

STHÉFANNY SANCHEZ FRIZZARIM

**Estudo de alternativas para promoção da resiliência do sistema
de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo**

São Carlos

2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA ENGENHARIA AMBIENTAL

Sthéfanny Sanchez Frizzarim

**Estudo de alternativas para promoção da resiliência do sistema de
abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo.**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciência da Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Montaña.

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F921e Frizzarim, Sthéfanny Sanchez
Estudo de alternativas para promoção da
resiliência do sistema de abastecimento de água da
Região Metropolitana de São Paulo / Sthéfanny Sanchez
Frizzarim; orientador Marcelo Montaña. São Carlos,
2022.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da
Engenharia Ambiental -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Resiliência. 2. Sistema de abastecimento da
RMSP. 3. Modelagem dinâmica. 4. Abordagem sistêmica. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **STHÉFANNY SANCHEZ FRIZZARIM**.

Título da dissertação: "Estudo de alternativas para promoção da resiliência do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo".

Data da defesa: 16/05/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Marcelo Montaña** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Aprovada

Prof. Dr. **Marcelo Coutinho Vargas**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADA

Prof. Associado **Evandro Mateus Moretto**
(Escola de Artes, Ciências e Humanidades/EACH-USP)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Titular **Marcelo Zaiat**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

Embora uma dissertação pareça ter por finalidade somente o seu caráter acadêmico e de avaliação individual, enxergo esta etapa como resultado de um longo processo, de muitas histórias e sob a influência de pessoas que foram muito importantes para mim. Conseguir agradecer de forma equivalente a todas as pessoas que fizeram parte deste processo, direta ou indiretamente, torna-se desafiador. No final sempre será pouco perto do apoio que me deram, da nostalgia e do carinho que me vem a cada palavra do texto que se desenrola a seguir.

Assim, inicio meus agradecimentos à minha família, que, com o seu apoio incondicional contribuiu para a formação do que sou hoje. Ao meu pai, pelo incentivo e pela confiança. À minha mãe, anjo da guarda, mulher forte que me ensinou o verdadeiro significado da vida e a confiar nas minhas potencialidades. À minha irmã, Kol, por seus conselhos, paciência e, mais do que tudo, parceria.

Agradeço também ao Iту e à Danira, amigos que me acolheram em São Carlos e que sempre estiveram ao meu lado, em apoio constante, sinucas e cervejas, práticas agroecológicas e de culinária, estudos de madrugada e, até mesmo, me (re)ensinaram a andar de bicicleta.

Agradeço à Julia, amiga que a pós-graduação me proporcionou que, além de me apoiar ao longo de todo o meu processo científico, também me permitiu participar do seu processo de construção. Uma construção conjunta do conhecimento.

Agradeço também aos meus amigos de vida, que sempre estiveram do meu lado em apoio constante e que, de alguma forma, contribuíram com este trabalho, dando suporte à minha saúde mental em tempos pandêmicos e de um contexto geopolítico tão conturbado. Agradeço principalmente ao “O Pior Grupo do Mundo” e aos amigos da UFLA.

Agradeço a todo o corpo docente do PPG-SEA, por seus ensinamentos e oportunidades ofertadas, em especial ao meu orientador Marcelo Montañó (Mindu) e a sua forma exigente, crítica, questionadora e humana de trabalhar.

Agradeço também à Secretaria do PPG-SEA, por toda a prestatividade em tirar dúvidas e dar orientações sobre as burocracias acadêmicas, em especial ao Nelson.

Agradeço aos colegas do NEPA pela partilha de saberes, recepção e auxílio, em especial à Thami, à Camila, ao Dante, ao Zé e ao Ed.

A despeito da compreensão de que é um dever constitucional do Estado prover e fomentar a educação em todos os níveis de formação à população brasileira, em razão de cumprimento de exigência formal, agradeço à bolsa de mestrado a mim concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Ademais, dada a oportunidade de concluir esta etapa da minha formação em uma universidade pública e de qualidade, gostaria de agradecer, também, a toda sociedade brasileira por ter financiado os meus estudos. Espero conseguir devolver todo o investimento proporcionado à minha formação.



Fonte: Figura da internet ([s.d]).

Resumo

FRIZZARIM, S.S. **Estudo de alternativas para a promoção da resiliência do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo**. 2021. p.167. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Considerando as perspectivas de cenários críticos para o abastecimento de água em diferentes regiões do globo, o debate em torno da resiliência de sistemas de abastecimento de água tem ganhado notoriedade, oferecendo aos planejadores e tomadores de decisão informações sobre a identificação de possíveis limiares de ruptura e mudança para estados de equilíbrio não sustentáveis. Entre 2013 e 2015, a Região Metropolitana de São Paulo vivenciou um dos piores quadros de escassez da sua história, acarretando diversos problemas de ordem socioeconômica, ambiental e de saúde pública. Um quadro de escassez que possui tendência de repetição frente aos efeitos das mudanças climáticas. Neste sentido, a identificação de alternativas que promovam a resiliência do sistema de abastecimento de água frente a eventos extremos ou falhas no sistema torna-se uma importante ferramenta no processo de tomada de decisão, contribuindo na proposição de medidas estratégicas. Diante do exposto, valendo-se de uma abordagem sistêmica e amparando-se na construção de um modelo simplificado de sua dinâmica, cujo comportamento foi analisado sob diferentes cenários, o presente trabalho procura trazer subsídios para a discussão sobre alternativas que promovam a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP. Confrontando os resultados obtidos pelas simulações do comportamento do sistema de abastecimento e a sua capacidade de resposta, os resultados encontrados amparam a discussão acerca da resiliência do sistema de abastecimento de água e seu atual estado de engessamento, denotando a necessidade de se discutir o atual estilo de desenvolvimento adotado pela região.

Palavras-chave: Resiliência. Sistema de abastecimento da RMSP. Modelagem dinâmica. Abordagem sistêmica.

Abstract

FRIZZARIM, S.S. **Study of alternatives for promoting the resilience of the water supply system of the Metropolitan Region of São Paulo.** 2021. p.167. MSc Dissertation - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

The debate around the resilience of water supply systems has gained notoriety, given the possibilities of critical water supply scenarios in different regions of the earth. As a result, planners and decision-makers can deal with information to identify possible thresholds of disruption and shift of unsustainable equilibrium states. Between 2013 and 2015, the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) experienced one of the worst shortages ever, which raised several socioeconomic, environmental, and public health problems. This scarcity scenario is likely to repeat itself, considering the effects of climate change. Therefore, the mapping of alternatives that promote the resilience of the water supply system against extreme events or system failures becomes an essential tool in the decision-making process, contributing to the proposition of strategic measures. Using a systemic approach and based on the construction of a simplified model of its dynamics, whose behavior was analyzed under different scenarios, this research brings subsidies to the discussion about alternatives that promote the resilience of the water supply system of MRSP. The results obtained by simulating the behavior of the water supply system and its response capacity support the discussion about the resilience of the water supply system and its current flexibility, indicating the need to discuss the existing style of the MRSP development.

Keywords: Resilience. Water supply system of MRSP. Dynamic modeling. Systemic approach.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-Os homens cegos e o elefante	23
Figura 2- Revolução do processo científico segundo Kuhn	24
Figura 3- Fundamentos epistemológicos e nível de foco dos diferentes vieses da resiliência	30
Figura 4- Tipos de resiliência segundo Von Bertalanffy	31
Figura 5 - Etapas do Ciclo Adaptativo	34
Figura 6- Ciclos adaptativos em Panarquia.....	36
Figura 7 - Possíveis estados de equilíbrio.....	38
Figura 8 - Estado alternativo	39
Figura 9 - Estados alternativos e Ponto Crítico	40
Figura 10- Exemplificação dos dois tipos de colapso.....	44
Figura 11 - Tripé da resiliência do sistema de abastecimento de água.....	45
Figura 12- A integração sistêmica nos sistemas socioecológicos	49
Figura 13 - Complexidades e incertezas nas técnicas prospectivas para análises ambientais prospectivas.....	53
Figura 14 - Design das fases de pesquisa e dos objetivos alcançados	58
Figura 15- A analogia da banheira e o sistema de abastecimento.....	59
Figura 16- Modelo cognitivo na construção do raciocínio lógico pela busca por informações.....	61
Figura 17- Lógica de conexões e interdependências.....	62
Figura 18 - Iteração entre as principais etapas do processo de modelagem	63
Figura 19- Organização esquemática de dados e informações	65
Figura 20 - Serviços ecossistêmicos desempenhados pela água	66
Figura 21 - Divisão sub-regional da RMSP	73
Figura 22 - Composição da Região Metropolitana de São Paulo.....	75
Figura 23- Precipitação média anual na RMSP.....	77
Figura 24- Anomalias na precipitação durante o verão (mm).....	78
Figura 25 - Quadro síntese com as informações de IQA e IAP da BH-AT	81
Figura 26 - Localização da RMSP dentro da RBCV.....	82
Figura 27 - Mapeamento das operadoras em saneamento e seus respectivos municípios de operação	86

Figura 28 - Sistema Adutor Metropolitano	91
Figura 29 - Inter-relações entre componentes de um sistema	93
Figura 30 - Caminho de identificação das inter-relações	94
Figura 31 - Diagrama de Causalidade.....	100
Figura 32 – Representação gráfica da lógica do Diagrama de Estoque e Fluxo.....	104
Figura 33 - Quadro esquemático do processo de modelagem dinâmica	105
Figura 34 - Modelo dinâmico do Sistema de Abastecimento da RMSP	107
Figura 35- Análise de sensibilidade sobre as águas para abastecimento.....	109
Figura 36- Análise de sensibilidade sobre o Sistema Cantareira	109
Figura 37- Análise de sensibilidade dos parâmetros sobre os sistemas	109
Figura 38- Análise da sensibilidade da Transposição do Paraíba do Sul sobre o Sistema Cantareira.....	110
Figura 39 - Interpolação da série histórica de consumo urbano.....	112
Figura 40 - Interpolação da série histórica de consumo industrial.....	112
Figura 41 – Testes sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios para calibração do modelo	114
Figura 42 – Testes de calibração sobre o Reservatório Cantareira	114
Figura 43- Comportamento do Sistema de Abastecimento da RMSP sob as condições dos diferentes cenários.	118
Figura 44 – Comportamento do Sistema Cantareira sob as condições dos diferentes cenários.....	119
Figura 45 - Cenário de referência sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios.....	119
Figura 46 - Cenário tendencial sobre o Reservatório do Sistema Cantareira	120
Figura 47 – Cenário 2 e a disponibilidade de água a longo prazo.....	122
Figura 48 – Sistema Cantareira sob as premissas adotadas para o Cenário 2.....	123
Figura 49- Projeção das águas para abastecimento nos cenários 3 e 4.....	124
Figura 50 – Projeção do Sistema Cantareira para os cenários 3 e 4	124
Figura 51- Aplicação dos cenários críticos sobre as águas disponíveis para abastecimento nos reservatórios.....	125
Figura 52- Aplicação dos cenários críticos sobre o Reservatório do Sistema Cantareira	126
Figura 53 – Análise de sensibilidade sobre as águas disponíveis para abastecimento com variação de 0%.....	140

Figura 54- Análise de sensibilidade sobre o Reservatório do Sistema Cantareira com variação de 0%.....	140
Figura 55- Análise de sensibilidade sobre as águas disponíveis para abastecimento com variação de $\pm 10\%$	141
Figura 56- Análise de sensibilidade sobre o Reservatório do Sistema Cantareira com variação de $\pm 10\%$	141
Figura 57- Análise de sensibilidade sobre as águas disponíveis para abastecimento com variação de $\pm 20\%$	142
Figura 58- Análise de sensibilidade sobre o Reservatório do Sistema Cantareira com variação de $\pm 20\%$	142
Figura 61 - Sistema de abastecimento de água ampliado, em termos quantitativos de reservação útil.....	178
Figura 62 - Reservatório Cantareira ampliado.....	179
Figura 61- Transformada de Fourier aplicada à precipitação total	180
Figura 62 - Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão a jusante total	180
Figura 63 - Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão natural total	180
Figura 64 - Transformada de Fourier aplicada sobre a precipitação do Sistema Cantareira.....	181
Figura 65 - Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão a jusante do Sistema Cantareira.....	181
Figura 66- Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão natural do Sistema Cantareira.....	181

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1- Diferentes conceitos sobre a resiliência	33
Quadro 2 – Etapas principais do processo de modelagem	63
Quadro 3 - Caracterização dos Sistemas Produtores de água.	88
Quadro 4 – Construção do argumento para elaboração do Diagrama de Causalidade.	95
Quadro 5- Classificação das variáveis do sistema conforme a sua função lógica ..	106
Quadro 6 - Condições dos cenários	116
Quadro 7 - Balanço hídrico – IWA.....	131

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados socioeconômicos dos municípios da RMSP.	69
Tabela 2- Informações sobre atendimento do sistema de água e esgoto da RMSP..	71
Tabela 3 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios	169
Tabela 4 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre Reservatório do Sistema Cantareira.....	173

ÍNDICE DE SIGLAS E ABREVIações

APA	Área de Proteção Ambiental
APRM	Área de Proteção e Recuperação dos Mananciais
B _n	Ciclos de balanceamento
BH – AT	Bacia Hidrográfica do Alto Tietê
BH –PCJ	Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá
BH – OS	Bacia Hidrográfica Paraíba do Sul
CEA	Coordenadoria de Educação Ambiental
EA	Educação Ambiental
ETA	Estação de Tratamento de Água
FABHAT	Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê
IAP	Índice de Qualidade das Águas Brutas para fins de Abastecimento Público
IQA	Índice de Qualidade de Água
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IWA	International Water Association
MDS	Modelo Dinâmica de Sistemas
MG	Minas Gerais
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PAM	Plano de Ação da Macrometrópole Paulista (2013-2040)
PIB	Produto Interno Bruto
R _n	Ciclos de reforço
RBCV	Reserva Brasileira do Cinturão Verde
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SAAE	Serviço de Água e Esgoto
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SACs	Sistemas Adaptativos Complexos
SAESA-	Sistema de Água, Esgoto e Saneamento Ambiental de São Caetano
SCS	do Sul
SAM	Sistema Adutor Metropolitano
SAMA	Saneamento Básico do Município de Mauá

SE	Serviços Ecosistêmicos
SEMAE	Serviço Municipal de Águas e Esgotos
SEMASA	Serviço Municipal de Saneamento Ambiental de Santo André
SP	São Paulo
SSE	Sistemas Socioecológicos
TGCA	Taxa Geométrica de Crescimento Anual
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Alto Tietê
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	19
2.1	Objetivo Geral	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1	O Paradigma da Complexidade e sua relação com os Sistemas Dinâmicos	22
3.2	o conceito de resiliência sob a abordagem dos sistemas complexos dinâmicos	29
3.3	Estados alternativos e o ponto crítico do sistema	36
3.4	A resiliência do sistema de abastecimento como um processo complexo ...	42
3.5	A resiliência do sistema de abastecimento sob a perspectiva de Sistemas Socioecológicos e Serviços Ecossistêmicos.....	45
3.6	A modelagem da dinâmica de sistemas e a construção de cenários nos estudos de resiliência	50
3.7	A utilização de cenários na proposição de alternativas.....	52
4	METODOLOGIA	56
4.1	Desenho da pesquisa.....	56
4.2	A lógica sistêmica na busca por informações	59
4.3	O processo de modelagem	62
4.3.1	Fontes de dados e informações.....	64
4.3.2	Estruturação da capacidade de análise.....	65
4.3.2.1	Os aspectos socioeconômicos da RMSP e do sistema de abastecimento.	68
4.3.2.2	Os aspectos ambientais do sistema de abastecimento da RMSP ..	74
4.3.2.3	Os aspectos hidrotécnicos e infraestruturais do sistema de abastecimento.	85
4.3.3	Modelagem conceitual das relações de causalidade.....	92
4.3.4	A modelagem dinâmica do sistema	103
4.3.4.1	Análise de sensibilidade do modelo	107
4.3.4.2	Calibração e validação do modelo dinâmico	111
4.4	A construção de cenários para a discussão sobre alternativas.....	115

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	118
5.1	ANÁLISE DE CENÁRIOS E A RESILIÊNCIA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	118
5.2	DISCUSSÃO SOBRE A RESILIÊNCIA E ALTERNATIVAS QUE GARANTAM A SUA PROMOÇÃO.....	128
5.2.1	Alternativas para gestão de demanda de águas da RMSP	128
5.2.2	Alternativas para gestão de oferta de água	132
5.2.3	Revisão do processo de desenvolvimento da RMSP e dos territórios associados	135
6	LIMITAÇÕES DO MODELO.....	139
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	144
8	REFERÊNCIAS.....	146
	APÊNDICE A – Informações pertinentes ao modelo dinâmico do Sistema de Abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo	169
	APÊNDICE B – Informações pertinentes ao modelo do Sistema Cantareira	173
	APÊNDICE C – Modelo dinâmico do Sistema de Abastecimento da RMSP.....	178
	APÊNDICE D – Transversa de Fourier aplicada sobre os parâmetros pertencentes ao Sistema Total	180
	APÊNDICE E- Transversa de Fourier aplicada sobre os parâmetros pertencentes ao Sistema Cantareira.....	181

1 INTRODUÇÃO

Como componente fundamental à manutenção na vida na biosfera e ao desenvolvimento humano, a água pode ser entendida como um recurso estratégico e um bem comum a todos os seres (GARCÍA; HILEMAN; BODIN, 2019). Apesar da sua importância, a gestão dos recursos hídricos está sujeita a toda complexidade decorrente de seus múltiplos usos e consequente degradação pelas ações antrópicas, intensificada pelo incessante aumento populacional. Este contexto resulta em uma relação paradoxal: embora sua própria existência dependa da qualidade e disponibilidade dos recursos ambientais, a sociedade pratica ações que resultam em sua sistemática deterioração, comprometendo os seus usos, o seu ciclo e as suas funções ecossistêmicas (FALKENMARK; WANG-ERLANDSSON; ROCKSTRÖM, 2019).

O aumento da demanda pelos diferentes usos da água, acompanhado da ineficiência das estratégias de gestão, tem feito com que diversas regiões tenham atingido o limite de seus recursos hídricos, prejudicando as funções e serviços oferecidos pela água e comprometendo a sua distribuição de forma sustentável e segura. Esta situação tem contribuído para um quadro crítico em relação à disponibilidade hídrica, seja pela escassez física deste recurso, pela carência de acesso à água potável para consumo em razão da ocorrência da falta de recursos financeiros ou deficiências institucionais que garantam um fornecimento de água ininterrupto, seja pela carência de infraestrutura apropriada para tratamento e distribuição adequados, ou, ainda, pela atuação conjunta de todos os elementos anteriormente mencionados (UN-Water, [s.d]).

Em consequência desta relação paradoxal e de suas implicações, o conhecimento dos aspectos relacionados à resiliência hídrica (ou dos sistemas de abastecimento hídrico) tem ganhado relevância, sendo reconhecida a necessidade de se oferecer à sociedade um arcabouço conceitual e metodológico compatível com os desafios colocados, notadamente quanto à identificação dos problemas e pontos de ruptura relacionados ao sistema hídrico que possam inviabilizar - em qualidade ou quantidade - o abastecimento de água (KLISE *et al.*, 2017; BALAEI *et al.*, 2018; SWEETAPPLE; ASTARAIE-IMANI; BUTLER, 2018; LIU, 2019). Neste caso, a noção

de resiliência remete à capacidade do sistema em lidar com situações de colapso ou adversidades que possam resultar em uma situação de estresse irreversível ao sistema.

O conceito de resiliência está relacionado à capacidade de um sistema em manter as características essenciais do seu regime, e conseqüentemente de sua dinâmica, depois de passar por uma situação de perturbação, seguido de um processo de reorganização entre os seus componentes, ou seja, diz respeito tanto à sua tenacidade quanto à sua capacidade de adaptação (BUSCHBACHER, 2014; RODINA, 2019). Neste caso, entende-se por *regime* as características essenciais e estruturantes que garantem a função do sistema (BUSCHBACHER, 2014).

Ao mesmo tempo em que se verifica certa flexibilidade nas relações entre os múltiplos componentes de um sistema, existe uma relação de interdependência entre estes componentes que é responsável pela preservação da coerência do sistema em termos de sua estrutura e função (FENZL; MACHADO, 2009). A resiliência hídrica, então, tem sido interpretada como a capacidade adaptativa e de recuperação que o sistema hídrico possui em lidar com perturbações, tanto de origem ambiental como antrópica, sem perder a sua capacidade de desempenhar as suas funções e serviços ecossistêmicos no contexto analisado (SCHLÜTER *et al.*, 2013; RODINA, 2019; RETALLACK, 2021).

Por possuir tais características, os sistemas resilientes podem ser analisados sob a perspectiva da Teoria dos Sistemas Complexos, os quais estão sujeitos a mudanças casuais e comportamentos não-lineares das suas partes. Os Sistemas Complexos podem ser compreendidos como um conjunto de elementos que, por estarem em uma relação hierárquica e sob diferentes níveis de organização e de função, estão sujeitos a múltiplas interações randômicas, estando suscetíveis a novas características emergentes que não podem ser deduzidas *a priori* (FENZL; MACHADO, 2009; MEADOWS, 2009; FOLLONI, 2016). Desta maneira, a ideia de resiliência hídrica pode ser concebida na percepção de Fenzl e Machado (2009), na qual os componentes da antroposfera e da biosfera se complementam em um único sistema e possuem certa relação de interdependência e evoluem e se desenvolvem de maneira conjunta.

A crise de abastecimento verificada na Região Metropolitana de São Paulo entre os anos de 2013 e 2015 serviu de alerta para as questões relacionadas aos recursos

hídricos devido aos prejuízos econômicos, ambientais e sociais gerados pelo déficit de água (BUCKERIDGE; RIBEIRO, 2018a). Na tentativa de se obter uma maior compreensão sobre os motivos que levaram a esta situação, verifica-se um esforço que se estende por diferentes áreas de conhecimento e sob diversos enfoques, dentre os quais: gestão, articulações políticas e/ou sociais e aspectos técnico-infraestruturais (RIO; DRUMMOND; RIBEIRO, 2016; MILLINGTON, 2018; RICHTER; JACOBI, 2018); a importância da vegetação e a interação entre mudanças climáticas, uso e ocupação do solo e/ou o ciclo hidrológico (FERREIRA *et al.*, 2019), inclusive sob a perspectiva da ocorrência de desastres (SORIANO *et al.*, 2016); as mudanças climáticas e/ou influência do clima (GIULIO *et al.*, 2018; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018). Desta maneira, é possível verificar que o tema da resiliência tem sido abordado de maneira parcial, cujo enfoque recai sobre parte dos elementos constituintes do sistema hídrico e, desconsiderando, sobretudo, suas múltiplas combinações e sinergias.

Embora venham sendo realizadas discussões sobre a importância da abordagem da resiliência hídrica no contexto nacional, principalmente no contexto da RMSP (BUCKERIDGE; RIBEIRO, 2018a), ainda são escassos os estudos que abordem esta temática de forma integrada, sistêmica e inter-relacionada, confrontando os elementos ambientais, técnico-infraestruturais, sociais, econômicos e institucionais em uma mesma investigação (BUCKERIDGE; RIBEIRO, 2018a).

Sendo assim, a fim de contribuir para o preenchimento desta lacuna e partindo da premissa de que a crise hídrica na RMSP denota em grande medida o comportamento de um sistema complexo voltado para o abastecimento de água e sujeito a variáveis que não podem ser controladas *a priori*, a presente pesquisa de Mestrado se propõe a identificar alternativas para a promoção da resiliência deste sistema, amparada na adoção de técnicas de modelagem estruturadas a partir dos campos teórico-metodológicos dos Sistemas Complexos Dinâmicos e, sobretudo, da Dinâmica de Sistemas (FENZL; MACHADO, 2009; MEADOWS, 2009; VON BERTALANFFY, 2010; FURTADO; SAKOWSKI; TÓVOLI, 2015; MORIN, 2015; FOLLONI, 2016).

