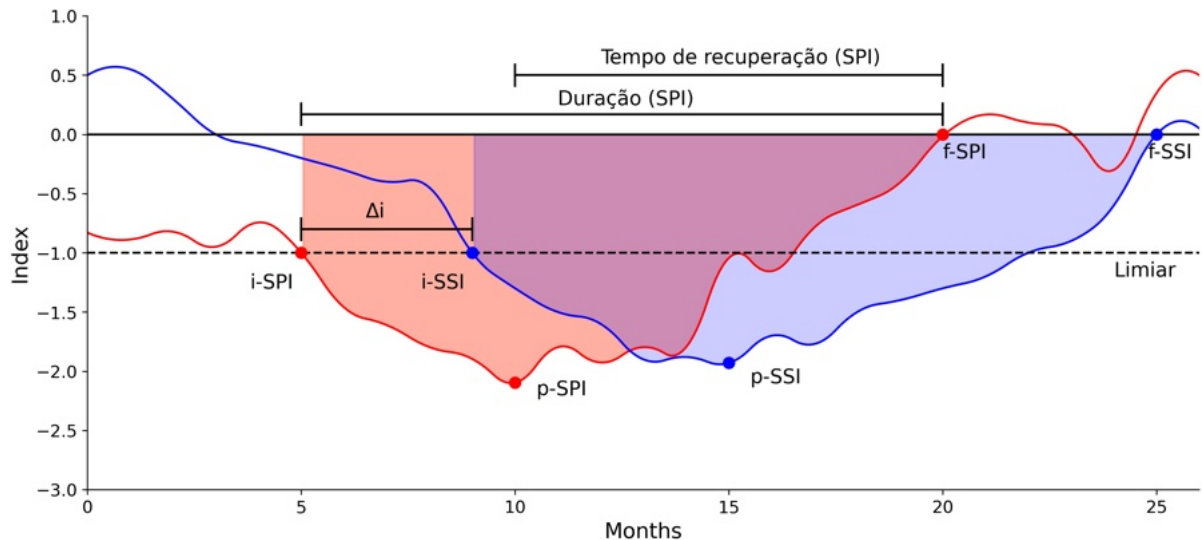
Figura 3.6 – Série de dados da UHE Salto Santiago para a geração, em GWh, e fator de capacidade, em porcentagem, e em azul o nível do reservatório, em metros. A linha pontilhada representa o percentil 25 da série de FC.



3.5 ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DA SECA

A propagação da seca é o processo de desenvolvimento de um tipo de seca que transiciona para outro. Ela foi analisada através da transição: (i) da seca meteorológica para a hidrológica; (ii) da seca meteorológica para a socioeconômica; e (iii) da seca hidrológica para a socioeconômica. Essa abordagem permite caracterizar a propagação da seca com base no início (Δi) de cada evento, como visto na Figura 3.7, e de forma semelhante ao abordado por Bevacqua et al. (2021). A janela de busca é definida a partir da janela temporal do evento primário, ou seja, se um evento de seca hidrológica ocorre dentro do período de um evento de seca meteorológica, assumimos que é uma consequência do evento de seca meteorológica.

Figura 3.7 – Características da propagação da seca entre um evento de seca meteorológica, representada pelo SPI e seca hidrológica, representada pelo SSI. As características de um evento são início (i), intensidade (p), fim (f), duração e tempo de recuperação.



Além disso foi estimada a diferença entre os inícios de eventos de cada par de usinas, ou seja, para cada usina, identificada como UHE montante, existe uma usina a jusante que é seu par. Assim, foi possível estimar a diferença entre o início de uma seca da usina montante e o início da seca para uma usina a jusante (Figura 3.8). Nesse caso, foram consideradas transições dentro do mesmo tipo de seca (por exemplo, de hidrológica para hidrológica). Isso nos permite estimar o tempo de propagação entre os tipos de reservatórios e seu impacto no início do evento de seca. Também foi estimada a co-ocorrência de eventos de seca, que é o período total em que eventos de seca ocorrem ao mesmo tempo em múltiplas UHEs (Figura 3.9).

Figura 3.8 – Diferença entre o início de cada evento entre reservatórios a montante e a jusante. A diferença entre os inícios foi estimada caso o evento da usina a jusante esteja contido no tempo do evento da usina a montante.

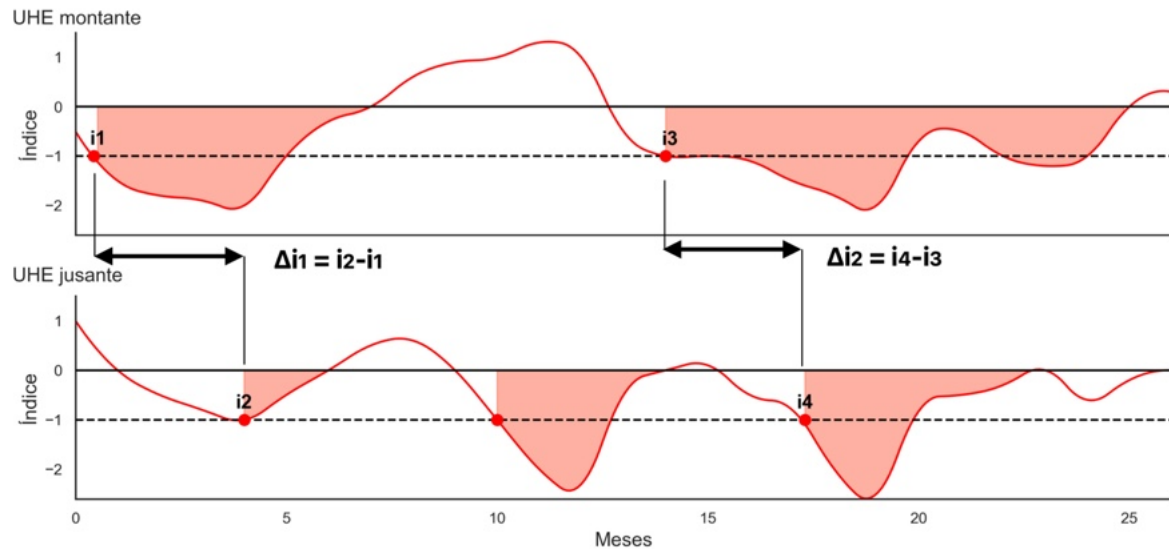
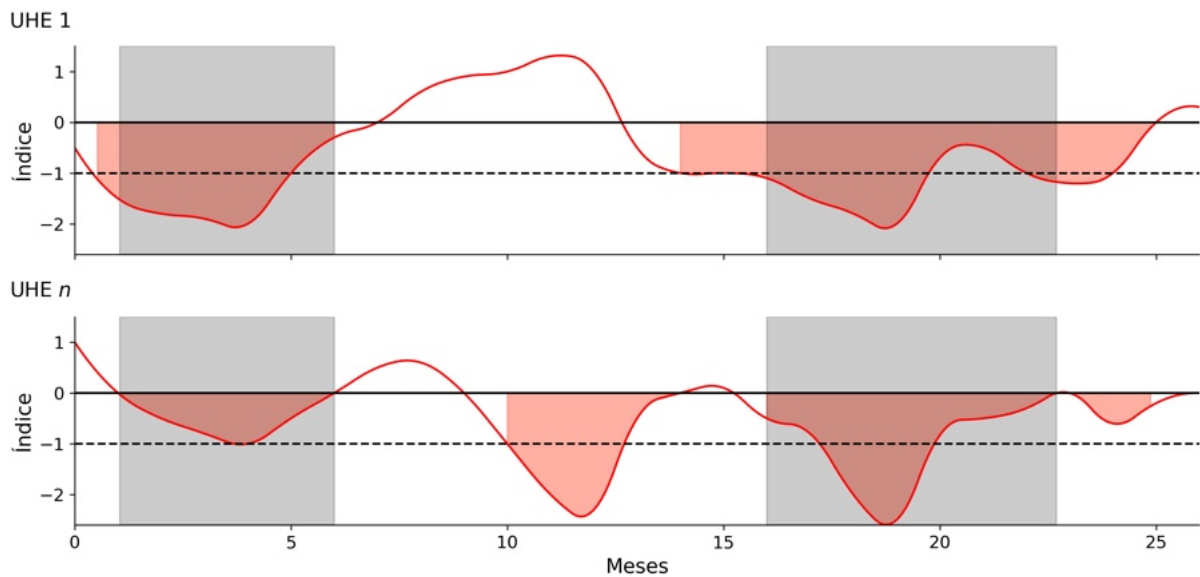


Figura 3.9 – Co-ocorrência de eventos de seca para os índices. São avaliados e contabilizados os meses em que a seca ocorre em várias usinas



Para identificar o índice mais adequado para representar cada tipo de seca, cada usina com seu fator de capacidade foi correlacionada com seus respectivos SPI e SSI correspondentes, ao longo de períodos de acumulação de 1, 3, 6, 9, 12 e 24 meses (Barker et al., 2016). As correlações podem ser encontradas no Anexo 2, Anexo 3 e Anexo 4 e a correlação de cada usina em detalhe no Anexo 5. Bevacqua et al. (2021) encontraram uma forte correlação entre o SPEI e o SSI-1 a partir de três meses de acumulação na bacia do rio Paraná.

Assim, o SPI-12 foi escolhido para representar a seca meteorológica, pois apresenta uma correlação mais forte tanto com o SSI-1 quanto com a FC. A seca hidrológica foi definida usando o SSI-1 pois ele demonstra uma forte correlação com a FC e reflete a hidrometeorologia integrada dos meses anteriores (Stahl et al., 2020). A acumulação de um mês foi escolhida para

definir a seca socioeconômica, de forma semelhante à escolha para o SSI, pois já reflete os resultados da vazão e da precipitação dos meses anteriores, juntamente com as condições atuais do reservatório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PADRÕES TEMPORAIS

O SPI-12 revela períodos prolongados de seca meteorológica, hidrológica e socioeconômica, com eventos de seca particularmente severos na bacia do Rio Paraná, a partir de 2014 e também em 2019. Esses eventos de seca meteorológica coincidem com reduções na vazão dos rios, conforme indicado pelo SSI-1 e refletido no Fator de Capacidade (FC). O tempo e a extensão das variações na vazão e no volume de precipitação podem diferir dependendo das características locais da bacia hidrográfica e das estratégias de gestão dos reservatórios. A Figura 4.1 ilustra a variabilidade temporal das secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas, categorizadas regionalmente e de montante para jusante na cascata.

A seca socioeconômica, indicada pelos percentis do FC, mostra sensibilidade significativa às condições hidrometeorológicas. Períodos de baixa vazão frequentemente coincidem com reduções substanciais no CF em múltiplas usinas, evidenciando a dependência da produção hidrelétrica em relação à disponibilidade hídrica, diretamente ligada à vazão e à precipitação. Secas meteorológicas possuem eventos prolongados, especialmente nos períodos de 2014 e 2019. Esses achados corroboram observações anteriores reportadas por Cuartas et al. (2022). A duração média de 13 meses para secas meteorológicas na bacia é consistente com valores encontrados em outras regiões, que variam entre 15 e 17 meses (Brasil, Bevacqua et al., 2021; Estado da Paraíba, Brasil Neto et al., 2022; Lago Malauí, Mtilatila et al., 2020)

Na bacia do Rio Grande, observa-se um contraste entre os tipos de seca em dois episódios distintos de seca. A seca de 2014 teve um impacto muito mais significativo na região do Grande do que a seca de 2019. Em termos de seca meteorológica, a região foi fortemente afetada em 2019, mas, em termos de seca hidrológica e socioeconômica, 2014 foi muito mais severo. Isso provavelmente resulta da operação dos reservatórios. A seca de 2019 foi inicialmente mais branda, enquanto a de 2014 se intensificou rapidamente em poucos meses. Isso indica que, com a previsão de um período de seca, o sistema em cascata conseguiu gerenciar preventivamente a operação dos reservatórios, minimizando o impacto na geração de energia, já que os reservatórios podem mitigar secas de curto prazo ao reduzir sua magnitude. No entanto, no restante da Bacia do Paraná e estendendo-se à Bacia do Prata, a partir de meados de 2019, a seca causou vazões recordes historicamente baixas (Naumann et al., 2021).

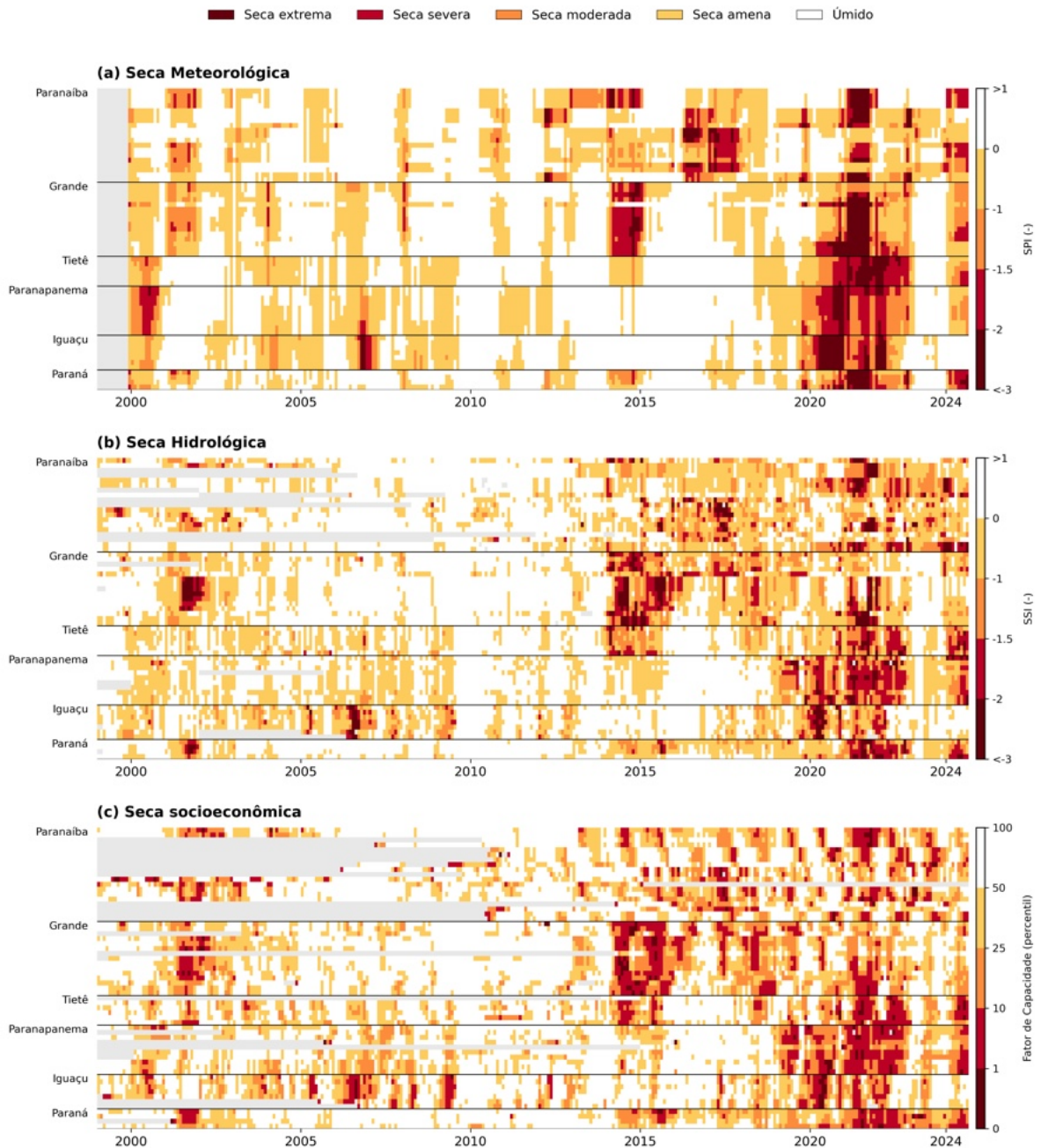
Secas meteorológicas (avaliadas pelo SPI-12) apresentam tempos de recuperação maiores do que as secas hidrológicas (avaliadas pelo SSI-1) na bacia de estudo, o que contrasta com os achados de Bevacqua et al. (2021) para a Bacia do Paraná. Esses autores constataram

que as secas hidrológicas tiveram um tempo de recuperação significativamente maior do que as meteorológicas. Uma possível explicação para essa divergência reside na diferença de índices utilizados: enquanto Bevacqua et al. (2021) empregaram o SPEI, que incorpora a variável temperatura, este trabalho baseou-se no SPI, que considera apenas a precipitação.

No entanto, ao analisar os resultados deste estudo sob uma perspectiva diferente, comparando SPI-12 e SSI-12, observa-se que a dinâmica se altera: as secas hidrológicas de fato levam mais tempo para se recuperar e têm maior duração em relação às meteorológicas, alinhando-se parcialmente com Bevacqua et al. (2021). Isso sugere que a escolha do índice de seca meteorológica (SPI ou SPEI) e o período de acumulação do índice (Stahl et al., 2020) podem influenciar a interpretação dos tempos de recuperação.

O FC pode ser um bom indicador de seca socioeconômica, uma vez que captura os eventos de seca em períodos próximos aos detectados pelo SPI e SSI. No entanto, existem também variações espaciais nessa resposta: enquanto algumas usinas ou regiões mantêm um CF estável durante secas meteorológicas, outras apresentam flutuações significativas. Essa variabilidade decorre de diferenças na capacidade de armazenamento dos reservatórios, na regulação em cascata, no projeto da usina (como fio d'água versus reservatórios de acumulação) e nas condições hidrológicas regionais.

Figura 4.1 - Heatmap ilustrando as séries temporais para (a) seca meteorológica, (b) seca hidrológica e (c) seca socioeconômica, representadas por SPI-12, SSI-1 e fator de capacidade, respectivamente, de cima para baixo. As usinas hidrelétricas estão organizadas de norte a sul e de montante a jusante. A intensidade do SPI e SSI é classificada de 0 a -1 (seca leve), -1 a -1,5 (seca moderada), -1,5 a -2 (seca severa) e menor que -2 (seca extrema). Valores maiores que zero indicam condições úmidas, e valores em cinza correspondem a dados faltantes ou inexistentes. Para o fator de capacidade, os valores são classificados para seca socioeconômica como 25 a 50 (seca amena), 10 a 25 (seca moderada), 1 a 10 (seca severa) e 0 a 1 (seca extrema). Valores acima do percentil 50 não são considerados seca socioeconômica (condições úmidas).