A importância socioeconômica da área escolhida (RMSP) e a problemática relativa à resiliência hídrica apontam para necessidade de maior conhecimento acerca das relações existentes entre os diversos componentes que integram o seu sistema de abastecimento e de suas relações. Neste sentido, entende-se que esta pesquisa

permitiu uma descrição sistêmica e melhor compreensão do funcionamento do objeto de investigação, sobretudo em relação aos fatores intervenientes na resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP, permitindo a discussão de alternativas para assegurar a sua capacidade de adaptação contínua, o que se mostra particularmente relevante em situações de crise.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa é voltada para a identificação e discussão de alternativas para a promoção da resiliência do sistema de abastecimento da RMSP, valendo-se da abordagem teórico-metodológica da Dinâmica de Sistemas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Identificar e sistematizar os principais elementos e processos envolvidos na resiliência do sistema de abastecimento hídrico da RMSP, através da construção de um modelo dinâmico simplificado, considerando elementos ambientais, técnico-estruturais, sociais, econômicos e institucionais;
- ✓ Compreender a dinâmica de inter-relação entre os elementos relacionados à resiliência do sistema de abastecimento de água;
- ✓ Identificar possíveis pontos de ruptura na resiliência do sistema de abastecimento, considerando os pontos controláveis e não controláveis;
- ✓ Analisar cenários e apresentar perspectivas de alternativas que promovam a resiliência no sistema de abastecimento de água da RMSP.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica que deu suporte para o desenvolvimento desta pesquisa, organizada em sete itens. Ressalta-se aqui que, dada a natureza do objeto de pesquisa e das variáveis que definem seu comportamento, optou-se pela estruturação da pesquisa no campo da Dinâmica de Sistemas. Desse modo, algumas perguntas-guia foram elaboradas para conduzir o levantamento bibliográfico e a estruturação do presente capítulo, conforme a necessidade de consolidação teórica, diante de diversos *gaps* teóricos que surgiram ao longo da pesquisa:

- 1) O que é complexidade? E o que há na complexidade que caracteriza os sistemas dinâmicos complexos?
- 2) O que é resiliência no campo da Dinâmica de Sistemas?
- 3) Por que um sistema de abastecimento de água, de modo geral, e o sistema de abastecimento da RMSP de modo específico, pode ser compreendido como um processo complexo?
- 4) Qual é a importância de considerar a resiliência do sistema de abastecimento no processo decisório?
- 5) Por que modelar a resiliência e considerá-la no processo decisório?
- 6) Qual é a importância de se considerar os diferentes cenários na proposição de alternativas?

Isto posto, a primeira seção deste capítulo é composta da contextualização sobre o processo de revolução científica e da necessidade e do surgimento do paradigma da complexidade no estudo de sistemas. A partir daí foram identificadas algumas características utilizadas para a definição e consolidação do conceito de sistemas dinâmicos complexos.

Em seguida, o conceito de resiliência foi abordado sob a ótica dos sistemas complexos dinâmicos na segunda seção, na qual algumas definições importantes foram trabalhadas dentro da abordagem da resiliência, tais como: estado, regime; Panarquia e ciclos adaptativos. A importância destes conceitos se dá por eles estarem relacionados a própria definição conceitual de resiliência e, desta maneira, estas

definições foram discutidas e tratadas em suas nuances dentro do objetivo de pesquisa e considerando o objeto de estudo como elemento central nesta construção.

Na terceira seção do capítulo, foi dada ênfase para a contextualização de estados alternativos no contexto da resiliência, na qual mudanças nas condições iniciais de um sistema podem causar mudanças abruptas em seu estado. Neste sentido, foram trabalhados conceitos como ponto crítico (*tipping point*) do sistema, histerese e suas relações com o estado e regime do sistema.

O capítulo segue com a seção 3.4, em que a resiliência do sistema de abastecimento de água é abordada como um processo complexo e, portanto, valendo-se dos conceitos desenvolvidos no campo da Dinâmica de Sistemas e no estudo de sistemas complexos. Procurou-se dar ênfase às diferentes proposições encontradas na literatura para aplicações similares, com a finalidade de consolidar a interpretação do termo resiliência a ser utilizada na pesquisa e referente ao sistema de abastecimento de água.

Na seção seguinte, a resiliência foi abordada no contexto dos sistemas socioecológicos, elucidando que ao passo em que a resiliência do sistema de abastecimento é em si um processo complexo, também é considerada parte integrante de sistemas socioecológicos e, portanto, está sujeita às interações entre o meio ambiente, a socioeconomia e os arranjos institucionais e de governança, que podem influenciar as funções e serviços oferecidos pela água.

Por fim, com o intuito de consolidar a metodologia da pesquisa e reforçar a importância dos procedimentos adotados, as seções 3.6 e 3.7 tratam do processo de modelagem dinâmica de sistemas e a elaboração de cenários para a proposição de alternativas em estudos ambientais, respectivamente.

3.1 O PARADIGMA DA COMPLEXIDADE E SUA RELAÇÃO COM OS SISTEMAS DINÂMICOS

O modelo de racionalidade atual segue preceitos de um paradigma reducionista¹, uma herança da revolução científica ocorrida no século XVI, cuja metodologia de investigação é baseada na compartimentalização da realidade em frações delimitadas e cada vez menores (MORIN, 2015). Tal procedimento de averiguação é realizado com o intuito de compreender o funcionamento destas partes isoladamente, tornando-as alheias à sua totalidade e ao seu ambiente de inserção (FOLLONI, 2016).

Este paradigma é conhecido por ser pautado em preceitos materialistas e mecanicistas, fundamentado nos preceitos Newton-Cartesianos, cuja construção do conhecimento é baseada e restringida por leis que pressupõem as ideias de ordem e de uma estabilidade única e estática, em que a busca do funcionamento do objeto de estudo ocorre de maneira fracionada e sob condições bem delimitadas e específicas (SANTOS, 2008; MORIN, 2015). Apesar deste modelo de racionalidade ter se mostrado necessário em muitas situações e ter permitido, e ainda permitir, o desenvolvimento de especificidades científicas, sua metodologia de investigação tem se revelado insuficiente no estudo do comportamento de sistemas (VON BERTALANFFY, 2010; MORIN, 2015; FOLLONI, 2016).

Sob esta ótica, Morin (2015) explica que o modelo reducionista de investigação científica acaba por “hipervalorizar a quantificação dos fenômenos”, uma vez que potenciais contradições experimentais que possam ser encontradas por vias empíricas são constantemente associadas a erros decorrentes do processo de pesquisa. Segundo o autor, ao associar quaisquer contradições a erros, este modelo limita os efeitos da causalidade a uma condição preestabelecida, no qual o objeto de estudo reduzido acaba representando toda a sua aleatoriedade operacional.

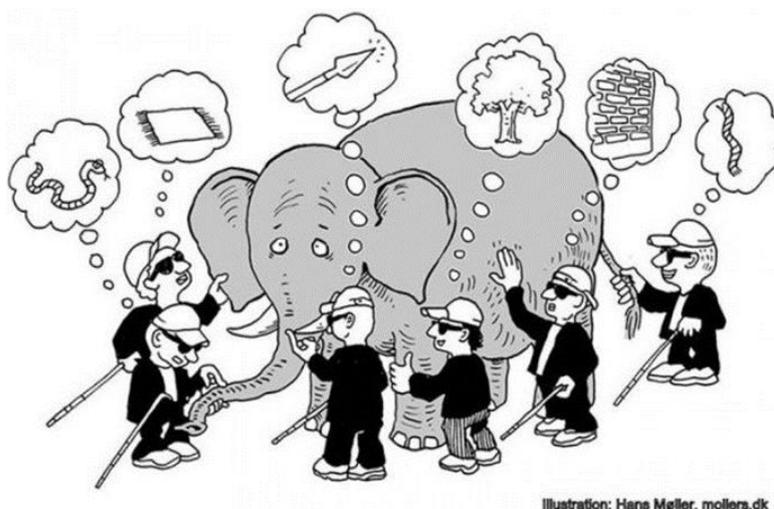
Exclui-se, portanto, todo o conjunto de integridades que compõem o sistema e justapõem-se as relações de causa-efeito entre o ambiente e o objeto (MORIN, 2015). Desta maneira, no caso de estudos sobre a dinâmica de sistemas, o modelo reducionista de investigação acaba rompendo com o real, uma vez que delimita todas

¹ Morin (2015) nomeia esse fenômeno de *Paradigma da Simplificação*.

as condições do meio que o sistema está inserido e não considera estas relações que também fazem parte da sua estruturação.

Neste contexto, o paradigma da complexidade emerge como resposta às lacunas deixadas pelo reducionismo, tanto com relação à categorização do conhecimento quanto com relação aos problemas oriundos da sua metodologia de investigação (MORIN, 2015; FOLLONI, 2016). Para uma melhor compreensão e dentro de um certo recorte de análise, a parábola *os cegos e o elefante* pode ser utilizada para ilustrar metaforicamente a inviabilidade do paradigma reducionista no estudo do comportamento dos sistemas, ao passo em que apresenta a necessidade da inserção da complexidade nestes estudos, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1-Os homens cegos e o elefante



Fonte: Ilustração da internet (MØller, [s.d]).

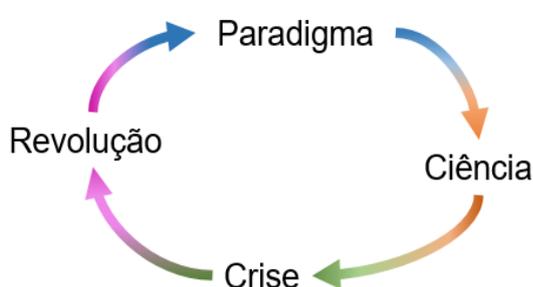
O elefante representa um sistema vivo, composto por diferentes partes possuidoras de funções específicas e que, de maneira conjunta, atuam para garantir a sobrevivência e a caracterização do animal enquanto elefante; tais como tromba, orelhas, rabo, dorso, pele e membros. Ao tocar cada parte isoladamente, cada um dos homens cegos tem uma percepção única e, conseqüentemente, uma interpretação distinta em resposta ao toque. Por fim, nenhum deles consegue ter a percepção do elefante em sua completude. As percepções parciais de cada um não representavam o todo e possuíam características distintas entre si.

De forma semelhante, isto é o que ocorre com o pragmatismo reducionista no estudo da dinâmica dos sistemas. A redução do sistema em partes não permite sua

real representação, pois cada uma das partes pode possuir funções distintas entre si e outras totalmente diferentes, ou complementares, quando analisadas em conjunto. Portanto, em relação ao comportamento de um sistema, o paradigma reducionista acaba conduzindo a uma análise insuficiente do todo.

Ainda sobre as questões paradigmáticas, Kuhn (1997) explica a necessidade de mudança de paradigma como resultante do próprio caráter revolucionário do processo científico (Figura 2).

Figura 2- Revolução do processo científico segundo Kuhn



Fonte: Elaboração própria.

Em analogia e comparando a ciência normal a um jogo de quebra-cabeças, o autor explica que os pesquisadores são como jogadores tentando resolver um quebra-cabeças e que o paradigma é a regra de instrução do jogo utilizada pela comunidade de jogadores. Ao longo do jogo, o quebra-cabeça pode ser de difícil resolução, então, o jogador deve fazer uso das regras do jogo para que o encaixe entre as peças seja perfeito. Assim, não vale, por exemplo, que o jogador corte uma peça para encaixá-la em determinado espaço, pois esta peça fará falta na composição final do jogo (KUHN, 1997).

Todavia, alguns quebra-cabeças não possuem resolução e resistem aos esforços dos jogadores por longos períodos sob as mesmas regras. Quando essas “anomalias” são identificadas, multiplicadas e as regras esgotadas, há uma situação de “crise”, na qual os jogadores (na pesquisa, os pesquisadores) têm que buscar por novas alternativas para a sua resolução. Esta nova alternativa, quando encontrada e utilizada por um número cada vez maior pela comunidade de jogadores, é o que o autor compara com a formação de um novo paradigma (KUHN, 1997).

Sob esta perspectiva, entende-se que o estudo da complexidade decorre naturalmente das lacunas deixadas pelo método de investigação guiado pelos preceitos reducionistas (KUHN, 1997; FOLLONI, 2016; MORIN, 2015). Neste contexto, Ludwig Von Bertalanffy (2010, p.55), um dos pioneiros a teorizar os sistemas dinâmicos (RODRIGUES; VANNUCCHI; LUZZI, 2020), ao desenvolver a Teoria Geral dos Sistemas e propor a ampliação da análise da realidade, afirma que:

“[...] É necessário estudar não somente partes e processo isoladamente, mas também resolver os decisivos problemas encontrados na organização e na ordem que os unifica, resultante da interação dinâmica das partes, tornando o comportamento das partes diferente quando estudado isoladamente e quando tratado no todo [...]” (BERTALANFFY, 2010, p.55).

Desta maneira, ao tutelar a necessidade de uma abordagem mais abrangente e salientar a dinâmica das inter-relações existentes entre os componentes do sistema, e como isto afeta diferentemente o comportamento do sistema e das partes que o compõem, Von Bertalanffy defendia a necessidade de um tratamento complexo em uma realidade provida de complexidade, na qual o todo representa muito além da soma de suas partes.

Mas, então, como definir a complexidade? Ao tentar construir a significação deste conceito, Folloni (2016, p.31) afirma que “[...] a complexidade pode ser entendida como uma qualidade dos sistemas complexos”, isto é, como “aquilo que permite qualificar um sistema como complexo [...]”. Partindo deste primeiro raciocínio, entende-se que a complexidade pode ser compreendida como os padrões complexos gerados pelo próprio sistema e, assim, buscar-se-á o entendimento da complexidade pelo desenvolvimento da compreensão do que são os sistemas complexos dinâmicos e suas principais características.

Seguindo esta mesma dinâmica de construção conceitual, um sistema complexo pode ser compreendido como uma estrutura unitária constituída por agentes heterogêneos, que se relacionam, interagem e exercem influências entre si, de diversas formas e, portando, atuam como agentes e pacientes em um mesmo arranjo (MEADOWS, 2009; FORD, 2010; MORIN 2015; FOLLONI, 2016). A riqueza de interações é tão grande que resulta na capacidade de auto-organização por parte do próprio sistema (MEADOWS, 2009; MORIN 2015; FOLLONI, 2016).

A dinâmica das interações e inter-relações entre os diversos elementos/subsistemas do sistema faz com que estes se sobrepujem e também potencializem a si próprios com relativas autonomia e em composição unitária, devido a cumulatividade e sinergia existente em muitas destas relações, acarretando em um processo de adaptação e reestruturação do próprio sistema e resultando em comportamentos e funções diferentes por parte dos seus elementos/subsistemas (MEADOWS, 2009; FENZL; MACHADO, 2009; FORD, 2010; FOLLONI, 2016; HEMMERS *et al.*, 2020). Desta maneira, o sistema pode possuir características totalmente distintas de seus subsistemas, quando analisados separadamente.

Portanto, entende-se que os elementos que o compõem estão organizados entre si em conjuntos distintos e com funções diferentes quando comparados aos do próprio sistema, porém, quando atuam em conjunto, mantêm sua coerência e sua performance como um todo (MEADOWS, 2009). Neste sentido, apesar de existir aleatoriedade entre os elementos que compõem o sistema, há também certa hierarquia e ordenação, para que este sistema possua autonomia e que seus subsistemas continuem se desenvolvendo sem afetar a função do sistema (MEADOWS, 2009; FOLLONI, 2016).

Entende-se, portanto, que o surgimento de um sistema, entendido como algo de dimensão mais ampla a partir de determinado referencial, acontece a partir do momento em que diversos elementos, possuidores de metabolismos variados e próprios, começam a interagir, estabelecendo uma dinâmica em sua performance e criando uma estrutura funcional conjunta (ROMESÍN, GARCÍA, 1998). Assim, a organização estrutural dos sistemas complexos acontece como consequência das interações e inter-relações estabelecidas entre os diferentes elementos do sistema, promovendo umnexo de encadeamento, e entre o sistema e o ambiente (FENZL; MACHADO, 2009; MEADOWS, 2009). Esta ordenação é o que diferencia o sistema de seu entorno e é responsável pelo engendramento do próprio sistema e de sua funcionalidade (MEADOWS, 2009, FOLLONI, 2016; DIETZ *et al.*, 2020).

Ressalta-se que, devido à ocorrência destas múltiplas interações, a ordenação estrutural dos elementos é dinâmica e a característica do sistema emerge destas relações e influências existentes entre os seus componentes. Nas palavras de Folloni (2016, p.39), “[...] a ordenação pode ser mais ou menos instável, dinâmica, dando lugar à desorganização às quais se seguirão novas ordenações em novas

configurações e assim por diante [...]”, permitindo, assim, que o sistema se auto-organize de maneira imprevisível e descentralizada. Neste sentido, sob a ótica do paradigma da complexidade, os sistemas complexos apresentam uma dinâmica de interações não-lineares entre os agentes que os compõem e entre estes agentes e o seu ambiente de inserção (BUSCHBACHER, 2014).

O comportamento caótico² apresentado por muitos sistemas complexos dinâmicos decorre da imprevisibilidade do seu comportamento diante de algumas mudanças que afetam a sua estrutura inicial e, portanto, as inter-relações existentes entre seus componentes (FOLLONI, 2016). Este comportamento caótico pode persistir por médio ou longo prazo, no qual o sistema vai acumulando fragilidades, podendo colapsar-se e transformar-se em um sistema com características diferentes das iniciais (HOLLING, GUNDERSON; 2002). Neste caso, o sistema fica sujeito a um novo regime que altera o seu comportamento inicial (BUSCHBACHER, 2014).

Perturbações não necessariamente desestabilizam a estrutura do sistema e, por muitas vezes, se fazem necessárias para que haja a manutenção do regime do sistema, apenas gerando alterações em seu estado (FOLLONI, 2016). Portanto, dentre as características principais de sistemas dinâmicos complexos e que constituem a noção de complexidade, tem-se: a unidade entre os agentes que o compõem, a hierarquia e ordenação entre estes agentes, as relações de não-linearidade, a capacidade de auto-organização e a emergência (MEADOWS, 2009, BUSCHBACHER, 2014, FOLLONI, 2016).

A capacidade de auto-organização do sistema é resultado da causalidade não linear e recursividade, baseada em mecanismos de *feedbacks* entre as partes do sistema e entre o sistema e suas partes, em uma intensa troca de informações e de interações, promovendo uma cadeia de organização em diferentes níveis (FOLKE, 2006; MILLER; PAGE, 2007; VON BERTALANFFY, 2010; BUSCHBACHER, 2014; RAND, 2015; FOLLONI, 2016; DIETZ *et al.*, 2020). A recursividade pode ser entendida aqui como um fenômeno característico que ocorre nos sistemas dinâmicos, nos quais

² O comportamento caótico não deve ser entendido como um conceito equivalente à desordem, mas por se tratarem de sistema dissipativos – abertos - e, portanto, não manterem a sua energia conservada ao longo do tempo, os sistemas complexos não possuem equilíbrio estático e são dotados de certa aleatoriedade em decorrência da sua não-linearidade e da recursividade existente entre os elementos que os compõem (VON BERTALANFFY, 2010; FURTADO; SAKOWSKI; TÓVOLI, 2015; FOLLONI, 2016; DIETZ *et al.*, 2020).

o agente de determinada ação também é o seu receptor. Devido a esta característica, os elementos de um sistema atuam cumprindo diferentes papéis e funções nos mecanismos de *feedbacks*, ora como agente ora como paciente. Cabe ressaltar que o fenômeno de recursividade também está relacionado, portanto, à capacidade de auto-organização do sistema.

Folloni (2016) explica que a auto-organização consiste em uma rede de produção de processos e de componentes que garantem tanto o funcionamento quanto as características próprias do sistema. Segundo o autor, isto ocorre devido às interações e às transformações de estado que ocorrem com o sistema e que acabam atuando na manutenção das relações que garantem estes processos de produção. Em acréscimo, Ashby (1971) argumenta que a relação entre dois agentes que compõem o sistema é importante para que seja possível o alcance de um “terceiro estado”, referindo-se às relações sinérgicas de composição de um sistema. Desta maneira, segundo o autor, a condicionalidade torna-se uma premissa básica para que haja a auto-organização do sistema, delimitando as coerções no sistema, nos quais determinadas interações acabam se sobrepondo a outras.

Entende-se, portanto, que os sistemas dinâmicos complexos possuem certa autonomia por possuírem a capacidade de se auto-organizarem (BUSCHBACHER, 2014; MORIN, 2015; FOLLONI, 2016). Esta autonomia não deve ser interpretada como independência do sistema com relação às suas externalidades ou influências de estado, mas sim com relação ao fato de que estes sistemas subordinam as mudanças e os processos os quais passam à manutenção de sua própria organização e, portanto, está relacionada também à sua capacidade de auto-organizar-se (MORIN, 2015; FOLLONI, 2016).

Diante do exposto, a funcionalidade e característica do sistema, assim como a sua capacidade de auto-organização, denotam outra característica extremamente importante dos sistemas complexos dinâmicos: a hierarquia entre os seus elementos. Meadows (2009) afirma que a relação hierárquica existente no sistema é de suma importância para manter as características e funções do próprio sistema, de maneira que “ [...] deve haver controle central suficiente para alcançar a coordenação em direção ao objetivo do grande sistema, e autonomia suficiente para manter todos os subsistemas florescendo, funcionando e se auto-organizando [...]” (MEADOWS, 2009, tradução livre).

Assim, parafraseando Morin (2015), a complexidade ao mesmo tempo em que diz respeito à lógica, em virtude da existência de certa ordenação e hierarquização entre os componentes de um sistema, diz respeito, também, às suas incertezas estruturais, devido à imprevisibilidade existente na aleatoriedade das relações de *feedback* entre os diversos componentes do sistema. Por fim, ao teorizar sobre os Sistemas Dinâmicos Complexos, Folloni (2016, p.40) explica:

“[...] Sistemas complexos não são absolutamente desordenados, mas também não são rigidamente organizados. Apresentam flexibilidade e, em muitos casos, capacidade de adaptação. É essa espécie de beirada, de borda, bastante tênue, que se posta no meio, entre a ordem e o caos, a região conhecida como “complexidade”. Um sistema bastante rígido e ordenado pode ir se tornando mais flexível e dinâmico até um momento em que cai no comportamento caótico. Essa beirada que separa a ordem do caos, esse ponto em que, caso avance um pouco mais, o sistema se desintegrará ou enfrentará uma mudança catastrófica de fase, esse ponto de equilíbrio cujo rompimento levará ao caos e diante do qual um recrudescimento provocará rigidez, é o ponto da complexidade [...]” (FOLLONI, 2016, p. 40).

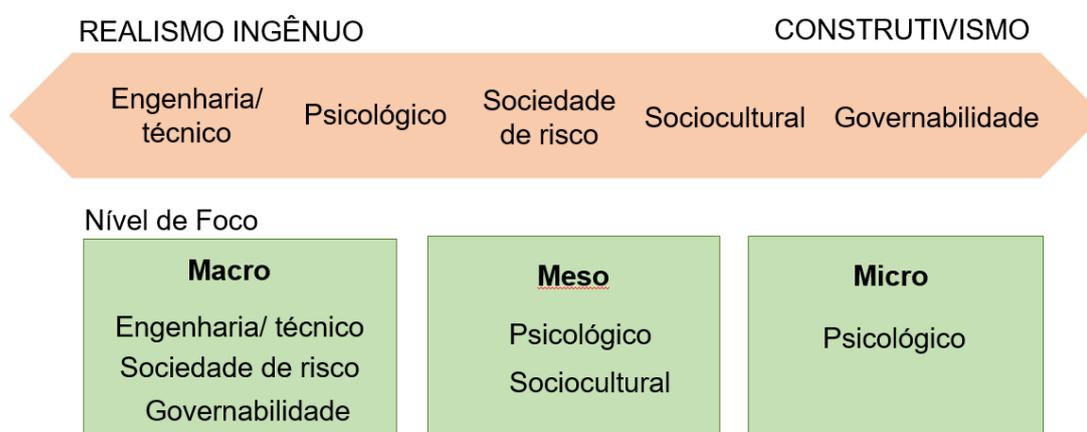
3.2 O CONCEITO DE RESILIÊNCIA SOB A ABORDAGEM DOS SISTEMAS COMPLEXOS DINÂMICOS

Ao mesmo tempo em que foi ocorrendo o desenvolvimento do pensamento sistêmico enquanto resposta aos problemas relacionados ao pragmatismo reducionista, o conceito de resiliência foi ganhando notoriedade em meados de 1960, a partir do desdobramento do estudo de sistemas (BUSCHBACHER, 2014), e adquirindo múltiplas interpretações no meio científico (MEADOWS, 2009; DAVOUDI *et al.*, 2012).