Os valores médios de intensidade, duração, tempo de recuperação e número de eventos para os três tipos de seca analisados revelam padrões distintos de comportamento (Tabela 4.1). A seca meteorológica, avaliada por meio do índice SPI-12, apresentou maior intensidade média (-1,7), quando comparada com a seca hidrológica, indicando condições mais severas de déficit

de precipitação. Esses eventos de seca meteorológica foram os mais prolongados, com duração média de 13 meses, e demandaram um tempo de recuperação considerável (7 meses). No entanto, ocorreram com menor frequência, 6 eventos em média para cada UHE no período analisado, sugerindo que, embora menos recorrentes, tais secas tendem a ser mais persistentes.

Em contraste, a seca hidrológica, representada pelo índice SSI-1, exibiu uma intensidade média ligeiramente menor (-1,6), mas com duração mais curta na média (9 meses) e um tempo de recuperação reduzido (5 meses). Esse tipo de seca registrou maior número de eventos, 9 na média, refletindo uma maior variabilidade na disponibilidade de água em rios e reservatórios, possivelmente influenciada tanto por fatores climáticos quanto por intervenções antrópicas. Na média, ambas secas meteorológicas e hidrológicas possuem classificação como eventos severos de seca (entre -1,5 e -2,0).

Já a seca socioeconômica, avaliada pelo índice FC, mostrou um padrão singular, com valor médio de 28,5% do fator de capacidade, ou seja, um evento tem intensidade média de 25,5%. Apesar da alta intensidade, esses eventos foram os mais curtos (4 meses em média) e com tempo de recuperação muito rápido (2 meses), o que pode estar associado a respostas rápidas de gestão do sistema para a recuperação. Chama atenção a elevada frequência (19 eventos), evidenciando que secas socioeconômicas, ainda que menos duradouras, são muito mais recorrentes. Os eventos de seca socioeconômica apresentam uma classificação de seca moderada, na média.

Tabela 4.1 – Valores médios de intensidade, duração, tempo de recuperação e número de eventos para cada tipo de seca e seu respectivo índice.

Tipo de seca	Índice	Intensidade	Duração (meses)	Tempo de recuperação (meses)	Número médio de eventos por usina
Meteorológica	SPI-12	-1,7	13	7	6
Hidrológica	SSI-1	-1,6	9	5	9
Socioeconômica	FC	28,5%	4	2	19

A seca socioeconômica exibe alta concordância temporal com a seca hidrológica na maioria das regiões (Figura 4.2), apresentando um atraso entre estas duas e a seca meteorológica. Eventos de seca severa ocorreram nas regiões do norte (como Paranaíba, Grande e Tietê) durante o evento de 2014, com algum impacto no na região do rio principal da Bacia do Rio Paraná. O evento de seca de 2019, por outro lado, afetou toda a Bacia do Paraná, impactando todas as regiões, mas com graus variados de intensidade.

Todas as regiões, exceto Paranaíba, apresentam um curto intervalo interquartil para a seca meteorológica, indicando que as condições nas UHEs são geralmente homogêneas, predominantemente secas ou úmidas (Figura 4.2). A região de Paranaíba apresenta uma maior

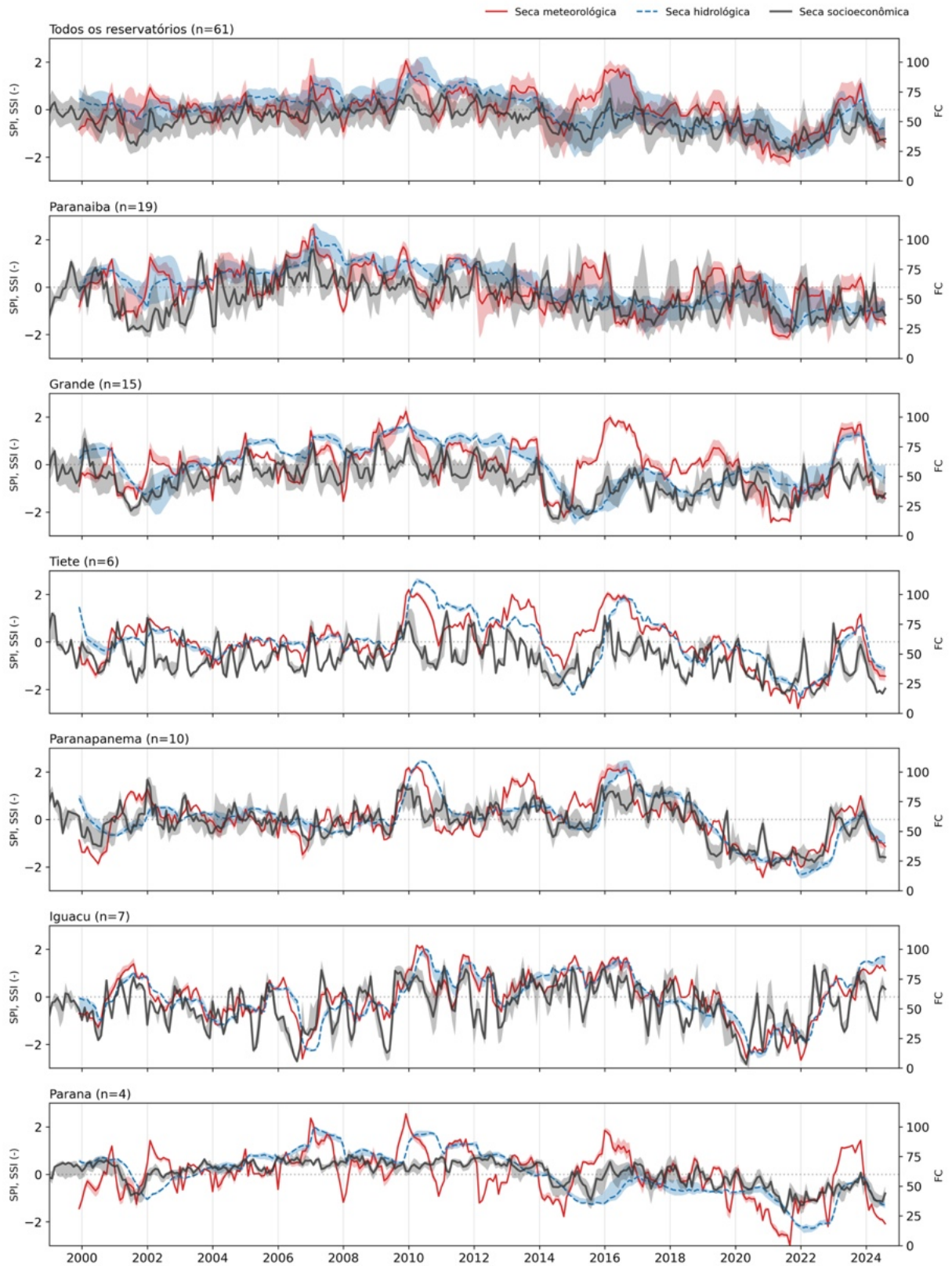
amplitude de valores, o que é explicado por sua extensão e número de UHEs em diferentes afluentes do Rio Paranaíba. A região contém 13 reservatórios de acumulação e 6 reservatórios a fio d'água, indicando um alto nível de regulação da vazão. Apresenta, também, múltiplos sistemas em cascata que operam de forma independente, resultando em um conjunto diversificado de regras operacionais.

Em termos de seca hidrológica, o SSI também apresenta um curto intervalo interquartil, com exceção das regiões de Paranaíba e Grande. Por outro lado, o fator de capacidade, que representa a seca socioeconômica, apresenta um intervalo interquartil mais variável, sugerindo flutuações significativas na forma como as UHEs gerenciam a seca socioeconômica; nem todas as regiões sofrem com a seca simultaneamente. A região do Iguaçu possui valores de SPI, SSI e FC que se comportam de forma similar entre si. Isso implica que a vazão nesta bacia responde mais rapidamente às condições meteorológicas em comparação com outras bacias, em concordância com a análise de baixa vazão de Chagas, Chaffé e Blöschl (2024a).

A região do rio principal da Bacia do Rio Paraná apresenta um tempo de início mais longo entre o SPI-12 e o SSI-12, sugerindo um período de propagação mais longo. Os valores de FC são relativamente estáveis, demonstrando resiliência mesmo durante secas meteorológicas severas. Isso pode ser atribuído à grande área de drenagem das UHEs do rio principal da Bacia do Rio Paraná, o que permite um tempo de resposta mais longo em comparação com outras regiões. Essa região é raramente afetada por eventos de seca. Como todas as regiões, exceto Iguaçu, drenam para essa porção do Rio Paraná (entre os reservatórios da UHE Ilha Solteira e a UHE Itaipu), apenas um período severo de baixa vazão em várias outras áreas pode desencadear uma seca hidrológica ou socioeconômica para essas UHEs, como observado durante os eventos de 2019. O curso principal do Rio Paraná sofreu um episódio hidrológico tardio, mas significativo. De acordo com os resultados aqui apresentados, a UHE Itaipu enfrentou sua seca mais severa do período analisado em 2019, em concordância com os resultados de Cuartas et al. (2024) e Naumann et al. (2021).

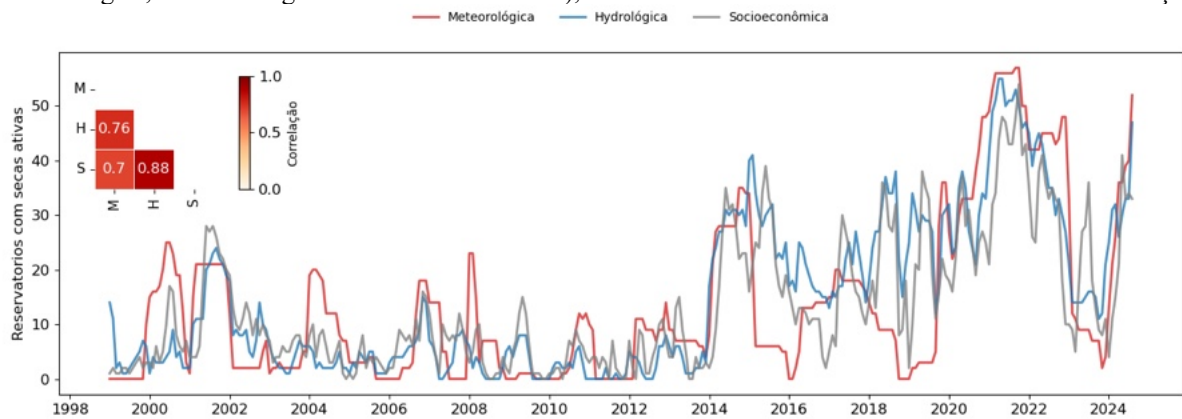
As séries temporais de cada usina estão disponíveis nos anexos deste trabalho, organizadas por rio principal da bacia (conforme disposto na Figura 3.3), do Anexo 6 ao Anexo 19.

Figura 4.2 - Séries temporais medianas para cada região da Bacia do Rio Paraná referentes à seca meteorológica (SPI-12, em vermelho), hidrológica (SSI-12, em azul) e socioeconômica (FC, em cinza). As áreas sombreadas representam a variação interquartil para cada série temporal.



Os eventos de seca que coocorrem em toda bacia também foram avaliados, contabilizando quantos reservatórios tiveram eventos de seca em andamento ao mesmo tempo. Existe um aumento aparente de secas ativas nos últimos 25 anos (Figura 4), associada a um aumento nas secas extremas (Chagas; Chaffe; Blöschl, 2024b). Os anos de 2015 e 2021 foram mais significativos nos últimos 25 anos nesta região, independentemente da intensidade. Notavelmente, em 2021, quase todos os reservatórios estavam em condições de seca simultaneamente, com 57 de 61 UHEs afetadas por seca meteorológica em setembro e outubro daquele ano. O coeficiente de correlação é alto entre todos os tipos de secas, especialmente para secas hidrológicas e socioeconômicas (0,88). Isso transmite como as secas socioeconômicas, quando se trata de energia, são dependentes das condições hidrológicas do mês atual, mesmo com um sistema composto por reservatórios que regulam o fluxo dos rios.

Figura 4.3 – Número de eventos ativos para a Bacia do Rio Paraná, para seca meteorológica (vermelho), hidrológica (azul) e socioeconômica (cinza). O *heatmap* representa a correlação entre os tipos de seca (M = meteorológica, H = hidrológica e S = socioeconômica), com o vermelho mais intenso indicando maior correlação.



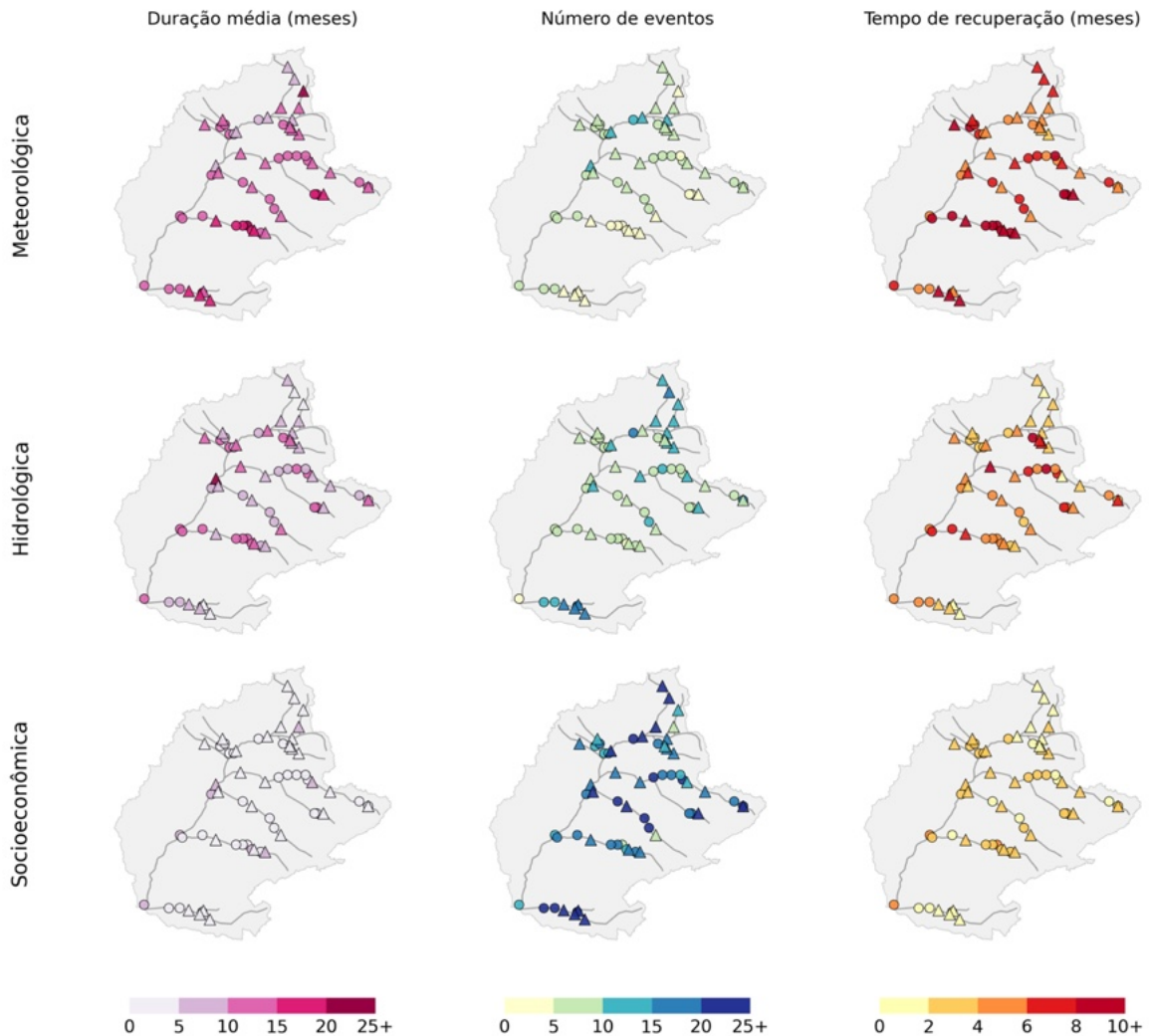
4.2 PADRÕES ESPACIAIS

Na maioria das regiões as secas meteorológicas são caracterizadas por menos eventos, durações mais longas e uma recuperação mais lenta em comparação com as secas hidrológicas (Figura 4.4 e Figura 4.5). Esta tendência é invertida na região do rio principal da Bacia do Rio Paraná, onde as secas hidrológicas são mais prolongadas, mas ocorrem com menos frequência. Este fenômeno pode ser atribuído ao tamanho da área de drenagem da bacia do Paraná, que abrange todas as regiões tributárias, levando a um maior tempo de resposta aos déficits de vazão. Consequentemente, é necessária uma seca generalizada para desencadear um evento no Rio Paraná. Os reservatórios de Itaipu e Porto Primavera, localizados no rio Paraná, têm um tempo médio de recuperação de 6 meses, mas também apresentaram um número limitado de eventos, totalizando apenas 12 e 14, cada.

Na região do Rio Iguaçu, observa-se um gradiente espacial: os eventos de seca hidrológica e socioeconômica diminuem em número e tempo de recuperação, enquanto aumentam em duração de montante para jusante, sugerindo atenuação dos efeitos da seca ao longo do curso do rio. Em contraste, os eventos de seca meteorológica aumentam em duração e tempo de recuperação de jusante para montante, refletindo as condições atmosféricas em altitudes mais elevadas que podem impulsionar o início da seca.

Embora as secas socioeconômicas ocorram com frequência em todas as regiões, elas são geralmente curtas, indicando início e resolução rápidos, possivelmente influenciados por práticas de gestão hídrica e mudanças na demanda. As regiões do Alto Iguaçu e Paranapanema se destacam por apresentarem secas meteorológicas de longa duração, sugerindo um estresse climático mais persistente nessa área em comparação com outras.

Figura 4.4 – Padrões espaciais de duração (em tons de rosa), número de eventos (em tons de azul) e tempo de recuperação (em tons de vermelho) para as usinas da Bacia do Rio Paraná. Quanto mais intensa a cor, maior o valor da variável. Círculos representam reservatórios a fio d'água e triângulos representam reservatórios de acumulação.