Deste então, este conceito tem sido aplicado em diversas áreas, tais como psicologia/psiquiatria (CHALVIN; LEJOYEUX, 2020), sistemas socioecológicos (FOLKE, 2006; BLANCHARD; DURUSSEL; BOTELER, 2019; ZAMORA-MALDONADO *et al.*, 2021), gestão e economia (STANLEY, 2020; UTAMI; SANTOSA; LEILA, 2021, VOLKOV *et al.*, 2021), redes e infraestrutura (JIN *et al.*, 2014, LI; GAO, 2021, MOTTAHEDI *et al.*, 2021), entre outros.

Ainda, ao abordar os diferentes vieses da resiliência (Figura 3), Kosovac e Logan (2021) discutem as diversas implicações que esta variabilidade conceitual traz para as noções de riscos. Os autores também tratam o conceito de resiliência como um conceito relativo, uma vez que, por ser definido majoritariamente como um estado desejável de um sistema, o termo pode carregar consigo certa subjetividade.

Figura 3- Fundamentos epistemológicos e nível de foco dos diferentes vieses da resiliência



Fonte: Modificado de Kosovac e Logan (2021, p.255, tradução livre).

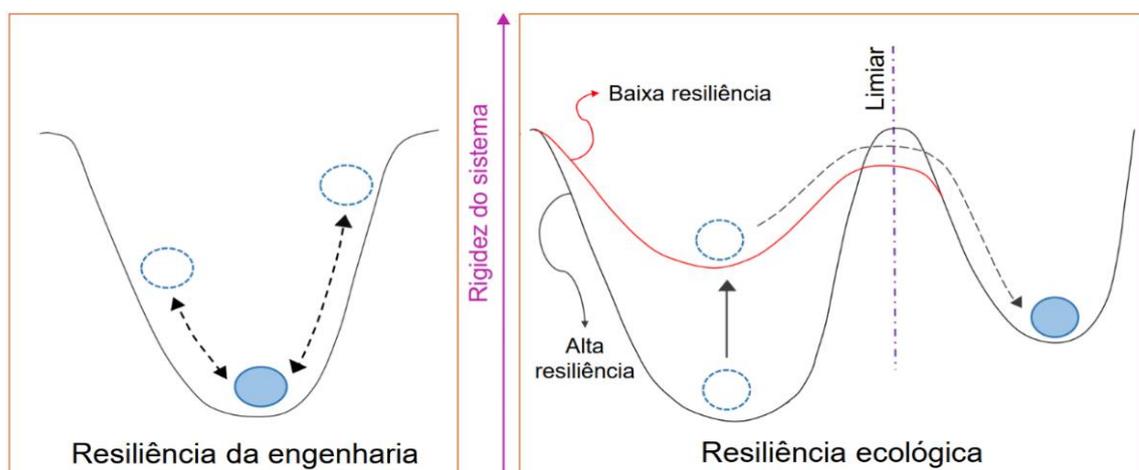
Devido a esta ampla aplicação do termo, existem diversas definições conceituais específicas aplicadas ao termo resiliência e que podem gerar conflitos entre si, uma vez que são dependentes do seu contexto de inserção e acabam tendo uso limitado à sua respectiva disciplina (DESSAVRE; RAMIREZ-MARQUEZ; BARKER, 2016).

De maneira geral e sob a ótica da dinâmica de sistemas, este conceito é utilizado de maneira técnica e restrita para referir-se ao retorno do sistema a um ponto/estado de equilíbrio anterior à influência de uma perturbação (FOLKE, 2006; FOLKE *et al.*, 2010). Porém, conforme dito anteriormente, os sistemas dinâmicos complexos possuem a complexidade como característica dos padrões que compõem a sua estrutura e, sendo assim, possuem diversos elementos que interagem de maneira ordenada e desordenada.

Diante do exposto, a compreensão do conceito de resiliência requer o entendimento de como esta abordagem foi desenvolvida no estudo de sistemas, para que então seja estabelecido o recorte conceitual a ser utilizado na análise desenvolvida ao longo desta dissertação. Holling (1973) foi o precursor a teorizar o

conceito de resiliência (RODRIGUES; VANNUCCHI; LUZZI, 2020) e ao desenvolvê-lo separou este conceito em dois tipos: a “resiliência de engenharia” e a “resiliência ecológica” (HOLLING, 1973, 1996; HOLLING; GUNDERSON, 2002), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4- Tipos de resiliência segundo Von Bertalanffy



Fonte: Elaboração própria, baseado em Holling e Gunderson (2002); Falkenmark; Wang-Erlandsson; Rockström (2019); Kombiadou *et al.* (2019).

Na resiliência de engenharia, a resiliência é compreendida como a capacidade de um sistema em retornar ao seu estado estacionário – de equilíbrio – após uma perturbação (HOLLING, 1996). Folke (2006) e Davoudi *et al.* (2012) explicam que, neste sentido, a resiliência é a resistência à perturbação e diz respeito à velocidade com que o sistema retorna ao seu estado de equilíbrio, sendo assim, quanto mais rápido um sistema retorna a este estado, maior a sua resiliência e, portanto, este tempo de retorno está estreitamente relacionado à eficiência, constância e previsibilidade do sistema com relação à sua própria resiliência.

Esta previsibilidade denota o comportamento de um sistema linear ou, no caso desta previsibilidade ser alcançada em um sistema não-linear, este sistema está nas imediações de sua estabilidade, cuja aproximação linear é passível de ser realizada, resultante de uma dinâmica lenta (LUDWIG *et al.*, 1997). Assim, basicamente, o conceito de resiliência de engenharia caracteriza-se como uma resiliência estática, sendo esta “[...] a capacidade do sistema de saltar para o seu estado anterior [...]” (MEEROW; NEWELL, 2016, p. 311).

No léxico de Holling (1996, p. 33, tradução livre), a resiliência ecológica pode ser explicada como “[...] a magnitude da perturbação que pode ser absorvida antes do sistema mudar a sua estrutura [...]”, podendo ser compreendida não somente como a quantidade de perturbação que um sistema tolera e, ao mesmo tempo, mantém sua estrutura e funções iniciais; mas, também, como “[...] o tempo com que o sistema leva para recuperar-se dentro de limites críticos [...]” (DAVOUDI *et al.*, 2012, p. 300, tradução livre); cujas qualidades principais são a complexidade e a capacidade de adaptação (BUSCHBACHER, 2014). Deste modo, a dinâmica da resiliência ecológica consiste na continuidade das “funções-chave” do ecossistema quando sujeito a qualquer tipo de perturbação (MEEROW; NEWELL, 2016).

Davoudi *et al.* (2012) explicam que a diferença entre os dois tipos conceituais expostos por Holling consiste no fato de que no processo de resiliência ecológica não existe um único equilíbrio estável, pelo contrário, é reconhecido a existência de múltiplos equilíbrios, assim como, também, a possibilidade de os sistemas entrarem em “domínios alternativos de estabilidade” até atingirem seus respectivos pontos de ruptura.

Esta situação denota que, longe de ser um processo estático, a resiliência é um processo dinâmico (FOLKE, 2006; FRANCIS; BEKERA, 2014; LABAKA; HERNANTES; SARRIEGI, 2015). Assim, a partir do entendimento de que a resiliência dos sistemas complexos é dinâmica e fundamentada nas ideias de limites e mudanças, faz-se necessária a compreensão dos conceitos de estado e regime para uma melhor definição sobre o tema (BUSCHBACHER, 2014). O *estado* de um sistema complexo diz respeito às suas características específicas em determinado momento, enquanto que *regime* concerne às características estruturais diretamente ligadas aos papéis e funções desempenhados pelo próprio sistema (BUSCHBACHER, 2014; PARK; RAO, 2014).

Park e Rao (2014) explicam que a alteração do regime de um sistema complexo é regularmente ocasionada por eventos estocásticos externos ou motivadores, que para fins de entendimentos desta dissertação serão chamados apenas de perturbação. Portanto, a resiliência de um sistema dinâmico complexo consiste na sua capacidade de suportar mudanças de estado, ocasionadas por perturbações, dentro dos limites impostos pelas características que integram o seu regime e, portanto, sem

perder a sua funcionalidade e os papéis que exerce como um todo (BUSCHBACHER, 2014; BALVANERA *et al.*, 2017; RODINA, 2019).

Ao pesquisar sobre a robustez de sistemas socioecológicos e com o intuito de identificar suas potenciais vulnerabilidades frente a distúrbios, Anderies, Janssen e Ostrom (2004) conceituam o termo robustez ao se referirem à capacidade de manutenção destes sistemas com relação a algumas características desejadas, ainda que estejam sujeitos a flutuações no comportamento entre seus elementos e/ou no seu ambiente de inserção. Folke (2006) faz um adendo, afirmando que a resiliência não consiste somente na robustez de um sistema perante uma perturbação, mas inclui também a possibilidade de recombinação entre os seus elementos, permitindo a sua adaptação e viabilizando a capacidade adaptativa do sistema.

Desta maneira, destaca-se o Quadro 1 no que se refere às principais diferenças conceituais sobre a definição do termo de resiliência:

Quadro 1- Diferentes conceitos sobre a resiliência

Resiliência	Características	Enfoque	Contexto
Resiliência da Engenharia	Tempo de retorno, eficiência	Recuperação, constância	Proximidade de um limite estável
Resiliência ecológica/ecossistêmica	Capacidade tampão, resistência ao choque, função de manutenção	Persistência, robustez	Equilíbrios múltiplos, paisagens de estabilidade
Resiliência social			
Resiliência socioecológica	Distúrbio das interações e reorganização, sustentação e desenvolvimento	Capacidade adaptativa, transformabilidade, aprendizagem e inovação	<i>Feedback</i> do sistema integrado, interações dinâmicas em escalas transversais

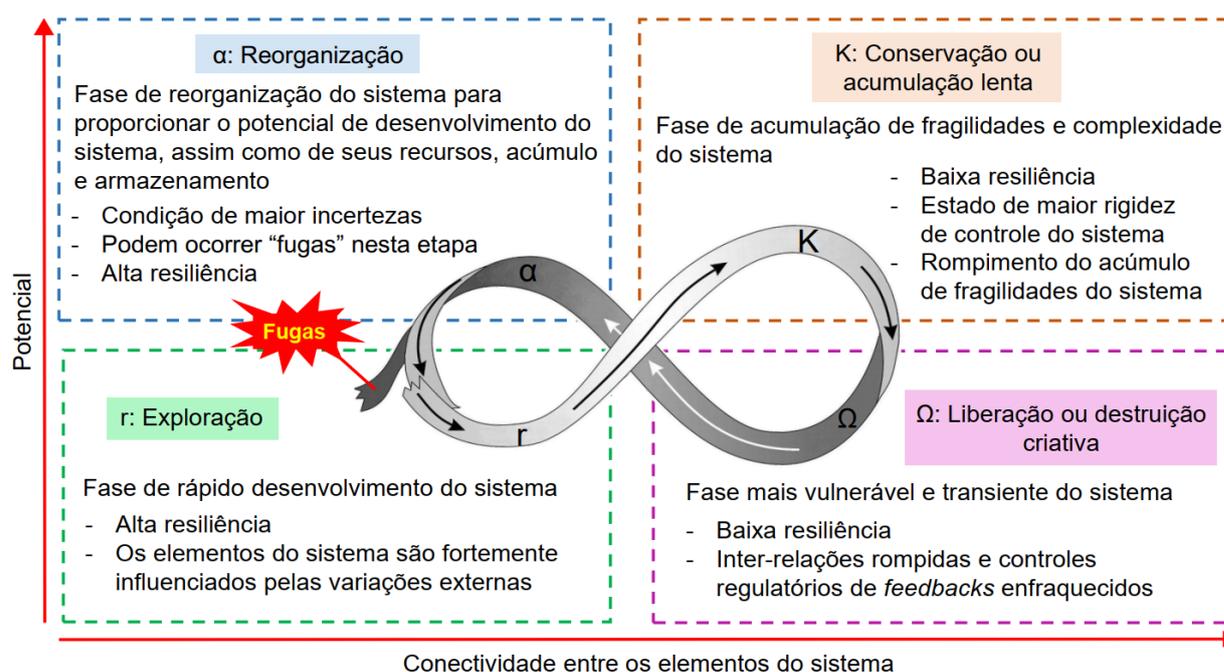
Fonte: Folke (2006, p.259, tradução livre)

Corroborando a ideia de que as características que garantem o regime do sistema são importantes ao se falar em resiliência, Buschbacher (2014) explica a transitoriedade inerente à estabilidade dos sistemas dinâmicos ao afirmar que o colapso e a reorganização são inevitáveis na constituição de um sistema; elucidando, ainda, a capacidade de amplificação do acúmulo de fragilidades sobre os efeitos resultantes do colapso e afirmando que, devido a estas características, o conceito de resiliência dialoga perfeitamente com as ideias de sistemas dinâmicos complexos.

Folke (2006) reconhece que este conceito tem avançado como consequência da evolução do entendimento de sistemas complexos adaptativos e das suas interações em escalas espaciais e temporais. Partindo do desenvolvimento dos ciclos adaptativos propostos por Holling (1986), até os conceitos mais recentes como o conceito de Panarquia (Gunderson e Holling, 2002) e de Holarquia³ (KOESTLER, 1989). Assim, a compreensão do que são ciclos adaptativos torna-se essencial para o entendimento do conceito de resiliência, uma vez que a resiliência é, em si, uma característica de sistemas complexos adaptativos⁴ (CARPENTER *et al.*, 2001).

Ciclos adaptativos referem-se ao padrão do comportamento da dinâmica de um sistema adaptativo complexo ao longo tempo com relação ao acúmulo de fragilidades gerados por perturbações, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Etapas do Ciclo Adaptativo



Fonte: Elaboração própria, baseado em Holling e Gunderson (2002) e Kombiadou *et al.* (2019).

³ O termo Holarquia é utilizado na descrição das relações existentes entre *hólons* e em como se dá a organização entre eles, uma organização que consiste em uma hierarquia aninhada. *Hólons*, no caso, são unidades completas, autossuficientes e que ao mesmo tempo fazem parte de um todo maior (KOESTLER, 1989).

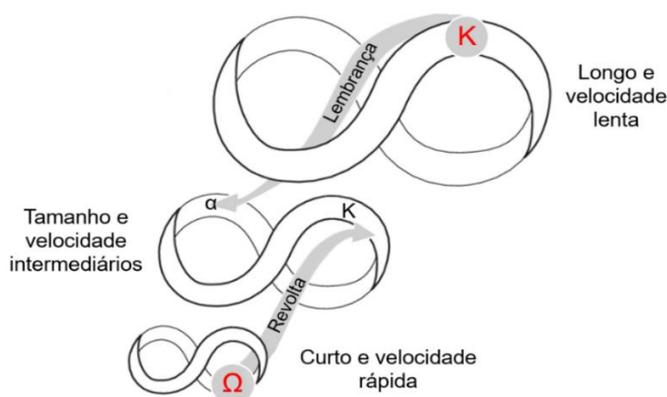
⁴ Ressalta-se que todos os sistemas adaptativos são sistemas dinâmicos complexos e apresentam todas as características esmiuçadas até o momento. Contudo, nem todo sistema complexo é adaptativo e os sistemas adaptativos complexos possuem algumas características específicas, que serão tratadas ao longo desta dissertação.

Na teoria dos ciclos adaptativos, os sistemas complexos dinâmicos (adaptativos) não tendem a uma configuração estática de equilíbrio, mas passam por quatro fases bastante características, em um curso contínuo de progressão (CARPENTER *et al.*, 2001; HOLLING e GUNDERSON, 2002; FOLKE, 2006; FOLKE *et al.*, 2010; DAVOUDI *et al.*, 2012; BUSCHBACHER, 2014): exploração (r); conservação ou acumulação lenta (K); liberação ou destruição criativa (Ω) e, por fim, a reorganização (α). Salienta-se que o curso de um ciclo adaptativo é representado por dois *loops* opostos, com períodos de transição entre as fases.

Nos ciclos adaptativos a fase r compreende um extenso período de crescimento gradual seguido de um período de mudança exponencial, no qual há disponibilidade de muitos recursos e alta resiliência do sistema. A fase K refere-se a períodos de maior conservação do sistema, caracterizado pela maior rigidez dos mecanismos de controle regulatório dos *feedbacks*. Nesta fase há um acúmulo de fragilidades e vulnerabilidades do sistema e um aumento da sua complexidade, devido ao excesso de conexões entre os elementos de sua composição. A fase seguinte, ômega (Ω), diz respeito à fase em que o sistema está mais vulnerável e já acumulou tantas fragilidades que entra em colapso devido alguma perturbação. Por fim, a fase alfa (α) concerne à reorganização do sistema, notadamente marcada por ser a sua condição de maior incerteza (CARPENTER *et al.*, 2001; HOLLING e GUNDERSON, 2002; FOLKE, 2006; FOLKE *et al.*, 2010; DAVOUDI *et al.*, 2012; BUSCHBACHER, 2014).

Já o conceito de Panarquia baseia-se no entendimento de uma dinâmica entre ciclos adaptativos e a hierarquia aninhada de sistemas em diferentes escalas e possuindo variados níveis de interação e de inter-relação (GUNDERSON e HOLLING, 2002; FOLKE, 2006; BUSCHBACHER, 2014), conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6- Ciclos adaptativos em Panarquia



Fonte: Adaptado de Gunderson e Holling (2002, p.75, tradução livre).

Assim, além das mudanças no sistema representado em menor escala serem particularmente mais rápidas, quando comparadas aos sistemas de maiores escalas, as mudanças ocorridas nos sistemas menores podem estimular mudanças no sistema maior (*revolta*), com maior rapidez que a sua reorganização (*lembrança*) (FOLKE, 2006; BUSCHBACHER, 2014). De qualquer maneira, a capacidade de reorganização de um sistema para determinado estado, após a ocorrência de um evento de perturbação, é dependente das influências exercidas pelos mecanismos de controle regulatório de suas alças de retroalimentação e das dinâmicas existentes no seu ambiente de inserção ao longo do tempo, pois são estes os parâmetros capazes de garantir a reorganização do sistema em escalas acima ou abaixo do seu atual estado de organização (FOLKE, 2006; BUSCHBACHER, 2014).

Neste sentido, o conceito de resiliência tem sido aplicado frente uma gama de contextos empíricos como uma maneira de pensar, uma abordagem teórica que orienta e organiza o pensamento em um sentido mais amplo, multi e interdisciplinar (FOLKE, 2006; MEEROW; NEWELL, 2016); tornando-se essencial no entendimento de como os sistemas complexos dinâmicos podem – ou não – persistir frente a perturbações e incertezas (DAVOUDI *et al.*, 2012).

3.3 ESTADOS ALTERNATIVOS E O PONTO CRÍTICO DO SISTEMA

Conforme visto anteriormente, o regime de um sistema corresponde às características estruturais de um sistema, sendo, portanto, responsável por garantir as funções e os papéis desempenhados por este sistema (BUSCHBACHER, 2014;

PARK; RAO, 2014). Park e Rao (2014, p.112, tradução livre) definem o regime como “[...] uma região no espaço-estado no qual um sistema complexo retém os mesmos atributos, como estrutura, funções e *feedbacks* [...]”. Portanto, compreende-se que, se por um lado a estruturação de um sistema e, portanto, as alças de retroalimentação que o compõem, garantem o funcionamento do próprio sistema e, conseqüentemente, configuram o seu regime; por outro, o regime atua na manutenção desta estruturação e da performance destas alças de retroalimentação.

Sob a abordagem dos sistemas complexos, este conjunto de comportamentos característicos nos quais um sistema dinâmico possui um comportamento transitório, e no qual o estado de equilíbrio do sistema se define em determinado tempo, é denominado de *atrator*, independente do seu ponto inicial a ser considerado em determinada análise (SCHEFFER *et al.*, 2001; PARK; RAO, 2014).

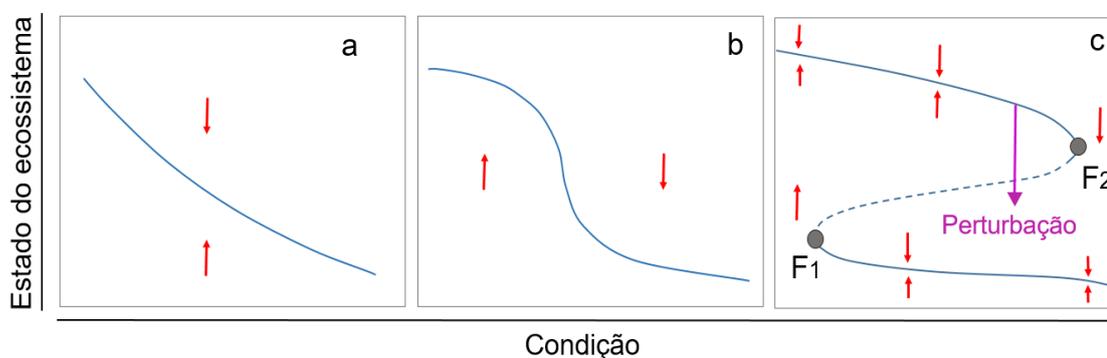
No caso, ao passo em que os sistemas complexos dinâmicos possuem diversos atratores, estes atratores possuem múltiplos elementos repelentes e atuam como um limite na delimitação de sua(s) bacia(s) de atração (SCHEFFER *et al.*, 2001; PARK; RAO, 2014). Se um destes elementos repelentes encontra condições de afetar e ultrapassar o limite disposto pelos atratores do sistema, eles tornam-se capazes de conduzir este sistema a uma mudança de regime e, portanto, podem atuar como *drivers externos* (WALKER *et al.*, 2012; PARK; RAO, 2014).

Alguns autores utilizam o termo bacia de atração (*basin of attraction*, tradução livre) ao referirem-se a região do espaço-estado no qual o sistema tende a permanecer, considerando todas as combinações e inter-relações possíveis entre os elementos que compõem este sistema e que o configuram (SCHEFFER *et al.*, 2001; WALKER *et al.*, 2004; PARK; RAO, 2014). Segundo Walker *et al.* (2004, p.3, tradução livre), “[...] para sistemas que tendem ao equilíbrio, o estado de equilíbrio é definido como um atrator e a bacia de atração constitui todas as condições iniciais que tenderão a este estado de equilíbrio [...]”.

Salienta-se, aqui, que o sistema é estruturado por processos dinâmicos completamente distintos, em diferentes níveis e que interagem entre si (MEADOWS, 2009). As características estruturantes são peculiares a cada sistema, que possui um comportamento próprio na resposta quando cruzam com estes “elementos repelentes”.

Ao discutirem padrões emergentes de ecossistemas sob mudanças de maiores escalas, Scheffer *et al.* (2001) explicam a diferença no comportamento do equilíbrio dinâmico de diferentes sistemas que possuem uma ou mais bacias de atração: i) podem possuir uma resposta mais suave e de tendência contínua; ii) podem ser bastante inertes, ou; iii) podem possuir mais de um estado alternativo – em um fenômeno conhecido como histerese, no qual o seu comportamento oscila “para frente” e “para trás” sob uma condição crítica (Figura 7).

Figura 7 - Possíveis estados de equilíbrio



Fonte: Alterado de Scheffer *et al.* (2001)⁵.

Quando o sistema possui mais de um estado alternativo, a transição de um estado para outro não ocorre suavemente, conforme mostrado na Figura 7c pelas linhas tracejadas. Os autores, Scheffer *et al.* (2001), explicam que a presença de múltiplos estados alternativos em um sistema ambiental tem implicações consideráveis, sobretudo, preocupantes, com relação a sua capacidade de resposta às mudanças ambientais, uma vez que restaurar as condições ambientais iniciais, antes da perturbação e do colapso do sistema (F2), não é suficiente para induzir a volta deste sistema para o seu estado anterior.

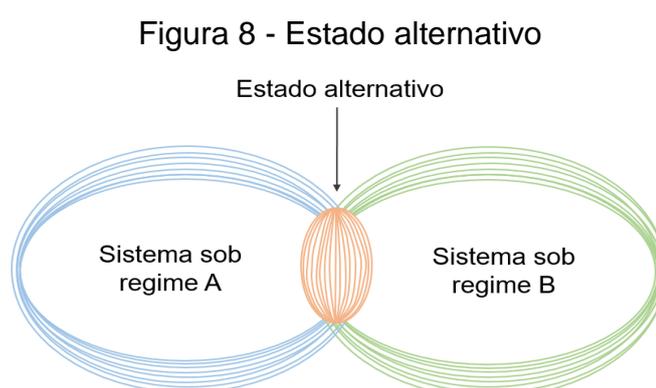
As mudanças capazes de alterar o regime de um sistema são comumente ocasionadas por eventos estocásticos externos ou motivadores (PARK; RAO, 2014). Os eventos estocásticos são aqueles que acabam conduzindo a mudança no sistema complexo em direção a um estado alternativo por meio da atuação do repelente,

⁵ Os autores explicam que há apenas um equilíbrio para cada condição, em a e b. Contudo, quando a curva de equilíbrio do sistema movimenta-se “para trás” e “para frente”, como ilustrado na figura c, é possível identificar três condições de equilíbrio, no qual a condição intermediária, representada pelo trecho tracejado, é a mais instável e indica um estado fronteiro entre duas bacias de atração dos estados estáveis alternativos nos ramos superior e inferior, cujo regime é diferente.

possuindo como característica a sua inconstância, o comportamento aleatório e a composição formada por variáveis rápidas (PARK; RAO, 2014). Já as mudanças conduzidas por motivadores, conhecidas por variáveis controladoras externas (*drivers externos*), alteram o comportamento do sistema de maneira gradual e, portanto, mais lenta, resultando em uma conseqüente mudança paulatina do regime deste sistema (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009; WALKER *et al.*, 2012).

Ressalta-se, porém, que existem variáveis controladoras externas e internas. Assim, as mudanças no regime de um sistema podem ocorrer também em função de alterações provocadas nas variáveis controladoras internas, que atuam de maneira mais rápidas e acabam desencadeando novas inter-relações e enfraquecendo as alças de retroalimentação que estruturam o sistema, causando a alteração do regime (SCHEFFER *et al.*, 2001).

Quando uma variável controladora atinge o valor crítico, o regime original do sistema dinâmico é alterado e o sistema se encontra em um estado alternativo e, portanto, suas características estruturantes iniciais e suas funções não são mais as mesmas. Desta forma, o sistema complexo está sujeito a um novo regime, ainda que transiente, porque este é o único regime que lhe oferece condições de uma estruturação transitória característica de um estado aleatório (SCHEFFER *et al.*, 2001; PARK; RAO, 2014). Conforme apresentado na Figura 8.



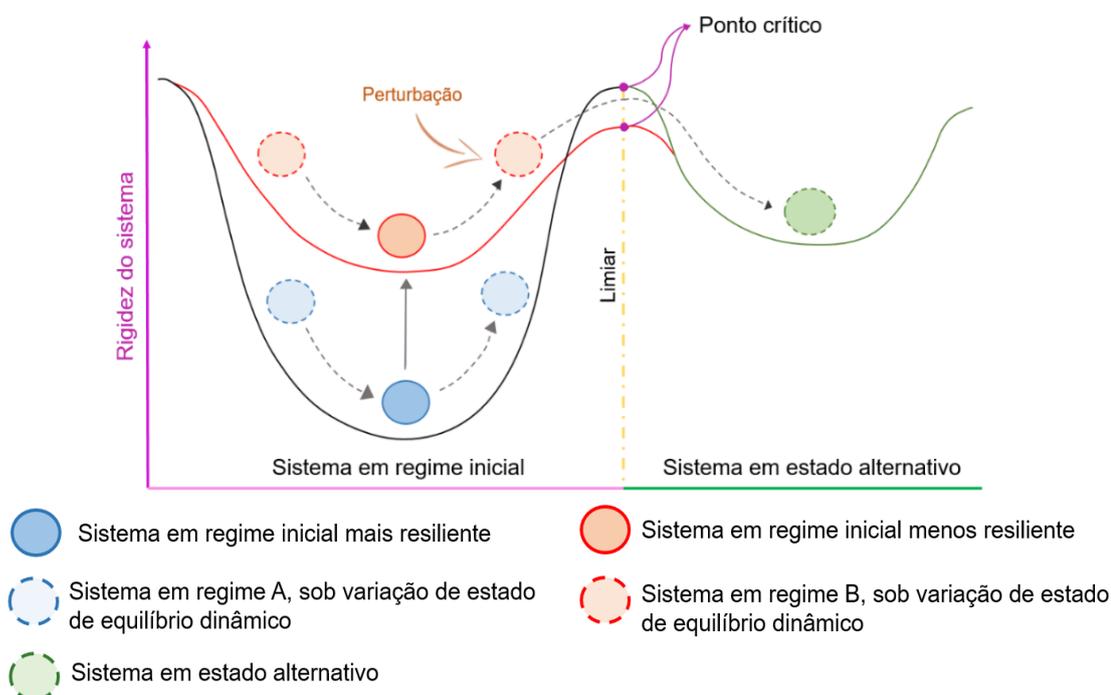
Fonte: Elaboração própria, baseado em Park e Rao (2014).

Se um sistema dinâmico está sujeito há apenas uma bacia de atração, a tendência é que o sistema volte ao mesmo estado anterior ao evento de perturbação. Contudo, se o sistema estiver sujeito a múltiplas bacias de atração e, portanto, se houver tendência a estados estáveis alternativos neste sistema, a ocorrência de uma

perturbação suficientemente enérgica do estado do ecossistema pode trazer o sistema para a bacia de atração de outro estado dinâmico de equilíbrio (SCHEFFER *et al.*, 2001). Portanto, a probabilidade de que esta mudança de regime aconteça depende não somente da perturbação e de sua potência, mas também do tamanho da bacia de atração e da energia envolvida.

Para facilitar o entendimento do que foi tratado até aqui, a literatura científica trata a questão da resiliência dos sistemas dinâmicos complexos, sobretudo aqueles ecológicos e/ou socioecológicos, sob um viés determinista, em que o sistema analisado apresenta um ponto crítico⁶ que, se ultrapassado, desencadeia as mudanças do regime deste sistema (SCHEFFER *et al.*, 2001; ROCKSTRÖM *et al.*, 2009). No caso, se um sistema em estado de estabilidade dinâmica sofre uma perturbação suficientemente intensa a ponto de conduzir o seu comportamento de maneira que ele ultrapasse o seu ponto crítico e, portanto, assumindo um estado alternativo transiente sob outro regime, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Estados alternativos e Ponto Crítico



Fonte: Elaboração própria, baseado em Holling e Gunderson (2002); Falkenmark; Wang-Erlandsson; Rockström (2019); Kombiadou *et al.* (2019).

⁶ O ponto crítico também é conhecido como ponto de bifurcação, conforme exposto por Park e Rao (2014). Os autores explicam que sob uma perspectiva determinística “[...] os atratores são considerados estacionários, com sua “força” mudando lentamente com as mudanças nos drivers [...]”, conforme ilustrado na Figura 8.

Seguindo o conceito proposto por Holling (1973, p.17, tradução livre), “[...] a resiliência determina a persistência de relacionamentos dentro de um sistema e é uma medida da capacidade desses sistemas em absorver as mudanças das variáveis de estado, variáveis controladoras, e parâmetros [...]”. Compreende-se, portanto, que a resiliência diz respeito a profundidade de uma bacia de atração (Figura 9), que delimita os limites de comportamento do sistema diante de uma perturbação antes que o sistema atinja um estado alternativo (SCHEFFER *et al.*, 2001; WALKER *et al.*, 2004; PARK; RAO, 2014).

Em acréscimo, Scheffer *et al.* (2001) explicam que, apesar do fato de que as condições que possuem a capacidade de causar alterações graduais sobre o sistema terem pouco efeito sobre o estado de um sistema dinâmico complexo, possuidor de múltiplos estados estáveis, estas condições possuem o potencial de diminuir a profundidade da bacia de atração, o que implica na perda da resiliência deste sistema e no aumento da rigidez entre os controladores das alças de retroalimentação. Conseqüentemente, esta perda da resiliência implica em uma maior fragilidade do sistema diante de eventos estocásticos.

Em acréscimo, ao estudarem sobre pontos de inflexão e mudanças de regime de sistemas forçados periodicamente, nos quais as mudanças dinâmicas abruptas de transição crítica não ocorrem entre os estados estacionários, mas sim entre os estados oscilantes (ciclos limites), Medeiros *et al.* (2017) explicam um comportamento importante sobre o colapso de sistemas: a existência de uma zona de transição em que há características e propriedades residuais do sistema em seus ciclos limites destruídos. Segundo os autores, esta característica resulta na suavização da transição crítica e, portanto, este comportamento provoca um *delay* entre o comportamento do sistema em seu estado real e o estado percebido.

Por fim, ressalta-se que os sistemas dinâmicos complexos são frequentemente caracterizados tanto pela presença de alças de retroalimentação internas positivas e negativas e quanto por seu comportamento responsivo não estacionário, e conseqüentemente incerto, quando submetido ação de um forçante externo (HASTINGS; WYSHAM, 2010). Neste sentido, Park e Rao (2014) explicam que nem sempre as mudanças de regime de um sistema ocorrem de forma determinística e, portanto, não há um valor crítico fixo a ser estabelecido, uma vez que há competição entre os forçantes. Assim, esta não estacionariedade introduz incertezas na previsão

de mudanças de regime, que podem acontecer mesmo quando a resiliência do sistema é percebida com maior potencial de absorver determinado impacto/choque diante de um evento de perturbação que gere este impacto (PARK; RAO, 2014).

3.4 A RESILIÊNCIA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO COMO UM PROCESSO COMPLEXO

A resiliência do sistema de abastecimento pode ser entendida como a capacidade do sistema relacionado à distribuição de água em suportar eventos de perturbação que sejam capazes de provocar o seu colapso (RODINA, 2019) e, portanto, capazes de comprometer tanto as suas características infraestruturais como as suas funções ecológicas e sociais. Neste sentido, a resiliência dos sistemas de abastecimento está estreitamente relacionada, também, à sua capacidade de adaptação a novos regimes hidrológicos, resultantes das mudanças climáticas e que acabam atuando como um condicionante adicional na resiliência (FOLKE, 2016, MEEROW; NEWELL, 2016).

Além do mais, a resiliência do sistema de abastecimento de água é dependente de sua própria estruturação e, portanto, de suas próprias características. Isto significa dizer que diversos sistemas quando sujeitos a uma quantidade de distúrbio e, portanto, a um recorte padronizado de perturbação, podem responder de diferentes maneiras diante desta ocorrência, tanto no que diz respeito ao seu processo de resiliência ou ao seu processo de entrar em colapso (LIU, 2019). Hwang, Forrester e Lansey (2014) afirmam que enquanto o tempo de recuperação do sistema de abastecimento está relacionado tanto à quantidade e qualidade de água disponível quanto com a rapidez do seu tempo de resposta, a robustez e a redundância deste sistema estão relacionadas à magnitude da perda de sua funcionalidade frente ao evento crítico, no caso, à perturbação.

Apesar do crescente foco no conceito de resiliência sobre os sistemas hídricos nos últimos anos, a literatura científica com relação à resiliência dos sistemas relacionados à água continua bastante fragmentada (RODINA, 2019), na qual os gestores de políticas públicas e estudiosos continuam a discutir e a elaborar constantemente sobre o tema, em busca de uma conciliação entre os debates

epistemológicos, ontológicos e normativos relacionados à estruturação deste conceito (DAVOUDI *et al.*, 2012; OLSSON *et al.*, 2015).

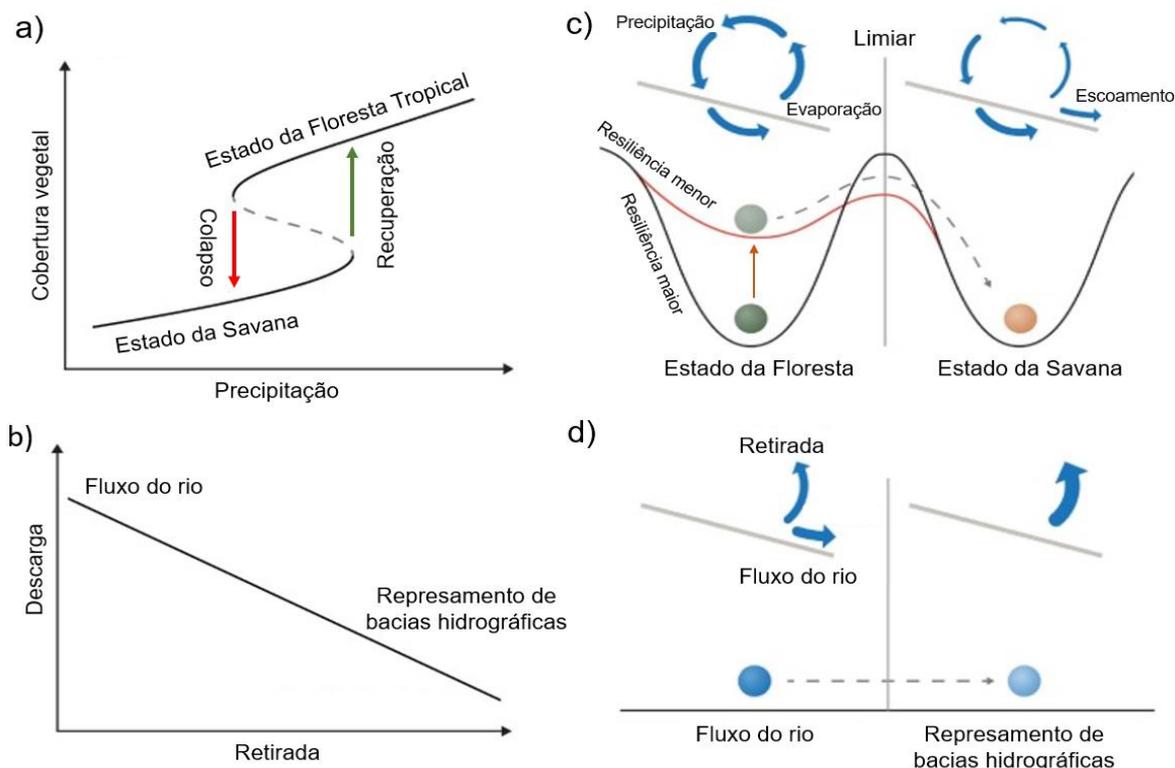
Neste sentido, muitos trabalhos têm sido publicados visando o desenvolvimento de ferramentas analíticas com o intuito de avaliar quantitativamente a resiliência das infraestruturas relacionadas à rede de abastecimento de água, por auxiliarem no processo de tomada de decisão (KLISE *et al.*, 2017; RYU; PARK, 2018), incluindo sistemas de reuso (LEE *et al.*, 2018). Outros autores também sugerem métricas de resiliência utilizando diferentes indicadores e/ou técnicas de modelagem para serem aplicadas às funções que perpassam a engenharia e podem ser utilizadas em outras áreas (MILMAN; SHORT, 2008; ZAMBRANO; PACHECO-MUÑOZ; FERNÁNDEZ, 2017; ZHAO; LIU; ZHUO, 2017; HUANG; LING, 2018; ZHAO *et al.*, 2018; JOANNOU *et al.*, 2019).

Ainda, diversas publicações referem-se a procedimentos metodológicos, cujas propostas concernem à avaliação quantitativa da resiliência, baseando-se na análise das características da rede de distribuição (MENG *et al.*, 2018; LIU; SONG; OUYANG, 2020). Outros ainda abordam o tema da resiliência hídrica de maneira qualitativa em junção com algum outro elemento específico, como mudanças climáticas, vegetação em áreas ripárias, entre outros (ATTANASIO *et al.*, 2013).

Em suma, o colapso pode ocorrer de duas formas: 1) colapso não linear e 2) colapso linear (FALKENMARK; WANG-ERLANDSSON; ROCKSTRÖM, 2019). O colapso não-linear é caracterizado como aquele em que o sistema passa por uma mudança de estado, saindo de um estado inicial de equilíbrio dinâmico, no qual há presença de alças de retroalimentação negativas que garantem o balanceamento das relações; para outro com muitas alças de retroalimentação positivas, que reforçam a imprevisibilidade de seus agentes devido aos efeitos de histerese. Já o colapso linear é aquele em que as propriedades da água sofrem mudanças sucessivas e capazes de provocarem alteração de estado do sistema; contudo, por não serem capazes de provocar alteração da dinâmica de retroalimentação entre os agentes, possui um efeito de histerese limitado ou nulo (FALKENMARK; WANG-ERLANDSSON; ROCKSTRÖM, 2019).

Falkenmark, Wang-Erlandsson e Rockström (2019) elucidam os tipos de colapso ao exemplificarem os serviços de provisão e regulação envolvendo a água enquanto recurso, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10- Exemplificação dos dois tipos de colapso



Fonte: Falkenmark; Wang-Erlandsson; Rockström (2019, tradução livre).

Os itens (a, b) expressam a dinâmica de inclinação não-linear na exemplificação de um processo de savanização, no qual há um processo irreversível de uma floresta tropical para a formação vegetal caracterizada como savana. Os autores explicam que com o aumento do desmatamento da floresta tropical, há uma redução considerável da resiliência do ecossistema como resultado da diminuição da reciclagem da umidade e do fluxo de precipitação, até que o sistema entra em colapso e adquire uma nova configuração, no caso, de uma vegetação tipo savana.

Nota-se que nestas curvas, o sistema pode ter dois estados para um mesmo nível de estresse, efeito mencionado anteriormente e conhecido como histerese (BUSCHBACHER, 2014). Portanto, salienta-se que no meio ambiente o efeito de histerese apesar de indicar um novo regime, possui característica de transição. Já os itens (c, d) apresentam o tipo de colapso linear em que há uma diminuição dos fluxos fluviais com o represamento da bacia (FALKENMARK; WANG-ERLANDSSON; ROCKSTRÖM, 2019).

Diante do exposto, portanto, a resiliência do sistema de abastecimento pode ser entendida como uma função da perda de sua funcionalidade em distribuir água em quantidade e em qualidade para os seus diferentes usuários, diante de condições críticas diversas e, por isto, a compreensão das interações entre os seus elementos e outros fatores que o influenciam torna-se tão importante na manutenção e garantia de seus serviços (Figura 11).

Figura 11 - Tripé da resiliência do sistema de abastecimento de água



Fonte: Elaboração própria, baseado em Hwang, Forrester e Lansey (2014) Ryu; Park (2018); KLISE *et al.*, 2017 (RODINA, 2019). Falkenmark, Wang-Erlandsson e Rockström (2019).

3.5 A RESILIÊNCIA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO SOB A PERSPECTIVA DE SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS E SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

Sob a ótica sistêmica, é possível perceber que mesmo quando se trata de uma análise sobre as questões infraestruturais do sistema de abastecimento e sua resistência⁷, esta análise dificilmente se limita a tais elementos. Isto acontece porque o sistema de abastecimento de água está inserido em um contexto de sistemas socioecológicos (SSE), que são caracterizados pela integração entre ecossistemas e sociedades humanas (FOLKE *et al.*, 2010).

⁷ Para não gerar confusão entre os termos utilizados, nesta dissertação o termo resistência será utilizado em referência à resiliência da infraestrutura em abastecimento, tal qual comentada por Bertalanffy.

Assim, a partir do entendimento de que a água disponível para abastecimento não depende somente da infraestrutura do sistema de abastecimento em si, a resiliência pode ser definida como o papel da água na manutenção e na função de salvaguardar condições específicas do seu SSE de inserção. Desta maneira, inclui-se desde a garantia do funcionamento dos ecossistemas até a estabilidade dos sistemas climáticos e meteorológicos regionais (FALKENMARK; WANG-ERLANDSSON; ROCKSTRÖM, 2019); ao passo que a sua qualidade e quantidade adequadas para abastecimento social também estejam asseguradas para a sua devida distribuição à população, com o intuito de suprir suas necessidades básicas e de desenvolvimento.

Devido a esta natureza heterogênea dos elementos envolvidos na manutenção da qualidade e da quantidade de água, é possível compreender o abastecimento de água como um sistema complexo e dinâmico (MAIOLO *et al.*, 2018), no qual a sua disponibilidade para abastecimento não depende somente do sistema de abastecimento em si.

Por conseguinte, compreender a resiliência do sistema de abastecimento para o desenvolvimento de infraestruturas, políticas e estratégias que visem um sistema de abastecimento mais resistente e resiliente, frente às interrupções e aos eventos críticos/perturbações, exige uma profunda compreensão da natureza e da complexidade intrínsecas a este sistema e que são inerentes à interação entre os elementos que o compõem e seu ambiente de inserção (RODINA, 2019).

Ao longo da história, as atividades humanas foram se constituindo como a principal força motriz das mudanças ambientais, afetando a capacidade suporte do ambiente e suscitando, no homem, uma necessidade crescente de previsão das respostas ambientais (BARNOSKY *et al.*, 2012). A intensificação dos processos de desenvolvimento econômico motivou a crença de um progresso humano sempre ascendente, pautado em tecnologias e transformações, no qual o homem se coloca diante de uma relação paradoxal com a natureza e que coloca em cheque a sua própria existência (LOURENÇO, 2019). Neste contexto, os componentes ambientais possuem o caráter de suas funções restringido somente à promoção do bem-estar humano, cuja valoração é reflexo desta redução e o seu valor real é subestimado pelo valor monetário (LOURENÇO, 2019).

Esta condição se reflete sobre a água enquanto recurso (hídrico), cuja exploração e consumo exacerbado perpassa os diversos setores sociais e

econômicos, desenhando um complexo quadro de inter-relações e interdependências que suscitam a necessidade de mudanças paradigmáticas com vistas à sua utilização de maneira mais equilibrada (FIGUEIRÓ; WOLKMER, 2013).

A natureza oferece uma série de benefícios ao homem que lhe possibilitam desenvolver atividades de recreação, culturais, espirituais, além de suprir suas necessidades básicas e viabilizar o desenvolvimento de tecnologias, o que torna a relação entre homem e a natureza de forte dependência na garantia de sua sobrevivência e bem-estar (BIGGS; SCHLÜTER; SCHOON, 2015). Estes benefícios derivados da interação entre os seres humanos e a natureza são conhecidos como serviços ecossistêmicos⁸ (SE) (ERNSTSON 2013; SCHMIDT; SACHSE; WALZ, 2016; VICTOR *et al.*, 2018; RODRIGUES *et al.*, 2020).

Por possuir um caráter multifuncional e interconectado, fazendo elo entre os serviços e funções desempenhados pelos fatores ambientais, e viabilizando uma análise monetária, o conceito de SE contribui na construção do elo entre os serviços e funções desempenhados pelos fatores ambientais e o bem-estar humano (BAKER *et al.*, 2013). Contudo, apesar do conceito de serviços ecossistêmicos ser alicerçado na perspectiva de sustentabilidade, a sua amplitude conceitual tem potencial conflituoso com esta própria perspectiva, e pode direcionar ao uso insustentável dos recursos naturais.

Schröter *et al.* (2017) expõem esta contradição ao abordar como a questão de distribuição inter e intrageracional dos serviços ecossistêmicos e seus valores associados não são devidamente considerados quando as avaliações de serviços ecossistêmicos são utilizadas na elaboração de valores agregados, por exemplo. Neste sentido, os autores apontam para a importância de que o conceito de serviços ecossistêmicos seja elaborado através de estratégias de sustentabilidade, com verdadeiro enfoque sobre os limites ambientais e vulnerabilidades sociais.