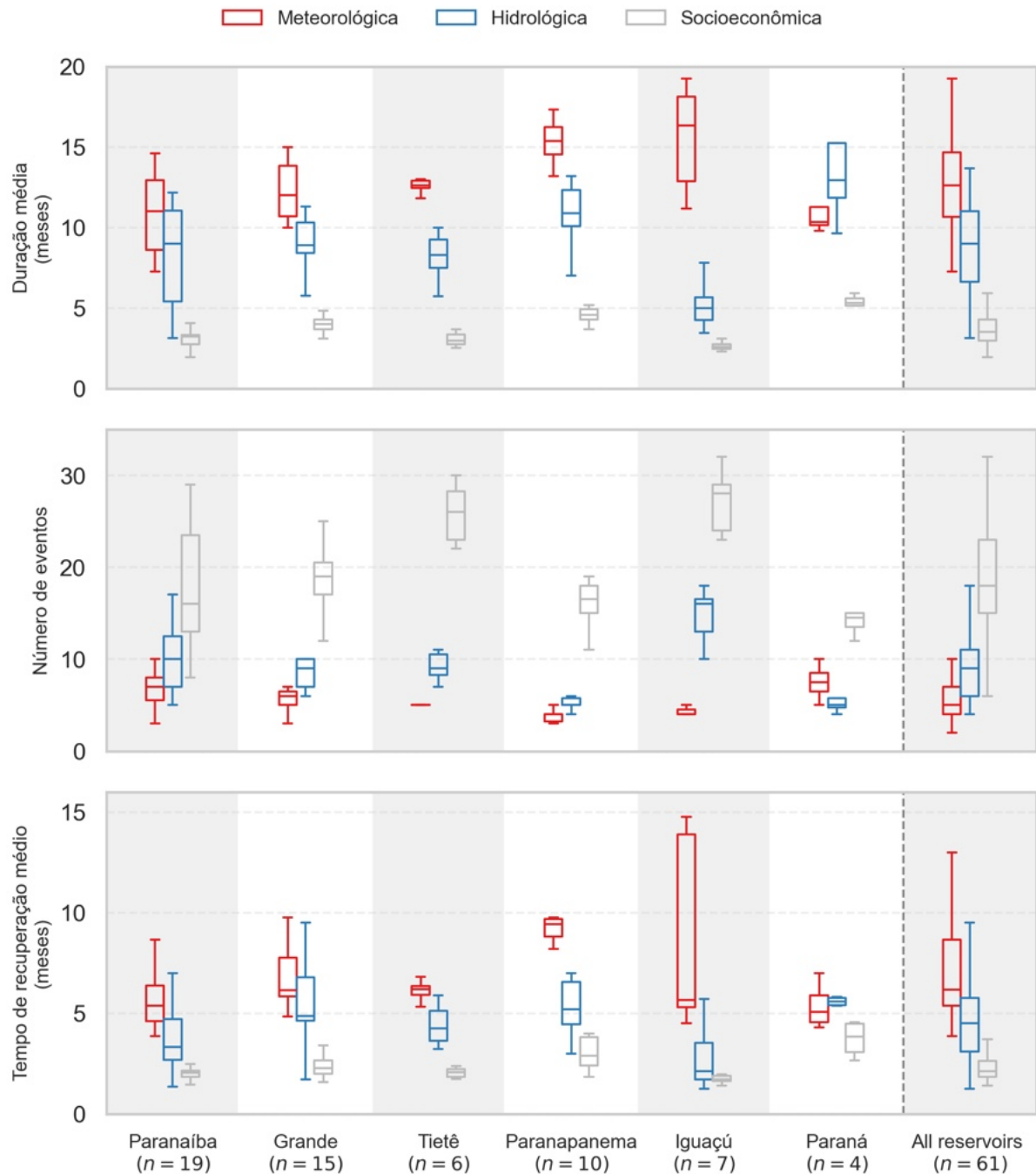
Secas socioeconômicas ocorrem com mais frequência do que secas meteorológicas e hidrológicas em todas as bacias, particularmente nas regiões do Tietê e do Iguaçu (Figura 4.4 e Figura 4.5). O número de eventos de seca socioeconômica varia entre 10 e 30, com mediana de 19, enquanto secas meteorológicas e hidrológicas variam tipicamente de 5 a 20 eventos, com mediana de 6 e 9, respectivamente. Eventos de seca socioeconômica foram duas vezes mais frequentes que secas hidrológicas e três vezes mais frequentes que secas meteorológicas. Enquanto secas meteorológicas e hidrológicas são baseadas em medições físicas diretas (precipitação e vazão), secas socioeconômicas incorporam múltiplas dimensões (por exemplo, demanda hídrica e déficits de armazenamento), tornando-as mais sensíveis a perturbações menores. Isso destaca como vários eventos socioeconômicos podem ocorrer dentro de uma seca hidrológica, por exemplo, mas também podem ocorrer sem relação com outros tipos de seca.

O tempo de recuperação também variou significativamente entre os tipos de seca. As secas meteorológicas apresentaram os períodos de recuperação mais longos, sendo o Iguaçu o caso mais extremo, variando de 5 a 15 meses. Além disso, as secas meteorológicas apresentam o maior tempo médio de recuperação em geral, chegando a mais de 10 meses. Por outro lado, as secas hidrológicas e socioeconômicas geralmente se recuperam mais rapidamente, normalmente em menos de 5 meses. Observa-se também que as secas meteorológicas tendem a persistir por mais tempo durante a fase de recuperação em todas as regiões. Excepcionalmente, o curso principal do rio Paraná apresenta períodos de recuperação mais longos para secas hidrológicas do que para secas meteorológicas, possivelmente influenciado pela extensa área de drenagem da bacia e pela resposta hidrológica mais lenta a eventos que ocorrem em diferentes partes da Bacia do Rio Paraná. Nas regiões de Paranapanema e Iguaçu, o tempo de recuperação de secas hidrológicas aumenta a jusante, assim como sua duração, mesmo com a redução do número de eventos (Figura 4.4).

Bevacqua et al. (2021) constataram que as secas hidrológicas apresentaram um tempo de recuperação muito maior do que as secas meteorológicas na Bacia do Paraná. No entanto, os autores comparam índices utilizando um indicador distinto para seca meteorológica (SPEI em vez de SPI). Quando analisamos a estimativa com base no SPI-12 em comparação ao SSI-12, a dinâmica se inverte e, de fato, as secas hidrológicas demoram muito mais para se recuperar e têm duração muito superior às secas meteorológicas. Além disso, observa-se que as secas socioeconômicas, em geral, se recuperam mais rapidamente, apresentam menor duração e ocorrem com muito mais frequência. A gestão de reservatórios pode contribuir para reduzir os tempos de recuperação das secas socioeconômicas, mesmo que as condições hidrológicas

permaneçam críticas. Isso reforça a importância de medidas de apoio no período pós-seca, especialmente em regiões com recuperação hidrológica lenta.

Figura 4.5 - Duração média (em meses), número de eventos, tempo de recuperação (em meses) e severidade dos eventos de seca meteorológica, hidrológica e socioeconômica. A seca meteorológica é representada pelo SPI-12, a hidrológica pelo SSI-1 e a socioeconômica pelo fator de capacidade.



4.3 PROPAGAÇÃO DA SECA

A propagação de secas meteorológicas para hidrológicas leva de 5 a 20 meses, com uma média de oito meses (Figura 4.6 e Figura 4.7). Os dados mostram que o tipo de reservatório não influencia significativamente a propagação da seca de meteorológica para socioeconômica.

Isso pode estar relacionado à operação do reservatório, que é conduzida conforme o sistema do ONS para previsão de vazão. Dessa forma, a operação pode estar antecipando os impactos socioeconômicos da seca.

A propagação de secas meteorológicas para socioeconômicas normalmente leva de 5 a 15 meses na maior parte da Bacia do Paraná, com Itaipu apresentando os maiores atrasos. Isso mostra um período de início mais longo em reservatórios de armazenamento, destacando a capacidade do reservatório em atrasar a seca. A propagação de secas hidrológicas para socioeconômicas ocorre mais rapidamente (5 meses) quando comparada à de secas meteorológicas para hidrológicas (6 meses) e de secas meteorológicas para socioeconômicas (9 meses). Particularmente nas regiões de Iguaçu, Paranapanema e Tietê, os tempos de propagação são inferiores a cinco meses. Uma exceção é a região oeste do Paranaíba, onde os atrasos se estendem entre 10 e 25 meses, formando um conjunto distinto de propagação mais lenta da seca hidrológica para a socioeconômica.

O curso principal do rio Paraná exhibe uma dinâmica única em comparação com outras áreas (Figura 4.7), exatamente como observamos nas características das secas. A transição da seca meteorológica para a seca hidrológica é relativamente rápida, enquanto a transição da seca hidrológica para a seca socioeconômica tende a levar mais tempo. Os resultados mostram que é necessária uma seca hidrológica muito longa e severa para que se propague para uma seca socioeconômica no curso principal do rio Paraná.

Nas regiões do Iguaçu (10 meses) e do Paranapanema (5 meses), a propagação da seca de meteorológica tanto para hidrológica quanto para socioeconômica tem, em média, durações semelhantes. Isso indica que, para essas regiões, o processo pode avançar rapidamente, partindo da seca meteorológica. Além disso, isso sugere que a seca socioeconômica pode ocorrer independentemente da seca hidrológica, após um déficit de precipitação e sem um déficit de vazão baixo o suficiente para desencadear uma seca hidrológica.

Figura 4.6 - Tempo de propagação da seca para o início (Δt) dos eventos de seca. Da esquerda para a direita, tempo de propagação de meteorológico para hidrológico, de meteorológico para socioeconômico e de hidrológico para socioeconômico. Tons mais escuros de roxo representam maior tempo de propagação.

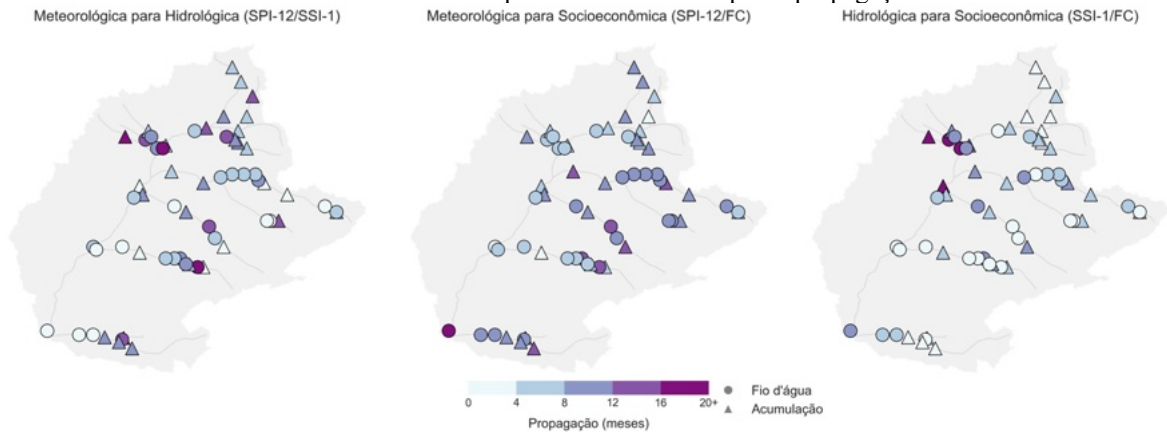
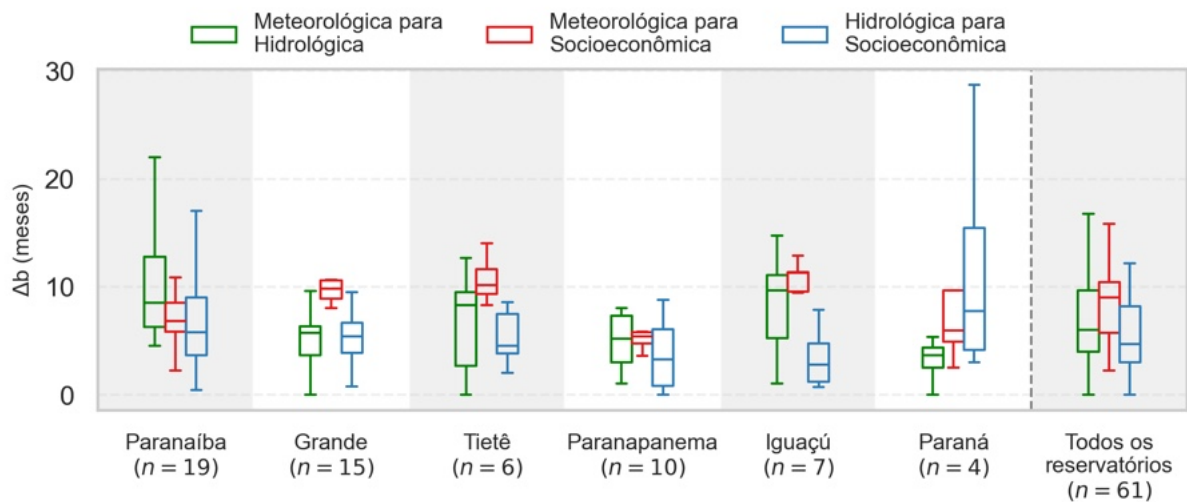


Figura 4.7 - Duração média (em meses), número de eventos, tempo de recuperação (em meses) e severidade dos eventos de seca meteorológica, hidrológica e socioeconômica. A seca meteorológica é representada pelo SPI-12, a hidrológica pelo SSI-1 e a socioeconômica pelo fator de capacidade.



4.4 IMPACTOS DO TIPO DE RESERVATÓRIO NAS SECAS

Os resultados indicam que eventos de seca socioeconômica apresentam padrões ligeiramente diferentes entre os dois tipos de reservatórios (Figura 4.8 e Figura 4.9). Secas socioeconômicas em reservatórios a fio d'água tendem a ser ligeiramente mais longas, com duração mediana de 4 meses, mas ocorrem com menor frequência, com média de cerca de 18 eventos por UHE. Em contraste, secas socioeconômicas em reservatórios de armazenamento são tipicamente mais curtas, com duração mediana de 3 meses, mas ocorrem com maior frequência, com média de cerca de 19 eventos por UHE. O tempo de recuperação é igual para ambos, cerca de 2 meses.

Embora se espere que reservatórios de acumulação apresentem maior resiliência devido à capacidade de armazenar volume e sustentar a geração de energia, em sistemas integrados como o da Bacia do Rio Paraná é plausível que ambos os tipos respondam de forma semelhante a eventos de seca. Isso se deve, em parte, às regras de operação dos reservatórios de acumulação, que asseguram o funcionamento dos reservatórios a fio d'água ao regular a liberação de água para manter vazões constantes a jusante. Este trabalho é liderado pelo ONS, que opera todas as usinas incluídas Sistema Interligado Nacional.

Figura 4.8 – Gráfico representando as secas (a) meteorológicas, (b) hidrológicas e (c) socioeconômicas, com diferenciação dos tipos de reservatório: reservatório a fio d'água (amarelo) e de acumulação (azul).

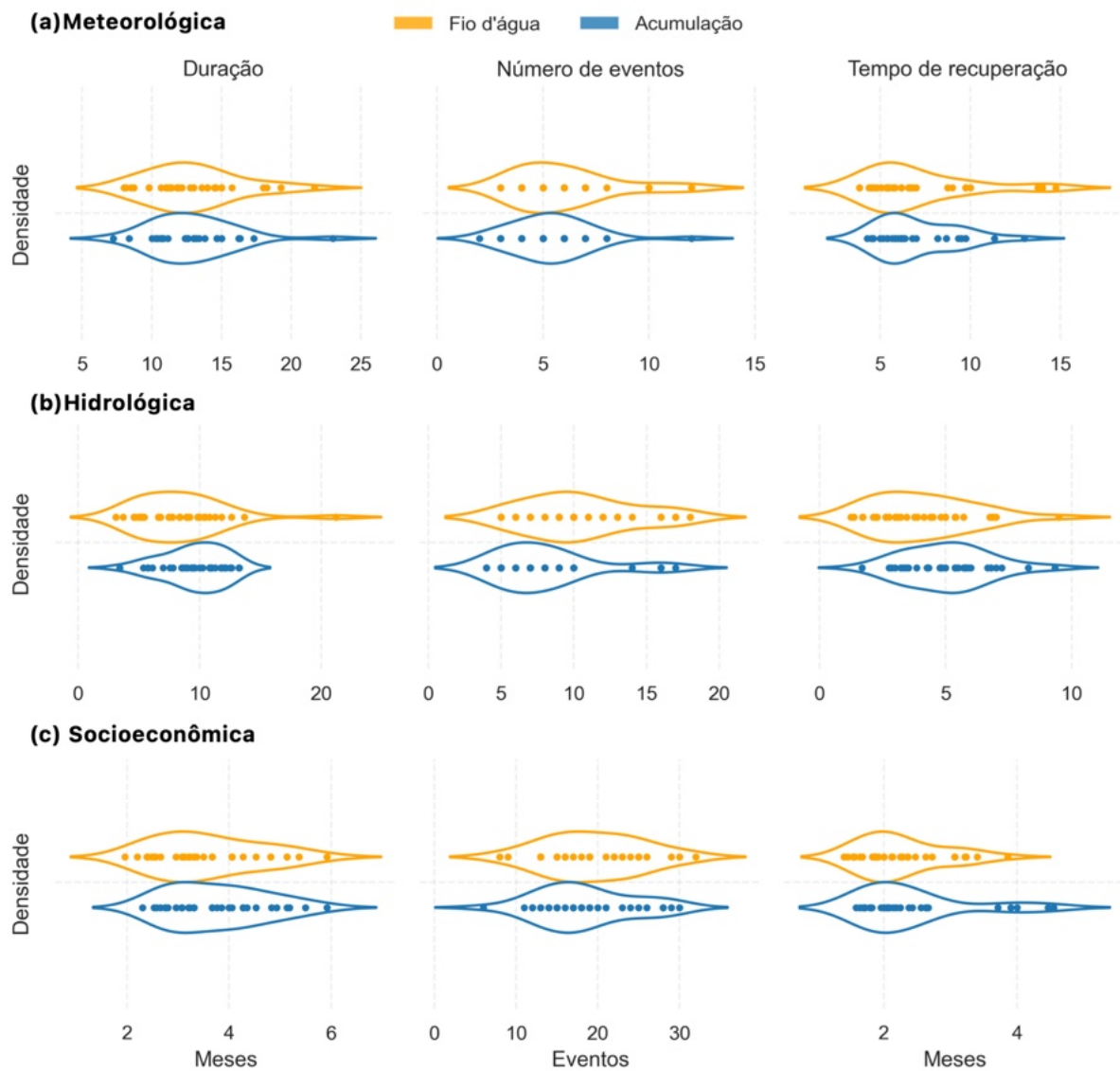


Tabela 4.2 – Valores de intensidade, duração, tempo de recuperação e número de eventos médios para cada tipo de reservatório em secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas

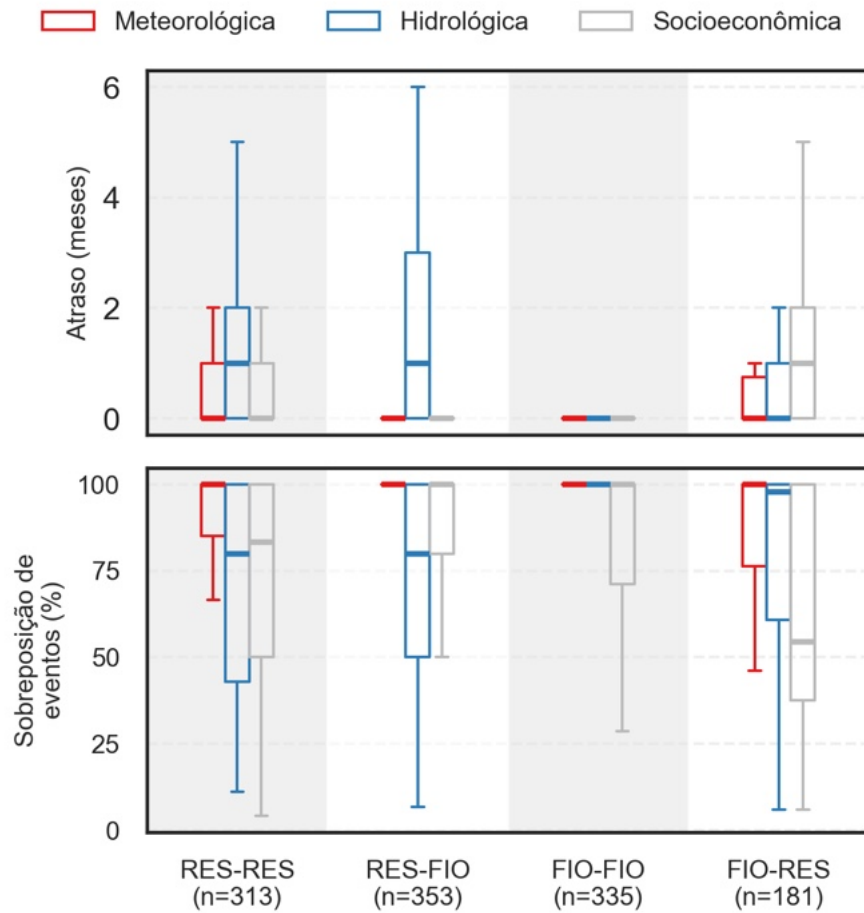
Tipo de seca	Tipo de reservatório	Intensidade média	Duração (meses)	Tempo de recuperação (meses)	Número médio de eventos por usina
Meteorológica	Fio d'água	-1.68	13	7	6
	Acumulação	-1.74	13	7	5
Hidrológica	Fio d'água	-1.54	8	4	10
	Acumulação	-1.67	10	5	8
Socioeconômica	Fio d'água	30.20	4	2	18
	Acumulação	23.89	3	2	19

Na análise da propagação de secas entre diferentes tipos de reservatórios, verificou-se que, para usinas hidrelétricas a fio d'água, os eventos de seca se propagam no mesmo mês para todos os tipos analisados, resultando em tempo de defasagem igual a zero (Figura 4.9). No caso da propagação do fio d'água para reservatório de armazenamento, o tempo de defasagem é curto para secas meteorológicas e hidrológicas, e relativamente maior para secas socioeconômicas. Esses resultados confirmam que reservatórios a fio d'água, por não possuírem capacidade de acumulação, não apresentam efeito de atenuação ou retardamento na propagação de secas.

Por outro lado, quando se trata da propagação entre reservatórios de armazenamento, observa-se uma defasagem de 0 a 5 meses para secas hidrológicas e de 0 a 2 meses para secas meteorológicas e socioeconômicas, considerando todos os eventos registrados. Na transição de reservatórios de armazenamento para reservatórios a fio d'água, a defasagem média para a propagação hidrológica é de 1 mês, podendo atingir até 6 meses; no entanto, a defasagem entre secas meteorológicas e socioeconômicas é nula. Esses resultados indicam que reservatórios de armazenamento podem retardar a progressão de eventos de seca, especialmente secas hidrológicas. Portanto, o tipo de reservatório o pode exercer sobre a propagação das condições de seca, mesmo em sistemas de reservatórios operando em cascata.

A sobreposição de eventos entre as UHEs sugere que as meteorológicas e socioeconômicas possuem forte sincronia temporal (Figura 4.9), com ocorrência simultânea entre reservatórios a montante e a jusante, refletindo a influência de padrões climáticos regionais. Secas hidrológicas, por outro lado, possuem maior variabilidade na sobreposição de eventos, especialmente em combinações que envolvem reservatórios de acumulação. Em alguns casos, a sobreposição é muito baixa, evidenciando a capacidade desses reservatórios de regular a vazão e, conseqüentemente, retardar ou atenuar os efeitos das secas hidrológicas ao longo do sistema.

Figura 4.9 - Eventos de propagação, representando todos os eventos que ocorrem para cada tipo de seca, totalizando 1.182 eventos e excluindo *outliers*. Nesse contexto, as caixas vermelhas representam secas meteorológicas, as caixas azuis indicam secas hidrológicas e as caixas cinzas representam secas socioeconômicas. Cada categoria ilustra uma combinação única de arranjos a montante e a jusante: RES-RES (reservatório de armazenamento para reservatório de armazenamento, 313 eventos), RES-FIO (reservatório de armazenamento para fio d'água, 353 eventos), FIO-FIO (fio d'água para fio d'água, 335 eventos) e FIO-RES (fio d'água para reservatório de armazenamento, 181 eventos). O gráfico superior representa o tempo de atraso em meses entre o início da seca do reservatório de montante e jusante, e o gráfico inferior representa a sobreposição temporal de eventos, em porcentagem.



5 CONCLUSÃO

Este trabalho examinou secas meteorológicas, hidrológicas e socioeconômicas na Bacia do Rio Paraná, evidenciando como esses eventos se propagam ao longo de sistemas de usinas hidrelétricas em cascata. Embora o padrão típico de propagação seja da seca meteorológica para a hidrológica e, posteriormente, para a socioeconômica, a duração, a frequência, o tempo de recuperação e os padrões espaciais variam entre bacias, tipos de reservatórios e usinas individuais. A forte correlação entre secas hidrológicas e socioeconômicas ressalta a dependência da produção de energia das condições hidrológicas, mesmo em sistemas altamente regularizados.

A avaliação dos padrões temporais e espaciais mostrou que as secas meteorológicas, apesar de menos frequentes, tendem a ser mais prolongadas e apresentar recuperação mais lenta, enquanto as secas hidrológicas ocorrem com maior frequência e menor duração, embora possam se estender em regiões de grande área de drenagem. Já as secas socioeconômicas se destacam pela elevada recorrência, curta duração e rápida recuperação, evidenciando a influência da gestão de reservatórios. Essas relações variam conforme o índice e o período de acumulação adotados, reforçando a necessidade de abordagens integradas que considerem simultaneamente variabilidade climática, características hidrológicas e estratégias operacionais.

A análise da propagação revelou que o intervalo entre a seca meteorológica e a hidrológica é, em média, de oito meses. Já a transição hidrológica-socioeconômica ocorre mais rapidamente, sobretudo em regiões como Iguaçu, Paranapanema e Tietê, com tempos inferiores a cinco meses. Em contraste, a região oeste do Paranaíba apresenta atrasos superiores a dez meses nessa transição. Os resultados sugerem que as secas socioeconômicas podem ocorrer independentemente das secas hidrológicas.

O tipo de reservatório influencia a progressão da seca hidrológica entre reservatórios: reservatórios de armazenamento podem adiar seu início, enquanto reservatórios a fio d'água não influenciam esse aspecto. Esses padrões destacam a importância de antecipar impactos em cascata por meio da gestão integrada de água e energia. Estratégias operacionais definidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) podem reduzir vulnerabilidades, amenizando a severidade ou retardando o início de secas socioeconômicas. O monitoramento de indicadores de seca socioeconômica, como o fator de capacidade, é crucial para aumentar a resiliência em sistemas hidrelétricos que enfrentam riscos crescentes de seca.

6 REFERÊNCIAS

- AGHAKOUCHAK, Amir *et al.* Anthropogenic Drought: Definition, Challenges, and Opportunities. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 2, p. e2019RG000683, jun. 2021.
- ALVARES, Clayton Alcarde; STAPE, Jose Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol. Z.**, 2013.
- ANA. **Hidrelétricas**. , 2013. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d0886b5c-f94c-4573-941b-febad5a990f3>>. Acesso em: 28 ago. 2025
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. [S.l.]: Ana, 2015.
- ANA. **Hidroeletricidade**. , 2016. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/56ac7cb5-aa22-4081-a135-c7fc0938a449>>. Acesso em: 29 ago. 2025
- ANA. **SIN - Bacia do Paraná - Reservatórios**. Capa. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/sin/b_parana>. Acesso em: 31 mar. 2024.
- ANA. **Sistema Interligado Nacional - Bacia do Rio Paraná**. , 2025. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sar/sin/b_parana>. Acesso em: 29 ago. 2025
- BBC. A catastrófica reação em cadeia à seca do rio Paraná. 6 set. 2021.
- BERGMAN, K. H.; SABOL, P.; MISKUS, D. Experimental Indices for Monitoring Global Drought Conditions. *In: United States Department of Commerce*, 1988.
- BEVACQUA, Alena G. *et al.* Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 126902, dez. 2021.
- BOLSON, Natanael; PRIETO, Pedro; PATZEK, Tadeusz. Capacity factors for electrical power generation from renewable and nonrenewable sources. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, n. 52, p. e2205429119, 27 dez. 2022.
- BRASIL. Governo Federal anuncia bandeira verde para todos os consumidores de energia e reduz em cerca de 20% o valor da conta de luz. 7 abr. 2022.
- BRASIL NETO, Reginaldo Moura *et al.* Evaluation of TRMM satellite dataset for monitoring meteorological drought in northeastern Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 67, n. 14, p. 2100–2120, 26 out. 2022.
- CAI, Wenju *et al.* Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 4, p. 215–231, 10 abr. 2020.
- CEOLA, Serena; MÅRD, Johanna; BALDASSARRE, Giuliano Di. Satellite-based Analysis of the Relationship Between Drought Occurrence and Human Mobility across Africa. *In: AGU24. Anais... AGU*, 9 dez. 2024. Disponível em: <<https://agu.confex.com/agu/agu24/meetingapp.cgi/Paper/1586813>>. Acesso em: 10 ago. 2025
- CEPED/UFSC. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. , jan. 2024. Disponível em: <<http://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/graficos.xhtml>>
- CHAGAS, Vinícius B. P.; CHAFFE, Pedro L. B.; BLÖSCHL, Günter. Regional Low Flow Hydrology: Model Development and Evaluation. **Water Resources Research**, v. 60, n. 2, p. e2023WR035063, fev. 2024a.
- CHAGAS, Vinícius B. P.; CHAFFE, Pedro L. B.; BLÖSCHL, Günter. Drought-Rich Periods Are More Likely Than Flood-Rich Periods in Brazil. **Water Resources Research**, v. 60, n. 10, p. e2023WR035851, out. 2024b.
- CUARTAS, Luz Adriana *et al.* Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. **Water**, v. 14, n. 4, p. 601, 16 fev. 2022.
- CUARTAS, Luz Adriana *et al.* Hydrometeorological drought analysis through Two-variate Standardized Index for the Paraná River Basin, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 54, p. 101886, ago. 2024.

CUNHA, Ana Paula M. A. *et al.* Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere**, v. 10, n. 11, p. 642, 24 out. 2019.

DE BRITO, Mariana Madruga. Compound and cascading drought impacts do not happen by chance: A proposal to quantify their relationships. **Science of The Total Environment**, v. 778, p. 146236, jul. 2021.

EGRE, Dominique; MILEWSKI, Joseph C. The diversity of hydropower projects. **Energy Policy**, 2002.

FERRAZ DE CAMPOS, Érica *et al.* Hybrid power generation for increasing water and energy securities during drought: Exploring local and regional effects in a semi-arid basin. **Journal of Environmental Management**, v. 294, p. 112989, set. 2021.

FUNK, Chris *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 150066, 8 dez. 2015.

GUMBEL, E. J. STATISTICAL FORECAST OF DROUGHTS. **International Association of Scientific Hydrology. Bulletin**, v. 8, n. 1, p. 5–23, mar. 1963.

GUO, Yi *et al.* Assessing socioeconomic drought based on an improved Multivariate Standardized Reliability and Resilience Index. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 904–918, jan. 2019.

GUSYEV, M. A. *et al.* Drought Assessment in the Pampanga River Basin, the Philippines. Part 1: A Role of Dam Infrastructure in Historical Droughts. *In*: 2015.

HAO, Zengchao *et al.* Global integrated drought monitoring and prediction system. **Scientific Data**, v. 1, n. 1, p. 140001, 11 mar. 2014.

HAO, Zengchao; AGHAKOUCHAK, Amir. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. **Advances in Water Resources**, v. 57, p. 12–18, 2013.

HASHIMOTO, Tsuyoshi; STEDINGER, Jerry R.; LOUCKS, Daniel P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 14–20, fev. 1982.

HUANG, Shengzhi *et al.* A nonparametric multivariate standardized drought index for characterizing socioeconomic drought: A case study in the Heihe River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 875–883, nov. 2016.

HUANG, Wen-Cheng; CHOU, Chia-Ching. Drought early warning system in reservoir operation: Theory and practice. **Water Resources Research**, v. 41, n. 11, p. 2004WR003830, nov. 2005.

IPCC. **Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. [S.l.]: Cambridge University, 2012.

JÄÄSKELÄINEN, Jaakko *et al.* Energy security impacts of a severe drought on the future Finnish energy system. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 542–554, jul. 2018.

KOGAN, F. N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 11, p. 1405–1419, 1990.

KOGAN, F. N. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 76, n. 5, p. 655–668, 1995.

LIU, Siyuan *et al.* Large-Scale Linkages of Socioeconomic Drought with Climate Variability and Its Evolution Characteristics in Northwest China. **Advances in Meteorology**, v. 2020, p. 1–13, 26 fev. 2020.

LYON, Bradfield. The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 21, nov. 2004.

MAPBIOMAS. **Cobertura e Uso da Terra (Coleção 10)**. , 2025. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/>>. Acesso em: 28 ago. 2025

MARENGO, Jose A. *et al.* Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation. **American Journal of Climate Change**, v. 02, n. 02, p. 87–96, 2013.

MARENGO, Jose A.; TORRES, Roger Rodrigues; ALVES, Lincoln Muniz. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3–4, p. 1189–1200, ago. 2017.

MARTONNE, E. De. **Traité de Géographie Physique.** , 1925.

MCKEE, Thomas B.; DOESKEN, Nolan J.; KLEIST, John. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *In*: EIGHTH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY. **Anais...** Anaheim, California: 1993.

MEHRAN, Ali; MAZDIYASNI, Omid; AGHAKOUCHAK, Amir. A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 15, p. 7520–7533, 16 ago. 2015.

MELO, Davi De C. D. *et al.* Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paraná River basin, south-eastern Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 11, p. 4673–4688, 24 nov. 2016.

MELO, Josemir Camilo De. O fenômeno el niño e as secas no Nordeste do Brasil. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, n. 20, p. 13–21, 12 nov. 1999.

MELO, Leonardo B. *et al.* Impacts of the hydrological potential change on the energy matrix of the Brazilian State of Minas Gerais: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 415–422, ago. 2019.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P.; DESAI, V. R. Drought characterization: a probabilistic approach. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, n. 1, p. 41–55, jan. 2009.

MŁYŃSKI, Dariusz; KSIAŻEK, Leszek; BOGDAŁ, Andrzej. Meteorological drought effect for Central Europe’s hydropower potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 191, p. 114175, mar. 2024.

MODARRES, Reza. Streamflow drought time series forecasting. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, n. 3, p. 223–233, 9 jan. 2007.

MTILATILA, Lucy *et al.* Meteorological and hydrological drought assessment in Lake Malawi and Shire River basins (1970–2013). **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 16, p. 2750–2764, 9 dez. 2020.

NARASIMHAN, B.; SRINIVASAN, R. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 1, n. 133, p. 69–88, 2005.

NAUMANN, G. *et al.* **The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin: a joint report from EC JRC, CEMADEN, SISSA and WMO.** LU: Publications Office, 2021.

NOBRE, Carlos A. *et al.* Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252–262, 2016.

OMM. **Drought.** , 2023. Disponível em: <<https://wmo.int/topics/drought>>

ONS. **Histórico da Operação.** Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-gerais>>.

PACHORE, Akshay *et al.* Evaluation of the impact of anthropogenic storage on the hydrological drought propagation in two contrasting semi-arid river basins. **Journal of Water and Climate Change**, v. 15, n. 7, p. 3276–3292, 1 jul. 2024.

PALMER, Wayne C. Meteorological Drought. fev. 1965.

RANGECROFT, Sally *et al.* An observation-based method to quantify the human

influence on hydrological drought: upstream–downstream comparison. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 3, p. 276–287, 17 fev. 2019.

RIBEIRO NETO, G. G. *et al.* Drought Cycle Analysis to Evaluate the Influence of a Dense Network of Small Reservoirs on Drought Evolution. **Water Resources Research**, v. 58, n. 1, p. e2021WR030799, jan. 2022.

RODRIGUES, Regina R.; MCPHADEN, Michael J. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 3, p. 1012–1018, 2014.

SANTOS, Eliane Barbosa *et al.* Spatio-temporal variability of wet and drought events in the Paraná River basin—Brazil and its association with the El Niño—Southern oscillation phenomenon. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 10, p. 4879–4897, ago. 2021.

SECRETO, Maria Verónica. A seca de 1877-1879 no Império do Brasil: dos ensinamentos do senador Pompeu aos de André Rebouças: trabalhadores e mercado. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 27, n. 1, p. 34–51, mar. 2020.

SHI, Haiyun *et al.* A new method and a new index for identifying socioeconomic drought events under climate change: A case study of the East River basin in China. **Science of The Total Environment**, v. 616–617, p. 363–375, 1 mar. 2018.

SHUKLA, Shraddhanand; WOOD, Andrew W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 2, 2008.

SHYROKAYA, Anastasiya *et al.* Significant relationships between drought indicators and impacts for the 2018–2019 drought in Germany. **Environmental Research Letters**, v. 19, n. 1, p. 014037, 1 jan. 2024.

STAGGE, James H. *et al.* Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 530, p. 37–50, nov. 2015.

STAHL, Kerstin *et al.* The challenges of hydrological drought definition, quantification and communication: an interdisciplinary perspective. **Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 383, p. 291–295, 16 set. 2020.

STROMMEN, N. D.; MOTHAR, R. P. An operational early warning agricultural weather system. *In*: WILHITE, D. A.; EASTERLING, W. E.; WOOD, D. A. (Orgs.). **Planning For Drought: Toward a Reduction of Societal Vulnerability**. [S.l.]: Westview Press, 1987.

SVOBODA, Mark; HAYES, Michael; WOOD, Deborah. **Standardized Precipitation Index: User Guide**. [S.l.]: Drought Mitigation Center Faculty Publications, 2012.

TALLAKSEN, L.; VAN LANEN, H. A. J. **Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater**. [S.l.]: Elsevier, 2004.

TURNER, Sean W. D. *et al.* Hydropower capacity factors trending down in the United States. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 5445, 27 jun. 2024.