Há uma preocupação clara e crescente sobre a sobreposição do desenvolvimento humano em detrimento da capacidade suporte do meio ambiente

⁸ Apesar de todas as discussões e lacunas existentes, o termo serviços ecossistêmicos é utilizado para a contabilização do capital natural, um campo que tenta integrar as informações monetárias e físicas nas relações entre o meio ambiente e a economia, com o intuito de auxiliar nos processos decisórios públicos e privados (VARDON; KEITH; LINDENMAYER, 2019; URETA *et al.*, 2020; PENG *et al.*, 2021).

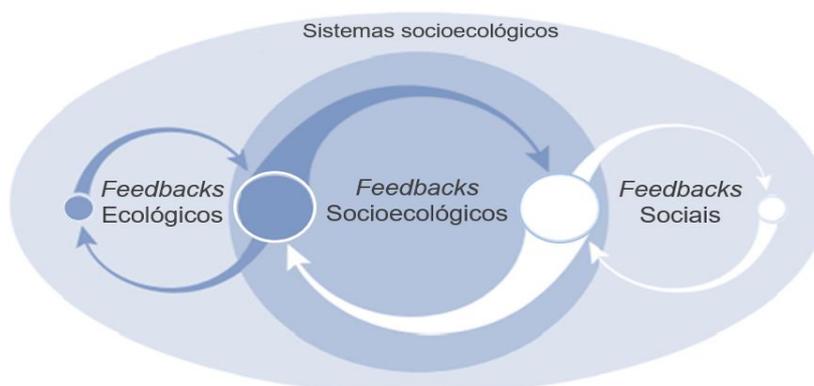
(SCHEFFER *et al.*, 2001; ROCKSTRÖM *et al.*, 2009; BARNOSKY *et al.*, 2012; GARNETT, 2018), sobretudo, em prover água em situações críticas (KLISE *et al.*, 2017; RODINA, 2019). Há uma gama de estudos evidenciando que o desenvolvimento econômico e tecnológico progressivo e de base extrativista estão devastando a capacidade suporte da natureza (IPCC, 2013; 2014; 2022), o que afeta impreterivelmente a sua capacidade de oferecer serviços ecossistêmicos dos quais a humanidade depende.

Os efeitos dos impactos cumulativos e a imprevisibilidade total dos efeitos sinérgicos têm impactado a performance dos diversos sistemas planetários, tanto em escala local e regional como também em escala planetária (ROCKSTRÖM *et al.*, 2009; BARNOSKY *et al.*, 2012). Os impactos cumulativos e sinergias também têm acarretado preocupações relativas à segurança alimentar, energética e ao fornecimento de água (AHMAD *et al.*, 2020; GOLFAM; ASHOFTEH; LOÁICIGA, 2021; YUXI *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2021), à prevalência e surgimento de novas doenças (RANJBARI *et al.*, 2021) e têm se mostrado ser um fator de influência em processos de tomada de decisão sobre ambientes urbanos (MULVIHILL; ALI, 2007; MCPHEARSON *et al.*, 2016; HOU *et al.*, 2021).

Portanto, os impactos e sinergias resultantes de ações antrópicas, decorrentes do mito da natureza inesgotável e do bem-estar humano enquanto um objetivo ideológico inalcançável, tornaram-se uma ameaça direta e indireta ao equilíbrio dinâmico que estrutura a performance global e seus sistemas (GARNETT, 2018), inclusive os sistemas hídricos e, conseqüentemente, à segurança e ao bem-estar humano (EEKHOUT *et al.*, 2020). Neste sentido, os SSE afetam as condições ambientais e, conseqüentemente, os serviços ecológicos também respondem a estas mudanças em um processo de constante interação (BERROUET; VILLEGAS-PALACIO; BOTERO, 2020).

Sob a abordagem da resiliência, os SSE são vistos como sistema coesivos, mesmo que ocorram na interface entre os sistemas social-econômico-ecológico, e por isto, faz-se uso de uma análise integrativa de interdependências complexas entre atores, instituições, ecossistemas em múltiplas escalas (OSTROM 2009; FOLKE *et al.*, 2010), conforme mostrado na Figura 12.

Figura 12- A integração sistêmica nos sistemas socioecológicos



Fonte: Biggs; Schlüter e Schoon (2015)

Por possuírem a capacidade de auto-organização e de adaptação em resposta a distúrbios internos e externos com base nas qualidades apresentadas no seu estado anterior, e por possuírem como característica comportamentos não-lineares e emergentes que geram incertezas na previsão exata do seu comportamento, presume-se que os SSE se comportem como sistemas adaptativos complexos (SACs) (FOLKE 2006; GROS, 2011; LEVIN *et al.*, 2012).

Neste sentido, a abordagem da resiliência do sistema de abastecimento dialoga com a abordagem sistêmica e centraliza o desenvolvimento de estudos voltados à capacidade dos SSE em recuperar-se de choques inesperados e na prevenção de pontos indesejáveis e, também, em lidar e adaptar-se às mudanças capazes de alterar o seu estado e dos SE que atuam na sua garantia (WALKER *et al.*, 2004; FOLKE *et al.*, 2010; BIGGS *et al.*, 2012). Esta premissa ilustra a importância em considerar as alças de retroalimentação existentes entre estes diferentes elos que influem sobre o sistema de abastecimento de água e a necessidade de uma análise interdisciplinar em termos de resiliência (MONTANARI *et al.*, 2013; CEOLA *et al.*, 2016).

Dito isto, entende-se que o sistema de abastecimento de água, por estar condicionado a cenários resultantes das interações ambientais, sociais, econômicas e tecnológicas, também está sob contínua evolução e sob constantes mudanças de estado, em decorrência da influência dos SSE sobre os SE (BIGGS *et al.*, 2012) exercidos pela água e que acabam por colocar a capacidade suporte do sistema à prova. Os ecossistemas possuem diversas funções e oferecem diversos serviços que

atuam na manutenção e garantia quali-quantitativa da água, de acordo com as características locais (EEKHOUT *et al.*, 2020, PENG *et al.*, 2021).

3.6 A MODELAGEM DA DINÂMICA DE SISTEMAS E A CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS NOS ESTUDOS DE RESILIÊNCIA

Como visto anteriormente, um sistema pode ser entendido como um conjunto de elementos que se inter-relacionam e interagem entre si, influenciando uns aos outros, ao mesmo tempo em que se estruturam garantindo a formação e a funcionalidade do próprio sistema. (FENZL; MACHADO, 2009; MEADOWS, 2009; Ford, 2010; VON BERTALANFFY, 2010; MORIN, 2015; FOLLONI, 2016)

Tanto Meadows (2009) quanto Ford (2010) afirmam que os modelos, sejam eles quali ou quantitativos, matemáticos ou mentais, são meras simplificações da realidade, facilitando a sua compreensão sob determinada condição. Meadows (2009) esmiúça esta ideia ao explicar que a percepção que temos do mundo é resultante do conjunto entre a percepção que nossos sentidos oferecem sobre o sistema e a nossa capacidade de reproduzi-lo através de modelos em nossas mentes. Este processo, segundo Morin (2015), é próprio do processo de construção do conhecimento no qual a seleção de dados é realizada pela separação entre dados significativos e não significativos, hierarquização e centralização de núcleos-chave. Portanto, ao passo que o modelo é resultado da construção de determinado conhecimento também auxilia para a sua elaboração e consolidação.

Neste sentido, o processo de modelagem da dinâmica do sistema (MDS) pode ser entendido como uma ferramenta que almeja certo grau de simplificação da complexidade deste sistema; mas não com o objetivo de reduzi-la e, sim, com o objetivo de auxiliar no entendimento de seu comportamento diante de determinada situação, na averiguação de antecipação de prováveis problemas e na tentativa de prever performances inesperadas (BARROW, 2006). Uma simplificação da realidade, cujas limitações devem ser consideradas no processo analítico a ser realizado.

Ford (2010) explica que a MDS permite a elaboração de modelos construídos com o intuito de descrever os padrões fundamentais e gerais que ocorrem no sistema, tais como crescimento, decadência e oscilações. Portanto, não possuem caráter

preditivo com relação a um tempo futuro. Neste sentido, o MDS possui por objetivo as investigações comportamentais sobre o estado do sistema, buscando por influências endógenas e exógenas, em que a estrutura do sistema é o que determina as suas taxas de mudanças (MEADOWS, 2009; FORD, 2010).

Sob a ótica da resiliência em sistemas de abastecimento, esta metodologia permite uma investigação descritiva e tendencial dos principais fatores relacionados a resiliência e, conseqüentemente, à vulnerabilidade do sistema. Na literatura, a modelagem do comportamento de sistemas hídricos tem ganhado notoriedade frente a necessidade de se obter o conhecimento do comportamento do sistema diante perturbações e de conhecer as condições de contorno do sistema (KUANG; LIAO, 2020), cujas características analisadas podem ser qualitativas (IMANI *et al.*, 2021) e/ou quantitativas (GHASHGHAIE; MAROFI; MAROFI, 2014).

A modelagem sobre a resiliência de sistemas relacionados à água também tem sido recorrente na literatura, sob a avaliação das interações entre homem e meio ambiente, possuindo por finalidade a facilitação do entendimento destas interações e/ou possíveis degradações ambientais (SIMONOVIC, 2009; MIRCHI *et al.*, 2012; GHASHGHAIE; MAROFI; MAROFI, 2014; GOHARIAN *et al.*, 2017; MATINZADEH *et al.*, 2017; LI; KAPPAS; LI, 2018; LASPIDOU *et al.*, 2020; JIA *et al.*, 2021; KEYHANPOUR, JAHROMI, EBRAHIMI, 2021; LI *et al.*, 2021; RAJARETHINAM; VARUVEL; BAGODI, 2021).

Alguns autores apontam para o fato de que ao permitir a identificação de interconexões e/ou alças de retroalimentação nos sistemas correlacionados à água, a MDS pode fornecer uma visão mais abrangente sobre as conseqüências potenciais de eventuais perturbações sobre o sistema e, desta maneira, viabilizar-se como uma plataforma adequada para o planejamento e gestão mais sustentáveis dos recursos hídricos (SIMONOVIC, 2009; MIRCHI *et al.*, 2012; GOHARIAN *et al.*, 2017), sendo aplicada enquanto uma ferramenta suplementar ao processo decisório (LIU *et al.*, 2009; DAVIES; SIMONOVIC, 2011; GASTELUM *et al.*, 2018; KARIMLOU *et al.*, 2020, EL-GAFY; APUL, 2021; LI *et al.*, 2021).

O benefício da MDS em permitir uma abordagem holística sobre o sistema é comumente apontado na literatura (MIRCHI *et al.*, 2012). Contudo, salienta-se que o processo de MDS tem por objetivo o estudo do comportamento do sistema e de possíveis variações, nas quais as influências endógenas e exógenas ao sistema são

capazes de influenciar o seu estado. Neste sentido, Meadows (2009) enfatiza que a maior amplitude de análise pode funcionar como uma trapa na análise de sistemas, na qual as definições dos limites do sistema ficam muito amplos e complicados de serem entendidos, em decorrência do excesso de informações e falta de alinhamento entre as características consideradas para a constituição do modelo com o objetivo de análise.

Diante do exposto, percebe-se que o processo de modelagem da dinâmica de sistemas ambientais permite a compreensão dos aspectos descritivos do comportamento do sistema diante de determinadas variações, viabilizando a identificação dos principais componentes ambientais relacionados ao seu processo de resiliência e a delimitação de suas condições de contorno.

3.7 A UTILIZAÇÃO DE CENÁRIOS NA PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS

No contexto dos Estudos Ambientais, para além dos aspectos descritivos do sistema, os estudos em resiliência podem oferecer uma visão estratégica de desenvolvimento que aponte para a mitigação ou para o enfrentamento de alterações que resultem em situações excepcionais (RESILIENCE ALLIANCE, 2010) e que envolvam riscos (MAHMOUDI *et al.*, 2018). Neste sentido, a utilização de cenários ambientais tem sido utilizada para examinar a evolução e integração de informações sobre diferentes componentes ambientais e representa-los sob diferentes condições, escalas e projeções temporais (ALCAMO, 2008; ROTHMAN, 2008).

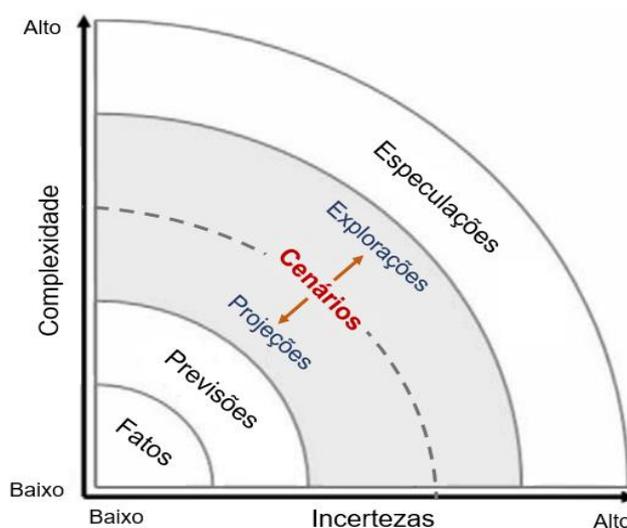
Rothman (2008), aponta para o fato de que tão importante quanto o estado final de um sistema, em uma análise de cenários, é o caminho e a investigação de pontos-chave. Portanto, a análise deve ser compreendida como “[...] uma história dinâmica e não simplesmente como um retrato estático de uma condição futura [...]” (ROTHMAN, 2008, p.39, tradução livre).

Assim, a incorporação de inúmeros compartimentos ambientais e suas interações permite a composição de uma estrutura interdisciplinar sobre problemas ambientais de grande complexidade, favorecendo a identificação antecipada de possíveis problemas e, assegurando uma análise mais ampla e flexível, sob contextos bem delimitados e que devem ser considerados em sua análise (ALCAMO, 2008).

No trabalho de Bolin; Seetharam; Pompeii (2010), verifica-se que os autores utilizaram a análise de cenários no esboço de futuros alternativos de estresse e vulnerabilidade hídrica da região de Phoenix, no Arizona, ao investigarem como se dão as interações e o desenvolvimento a longo prazo dos componentes ambientais e socioeconômicos e as influências que exercem sobre as condições dos recursos hídricos da região.

A análise de cenários permite “[...] uma abordagem para pensar através de desenvolvimento de futuros plausíveis e incertezas relacionadas de uma maneira estruturada [...]” (ALCAMO, HENRICHS, 2008, p.15, tradução livre), a partir de uma estruturação inicial, permitindo a utilização de projeções e explorações das condições ambientais (Figura 13).

Figura 13 - Complexidades e incertezas nas técnicas prospectivas para análises ambientais prospectivas



Fonte: Alcamo e Henrichs (2008, p.15, tradução livre).

Além do mais, a utilização de cenários permite fornecer estados alternativos das condições ambientais na ausência de políticas ambientais adicionais (cenário de referência), viabilizando a indicação de caminhos de políticas alternativas que balizem, ou não, um objetivo ambiental (ALCAMO, HENRICHS, 2008). A partir da antecipação de possíveis problemas, é possível prever a sua respectiva solução ou mitigação.

Na literatura científica, observa-se um número crescente de publicações que fazem uso de cenários ambientais, de forma conjunta com processos de modelagem. Esta junção é comumente utilizada sob diferentes recortes, envolvendo uma combinação de metodologias quali-quantitativas, com o intuito de explorar o comportamento de sistemas ambientais (LIU *et al.*, 2009; BOLIN; SEETHARAM; POMPEII, 2010; ABED-ELMDOUST; KERACHIAN; 2012; NIKOO; KARIMI; KERACHIAN, 2013, GARCÍA; FERNÁNDEZ; FITZ, 2020; LASPIDOU *et al.*, 2020 LI *et al.*, 2021).

Em um estudo de revisão de literatura feito por García, Fernández e Fitz (2020), os autores avaliaram o estado da arte do uso de modelos e cenários na investigação sobre os efeitos de mudanças no uso do solo e nas mudanças climáticas. Os autores identificaram que, por intermédio da análise de cenários, muitos trabalhos apresentaram que os efeitos combinados no sistema são muito maiores que os individuais, sobretudo na dinâmica hidrológica nos recursos hídricos.

No caso de uso de cenários e estudos de resiliência, Liu *et al.* (2009) utilizaram a interface de MDS na avaliação da vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água em uma bacia hidrográfica de Taiwan, em um levantamento mais abrangente das inter-relações dos componentes ambientais do sistema, cujas condições presentes e futuras foram estimadas e apresentadas por intermédio de cenários de escassez. Já Nikoo, Karimi e Kerachian (2013) desenvolveram um modelo integrado quali-quantitativo voltado para a alocação da água a longo prazo em uma região de vulnerabilidade hídrica no Irã, valendo-se da aplicação de programação linear iterativa.

Ressalta-se que Ghashghaie, Marofi e Marofi (2014) explicam que as políticas de gestão integrada das águas devem ser governadas com base em uma concepção holística do sistema, seus processos e respostas a qualquer mudança de estado. Portanto, é de suma importância que o tomador de decisão tenha a capacidade de compreender as interações e alças de retroalimentação do sistema, que são características de suas relações não lineares. A exemplo, no sentido de aumentar a percepção de tomadores de decisão, Abed-Elmdoust e Kerachian (2012) valeram-se de jogos cooperativos difusos na simulação da alocação de água diante de condições diversas e períodos temporais distintos.

Neste sentido, a análise de cenários torna-se uma ferramenta passível de auxiliar no processo de tomada de decisão, por basear-se no desenvolvimento de um modelo inicial, que comporte as características atuais necessárias à análise, comparação de resultados e posterior avaliação das consequências das mudanças e interações no sistema (ALCAMO, HENRICHS, 2008). Esta característica permite a identificação das influências sobre o comportamento do sistema, que podem resultar em novos problemas ambientais ou na sua intensificação, viabilizando a indicação de possíveis alternativas e ampliando a visão dos formuladores de políticas sobre determinada questão ambiental e os fatores envolvidos.

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas a estruturação da pesquisa e os procedimentos metodológicos utilizados sobre o recorte e sobre o objeto de estudo. Cabe ressaltar que, ainda que a construção de um modelo matemático dinâmico tenha sido desenvolvida para amparar a discussão sobre a resiliência do sistema, esta pesquisa possui abordagem qualitativa e natureza exploratória. Desta maneira, este capítulo foi dividido em quatro seções principais, cuja estruturação permite uma maior compreensão dos procedimentos adotados ao longo do seu desenvolvimento.

Na primeira seção é apresentado o desenho da pesquisa, com as fases de execução e a estruturação dos procedimentos metodológicos principais. Nesta estrutura também são apresentados o cumprimento dos objetivos de pesquisa por fase. O detalhamento de cada um destes procedimentos metodológicos foi apresentado nos textos subsequentes.

Em seguida, é apresentada a lógica na busca por informações. Desta maneira, um mapa cognitivo foi apresentado como uma primeira aproximação sobre o recorte de estudo. Este mapa foi um “instrumento-guia”, desenvolvido e utilizado ao longo da pesquisa

Na terceira seção, o processo de modelagem é justificado e descrito em relação aos procedimentos adotados. Baseado em um desenvolvimento iterativo, esta etapa da pesquisa foi dividida em: i) fontes de informações e dados; ii) estruturação da capacidade de análise; iii) elaboração de um modelo conceitual; iv) modelagem dinâmica do sistema de abastecimento.

Por fim, na quarta seção são apresentadas as condições consideradas nas projeções dos cenários e como as premissas adotadas nortearam a escolha das alternativas discutidas.

4.1 DESENHO DA PESQUISA

Como a discussão de alternativas foi baseada no conhecimento das inter-relações e da influência exercida pelos diversos elementos envolvidos no sistema de

abastecimento, de forma a melhor compreender como o seu processo de resiliência é mantido e quais medidas poderiam ser adotadas para fortalecê-lo, a linha teórico-metodológica que norteou esta pesquisa foi a de Dinâmica de Sistemas e os Sistemas Complexos Dinâmicos.

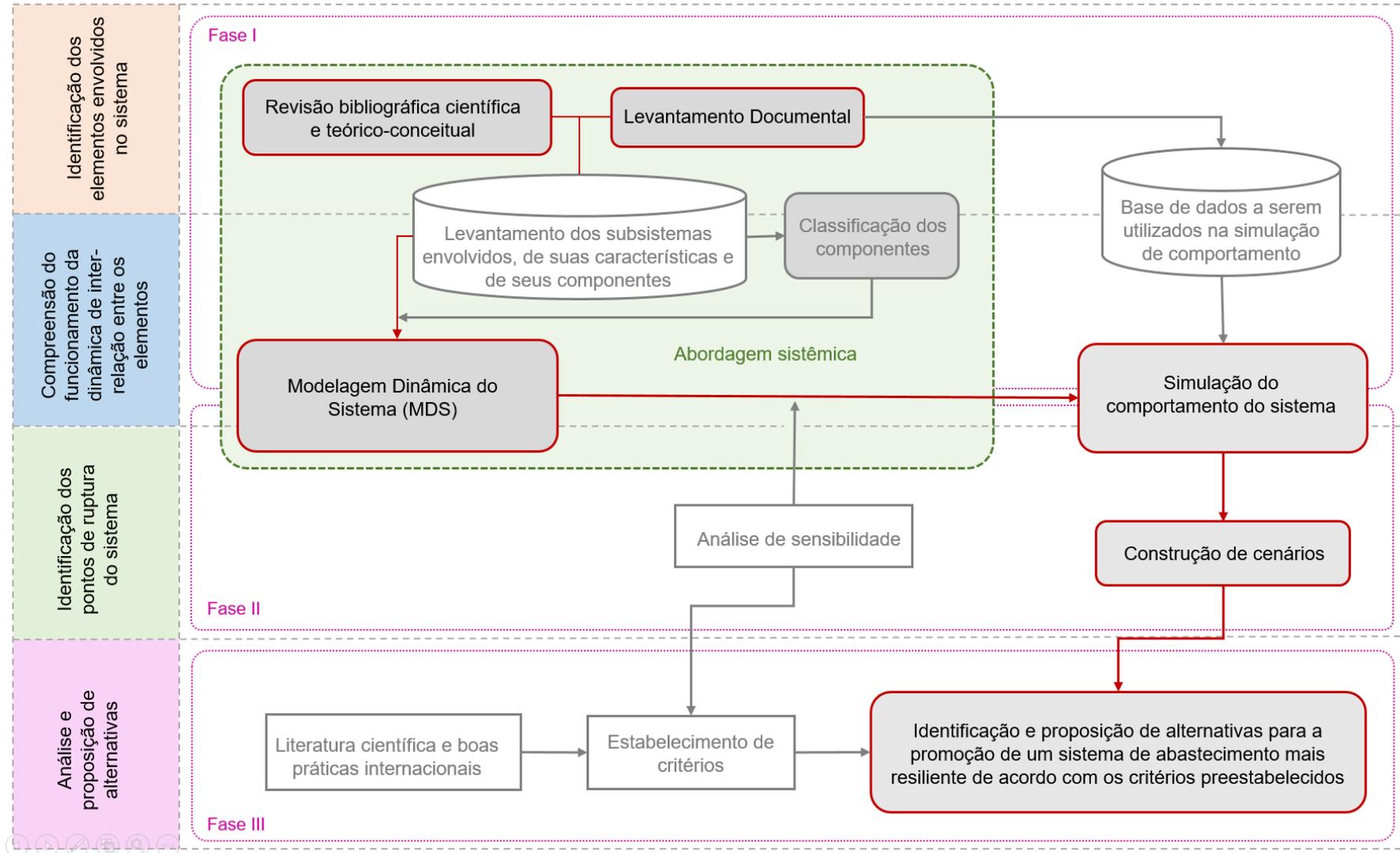
À luz desta linha teórico-metodológica, considera-se ser possível uma maior compreensão da interdependência dos elementos que compõem o sistema de abastecimento de água, da abrangência das escalas de espaço-tempo e seus níveis de complexidade do sistema e das relações não-lineares entre os mesmos (FENZL e MACHADO, 2009; FOLLONI, 2016).

Buscou-se, assim, uma melhor clareza sobre as interações e sinergia existentes entre os diversos elementos do sistema e entre estes elementos e o ambiente no qual estão inseridos, onde as características de não-linearidade e recursividade implicam em dificuldades na previsão de comportamentos internos ao próprio sistema (VON BERTALANFFY, 2010; FOLLONI, 2016; DIETZ et al., 2020) e, conseqüentemente, nos processos de tomada de decisão envolvidos (FURTADO; SAKOWSKI; TÓVOLI, 2015).

Dados os objetivos desta pesquisa e a importância do conhecimento das relações existentes entre os elementos que garantem a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP, esta pesquisa foi dividida em três fases, conforme mostrado na Figura 14. São elas:

- I. *Aplicação da abordagem sistêmica na busca por informações:* Nesta fase foram realizadas tanto a definição e caracterização do recorte do espaço geográfico e temporal como, também, a identificação, sistematização dos agentes pertinentes a esta pesquisa e o processo de modelagem
- II. *Análise da dinâmica entre agentes:* Nesta fase da pesquisa foi analisada a dinâmica das inter-relações existentes entre os elementos do sistema, via construção de cenários hipotéticos e por meio da simulação do comportamento do sistema.
- III. *Busca por alternativas:* Identificação de alternativas que garantam um sistema de abastecimento de água para a RMSP mais resiliente.

Figura 14 - Design das fases de pesquisa e dos objetivos alcançados



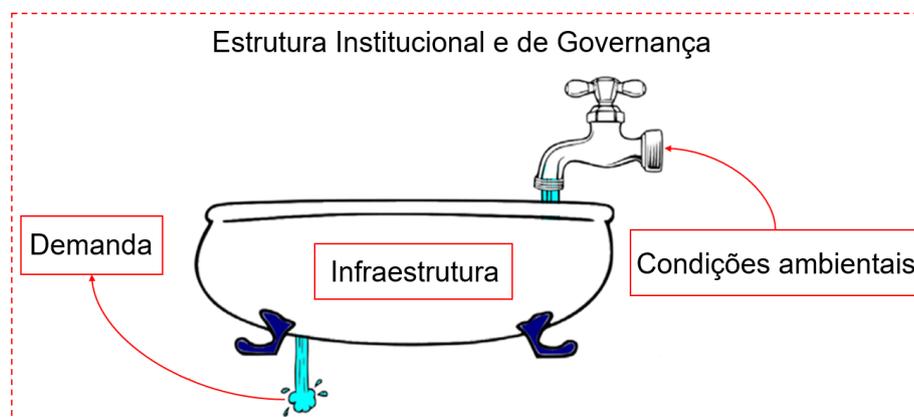
Fonte: Elaboração própria.

4.2 A LÓGICA SISTÊMICA NA BUSCA POR INFORMAÇÕES

Alicerçada à abordagem sistêmica, a lógica do processo de modelagem foi a equação do balanço hídrico aplicada ao sistema de abastecimento de água da RMSP. Esta equação obedece ao princípio da continuidade, segundo o qual a variação do armazenamento de um sistema qualquer é resultado da diferença entre os seus fluxos de entrada e de saída (MANOEL FILHO, 2000).

Desta maneira, primeiramente foram investigadas as funções individuais do que foram chamados de subsistemas do sistema de abastecimento de água (demanda, infraestrutura, condições naturais e estrutura institucional e de governança) e, então, os agentes que os compõem foram identificados bem como as interações entre cada uma destas partes. Para uma melhor compreensão, a Figura 15 ilustra a lógica inicial do processo de modelagem aplicado ao sistema de abastecimento através da metáfora do armazenamento de água em uma banheira.

Figura 15- A analogia da banheira e o sistema de abastecimento



Fonte: Adaptado de Costa Junior (2018).

Em uma primeira aproximação, partindo da compreensão do sistema de abastecimento de água como um sistema unitário e possuidor de outros subsistemas, que operam no seu processo de resiliência para garantir-lhe suas funções, as condições ambientais garantem o *input* de água (aporte) e a demanda garante o *output* do sistema, ao passo que a infraestrutura garante o armazenamento e distribuição. Já as estruturas institucional e de governança exercem diferentes atuações sobre os demais subsistemas, sobretudo, atuam com a função de regulação de suas entradas e saídas.

Ressalta-se que, no âmbito da presente pesquisa, o conceito de ambiente pode ser entendido como “[...] a natureza conhecida pelo sistema social humano [...]” (DULLEY, 2004, p.20), não englobando somente o meio físico e biológico para a manutenção da vida, mas sendo resultante da visão e ação do homem sobre o recorte espacial e temporal.

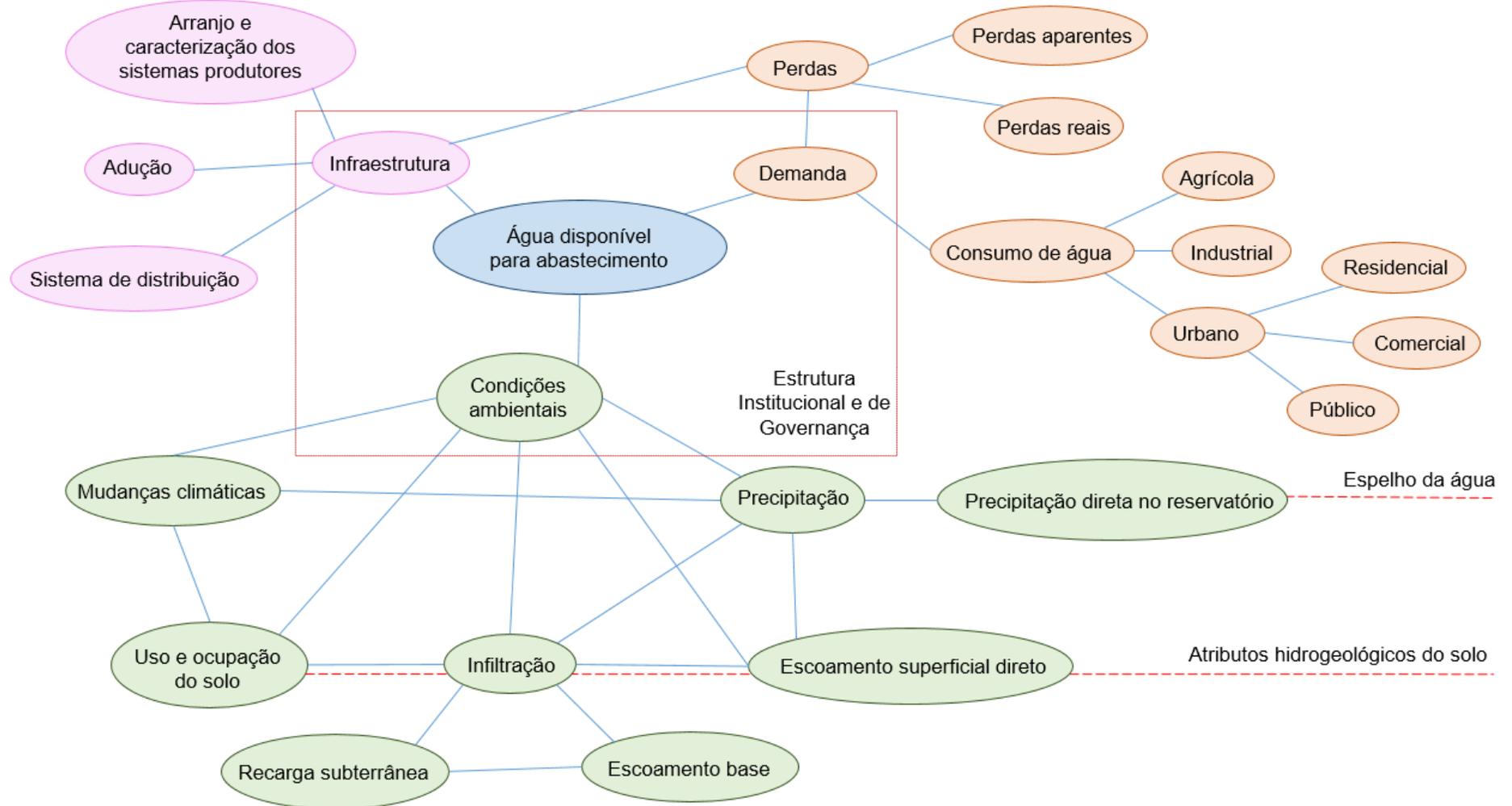
Desta maneira, ao considerar as questões pertinentes ao sistema de abastecimento de água na RMSP, o conceito de condições ambientais adquire não apenas um sentido paisagístico e estático, mas possuidor de uma dinâmica própria, baseada nas inter-relações dos elementos que fazem parte de sua composição e, principalmente, das influências exercidas pelas ações humanas. Posto isto, nesta pesquisa são considerados os elementos que compõem o ambiente natural, o ambiente modificado e a dinâmica existente entre os envolvidos na análise.

Optou-se, então, pela elaboração de um mapa cognitivo com os conceitos primários envolvidos na manutenção do sistema de abastecimento, de maneira a estruturá-los hierarquicamente e permitindo a visualização inicial de sua extensão e construção de um raciocínio lógico para a busca de informações (Figura 16). O mapa conceitual cognitivo é baseado na teoria de aprendizagem significativa de David Ausubel, que explica que o ser humano é capaz de elaborar e organizar o próprio conhecimento via estruturação hierárquica⁹ de conceitos (NOVAK; CAÑAS, 2008) e seleção de dados significativos e não significativos (MORIN, 2015), arquitetando uma estrutura cognitiva de aprendizagem. Desta maneira, é possível estruturar situações complexas, com informações importantes e pertinentes ao objeto de pesquisa, ainda que seja necessária a aplicação de um recorte sobre este objeto.

Destaca-se, contudo, que a representação gráfica destes conceitos nesta etapa da pesquisa não teve a pretensão de reduzir o sistema, mas sim representar uma estrutura que permitisse o seu desmembramento e a sua investigação no processo de busca por informações e de dados numéricos, que ao mesmo tempo em que fossem específicas de cada uma das partes, facilitasse a compreensão e a identificação das relações existentes entre cada uma delas.

⁹ Entende-se como estruturação hierárquica de conceitos aquela que parte de um conceito mais abrangente para um menos abrangente.

Figura 16- Modelo cognitivo na construção do raciocínio lógico pela busca por informações



Fonte: Elaboração própria.

A partir deste raciocínio foram investigadas as relações de influência entre os diferentes componentes supramencionados, a partir do entendimento dos diferentes papéis e funções exercidas por eles e como se relacionam com o sistema de abastecimento de água. Neste sentido, as funções ambientais, socioeconômicas e político-infraestruturais foram exploradas para que a lógica de conexões e interdependências entre os subsistemas fosse estabelecida (Figura 17).

Figura 17- Lógica de conexões e interdependências



Fonte: Elaboração própria.

4.3 O PROCESSO DE MODELAGEM

O processo de modelagem objetivou oferecer uma representação gráfica simplificada da estrutura do sistema de abastecimento de água da RMSP, com informações necessárias que possibilitem o entendimento de sua dinâmica e que viabilizassem a discussão sobre a sua resiliência. Desta maneira, o modelo fornece as informações necessárias sobre a dinâmica do sistema sem, contudo, precisar considerar todas as informações de todos os subsistemas envolvidos e de seus respectivos elementos. O processo de modelagem demandou uma série de etapas, conforme mostrado no Quadro 2.

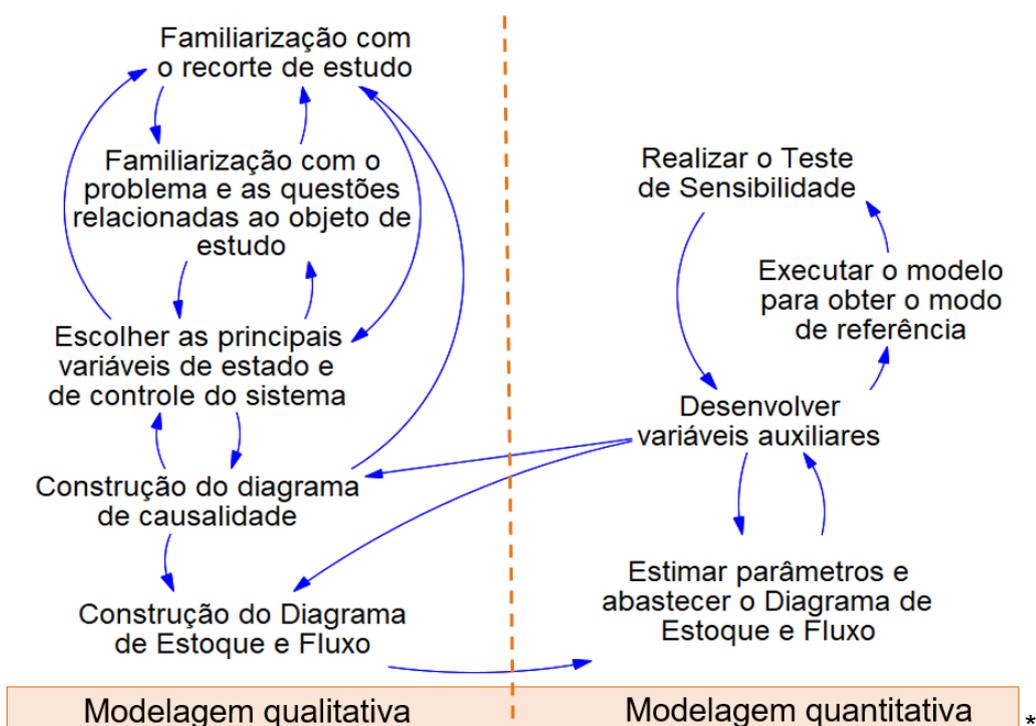
Quadro 2 – Etapas principais do processo de modelagem

Modelagem qualitativa	
1	Familiarização com o recorte de estudo
2	Familiarização com o problema e as questões relacionadas ao objeto de estudo
3	Escolher as principais variáveis de estado e controle do sistema
4	Construção de um diagrama de causalidade
5	Construção do diagrama de estoque e fluxo
Modelagem quantitativa	
1	Estimar parâmetros
2	Executar o modelo para obter o modo de referência
3	Realizar o teste de sensibilidade

Fonte: Elaboração própria, baseada em Ford (2010).

Devido a flexibilidade oferecida pelo processo de modelagem e visando o melhor refinamento das informações sobre o sistema de abastecimento e dos dados de alimentação do modelo, as etapas supracitadas ocorreram de maneira iterativa, para proporcionar maior robustez ao modelo simplificado final, conforme esquematizado na Figura 18.

Figura 18 - Iteração entre as principais etapas do processo de modelagem



Fonte: Elaboração própria, baseada em Ford (2010).

Cabe ressaltar que, para que o processo de modelagem pudesse ocorrer de forma iterativa, foi necessária a organização de uma estrutura de coleta de dados e informações, assim como também a estruturação da capacidade de análise, para que o modelo fosse sendo gerado e interpretado corretamente. Estas etapas serão minuciosamente detalhadas nos itens textuais subsequentes.

4.3.1 Fontes de dados e informações

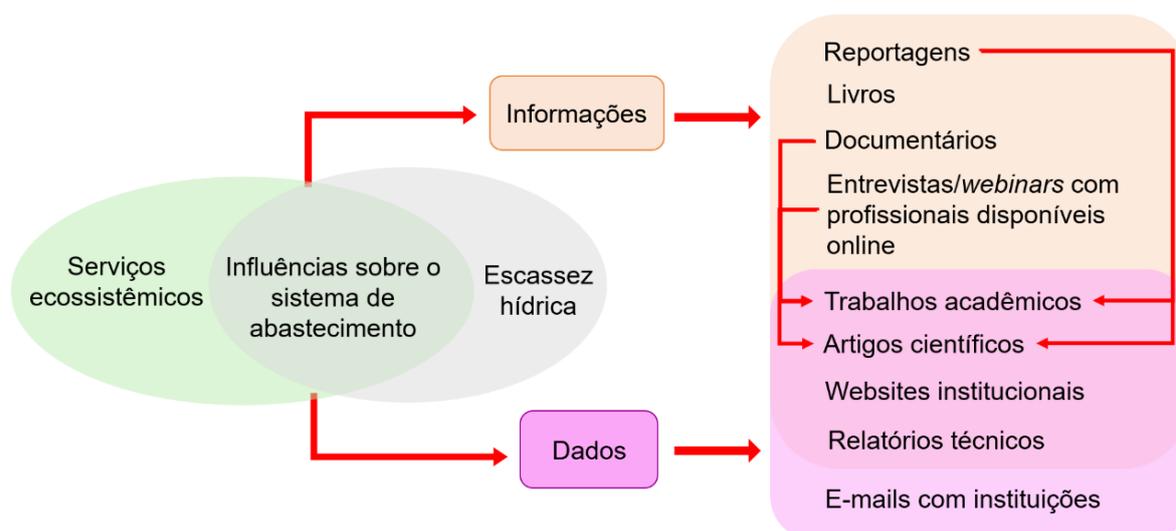
Com o intuito de definir e caracterizar os recortes do espaço geográfico e setorial e, também, de realizar a identificação e sistematização conceitual dos agentes pertinentes a esta pesquisa, o levantamento de informações foi realizado por leitura de livros, entrevistas com especialistas disponíveis em plataformas *online* e/ou *webinars*, reportagens, documentários, artigos científicos, trabalhos acadêmicos, *websites* institucionais e documentos estratégicos. A busca pelas informações foi embasada no raciocínio lógico previamente descrito e norteada majoritariamente pelas publicações referentes ao cenário de escassez hídrica vivenciado pela RMSP durante o período de 2013 a 2015 e os conceitos relacionados aos serviços ecossistêmicos.

O quadro de escassez hídrica foi escolhido por tratar-se de um evento crítico, no qual os efeitos do déficit de água estimularam o debate em torno dos aspectos de ordem econômica, social, ambiental e política associados à resiliência do sistema de abastecimento da RMSP. Já os conceitos relacionados aos serviços ecossistêmicos foram escolhidos por viabilizarem a identificação e as relações de interdependência entre o homem e os recursos naturais, cujo enfoque recaiu sobre os recursos hídricos, viabilizando uma melhor definição no recorte de busca.

Na etapa do processo de modelagem de estoque-e-fluxo e na elaboração dos cenários, os dados utilizados restringiram-se a informações oficiais (via documentos oficiais, *websites* institucionais e troca de *e-mails* com as instituições de interesse) e trabalhos acadêmicos (artigos científicos, dissertações e teses). As informações obtidas por *websites* institucionais foram utilizadas a partir da compreensão de que tais informações representam um posicionamento formal destas instituições diante do público e que os valores apresentados nas referidas plataformas condizem aos valores utilizados na elaboração das ações estratégicas por parte destas instituições.

Por fim, a organização esquemática por informações e dados pode ser observada na Figura 19.

Figura 19- Organização esquemática de dados e informações



Fonte: Elaboração própria.

4.3.2 Estruturação da capacidade de análise

A fim de discutir alternativas para a promoção da resiliência do sistema de abastecimento de água da RMS, a compreensão do seu contexto de inserção e do seu arranjo infraestrutural são fundamentais no entendimento de como a sua resiliência está engendrada e das inter-relações existentes entre os diversos elementos que o compõem. Nesta pesquisa, para que a resiliência do sistema de abastecimento pudesse ser compreendida, com a devida complexidade que lhe cabe, e para que o modelo pudesse ser construído com maior robustez, inicialmente foi realizada a definição e contextualização dos recortes setorial e do espaço-geográfico.

Quanto ao recorte setorial, a escolha do setor de abastecimento se justifica pela sua importância social, ambiental e econômica, considerando que, ao mesmo tempo em que os serviços de abastecimento estão estreitamente relacionados ao desenvolvimento econômico da região e das demais atividades humanas, os serviços de abastecimento também são responsáveis por gerenciar grande parte dos serviços de saneamento (fornecimento de água, coleta e tratamento de esgoto) que podem comprometer a manutenção das funções ambientais dos recursos hídricos (BOLUND;

HUNHAMMAR, 1999; RODRIGUES *et al.*, 2020), ainda que neste trabalho o enfoque recaia sobre o sistema de abastecimento de água.

Outro aspecto importante para a escolha do setor de abastecimento, como foco para a aplicação do estudo da resiliência, é a existência de uma densa disponibilidade de informações, principalmente com relação à crise de abastecimento ocorrida entre os anos de 2013-2015 na RMSP e, em acréscimo, aos eventos mais recentes de um possível novo quadro de crise - que tem se intensificado desde o ano de 2021, no qual tem sido tratado como indicativo de início de mais um novo período de escassez (VARGAS, 2020; CNN, 2021; FONTES, 2021; GASPODINI, 2021; GERBELLI, 2021).

Ademais, a partir do entendimento de que a complexidade do sistema de abastecimento de água da RMSP é estruturada na performance dos seus subsistemas e nas relações de causa-e-efeito que os caracterizam, bem como dos elementos que os compõem, e considerando que a água é um prestador de serviço ecossistêmicos na qual o homem faz de seu uso um meio de bem-estar (DURAN-ENCALADA *et al.*, 2017; RODRIGUES *et al.*, 2020), a investigação entre os elementos que compõem o sistema de abastecimento de água foi esmiuçada pelas funções e serviços desempenhados pela água (Figura 20) e nos elementos que atuam na sua garantia e manutenção.

Figura 20 - Serviços ecossistêmicos desempenhados pela água



Fonte: Elaboração própria, baseado em Brauman *et al.* (2007).

Uma vez que esta etapa foi realizada de maneira iterativa e a fim de se obter uma melhor organização das informações, a caracterização do espaço-geográfico foi subdividida em três itens textuais, nos quais as informações relacionadas à resiliência do sistema de abastecimento são trabalhadas sob as óticas supramencionadas: ambiental, hidrotécnica, hidropolítica e socioeconômica.

O intuito desta etapa foi a familiarização com a região e o objeto de estudo e estruturar a capacidade de análise tanto para o desenvolvimento das etapas subsequentes quanto para a posterior interpretação dos resultados. A escolha em realizar o processo de descrição com base no recorte do espaço geográfico foi feita a partir da definição de Santos (1997, p. 39) de que o espaço geográfico é:

“[...] um conjunto indissociável, solidário e também contraditório, de sistemas de objetos e sistemas de ações, não considerados isoladamente, mas como o quadro único no qual a história se dá. No começo era a natureza selvagem, formada por objetos naturais, que ao longo da história vão sendo substituídos por objetos fabricados, objetos técnicos, mecanizados e, depois cibernéticos fazendo com que a natureza artificial tenda a funcionar como uma máquina [...]” (SANTOS, 1997, p. 39).

Portanto, entende-se que o conceito de espaço geográfico ao mesmo tempo em que consiste na articulação entre o homem e a natureza, dentro de um intervalo de tempo, permite também a sua interpretação enquanto um conjunto de sistemas. Desta maneira, o conceito de espaço geográfico não se limita somente a uma caracterização territorial, mas se traduz como resultado de um conjunto complexo de relações humanas, ambientais, econômicas, político-estruturais e, conseqüentemente, paisagísticas.

Assim, apesar dos itens textuais serem escritos com um enfoque maior de acordo com a “temática-guia”, os três itens textuais se comunicam entre si. Por conseqüência, ao passo que a descrição do espaço geográfico permite a adequada caracterização da área e dos fatores relacionados ao objeto de estudo, também permite certo grau de investigação das inter-relações de estruturação da resiliência do sistema de abastecimento, bem como do seu meio de inserção.

Ao realizar este tipo de construção textual, fica claro que não há como estudar a resiliência do sistema de abastecimento de água e considerar os fatores que exercem

influência sobre este sistema isoladamente, é essencial considerar a sua complexidade, ainda que sem a pretensão de mapear exaustivamente todos os mecanismos e agentes envolvidos.