VAN DIJK, Albert I. J. M. *et al.* The Millennium Drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. **Water Resources Research**, v. 49, n. 2, p. 1040–1057, fev. 2013.

VAN LANGEN, Simone C. H. *et al.* Effect of a reservoir network on drought propagation in a semi-arid catchment in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 10, p. 1567–1583, 27 jul. 2021.

VAN LOON, A. F.; VAN LANEN, H. A. J. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1483–1502, mar. 2013.

VAN LOON, Anne F. Hydrological drought explained. **WIREs Water**, v. 2, n. 4, p. 359–392, jul. 2015.

VAN LOON, Anne F. *et al.* Drought in the Anthropocene. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 2, p. 89–91, fev. 2016.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 1 abr. 2010.

VOGT, Jürgen V. *et al.* **Drought risk assessment and management :a conceptual framework**. LU: Publications Office, 2018.

WANG, Te *et al.* Risk assessment methods of cascade reservoir dams: a review and reflection. **Natural Hazards**, v. 115, n. 2, p. 1601–1622, jan. 2023.

WILHITE, Donald A. Chapter 1 Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. 2000.

WILHITE, Donald A. Combating drought through preparedness. **Natural Resources Forum**, v. 26, n. 4, p. 275–285, nov. 2002.

WILHITE, Donald A.; GLANTZ, Michael H. Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. **WATER INTERNATIONAL**, 1985.

WILHITE, Donald A.; VANYARKHO, Olga V. Chapter 18 Drought: Pervasive Impacts of a Creeping Phenomenon. 2000.

WMO. **Standardized precipitation index user guide**. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2012.

WU, Jiefeng *et al.* Response of Hydrological Drought to Meteorological Drought under the Influence of Large Reservoir. **Advances in Meteorology**, v. 2016, p. 1–11, 2016.

ZHAO, Menglong *et al.* Assessing socio-economic drought evolution characteristics and their possible meteorological driving force. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 10, n. 1, p. 1084–1101, 1 jan. 2019.

ZHAO, Xiaohu *et al.* Responses of hydroelectricity generation to streamflow drought under climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 174, p. 113141, mar. 2023.

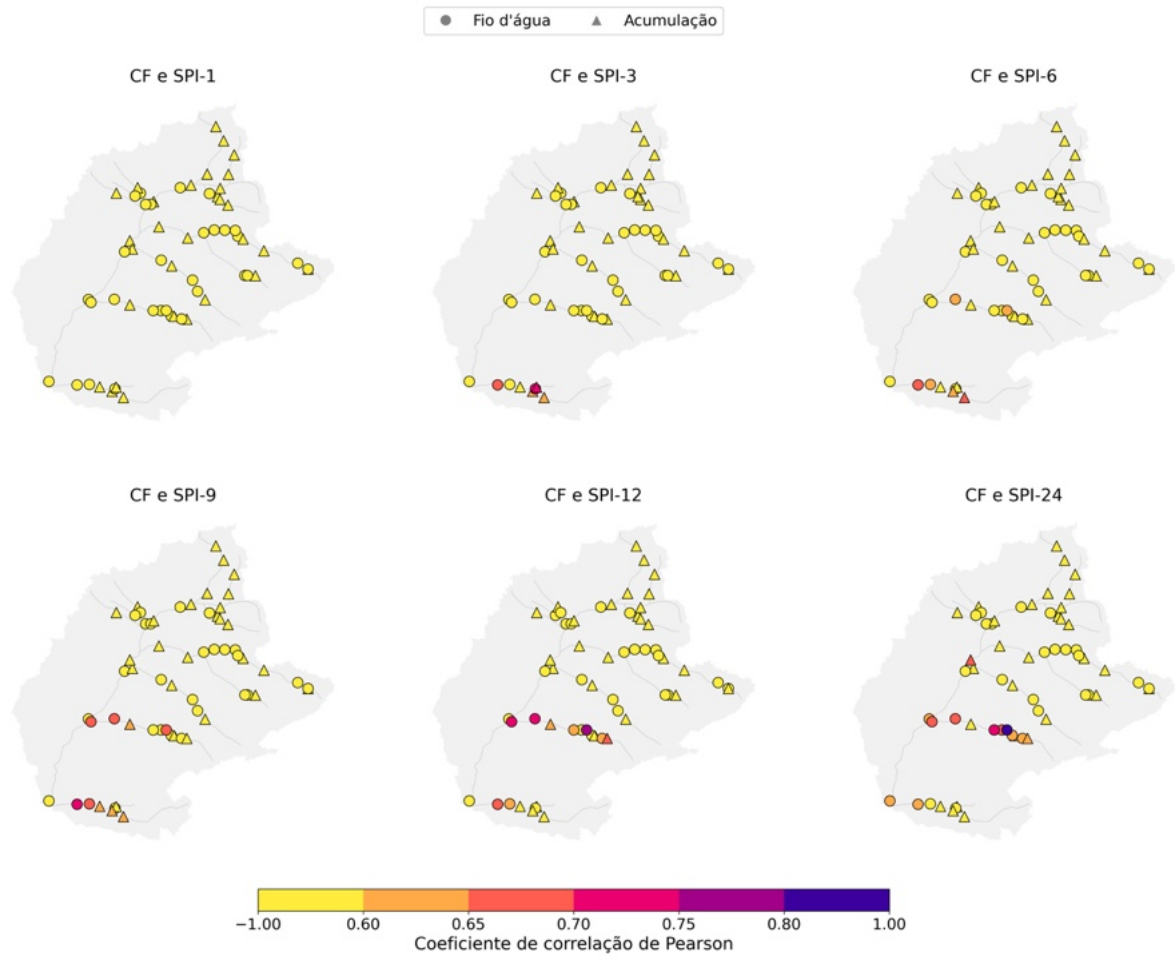
7 ANEXOS

Anexo 1 – Características das usinas hidrelétricas da Bacia do Rio Paraná.

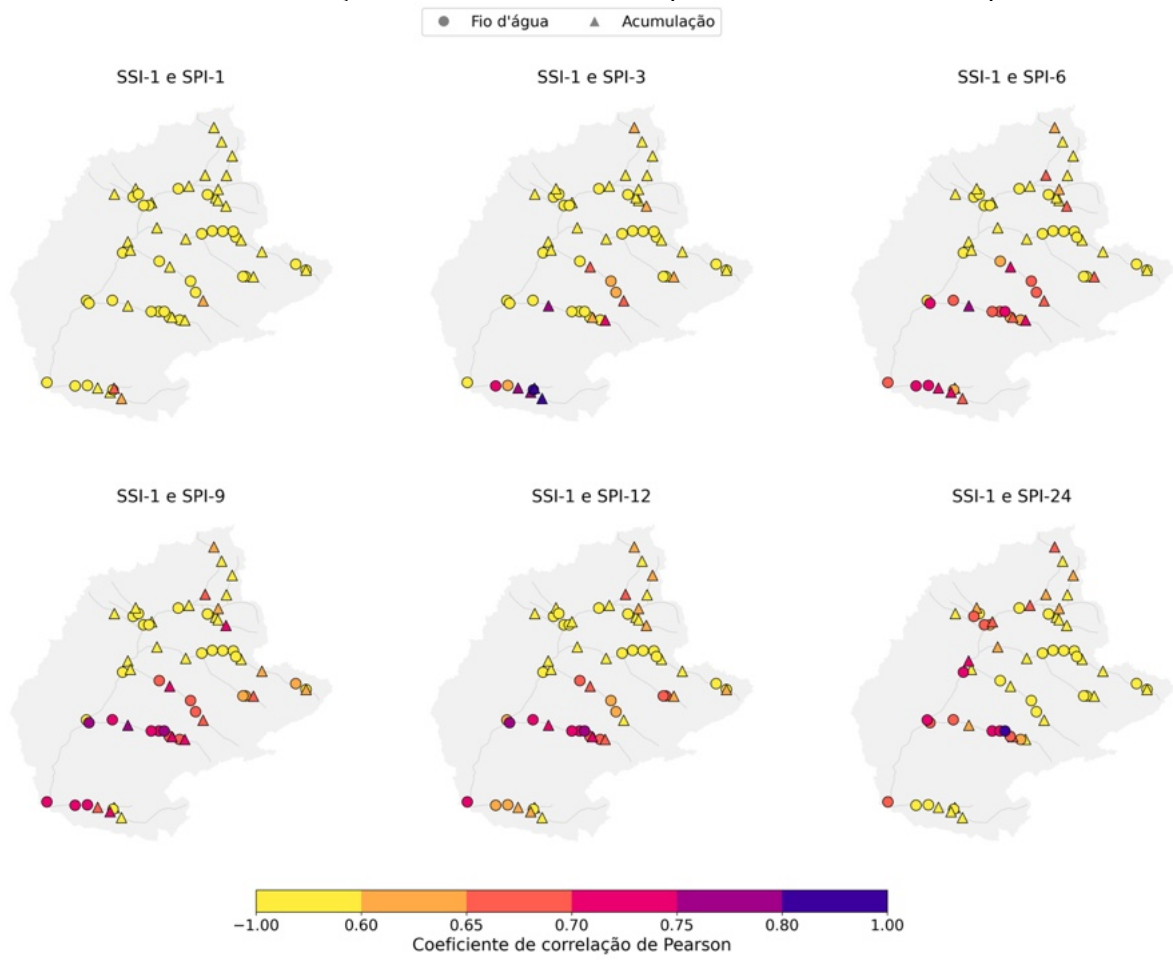
Usina	Tipo	Região	Rio	Potência MW	Área Km ²	Área inundada km ²	NA máx. m	NA mín. m	Vol. máx. hm ³	Vol. útil hm ³	Lat	Long
NOVA PONTE	RES	PARANAIBA	ARAGUARI-MG	510	15.325	444	815	776	13.116	10.612	-19,1	-47,7
MIRANDA	RES	PARANAIBA	ARAGUARI-MG	408	18.000	50	696	693	1.095	143	-18,9	-48,0
C.BRANCO-1	RES	PARANAIBA	ARAGUARI-MG	240	18.369	19	624	623	284	13	-18,8	-48,1
C.BRANCO-2	FIO	PARANAIBA	ARAGUARI-MG	210	19.165	42	565	565	837	12	-18,7	-48,4
CACU	RES	PARANAIBA	CLARO	65	12.118	14	477	475	185	27	-18,5	-51,1
B COQUEIROS	FIO	PARANAIBA	CLARO	90	12.636	25	448	446	346	47	-18,7	-51,0
FOZ DO RIO CLARO	FIO	PARANAIBA	CLARO	68	13.612		354	352	99	15	-19,1	-50,6
ESFORA	RES	PARANAIBA	CORRENTE	32	4.061		584	577	209	138	-18,7	-51,9
CORUMBA-4	RES	PARANAIBA	CORUMBÁ	129	7.017		843	837	3.708	917	-16,3	-48,2
CORUMBA-3	RES	PARANAIBA	CORUMBÁ	96	8.885	71	772	768	965	256	-16,8	-47,9
CORUMBA	RES	PARANAIBA	CORUMBÁ	375	27.766	62	595	570	1.380	969	-18,0	-48,5
CAMARGOS	RES	GRANDE	GRANDE	46	6.224	77	913	899	744	636	-21,3	-44,6
ITUTINGA	FIO	GRANDE	GRANDE	52	6.247	2	886	880	11	8	-21,3	-44,6
FUNIL-MG	FIO	GRANDE	GRANDE	180	15.714	33	808	808	275	6	-21,1	-45,0
FURNAS	RES	GRANDE	GRANDE	1.216	51.895		768	750	22.950	17.217	-20,7	-46,3
M. MORAES	RES	GRANDE	GRANDE	476	59.482	276	666	653	4.187	2.588	-20,3	-47,1
L. C. BARRETO	FIO	GRANDE	GRANDE	1.050	61.023	49	623	619	1.472	185	-20,2	-47,3
JAGUARA	FIO	GRANDE	GRANDE	424	61.459	34	559	556	494	97	-20,0	-47,4
IGARAPAVA	FIO	GRANDE	GRANDE	210	63.443	38	512	512	325	15	-20,0	-47,8
VOLTA GRANDE	FIO	GRANDE	GRANDE	380	67.441	196	495	493	2.090	264	-20,0	-48,2
P. COLOMBIA	FIO	GRANDE	GRANDE	320	77.166	136	467	466	1.513	222	-20,1	-48,6
MARIMBONDO	RES	GRANDE	GRANDE	1.440	118.138	438	446	426	6.050	5.279	-20,3	-49,2
A. VERMELHA	RES	GRANDE	GRANDE	1.396	139.188	651	383	373	10.657	5.220	-19,9	-50,3
G. B. MUNHOZ	RES	IGUACU	IGUAÇU	1.676	30.153	126	742	700	5.447	3.609	-26,0	-51,7
SEGREDO	RES	IGUACU	IGUAÇU	1.260	34.387	80	607	602	3.011	384	-25,8	-52,1
SALTO SANTIAGO	RES	IGUACU	IGUAÇU	1.420	43.902	209	506	481	6.775	4.074	-25,6	-52,6
SALTO OSORIO	FIO	IGUACU	IGUAÇU	1.104	45.843	56	397	389	1.144	400	-25,5	-53,0
SALTO CAXIAS	FIO	IGUACU	IGUAÇU	1.240	57.084	140	325	323	3.681	271	-25,5	-53,5
SANTA CLARA-PR	RES	IGUACU	JORDÃO	120	3.910	20	805	788	441	262	-25,6	-52,0
FUNDÃO	FIO	IGUACU	JORDÃO	120	4.093	2	706	705	37	1	-25,7	-52,0
I. SOLTEIRA	RES	PARANA	PARANÁ	3.444	377.299	1.245	328	323	19.993	5.372	-20,4	-51,4
JUPIA	FIO	PARANA	PARANÁ	1.551	476.050	318	280	277	2.974	855	-20,8	-51,6
PORTO PRIMAVERA	FIO	PARANA	PARANÁ	1.540	570.936	2.017	257	257	18.893	603	-22,5	-53,0
ITAIPU	FIO	PARANA	PARANÁ	14.000	822.371	1.350	220	219	29.404	19.000	-25,4	-54,6

Usina	Tipo	Região	Rio	Potência MW	Área Km ²	Área inundada km ²	NA máx. m	NA mín. m	Vol. máx. hm ³	Vol. útil hm ³	Lat	Long
EMBORCAÇÃO	RES	PARANAIBA	PARANAÍBA	1.192	29.062	477	661	615	17.075	12.788	-18,5	-48,0
ITUMBIARA	RES	PARANAIBA	PARANAÍBA	2.082	94.678		520	495	17.027	12.454	-18,4	-49,1
C. DOURADA	FIO	PARANAIBA	PARANAÍBA	658	99.733		432	428	460	222	-18,5	-49,5
SÃO SIMÃO	RES	PARANAIBA	PARANAÍBA	1.710	171.433	682	401	391	12.620	5.666	-19,0	-50,5
JURUMIRIM	RES	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	101	17.886	463	568	560	7.011	3.220	-23,2	-49,2
PIRAJU	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	80	18.339	15	532	531	127	3	-23,2	-49,4
CHAVANTES	RES	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	414	27.757	403	474	465	8.874	3.059	-23,1	-49,7
OURINHOS	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	44	28.155	5	398	398	26	2	-23,1	-49,8
SALTO GRANDE CS	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	74	38.766	13	385	381	53	35	-22,9	-50,0
CANOAS II	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	72	39.574	21	366	365	159	20	-22,9	-50,2
CANOAS I	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	83	41.322	27	351	350	223	26	-22,9	-50,5
CAPIVARA	RES	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	643	84.774	633	334	321	11.746	6.285	-22,7	-51,4
TAQUARUCU	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	525	100.888	82	284	282	930	159	-22,5	-52,0
ROSANA	FIO	PARANAPANEMA	PARANAPANEMA	354	100.888	206	258	256	1.996	400	-22,6	-52,9
CACONDE	RES	GRANDE	PARDO	80	2.562	32	855	825	556	505	-21,6	-46,6
E. DA CUNHA	FIO	GRANDE	PARDO	109	4.355	1	665	660	8	3	-21,6	-46,9
LIMOEIRO	FIO	GRANDE	PARDO	32	4.435	3	573	563	21	17	-21,6	-47,0
BATALHA	RES	PARANAIBA	SAO MARCOS	53	6.670		800	785	1.782	1.352	-17,3	-47,5
S.DO FACÃO	RES	PARANAIBA	SAO MARCOS	213	10.597		756	733	5.199	3.474	-18,0	-47,7
B. BONITA	RES	TIETE	TIETÊ	141	32.506	308	452	440	2.965	2.476	-22,5	-48,5
BARIRI	FIO	TIETE	TIETÊ	143	36.062	53	428	427	484	49	-22,2	-48,8
IBITINGA	FIO	TIETE	TIETÊ	131	44.285	100	404	404	928	48	-21,8	-49,0
PROMISSÃO	RES	TIETE	TIETÊ	264	57.383	597	384	380	7.897	2.346	-21,3	-49,8
N. AVANHANDAVA	FIO	TIETE	TIETÊ	347	62.009	219	358	356	2.710	399	-21,1	-50,2
TRÊS IRMÃOS	RES	TIETE	TIETÊ	808	70.525	696	328	323	13.983	3.214	-20,7	-51,3
SALTO	FIO	PARANAIBA	VERDE	116	10.822	59	447	445	794	12	-18,8	-51,2
S.R.VERDINHO	FIO	PARANAIBA	VERDE	93	11.806	43	371	370	397	41	-19,1	-50,8

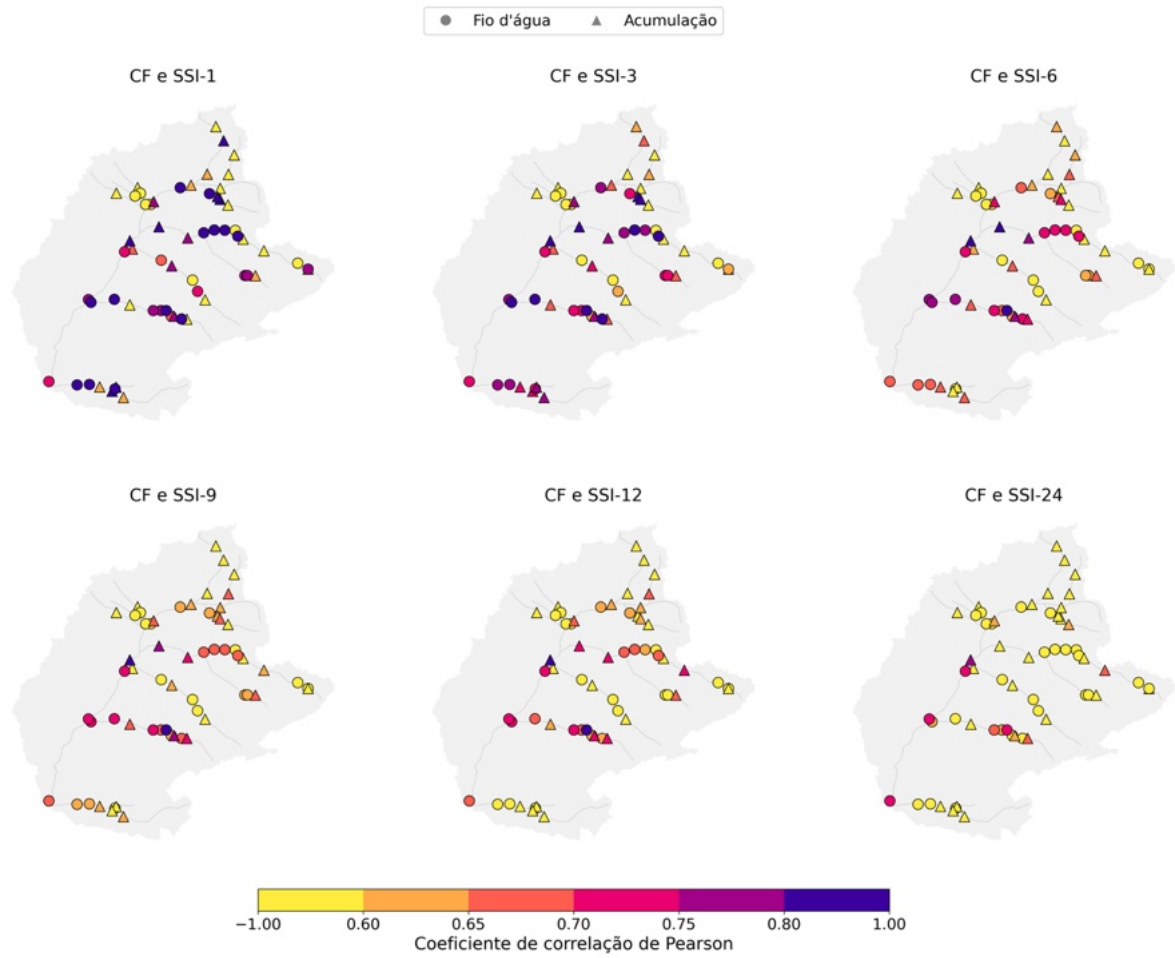
Anexo 2 – Coeficiente de correlação de Pearson de FC e SPI para diferentes escalas de tempo.



Anexo 3 – Coeficiente de correlação de Pearson de SSI-1 e SPI para diferentes escalas de tempo.



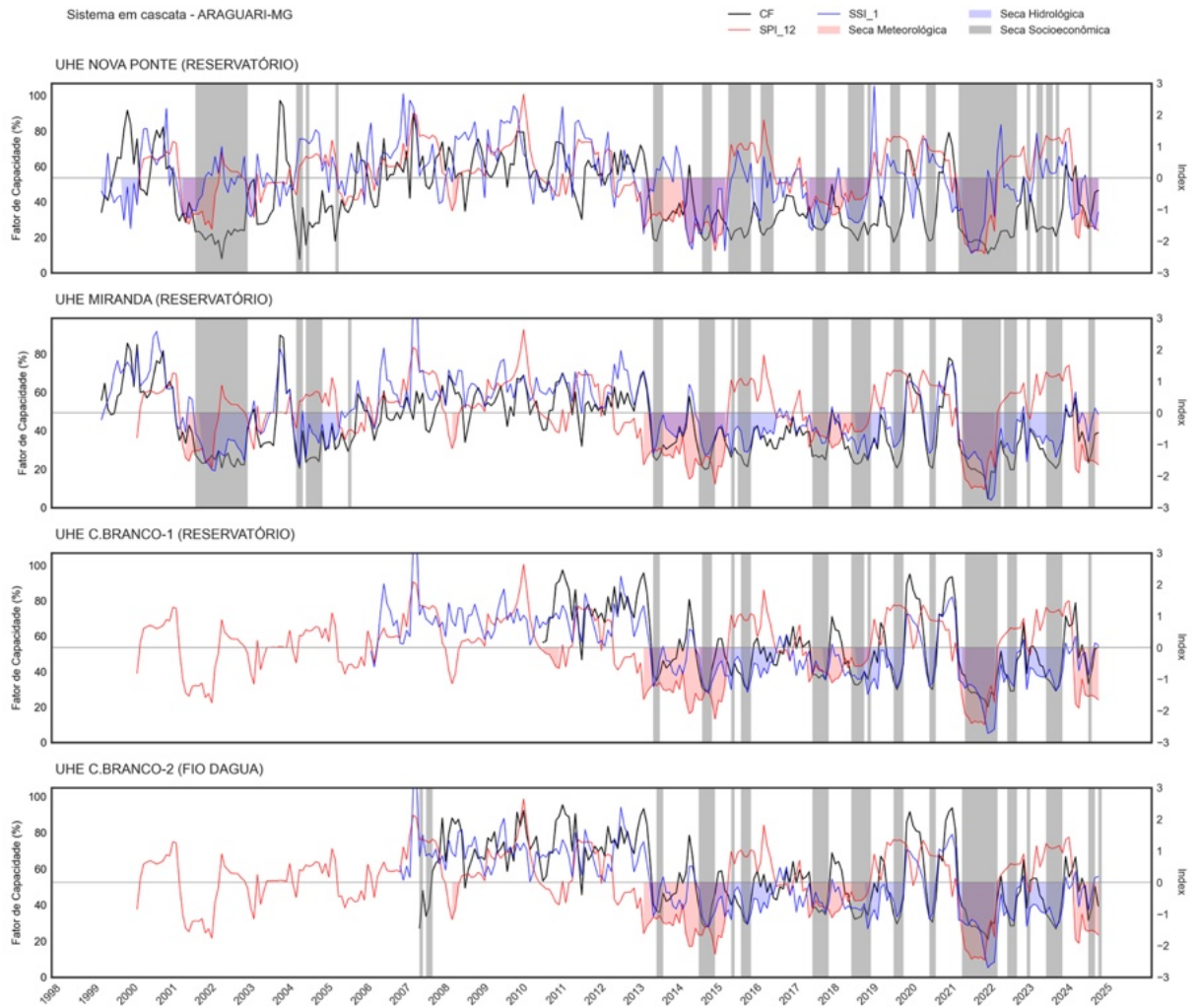
Anexo 4 – Coeficiente de correlação de Pearson de CF e SSI para diferentes escalas de tempo.



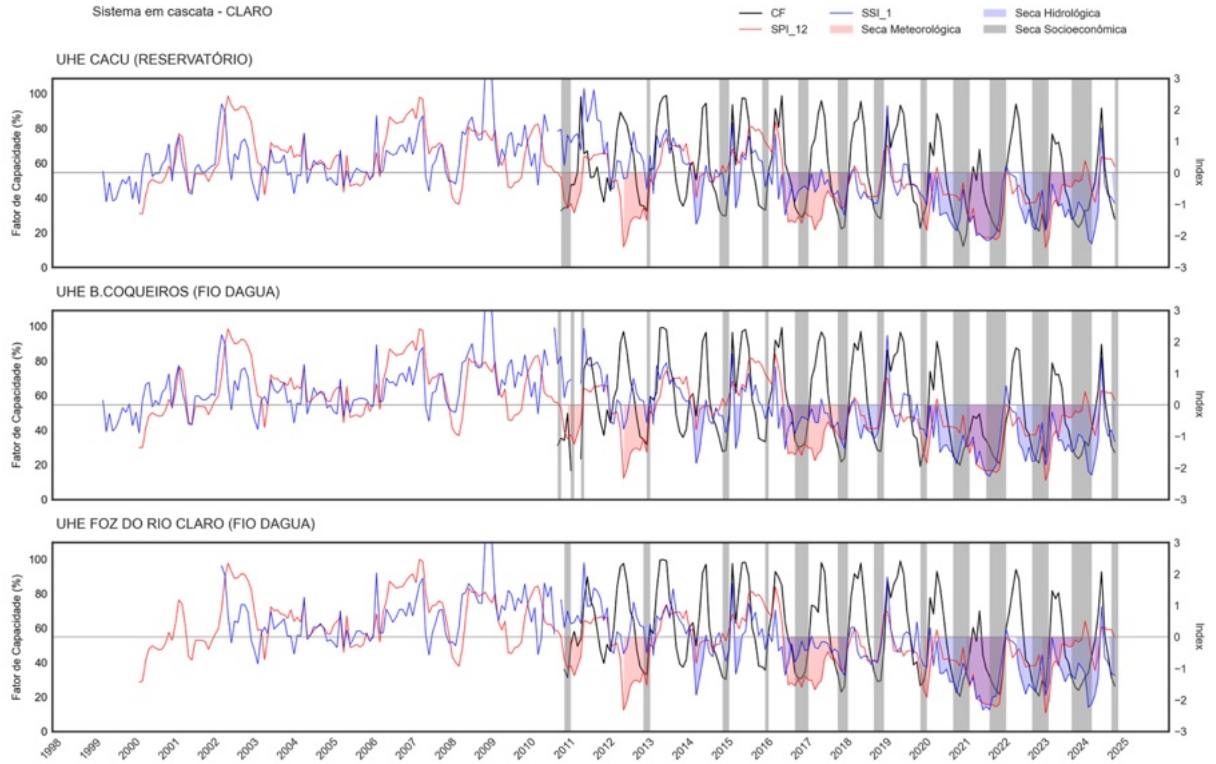
Anexo 5 – Coeficiente de correlação de Pearson entre geração e vazões afluente, defluente, turbinada e vertida, nível, volume, fator de capacidade e SPI e SSI de acumulações 1, 3, 6, 9 12 e 24, por usina.

	Coeficiente de Pearson																		
	Vazão Afluente	Vazão Defluente	Vazão Turbinada	Vazão Vertida	Volume	Nível Montante	Fator de Capacidade	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-12	SPI-24	SSI-1	SSI-3	SSI-6	SSI-9	SSI-12	SSI-24
A. VERMELHA	0.68	0.85	0.99	0.24	0.47	0.47	1.00	-0.06	0.02	0.26	0.38	0.49	0.58	0.85	0.85	0.80	0.77	0.73	0.58
B. BONITA	0.63	0.74	0.83	0.41	0.13	0.14	1.00	0.23	0.46	0.54	0.54	0.54	0.55	0.53	0.51	0.45	0.42	0.43	0.39
B.COQUEIROS	0.83	0.84	1.00	0.28	0.01	0.01	1.00	0.20	0.17	0.09	0.20	0.31	0.27	0.42	0.37	0.30	0.33	0.33	0.28
BARIRI	0.82	0.82	0.99	0.46	0.08	0.08	0.99	0.22	0.45	0.48	0.49	0.46	0.35	0.73	0.62	0.53	0.49	0.45	0.34
BATALHA	0.09	0.90	0.98	0.05	0.27	0.27	1.00	-0.17	0.07	0.36	0.31	0.38	0.40	0.29	0.53	0.63	0.57	0.53	0.39
C. DOURADA	0.92	0.92	0.94	0.17	0.11	0.10	1.00	-0.09	-0.12	0.08	0.19	0.30	0.45	0.89	0.78	0.66	0.64	0.62	0.54
C.BRANCO-1	0.99	0.99	1.00	0.23	-0.06	-0.06	1.00	0.01	-0.10	-0.05	0.07	0.14	0.36	0.89	0.82	0.70	0.62	0.57	0.47
C.BRANCO-2	0.96	0.96	0.99	0.06	0.04	0.04	1.00	0.11	0.02	0.02	0.13	0.20	0.41	0.82	0.71	0.64	0.64	0.63	0.55
CACONDE	0.43	0.83	0.99	0.16	0.56	0.57	1.00	0.15	0.29	0.38	0.44	0.50	0.43	0.61	0.68	0.70	0.69	0.66	0.47
CACU	0.84	0.85	0.99	0.36	0.09	0.09	1.00	0.23	0.17	0.09	0.19	0.28	0.27	0.40	0.32	0.28	0.26	0.26	0.23
CAMARGOS	0.64	0.75	0.93	0.18	0.20	0.22	1.00	0.17	0.32	0.33	0.42	0.41	0.29	0.65	0.63	0.59	0.56	0.53	0.38
CANOAS I	0.63	0.63	0.99	0.25	0.01	0.01	0.99	0.20	0.32	0.47	0.57	0.62	0.73	0.77	0.75	0.72	0.71	0.70	0.66
CANOAS II	0.58	0.58	0.99	0.14	0.03	0.03	0.99	0.17	0.31	0.45	0.52	0.58	0.69	0.77	0.72	0.69	0.67	0.68	0.64
CAPIVARA	0.46	0.65	0.97	0.29	0.49	0.48	0.99	0.05	0.32	0.54	0.60	0.62	0.54	0.56	0.68	0.69	0.65	0.61	0.49
CHAVANTES	0.66	0.86	0.99	0.29	0.42	0.42	1.00	0.11	0.28	0.46	0.54	0.60	0.63	0.76	0.80	0.78	0.75	0.72	0.62
CORUMBA	0.82	0.85	0.99	0.52	0.52	0.51	1.00	0.07	0.28	0.42	0.42	0.41	0.44	0.61	0.59	0.51	0.44	0.42	0.40
CORUMBA-3	0.91	0.96	0.99	-0.19	0.05	0.05	1.00	0.07	0.16	0.33	0.31	0.26	0.34	0.83	0.67	0.55	0.47	0.42	0.37
CORUMBA-4	0.51	0.94	0.99	-0.06	0.11	0.05	1.00	0.15	0.33	0.49	0.48	0.44	0.49	0.56	0.63	0.62	0.54	0.48	0.44
E. DA CUNHA	0.91	0.91	0.99	0.40	-0.26	-0.26	1.00	0.26	0.38	0.43	0.48	0.52	0.44	0.79	0.72	0.65	0.61	0.56	0.43
EMBORCAÇÃO	-0.09	0.87	0.75	0.09	0.39	0.39	1.00	-0.06	-0.08	0.09	0.22	0.33	0.55	0.32	0.42	0.56	0.60	0.64	0.57
ESPORA	0.53	0.66	0.52	-0.07	0.27	0.27	0.99	0.04	0.12	0.07	0.06	0.13	0.10	0.42	0.45	0.49	0.47	0.48	0.57
FOZ DO RIO CLARO	0.88	0.88	1.00	0.31	0.06	0.06	1.00	0.21	0.17	0.09	0.20	0.31	0.27	0.44	0.36	0.34	0.32	0.25	0.21
FUNDÃO	0.71	0.71	1.00	0.35	0.32	0.32	1.00	0.32	0.71	0.57	0.49	0.49	0.44	0.86	0.73	0.46	0.39	0.40	0.43
FUNIL-MG	0.92	0.92	0.97	0.59	-0.21	-0.21	1.00	0.26	0.35	0.36	0.41	0.37	0.31	0.59	0.53	0.49	0.48	0.43	0.37
FURNAS	0.06	0.86	0.96	0.26	0.39	0.39	1.00	-0.10	-0.10	0.01	0.12	0.21	0.32	0.36	0.46	0.58	0.64	0.70	0.68
G. B. MUNHOZ	0.58	0.82	0.99	0.41	0.58	0.57	1.00	0.16	0.60	0.66	0.64	0.58	0.48	0.60	0.78	0.69	0.64	0.56	0.48
I. SOLTEIRA	0.79	0.82	0.97	0.29	0.44	0.48	0.99	-0.01	0.05	0.22	0.37	0.50	0.69	0.87	0.87	0.85	0.83	0.82	0.75
IBITINGA	0.65	0.65	0.97	0.31	-0.13	-0.13	0.99	0.15	0.34	0.38	0.38	0.35	0.30	0.59	0.51	0.42	0.36	0.34	0.26
IGARAPAVA	0.80	0.80	0.62	0.27	-0.09	-0.09	1.00	-0.03	-0.05	0.04	0.14	0.22	0.36	0.86	0.79	0.71	0.66	0.62	0.46
ITAIPU	0.56	0.57	0.66	0.08	0.35	0.34	0.99	0.18	0.34	0.39	0.44	0.50	0.62	0.70	0.70	0.67	0.67	0.69	0.70
ITUMBARA	0.39	0.93	0.97	0.20	0.20	0.19	1.00	-0.13	-0.12	0.10	0.23	0.35	0.49	0.65	0.67	0.64	0.64	0.64	0.56
ITUTINGA	0.90	0.90	0.97	0.54	0.14	0.13	1.00	0.22	0.37	0.39	0.45	0.41	0.35	0.76	0.64	0.57	0.54	0.50	0.41
JAGUARA	0.52	0.52	0.82	0.08	-0.17	-0.17	1.00	-0.14	-0.20	-0.05	-0.07	-0.09	0.15	0.54	0.39	0.22	0.24	0.28	0.18
JUPIÁ	0.56	0.56	0.98	-0.18	0.14	0.14	0.99	-0.05	-0.04	0.10	0.24	0.38	0.59	0.72	0.74	0.74	0.73	0.73	0.72
JURUMIRIM	0.47	0.78	0.99	0.27	0.55	0.54	1.00	0.16	0.38	0.54	0.60	0.66	0.65	0.58	0.68	0.74	0.75	0.73	0.66
L. C. BARRETO	0.88	0.89	0.98	0.28	-0.01	-0.01	1.00	-0.04	-0.04	0.07	0.17	0.25	0.38	0.91	0.84	0.74	0.69	0.65	0.52
LIMOIEIRO	0.83	0.83	0.99	0.21	-0.05	-0.04	1.00	0.24	0.36	0.43	0.48	0.54	0.46	0.77	0.71	0.65	0.61	0.54	0.33
MARIMBONDO	0.71	0.84	0.96	0.36	0.58	0.57	1.00	-0.00	0.16	0.34	0.44	0.51	0.57	0.78	0.80	0.77	0.75	0.72	0.56
MASCARENHAS	0.16	0.16	0.12	0.12	0.55	0.26	1.00	-0.09	-0.21	-0.16	-0.13	-0.13	-0.01	0.38	0.44	0.50	0.52	0.55	0.58
MIRANDA	0.91	0.91	0.95	0.04	-0.04	-0.01	1.00	0.02	-0.05	0.03	0.15	0.24	0.40	0.88	0.82	0.72	0.67	0.63	0.43
N. AVANHANDAVA	0.71	0.71	0.99	0.23	0.27	0.28	0.99	0.15	0.39	0.46	0.51	0.48	0.34	0.67	0.55	0.44	0.38	0.32	0.21
NOVA PONTE	-0.08	0.94	0.82	0.17	0.40	0.41	1.00	-0.01	-0.06	0.04	0.15	0.26	0.43	0.20	0.30	0.43	0.50	0.57	0.62
OURINHOS	0.47	0.47	0.97	0.06	-0.06	-0.06	1.00	0.10	0.20	0.38	0.48	0.54	0.63	0.66	0.64	0.63	0.62	0.62	0.56
P. COLOMBIA	0.78	0.79	0.98	0.20	0.08	0.08	0.99	0.03	0.03	0.13	0.23	0.30	0.45	0.83	0.77	0.70	0.67	0.65	0.55
PIRAJUÍ	0.80	0.81	0.99	0.26	0.15	0.15	1.00	0.20	0.42	0.57	0.60	0.63	0.65	0.93	0.84	0.74	0.68	0.64	0.54
PORTO PRIMAVERA	0.60	0.61	0.96	0.06	-0.07	-0.07	0.98	0.06	0.09	0.22	0.36	0.47	0.64	0.75	0.76	0.75	0.74	0.73	0.70
PROMISSÃO	0.79	0.86	0.99	0.45	0.47	0.47	1.00	0.17	0.47	0.57	0.60	0.57	0.46	0.76	0.74	0.66	0.61	0.56	0.45
ROSANA	0.71	0.71	0.98	0.25	0.01	0.01	0.99	0.18	0.39	0.59	0.67	0.72	0.67	0.85	0.81	0.76	0.73	0.70	0.61
S.DO FACÃO	0.33	0.96	0.99	0.33	0.47	0.46	1.00	0.01	0.03	0.20	0.37	0.44	0.50	0.53	0.64	0.68	0.70	0.69	0.52
S.R.VERDINHO	0.88	0.88	0.99	0.27	0.10	0.10	0.99	0.24	0.18	0.10	0.20	0.26	0.34	0.57	0.51	0.43	0.37	0.32	0.28
SALTO	0.90	0.90	0.99	0.15	0.07	0.07	1.00	0.26	0.20	0.13	0.20	0.24	0.35	0.55	0.48	0.44	0.39	0.34	0.31
SALTO CAXIAS	0.73	0.73	0.99	0.34	0.31	0.30	1.00	0.34	0.65	0.69	0.71	0.65	0.60	0.83	0.78	0.65	0.60	0.54	0.53
SALTO GRANDE CS	0.57	0.57	0.99	0.18	-0.10	-0.08	1.00	0.25	0.42	0.61	0.70	0.75	0.80	0.80	0.81	0.82	0.82	0.82	0.74
SALTO OSORIO	0.70	0.70	1.00	0.31	0.14	0.14	1.00	0.14	0.49	0.63	0.67	0.64	0.58	0.83	0.77	0.66	0.61	0.56	0.53
SALTO SANTIAGO	0.53	0.66	0.99	0.29	0.61	0.61	1.00	0.05	0.40	0.59	0.62	0.56	0.48	0.62	0.74	0.68	0.61	0.53	0.46
SANTA CLARA-PR	0.67	0.75	0.99	0.39	0.57	0.56	1.00	0.36	0.74	0.58	0.50	0.47	0.43	0.78	0.79	0.54	0.44	0.44	0.44
SEGREDO	0.70	0.71	0.99	0.29	0.49	0.49	1.00	0.20	0.61	0.60	0.62	0.58	0.52	0.80	0.71	0.58	0.54	0.50	0.46
SÃO SIMÃO	0.67	0.76	0.90	0.26	0.41	0.41	0.99	-0.04	-0.05	0.12	0.28	0.40	0.48	0.77	0.77	0.71	0.69	0.67	0.63
TAQUARUÇU	0.90	0.90	0.99	0.48	-0.02	-0.02	1.00	0.19	0.43	0.63	0.70	0.72	0.66	0.92	0.87	0.79	0.73	0.68	0.58
TRÊS IRMÃOS	0.76	0.91	1.00	0.29	0.36	0.35	1.00	0.05	0.18	0.27	0.28	0.34	0.41	0.68	0.70	0.63	0.58	0.53	0.43
VOLTA GRANDE	0.85	0.85	0.89	0.31	0.07	0.07	1.00	-0.01	0.00	0.11	0.21	0.28	0.44	0.87	0.82	0.72	0.68	0.66	0.54