Em suma, a escolha de realizar a descrição do espaço-geográfico sob a ótica dos serviços ecossistêmicos relacionados à água, com foco no sistema de abastecimento, foi realizada com o intuito de se obter uma melhor familiarização com as condicionantes relacionadas ao recorte setorial do tema de pesquisa, identificar e selecionar as variáveis que compõem o sistema e identificar as diversas inter-relações existentes entre os campos socioeconômico, ambiental e hidrotécnicos¹⁰; contribuindo na estruturação do modelo e da capacidade de análise sobre o sistema de abastecimento.

4.3.2.1 Os aspectos socioeconômicos da RMSP e do sistema de abastecimento.

A RMSP centraliza os maiores complexos industriais, comerciais e financeiros do país, sendo considerada o maior polo de riqueza nacional, cujo Produto Interno Bruto (PIB) corresponde a mais da metade do PIB paulista (53,48%) (SEADE, 2018), além de também exercer a função de centro político do Estado de São Paulo (EMPLASA, [s.d.]a,b). O PIB *per capita* da região encontra-se na média de R\$56.600,00, enquanto a renda *per capita* média é de R\$ 948,09 (SEADE, 2021).

A RMSP conta com uma população estimada em 21.252.384 habitantes, com um grau de urbanização de 98,9% e com densidade demográfica de 2.674,3 hab/km² (SEADE, 2021). Todos os municípios da região apresentam Taxa Geométrica de Crescimento Anual (TGCA) positiva entre os anos de 2010 e 2021, resultando em uma TGCA geral de 0,71% ao ano (SEADE, 2021), o que implica em uma tendência de crescimento populacional da região. As informações socioeconômicas de cada um dos municípios da RMSP foram reunidas e apresentadas na Tabela 1

¹⁰ Os aspectos hidrotécnicos (VARGAS, 2020) correspondem às medidas técnicas e infraestruturais adotadas no sistema de abastecimento e que, em certo grau, estão atreladas aos arranjos infraestruturais e de governança da água do sistema de abastecimento de água da RMSP.

Tabela 1 - Dados socioeconômicos dos municípios da RMSP.

Caracterização socioeconômica da RMSP (continua)					
Municípios	População estimada para 2021 (hab)	TGCA 2010/2021 (% a.a.)	Grau de urbanização (%)	PIB per capita (R\$) - 2018	Renda per capita* (R\$)
Arujá	90.958	1,80	96,33	70.959,06	745,4
Barueri	266.236	0,93	100,00	194.642,06	877,46
Biritiba Mirim	32.683	1,24	87,37	21.779,56	478,17
Caieiras	101.748	1,50	98,31	36.376,87	683,16
Cajamar	78.786	1,91	98,86	226.539,99	571,55
Carapicuíba	396.447	0,65	100,00	14.731,19	577,56
Cotia	251.382	2,07	100,00	52.624,47	882,64
Diadema	405.596	0,46	100,00	36.573,96	564,99
Embu das Artes	273.266	1,19	100,00	50.033,40	474,17
Embu-Guaçu	68.565	0,81	97,33	16.746,43	516,15
Ferraz Vasconcelos de	195.168	1,37	95,51	16.688,06	460,59
Francisco Morato	176.346	1,22	99,80	8.915,06	396,07
Franco da Rocha	153.903	1,45	92,13	20.221,41	479,44
Guararema	29.736	1,30	86,05	49.267,47	621,85
Guarulhos **	1.361.862	1,00	100,00	46.257,38	633,33
Itapeverica da Serra	171.123	1,06	99,17	22.023,46	487,17
Itapevi	241.15	1,70	100,00	52.926,14	471,86
Itaquaquecetuba	374.997	1,41	100,00	20.009,21	413,35
Jandira	124.94	1,32	100,00	33.310,75	683,76
Juquitiba	30.579	0,57	86,48	17.107,31	404,53
Mairiporã	100.034	1,97	92,54	18.382,22	738,89
Mauá **	463.338	0,97	100,00	33.825,83	583,61
Mogi das Cruzes **	436.883	1,10	92,81	36.296,45	757,93
Ribeirão Pires	119.339	0,50	100,00	25.805,69	726,35
Rio Grande da Serra	50.313	1,24	100,00	11.651,85	487,07
Salesópolis	16.645	0,74	66,62	12.209,28	511,46

Fonte:Elaboração própria, baseado em SEADE (2021).

*Informações baseadas no Censo Demográfico de 2010.

** Municípios cujos sistemas de abastecimento não são operacionalizados pela Sabesp.

Tabela 1 - Dados socioeconômicos dos municípios da RMSP.

Caracterização socioeconômica da RMSP (conclusão)					
Municípios	População estimada para 2021 (hab)	TGCA 2010/2021 (% a.a.)	Grau de urbanização (%)	PIB per capita (R\$) - 2018	Renda per capita* (R\$)
Osasco	682.876	0,22	100,00	113.034,37	757,55
Pirapora do Bom Jesus	19.139	1,82	100,00	25.150,03	443,73
Poá	116.289	0,85	98,42	40.981,47	569,23
Santa Isabel	55.436	0,87	81,43	29.084,67	543,5
Santana de Parnaíba	140.616	2,39	100,00	69.798,01	1.507,66
Santo André **	694681	0,25	100,00	41.987,75	1.021,51
São Bernardo do Campo	815.109	0,58	98,40	62.914,30	944,67
São Caetano do Sul **	151.111	0,12	100,00	89.018,52	1.578,74
São Lourenço da Serra	15.721	1,09	93,24	13.687,71	507,98
São Paulo	11.914.851	0,53	99,10	60.805,18	1.126,97
Suzano	293.464	1,03	96,48	39.080,08	552,44
Taboão da Serra	287.155	1,49	100,00	30.359,59	664,47
Vargem Grande Paulista	53.613	2,05	100,00	41.000,36	717,88

Fonte:Elaboração própria, baseado em SEADE (2021).

*Informações baseadas no Censo Demográfico de 2010.

** Municípios cujos sistemas de abastecimento não são operacionalizados pela Sabesp.

A seguir, na Tabela 2, são apresentadas as informações gerais sobre as taxas de atendimento do sistemas de água e esgoto dos municípios pertencentes a RMSP. A maior parte dos municípios da RMSP apresenta índices de atendimento total de água acima de 90%. Este índice considera o abastecimento tanto da população urbana como da população rural de cada município e não considera soluções individuais de abastecimento, tais como captações irregulares de corpos da água e retirada de poços. Contudo, alguns municípios ainda apresentam índices baixos de acesso ao abastecimento, nos quais os municípios de Juquitiba (45,55%), Mairiporã (57,55%) e São Lourenço da Serra (49,05%) apresentam os piores valores.

Com relação ao sistema de esgotamento sanitário, nota-se que a fração de população atendida é menor em todos os municípios, em comparação ao sistema de abastecimento. A média geral de coleta de esgoto para toda RMSP é de 60,3% e de tratamento, 58,73%. Cabe ressaltar, ainda, que apesar de um município tenha um elevado índice de tratamento de esgoto sanitário, isto não implica que todo o esgoto produzido esteja recebendo tratamento adequado, pois o seu índice de coleta pode ser baixo. Logo, isto implica dizer que nem todo esgoto produzido está recebendo um tratamento adequado. Um exemplo desta situação acontece com o município de Arujá, que apesar de realizar o tratamento de 100% do esgoto coletado; coleta somente 50,32% do total de esgoto produzido.

Tabela 2-Informações sobre atendimento do sistema de água e esgoto da RMSP.

Atendimento do sistema de água e esgoto da RMSP (continua)					
Municípios	População com acesso a abastecimento de água (hab)	Índice de atendimento total de água (%)	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Índice de coleta de esgoto (%)	Índice de tratamento de esgoto (%)
Arujá	89.824	100,00	65.594	50,32	100,00
Barueri	274.182	100,00	245.941	63,50	51,15
Biritiba Mirim	32.598	55,37	15.851	69,58	99,40
Caieiras	101.47	97,70	78.912	61,92	0,00
Cajamar	76.801	100,00	71.181	60,42	0,00
Carapicuíba	400.927	100,00	334.097	56,72	51,56
Cotia	249.21	100,00	132.158	37,69	44,99
Diadema	423.884	100,00	399.439	75,75	52,69
Embu das Artes	273.726	100,00	203.725	55,41	55,00
Embu-Guaçu	248.722	88,25	130.587	n/a	55,00
Ferraz de Vasconcelos	194.276	96,80	161.471	68,18	56,00
Francisco Morato	175.844	96,92	82.687	36,62	0,00
Franco da Rocha	154.489	97,90	103.127	53,42	0,00
Guararema	29.798	72,91	14.907	62,67	100,00
Guarulhos **	1.379.182	96,20	1.185.702	69,38	100,00
Itapeçerica da Serra	175.693	96,70	82.183	37,25	98,00
Itapevi	237.7	95,01	157.956	52,37	54,95
Itaquaquecetuba	370.821	100,00	260.736	53,46	16,40

Fonte:Elaboração própria, baseado em SNIS (2019b).

** Municípios cujos sistemas de abastecimento não são operacionalizados pela Sabesp.

Tabela 2 - Informações sobre atendimento do sistema de água e esgoto da RMSP

Atendimento do sistema de água e esgoto da RMSP (conclusão)					
Municípios	População com acesso a abastecimento de água (hab)	Índice de atendimento total de água (%)	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Índice de coleta de esgoto (%)	Índice de tratamento de esgoto (%)
Jandira	124.937	100,00	98.223	57,84	45,58
Juquitiba	31.444	45,55	4.578	34,85	100,00
Mairiporã	100.179	57,55	24.997	32,83	71,97
Mauá **	472.912	98,00	439.076	92,54	85,68
Mogi das Cruzes **	445.842	98,50	417.197	77,17	66,16
Osasco	698.418	100,00	687.952	60,48	55,77
Pirapora do Bom Jesus	18.895	82,55	9.893	48,99	35,69
Poá	117.452	100,00	117.393	87,62	86,18
Ribeirão Pires	123.393	90,34	91.122	65,47	70,00
Rio Grande da Serra	50.846	84,44	26.301	55,87	85,00
Salesópolis	17.139	62,55	9.224	68,35	97,30
Santa Isabel	57.386	66,03	25.707	66,74	7,74
Santana de Parnaíba	139.447	100,00	66.819	33,54	26,06
Santo André **	718.773	100,00	718.773	78,86	46,00
São Bernardo do Campo	838.936	100,00	830.804	72,96	27,66
São Caetano do Sul **	161.127	100,00	161.127	85,00	100,00
São Lourenço da Serra	15.825	49,05	4.674	58,71	100,00
São Paulo	12.252.023	99,30	11.798.698	74,41	92,20
Suzano	297.637	100,00	292.903	77,60	70,00
Taboão da Serra	289.664	100,00	276.919	70,33	54,21
Vargem Grande Paulista	52.597	95,15	18.29	26,41	31,96

Fonte:Elaboração própria, baseado em SNIS (2019b).

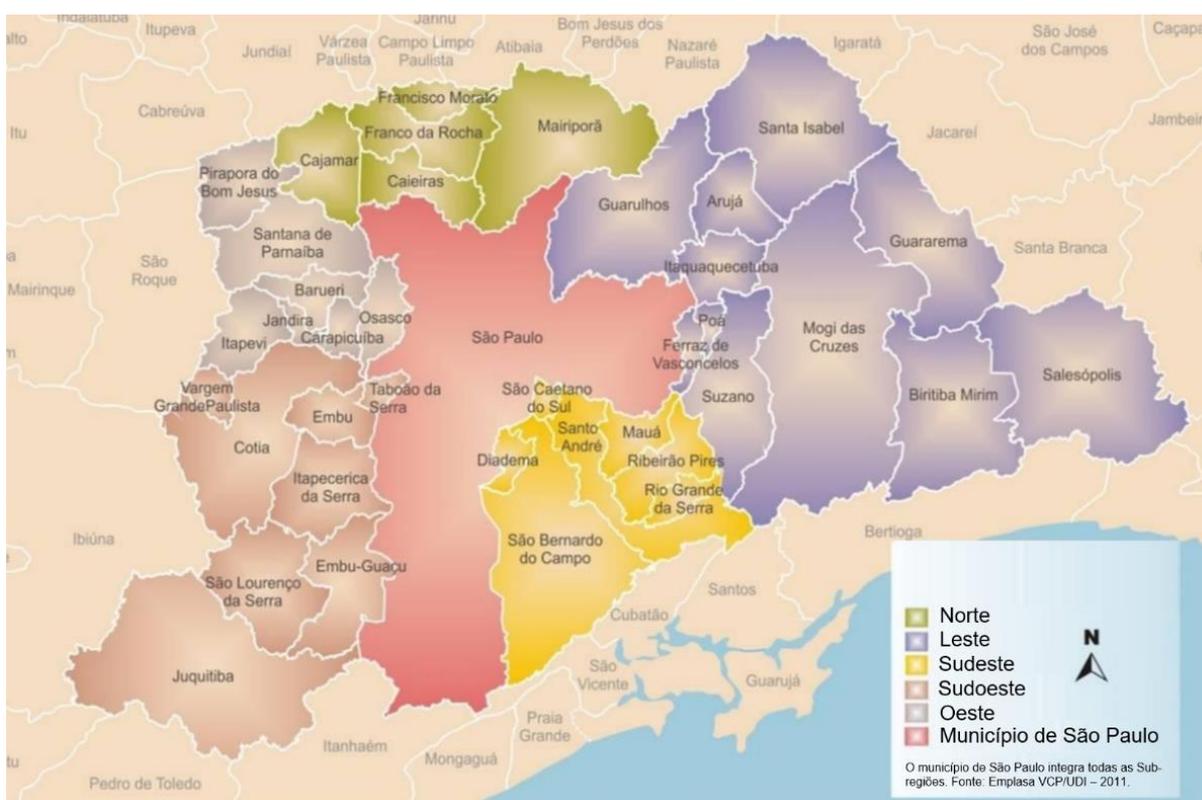
** Municípios cujos sistemas de abastecimento não são operacionalizados pela Sabesp.

Em acréscimo às informações socioeconômicas, as principais atividades desenvolvidas na região estão relacionadas principalmente à indústria, ao comércio, à prestação de serviços e à construção civil (EMPLASA, 2016). No contexto geral, as atividades mais representativas são as voltadas ao setor de serviço e industrial. O setor de serviços teve um gradual crescimento ao longo dos anos, de 70,5% em 2000 para 78,8% em 2012, e o setor industrial sofreu um decréscimo de suas atividades no mesmo período, com uma participação que caiu de 29,4% para 21,15% (EMPLASA, 2016). A importância em considerar estas variações nas produções setoriais consiste

no fato de que elas incidem diretamente no consumo de água da região e, portanto, exercem pressão sobre o sistema de abastecimento em termos quantitativos.

Apesar desta tendência geral na RMSP, algumas variações internas no desenvolvimento destes setores são observadas nas Sub-regiões da metrópole. A maior concentração do setor industrial ocorre no município de São Paulo, que vem passando por um processo de retração gradual nos últimos anos, com declínio de 59,7% em 2000 para 54,5% em 2012 (EMPLASA, 2016). O mesmo vem ocorrendo com o setor de serviços do município, que caiu de 69,1% para 66,1% no mesmo período (EMPLASA, 2016). Para facilitar a descrição socioeconômica da área, a Figura 21 ilustra as divisões sub-regionais da RMSP e seus respectivos municípios.

Figura 21 - Divisão sub-regional da RMSP



Fonte: EMLPLASA (2013).

A Sub-região Sudeste destaca-se no setor industrial, cuja participação no âmbito da metrópole aumentou de 16,7% em 2000 para 20,7% em 2012; com destaque para os aumentos do município de São Bernardo do Campo (7,3% em 2012) e Santo André

(3,0% em 2012). As Sub-regiões Norte e Sudoeste possuem representação pouco expressiva em todos os setores dicutidos (EMPLASA, 2016).

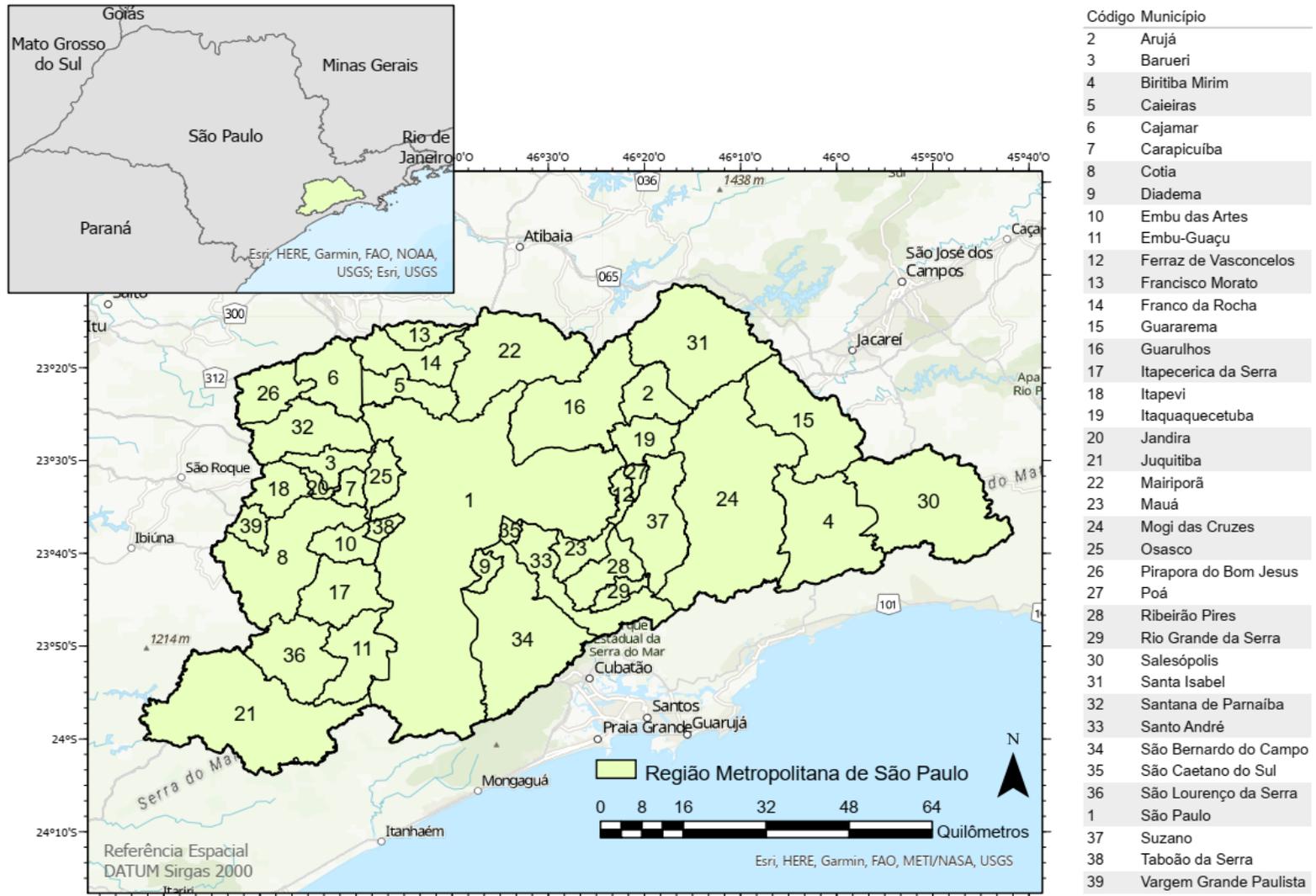
Já a Sub-região Leste é a que mais contibui para a produção agrícola e pecuária da RMSP, principalmente nos municípios de Mogi das Cruzes e Biritiba Mirim, que juntos somaram 34,0% dos empregos formais da RMSP neste setor no ano de 2014, correspondendo a 60,8% dos empregos formais na sub-região (EMPLASA, 2016).

Na região, o setor agrícola é voltado majoritariamente para a produção de hortaliças (legumes e verduras) e frutas, que acabam sendo comercializados na própria região (VICTOR *et al.*, 2018). Apesar do setor agrícola não ser responsável por um grande consumo de água no âmbito regional, em termos relativos, e por ser caracterizada por culturas que necessitam de quantidas constantes de água ao longo do ano, este setor passa a competir com os demais usos, em especial, nos períodos de estiagem.

4.3.2.2 *Os aspectos ambientais do sistema de abastecimento da RMSP*

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) foi instituída pela Lei Complementar Federal nº14, de 8 de junho de 1973 e, posteriormente, reorganizada pela Lei Complementar nº1.139 de 16 de junho de 2011 (São Paulo, 1973 e 2011; EMLASA, [s.d]a). Esta região é composta por 39 municípios e ocupa uma área de 7947,17 km² (EMPLASA, 2014), além de abranger toda a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Alto Tietê (UGRHI 06), a uma altitude média de 750 metros acima do nível do mar (LIMA, 2015), conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Composição da Região Metropolitana de São Paulo



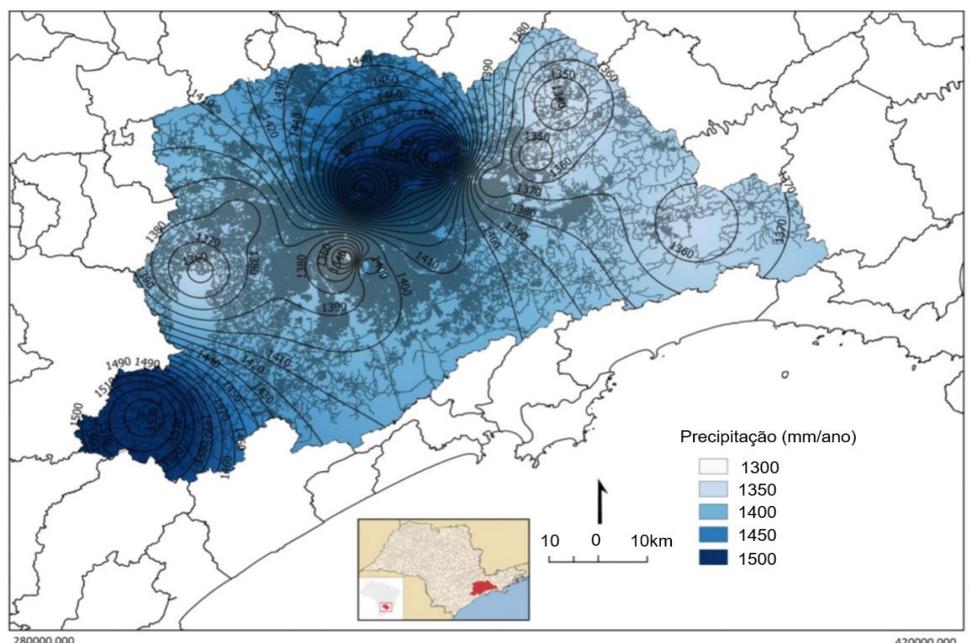
Fonte: Elaboração própria.

O núcleo central da RMSP localiza-se na cabeceira do Rio Tietê, na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BH-AT), uma área marcada tanto por sua baixa disponibilidade hídrica como pela alta variabilidade sazonal no seu regime de precipitação (REBOITA *et al.*, 2010; LIMA, 2015; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018). Por localizar-se em uma zona de transição entre os Climas Tropical Úmido de Altitude e Subtropical, a região é notadamente marcada por períodos secos (inverno) e úmidos (verão) bem definidos (REBOITA *et al.*, 2010; LIMA, 2015; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018).

A BH-AT coincide em grande parte com a localização da RMSP e contribui para o seu abastecimento. Esta bacia hidrográfica abrange 34 dos 39 municípios que compõem a RMSP, e corresponde a Unidade de Gerenciamento e Recursos Hídricos nº06 (UGRHI-06), sendo delimitada pelas UGRHI-05 (Piracicaba/Capivari/Jundiaí) ao norte, pelas UGRHI-10 (Tietê/Sorocaba) e UGRHI- 11 (Ribeira do Iguape/Litoral Sul) a oeste, ao sul pelas UGRHI-07 (Baixada Santista) e 03 e a leste pela UGRHI – 02 (Litoral Norte) (FABHAT, 2018b). Sendo que as bacias hidrográficas de apoio para o setor de abastecimento são a BH-PCJ e, mais atualmente, a BH-PS (FABHAT, 2018a).