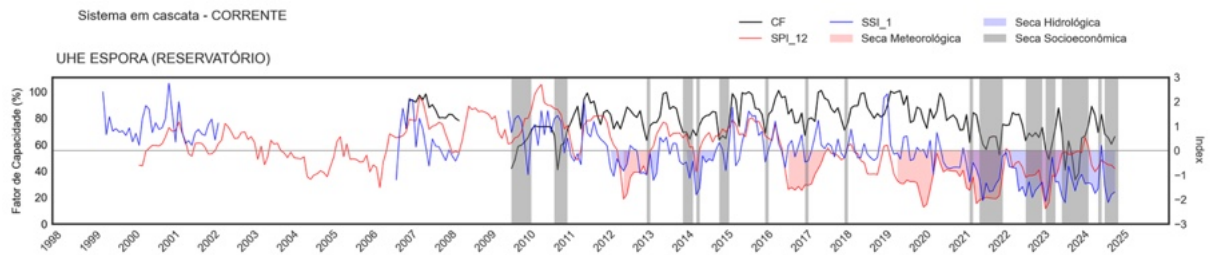
Anexo 6 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Araguari.



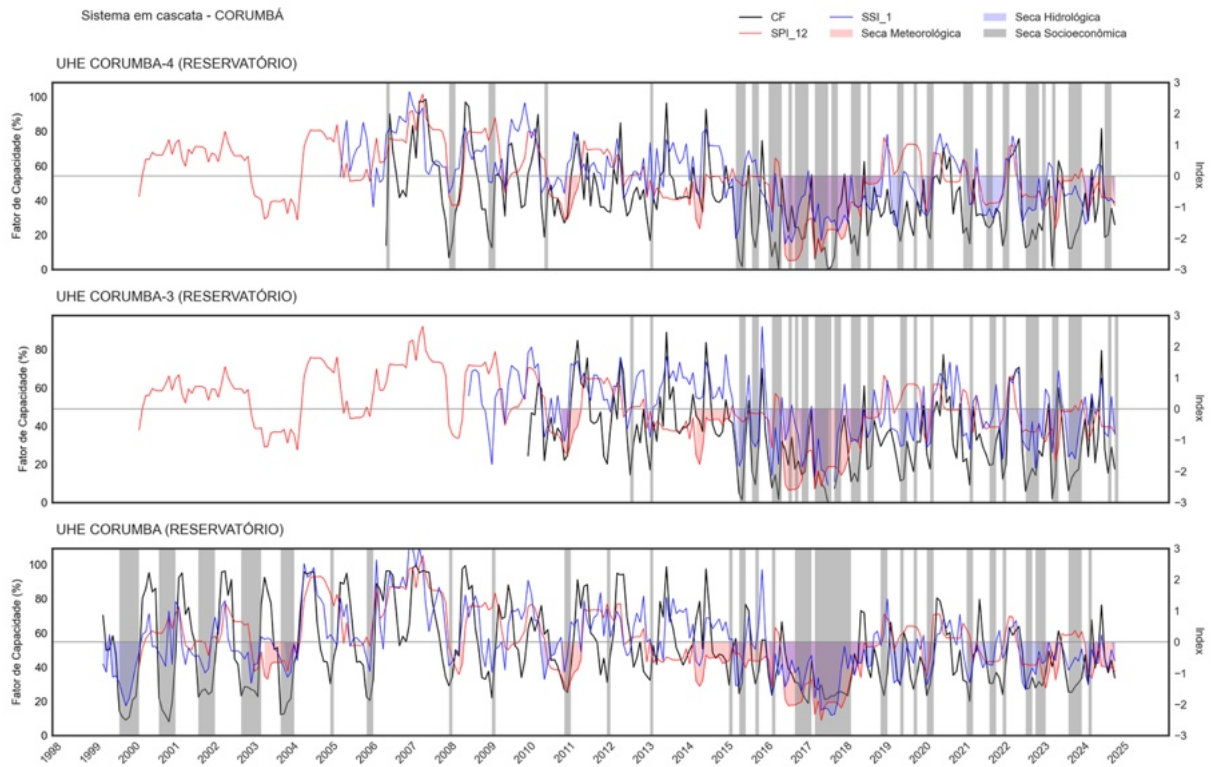
Anexo 7 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Claro.



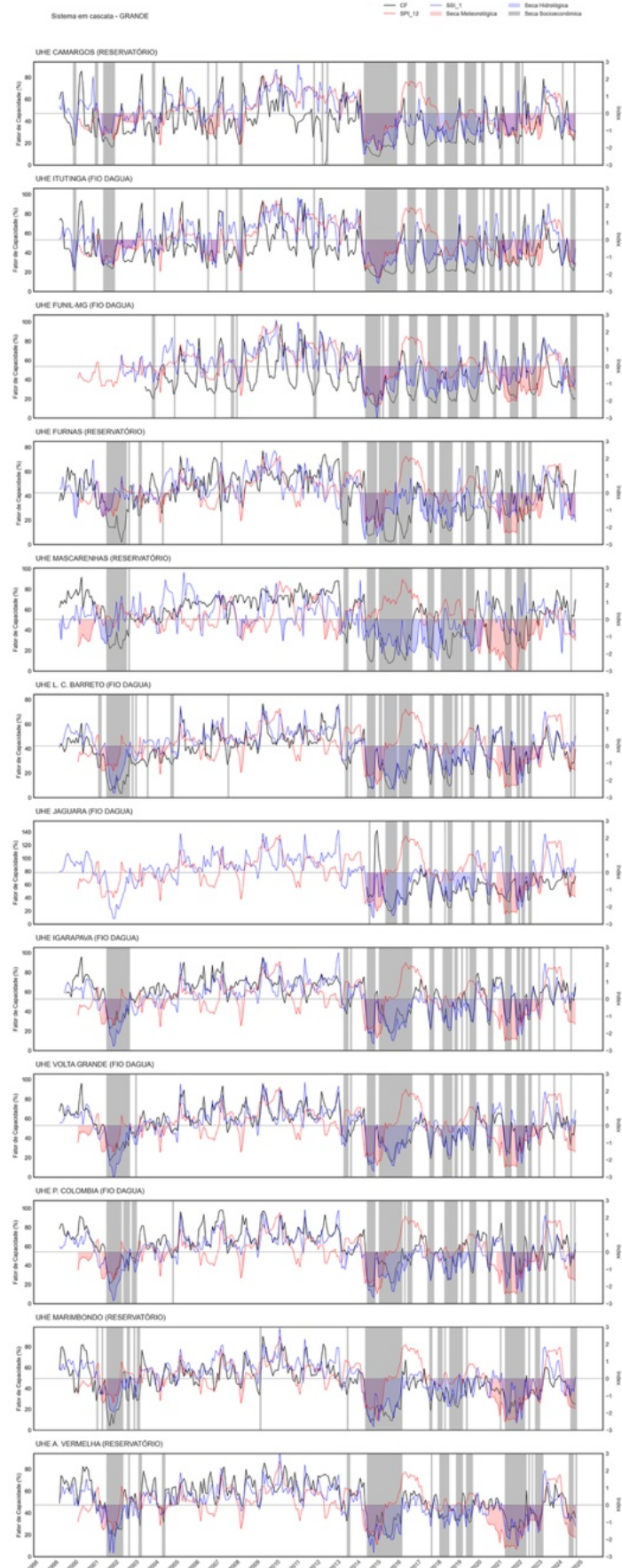
Anexo 8 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Corrente.



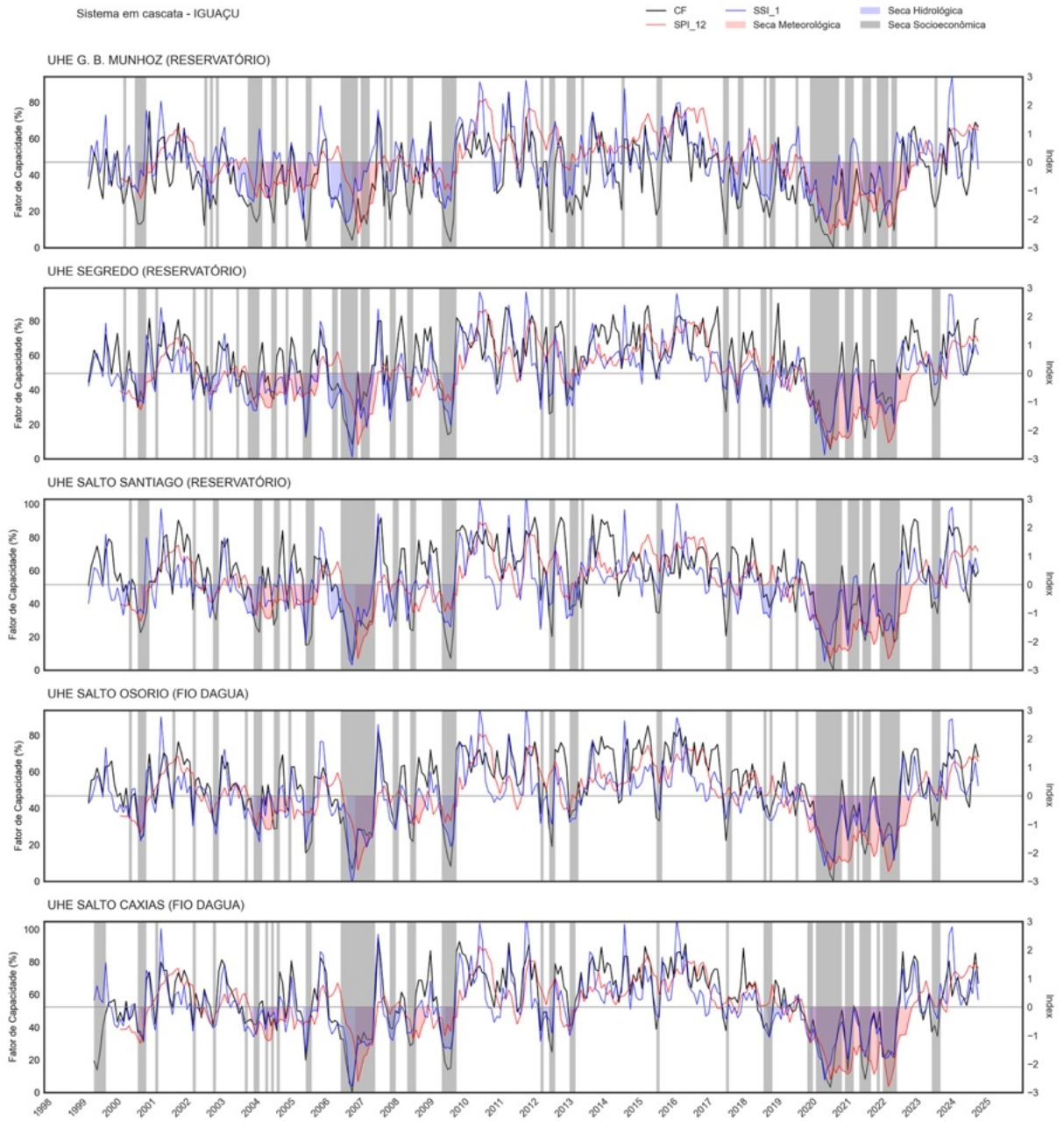
Anexo 9 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Corumbá.



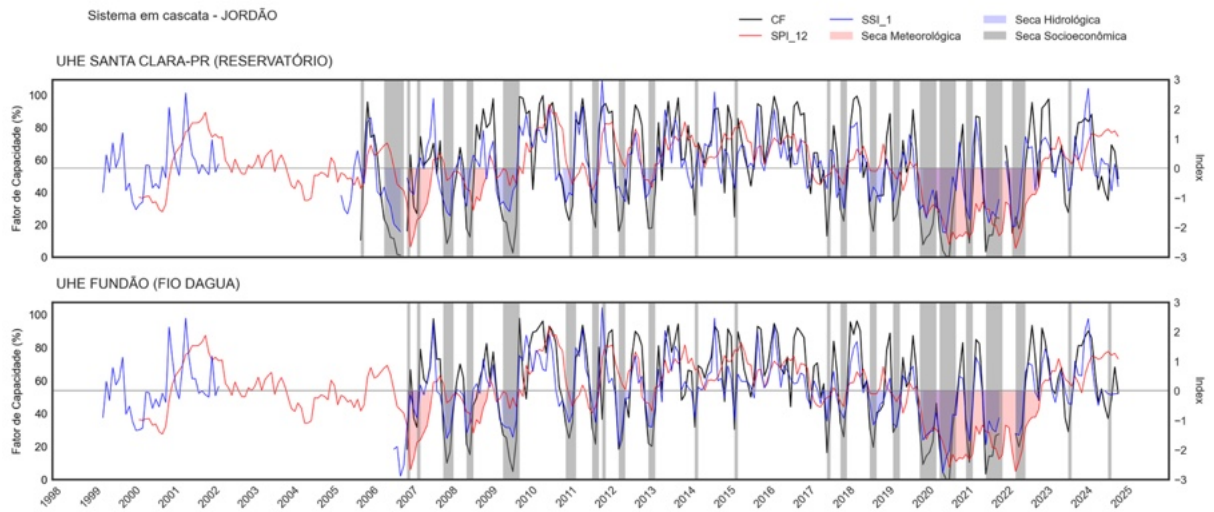
Anexo 10 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Grande.



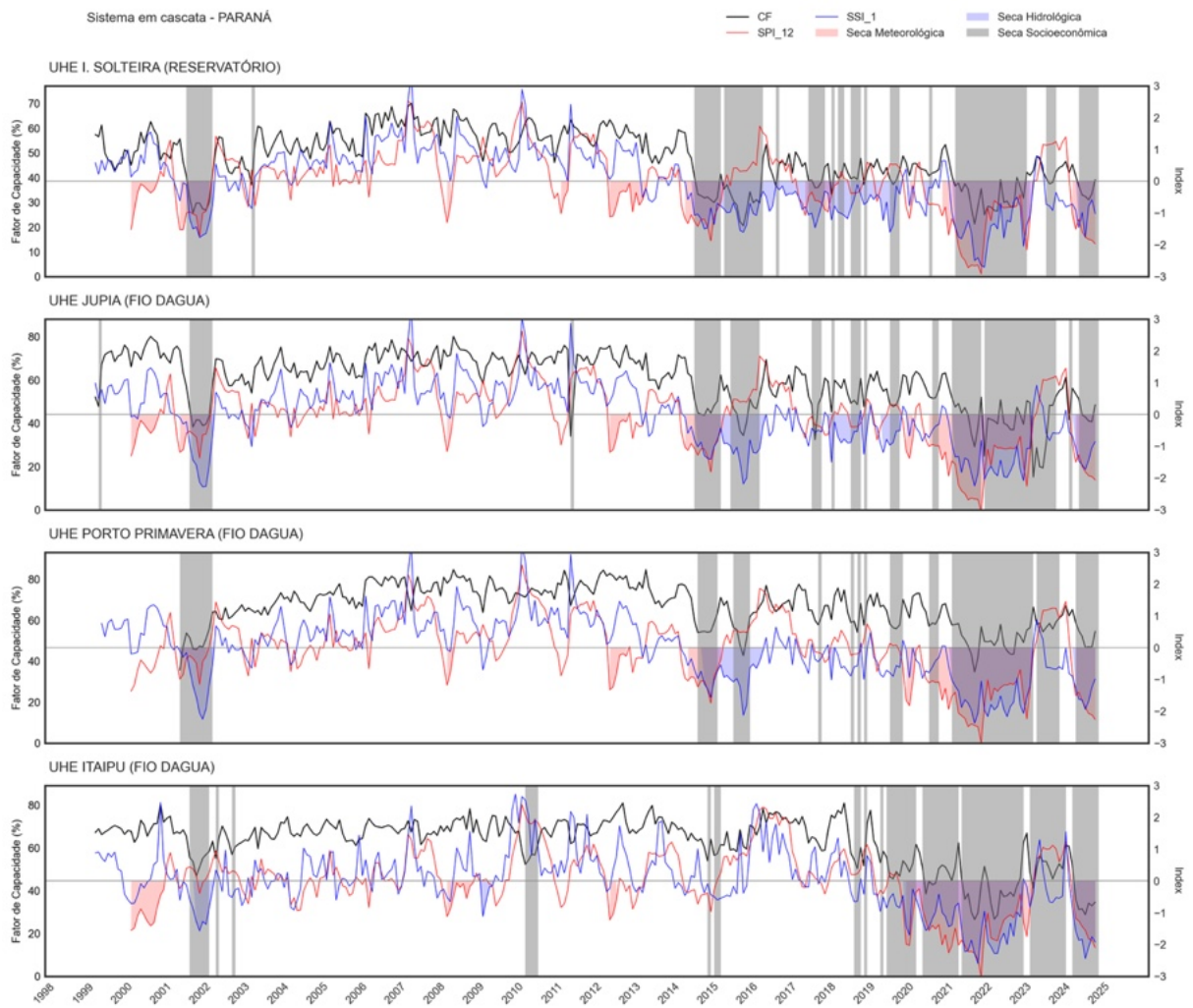
Anexo 11 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Iguaçu.



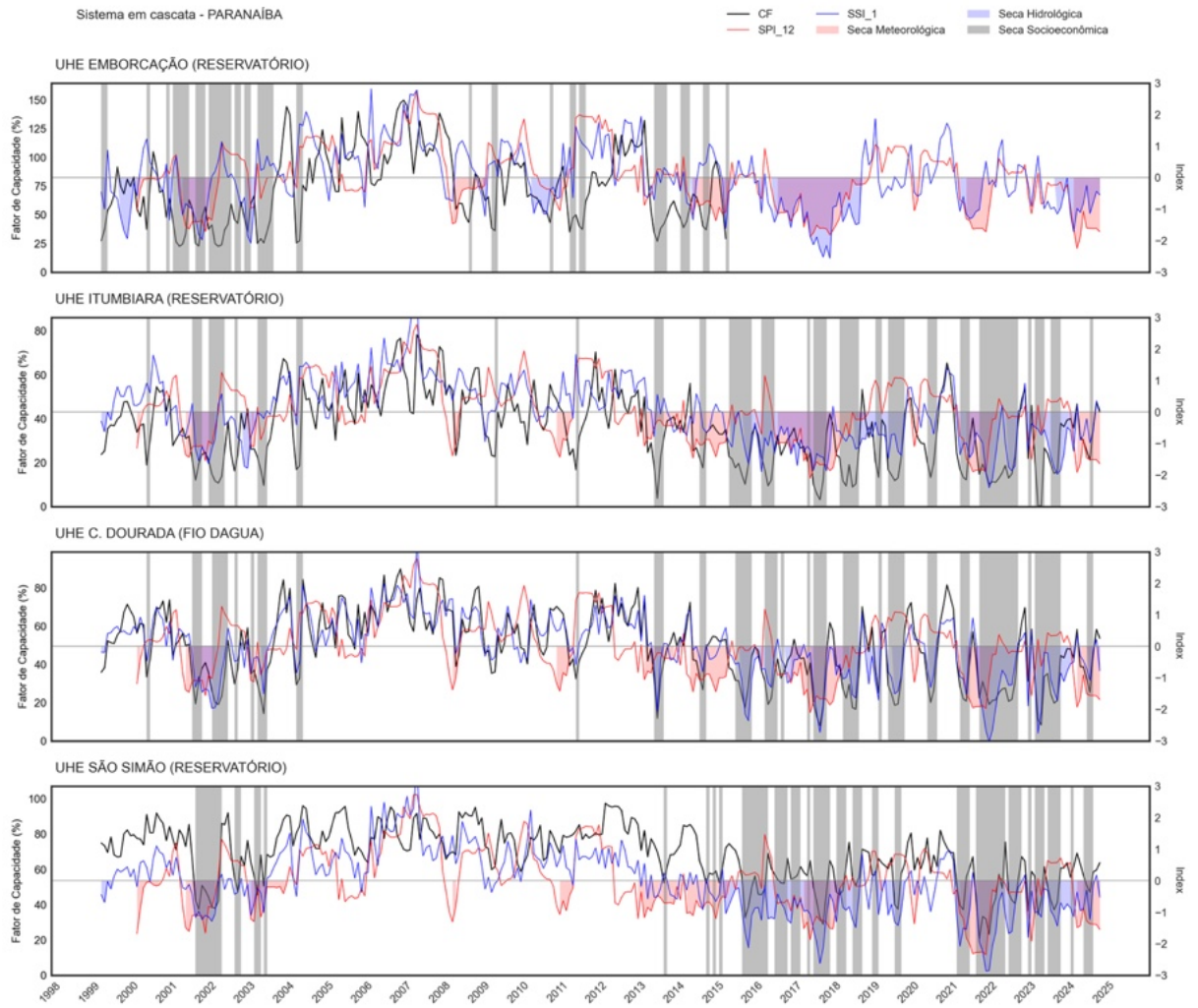
Anexo 12 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Jordão.



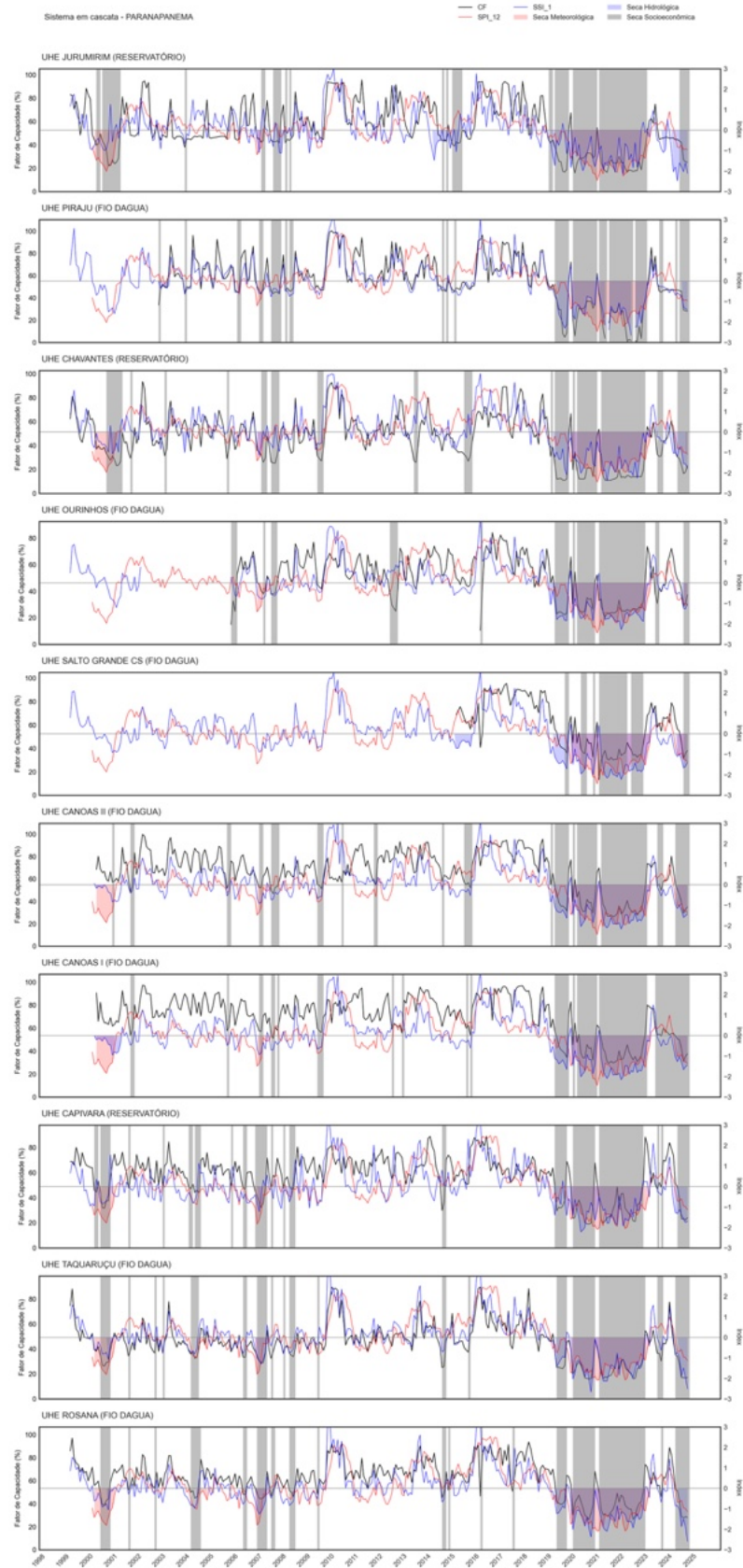
Anexo 13 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Paraná.



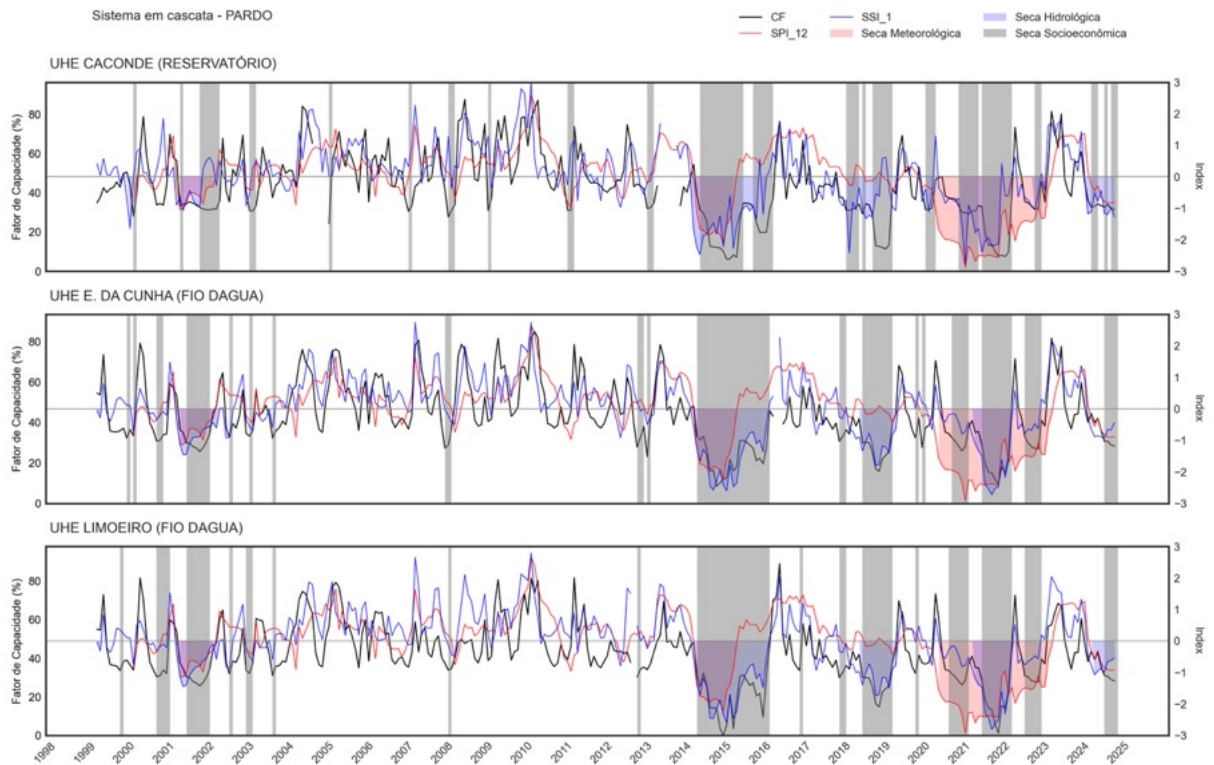
Anexo 14 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Paranaíba.



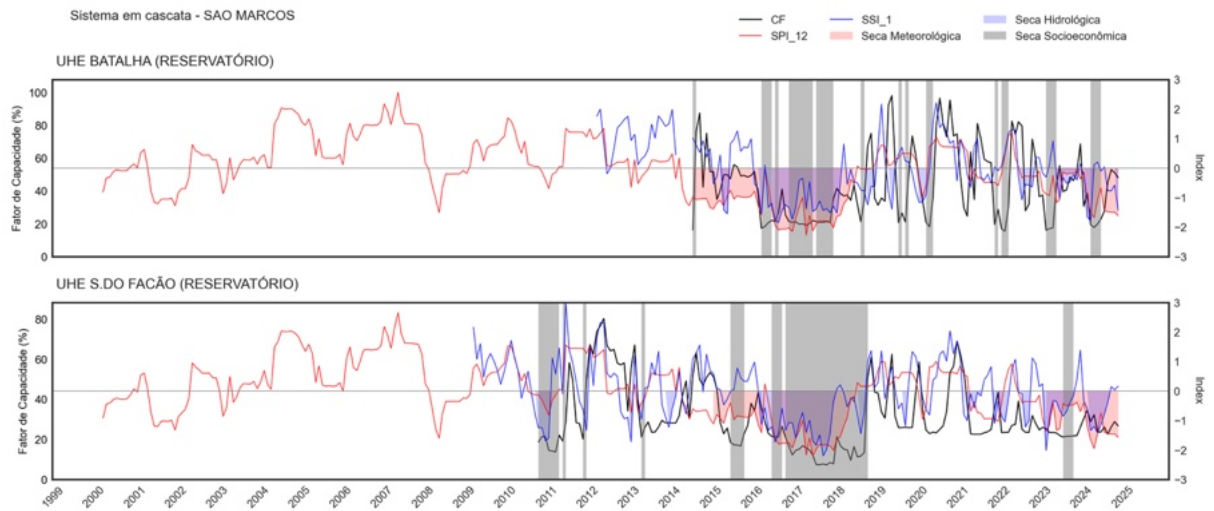
Anexo 15 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Paranapanema.



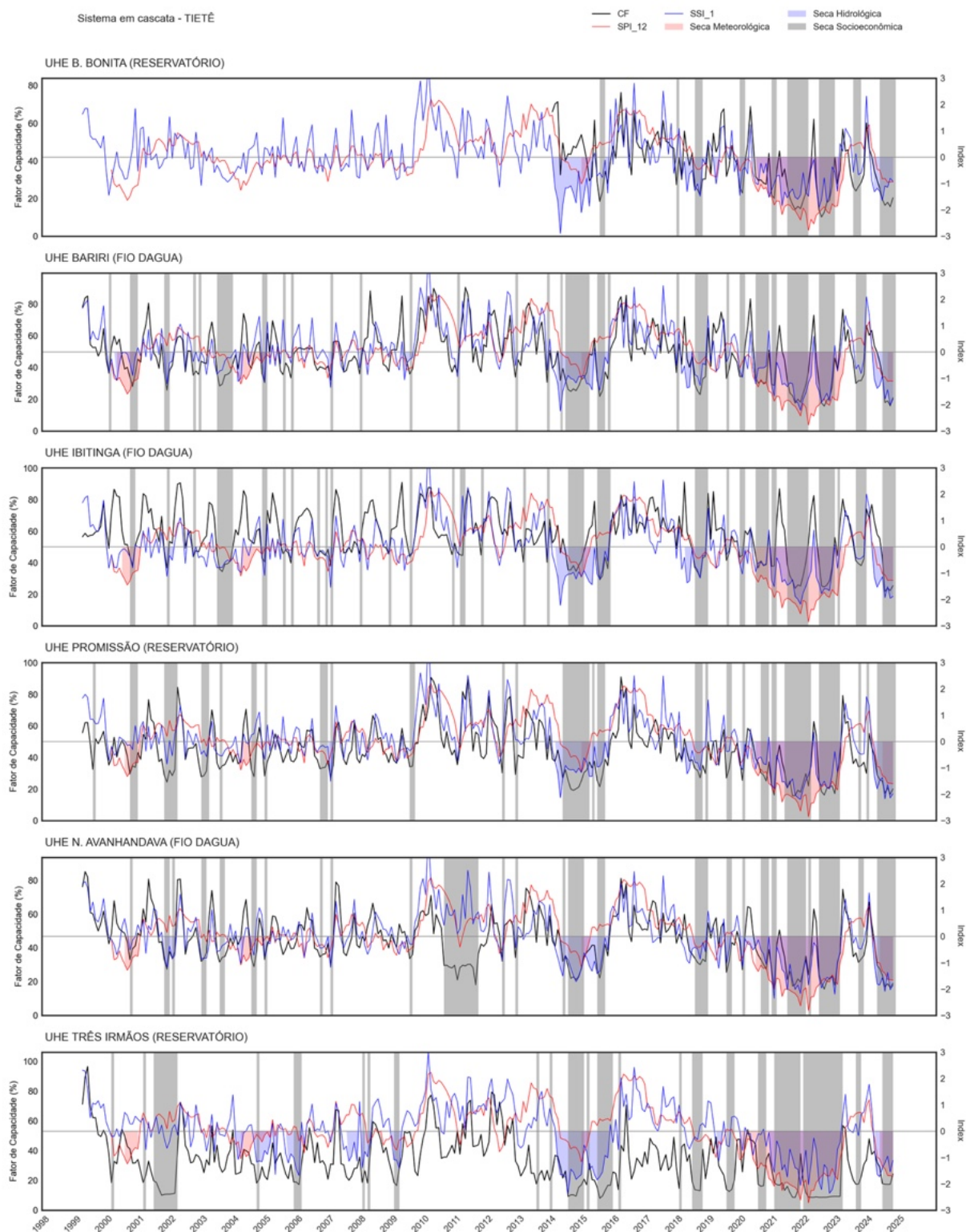
Anexo 16 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Pardo.



Anexo 17 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio São Marcos.



Anexo 18 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Tietê.



Anexo 19 – Séries de eventos para o sistema em cascata do Rio Verde.