Esta região também está sujeita a uma ampla variabilidade espacial de precipitação em decorrência da combinação dos ventos oceânicos e das suas características de relevo, que resulta em menores taxas de precipitação e maiores taxas de evaporação no vale do Tietê (LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018). A distribuição espacial da precipitação sobre esta área, em função de seus valores médios anuais, pode ser verificada na Figura 23.

Figura 23- Precipitação média anual na RMSP



Fonte: Lima, Lombardo e Magaña (2018, tradução livre).

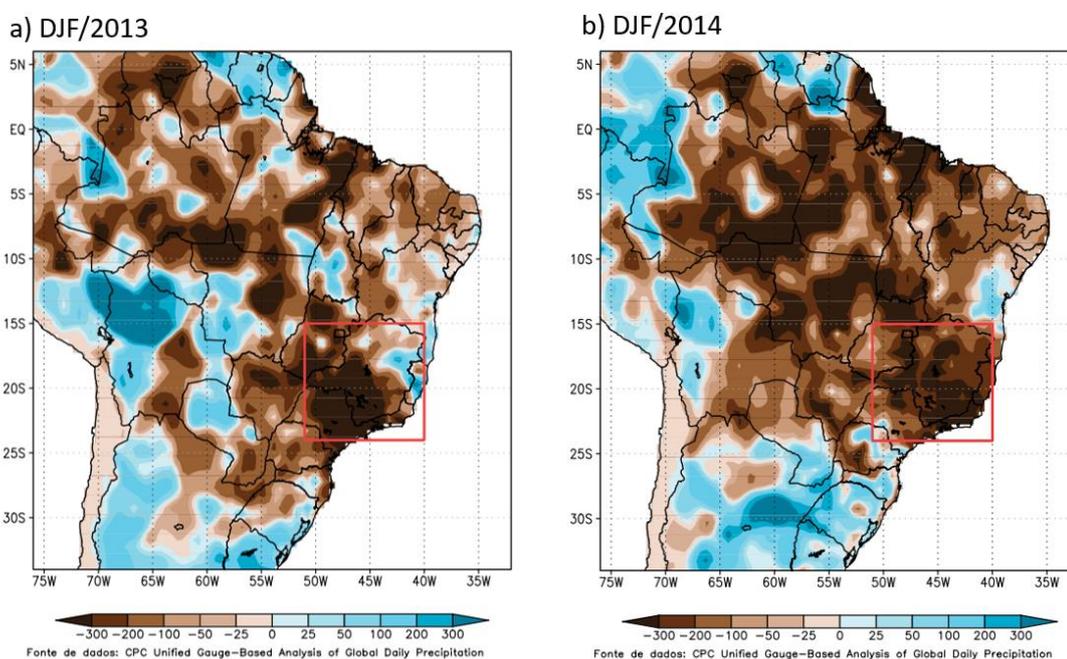
Além disto, não somente a RMSP, mas também toda a região sudeste brasileira tem o seu regime de precipitação dependente da passagem de frentes frias e da formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). (AMBRISSE; COELHO, 2018; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018; MARENGO *et al.*, 2020).

A ZCAS pode ser definida como um fenômeno meteorológico intrasazonal na direção NW-SE (SANTOS *et al.*, 2021) e é responsável pela alta variabilidade e formação de nuvens convectivas que se formam sobre a região em decorrência das temperaturas elevadas e da alta umidade do ar entre os meses de novembro e abril. (AMBRISSE; COELHO, 2018; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018; MARENGO *et al.*, 2020; SANTOS *et al.*, 2021).

Como parte dos reservatórios que garantem o abastecimento da RMSP não estão inseridos dentro dos limites geográficos da BH-AT e nem dos municípios que compõem a região metropolitana (FABHAT, 2018a,b; SABESP, 2020a,b), considerar a atuação das ZCAS sobre os reservatórios torna-se importante devido ao fato de que eles estão sujeitos a variabilidade sazonal e acabam sendo majoritariamente abastecidos durante os períodos chuvosos, garantindo o fornecimento de água ao longo dos períodos naturais de estiagem (AMBRISSE; COELHO, 2018).

Desde o final da década de 1990 tem sido observada uma ligeira redução no volume das chuvas na região sudeste brasileira, (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2015; COELHO *et al.*, 2015), sobretudo na região da Bacia do Paraná, cujos níveis mais baixos coincidem com as secas ocorridas entre os anos de 2013 e 2015 (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2015; SETH; FERNANDES; CAMARGO, 2015; MARENGO *et al.*, 2020), conforme mostrado na Figura 24, cujo somatório de déficits na região demarcada chegou a 222mm de chuva entre os anos de 2013-2014 (AMBRISSE; COELHO, 2018).

Figura 24- Anomalias na precipitação durante o verão (mm)



Fonte: Ambrissi e Coelho (2018).

O quinto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2013) já havia apontado para a tendência global do aumento do número de dias secos consecutivos e de eventos de precipitação intensa na região, cujos dados analisados pelos grupos de trabalho envolvidos na pesquisa referem-se ao espaço temporal de 1951 até 2010.

À época, a baixa confiabilidade nas verificações de tendência globais de secas foi associada às variações metodológicas na coleta e tratamento de dados e à falta de índices padronizados entre os diferentes países e regiões. No entanto, corroborando com as informações de tal relatório, Marengo *et al.* (2020) apontam que

a RMSP tem experimentado importantes mudanças climáticas ao longo dos últimos anos, sobretudo com o aumento da frequência de precipitação extrema e também do número de dias secos consecutivos, ao analisarem conjuntos pluviométricos da região dos últimos 60 anos.

Quando o assunto é abastecimento de água, as questões ambientais constituem-se enquanto um fator importante a ser estudado para que haja garantia no fornecimento de água para o sistema (LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018; ARANTES *et al.*, 2021). Dito isto, o fenômeno de precipitação é o principal fenômeno de entrada e responsável maior na manutenção da quantidade de água a ser utilizada pelo sistema de abastecimento da RMSP (LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018, SABESP, 2000a).

Neste sentido, as alterações do regime de precipitação e na recarga dos reservatórios que asseguram o fornecimento de água têm suscitado preocupações específicas ao se considerar os cenários climáticos projetados para a região Sudeste, sobretudo, para a RMSP (LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018), tornando-se uma preocupação a ser ponderada em termos de resiliência do sistema devido a sua capacidade em promover alterações sobre os fluxos do ciclo hidrológico (ARNELL; GOSLING, 2013; IPCC, 2014; MARENGO *et al.*, 2020).

Ademais, os fluxos do ciclo hidrológico da região são reflexo do somatório de alterações paisagísticas que resultaram na sua conformação atual (LIMA, 2015), e isso implica em todo o processo histórico de alteração do ambiente natural, em decorrência das influências antrópicas sobre o meio ambiente para a consolidação dos processos de ocupação e organização territorial da região. Ao longo de todo o processo de urbanização da RMSP, alterações da topografia e do material de revestimento do solo¹¹, alteraram toda a dinâmica de troca de calor entre superfícies do seu terreno e a atmosfera, influenciando e modificando mais rapidamente as características climáticas locais (LIMA, 2015; PRASOOD *et al.*, 2021).

Além de mudarem as dinâmicas climáticas locais, afetam também outros processos e fenômenos relacionados ao ciclo hidrológico, tais como o escoamento, a evapotranspiração e a infiltração (CHRISTOFFERSEN *et al.*, 2014; LIMA, 2015;

¹¹ Referem-se a alterações de topografia e do material de revestimento do solo, os processos relacionados ao desmatamento e a impermeabilização do solo, característicos do processo de urbanização e de dinamismo de expansão do espaço geográfico (LIMA, 2015).

PRASOOD *et al.*, 2021). Desta maneira, para além das condições climáticas, as alterações espaciais resultantes do intenso processo de urbanização da região resultaram, também, em alterações em fenômenos relacionados ao ciclo hidrológico, alterando tanto as funções ecossistêmicas que atuam na garantia quali-quantitativa da água como nas funções que exerce.

As alterações no regime de precipitação e o intenso e desordenado processo de urbanização da RMSP também exercem influência sobre a sua vegetação nativa (SILVA, 2013; LIMA, 2015; SILVA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021). De maneira geral, a vegetação está intimamente relacionada ao balanço do ciclo hidrológico local, cujas raízes viabilizam uma maior infiltração da água precipitada no solo, ainda que indiretamente pela sua maior conservação e aumentando o tempo de detenção e, também, na regulação do processo de evapotranspiração e sua sazonalidade (CHRISTOFFERSEN *et al.*, 2014). Já a vegetação ripária, também conhecida como mata ciliar, exerce influência sobre os parâmetros físico-químicos e biológicos da água e, portanto, atua principalmente sobre a sua qualidade (TAMBOSI *et al.*, 2015; RODRIGUES; VICTOR, 2020).

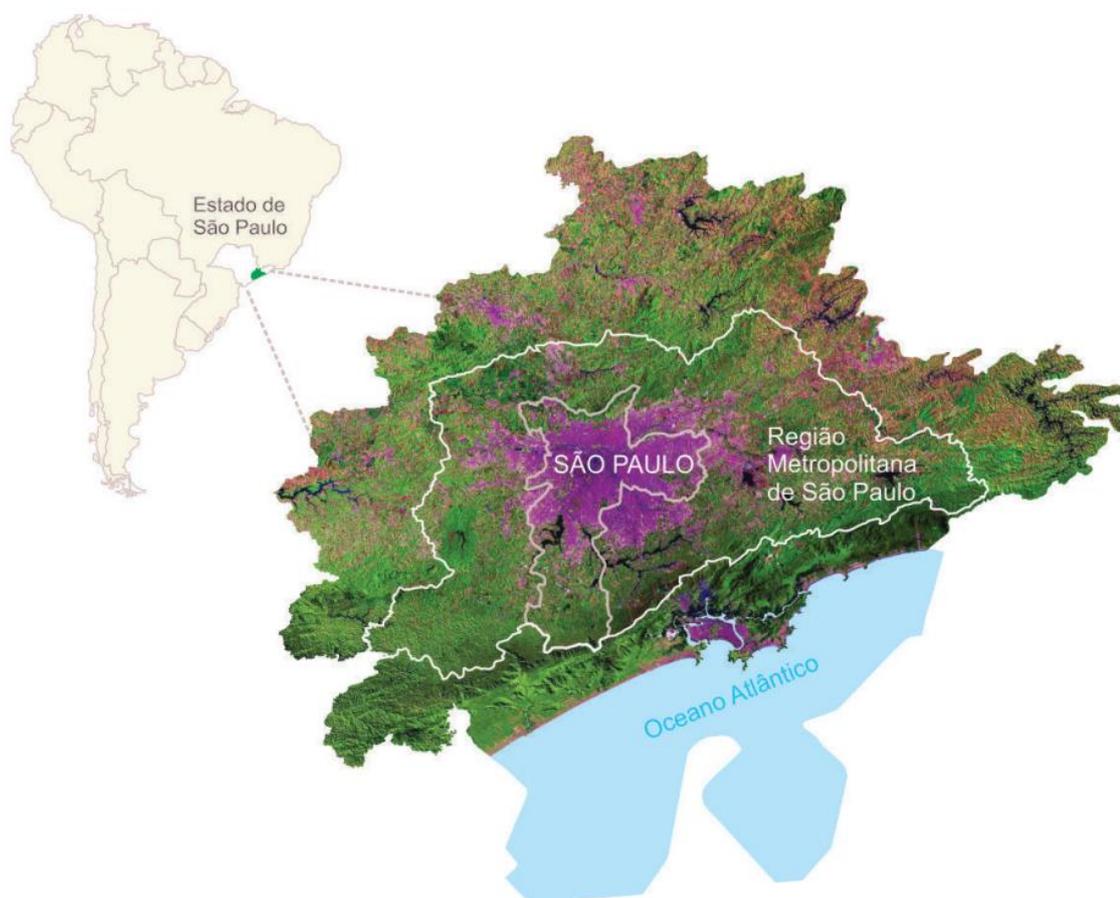
Outra característica marcante da RMSP é o grau de degradação dos seus recursos hídricos, sobretudo na BH-AT. Sobre a qualidade das águas superficiais, a Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FABHAT, 2017) faz uso de dois indicadores e utiliza-se de 72 pontos distintos de coleta: o Índice de Qualidade das Águas (IQA), relacionado ao enquadramento dos corpos da água, e o Índice de Qualidade das Águas Brutas para fins de Abastecimento Público¹² (IAP) FABHAT (2017).

Conforme mostrado na Figura 25, as regiões mais a montante das bacias hidrográficas dos rios afluentes ao Rio Tietê, principal corpo receptor de esgotamento, apresentam melhor qualidade. Chama a atenção o fato de que 5 pontos de monitoramento de IAP são classificados como regulares, ruins ou péssimos e estão nas proximidades de represas voltadas ao abastecimento. Cabe ressaltar, ainda, que os piores enquadramentos de água coincidem com a região mais povoada e populosa da RMSP.

¹² Na prática, o IAP considera os resultados de IQA na sua ponderação, uma vez que ambos os índices consideram três grupos de parâmetros em sua composição. Em FABHAT (2017) constam maiores informações sobre a ponderação destes índices.

Ainda sobre as questões ambientais, a RMSP está inserida em sua totalidade na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde de São Paulo (RBCV), conforme pode ser observado na Figura 26 , na qual são incluídas diversas unidades de conservação de dois importantes biomas brasileiros: o Cerrado e a Mata Atlântica (SIMA [s.d]b; VICTOR *et al.*, 2018; SILVA, 2013). A RBCV se configura como um espaço natural que possui a capacidade de viabilizar certo grau de bem-estar da população residente na região, desde que seja preservada, ao atuar na manutenção dos serviços hidrológicos ecossistêmicos (SIMA, [s.d]b; SILVA, 2013; VICTOR *et al.*, 2018; RODRIGUES, VICTOR, 2020).

Figura 26 - Localização da RMSP dentro da RBCV



Fonte:Rodrigues (2014).

Como pode ser observado na figura, a RBCV é muito mais extensa que a RMSP e é intensamente marcada pela supressão vegetal no município de São Paulo. Sobre este fato, Rodrigues e Victor (2020, p.30) explicam que:

“[...] Com a urbanização ao longo do tempo, a área central da RBCV teve a sua rede de drenagem recoberta por ruas e avenidas, com alteração do ciclo da água e da circulação do ar. Na cidade de São Paulo, nos últimos 75 anos, houve aumento de temperatura do ar de 2,1°C, elevação muito superior ao aumento da temperatura média global do planeta (0,5°C); diminuição da umidade relativa em 7%; aumento das chuvas em quase 400 mm (litros por metro quadrado); diminuição da intensidade dos ventos; aumento do número de horas de brilho solar ou diminuição da nebulosidade, redução da garoa e aumento das temperaturas mínimas do ar. Nos últimos anos, 65% dos eventos de enchentes foram causados pela combinação de ilha de calor urbano e brisa do mar. Nas últimas décadas, houve diminuição da quantidade de vapor de água em virtude da redução das áreas vegetadas. Sinergicamente, devido às mudanças no microclima da RBCV, a população está mais exposta aos riscos ambientais advindos do desenvolvimento urbano. Na RBCV, foram identificadas as diferentes fontes de vapor d'água que abastecem seu território (Nordeste, Pantanal, Amazônia e Oceano Atlântico). Como as alterações nos ecossistemas afetam desde o microclima até as condições climáticas regionais, essa relação deve ser considerada no planejamento e ordenamento territorial em escalas diferenciadas de intervenção [...]” (RODRIGUES; VICTOR, 2020, p. 30).

Ainda que indiretamente, a citação acima lança luz sobre a complexidade inerente ao sistema de abastecimento de água da RMSP: como as questões ambientais estão integradas e possuem relações sinérgicas com os fatores socioeconômicos; além de indicar que tanto a totalidade desta estrutura quanto as relações existentes entre estes agentes devem ser consideradas nos processos decisórios.

Desta maneira, outra consequência advinda das interações entre homem e meio ambiente, e que reflete diretamente nos aspectos ambientais do sistema de abastecimento, é a supressão da vegetação nativa. Ressalta-se que a presença da vegetação está estreitamente relacionada à manutenção e à garantia qualitativa dos recursos hídricos (BICUDO *et al.*, 2020). A supressão vegetal da RMSP teve – e tem – no processo de urbanização a sua principal causa deflagradora (SILVA, 2013).

Entre os anos de 1989 e 2010, a RMSP perdeu cerca de 415,94 km² de cobertura vegetal, o que corresponde a 5,23% do território da metrópole paulista (SILVA, 2013). Deste valor, a região perdeu 382,43 km² de vegetação arbórea, correspondendo a 4,81% da área da RMSP (SILVA, 2013). Lima (2015) aponta para o fato de que uma parte significativa da perda da cobertura vegetal diz respeito à área no entorno dos reservatórios de abastecimento. A necessidade de preservação de mananciais de

água e outros recursos naturais gerou a necessidade de delimitação de áreas nas quais o uso e a ocupação do solo são restritas, e a de recuperação de áreas cujo processo de urbanização e degradação já as haviam tomado (SIMA, 2016). Estas áreas são conhecidas como Áreas de Proteção e Recuperação de Mananciais (APRM).

Nos últimos anos, a Sabesp tem conseguido avanços importantes quanto à recuperação no entorno dos mananciais pertencentes a RMSP. Através do programa Cinturão Verde dos Mananciais Metropolitanas, a companhia afirma que a cobertura vegetal do entorno do Sistema Cantareira foi recuperada em 27,87%, alcançando 78% de sua área original (SABESP, 2019). A cobertura vegetal no entorno dos mananciais e represas operados pela companhia abrange uma área total de 330 km² e engloba cerca de 1,4% de todo o remanescente de Mata Atlântica do Estado de São Paulo (SABESP, 2019).

No documento suporte, que contém os subsídios para a elaboração do Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado da Região Metropolitana de São Paulo (PDUI-RMSP), consta que o avanço das áreas urbanizadas e atividades agropecuárias sobre as Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais (APRM) foi de 23,35% e 64,89%, respectivamente; ao compilarem informações entre os anos de 2002 e 2010 (EMPLASA, 2016). Ainda, segundo este documento, o somatório destes avanços resultou em uma área de 884,908 km², correspondendo a 34,90% da área de APRM (EMPLASA, 2016).

As porções situadas mais ao sul e ao norte da RMSP, seguindo o contorno da área mais urbanizada da região, são as que abrangem a maior porção territorial de remanescentes e são protegidos pelo Parque Estadual da Serra do Mar e pela Área de Proteção Ambiental (APA) de mesmo nome, que incorporam parcialmente a Serra do Mar e o maciço de Mata Atlântica que a compõem, em conjunto com o Parque Estadual da Cantareira (SILVA, 2013), “[...] formando uma das grandes florestas urbanas do mundo [...]” (SILVA, 2013, p.185).

4.3.2.3 Os aspectos hidrotécnicos e infraestruturais do sistema de abastecimento.

Em decorrência do posicionamento geográfico da RMSP, que já é naturalmente caracterizado pela baixa disponibilidade hídrica e variabilidade sazonal de precipitação (REBOITA *et al.*, 2010; LIMA, 2015; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018), as inúmeras obras de aproveitamento de recursos hídricos existentes, somadas às transferências de água de outras bacias hidrográficas para garantir a sua demanda, acabam gerando um maior grau de complexidade na análise dos fluxos de água da região, sobretudo, na análise dos elementos envolvidos na resiliência do seu sistema de abastecimento de água (BUCKERIDGE; RIBEIRO, 2018b; SABESP, 2020c).

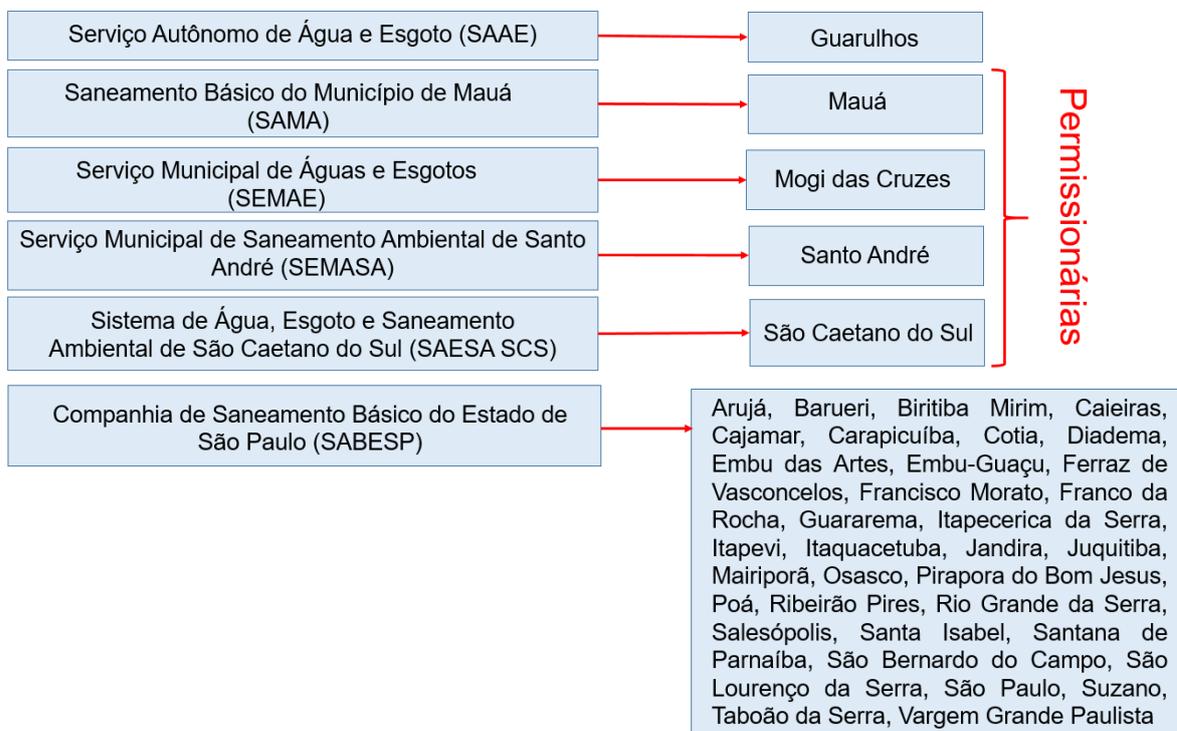
Como mencionado anteriormente, os fatores estressores dos recursos hídricos na BH-AT são muitos, envolvendo desde o rápido e desordenado processo de urbanização da região, a impermeabilização do solo e ocupação indevida de áreas de várzeas e as condições climáticas e geomorfológicas da região. Este arranjo de condições resulta na necessidade de importação de água de outras bacias hidrográficas para que toda a demanda da RMSP seja suprida, especialmente da Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivarí e Jundiá (BH-PCJ), cuja vazão de retirada pode chegar a 33 m³/s (FABHAT, 2018a; SABESP, 2020a,c), e, mais atualmente, da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul (BH-PS), com a transposição média outorgada de até 5.13 m³/s para o Sistema Cantareira, sob condições específicas (CBH-PS, 2016; SABESP, 2020a,c).

Esta situação é agravada pela alta carga de poluentes lançados em muitos dos seus corpos receptores, oriundos de atividades industriais, domésticas e, ainda, da gestão ineficiente destes efluentes e dos resíduos sólidos produzidos na região; como resultado das elevadas - e não planejadas – concentrações populacional e industrial históricas que exige uma elevada demanda de água (TUNDISI, 2018; BICUDO *et al.*, 2020). A contaminação destas águas inviabiliza o seu uso.

A RMSP é abastecida majoritariamente pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), sendo responsável pela maior parte da captação, tratamento e distribuição de água na região (TORRES *et al.*, 2018), totalizando o abastecimento de 35 municípios da região (SABESP, 2020c). Desta maneira, outras operadoras também prestam serviços em saneamento na região, tanto no

abastecimento de água como de esgotamento sanitário, conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 - Mapeamento das operadoras em saneamento e seus respectivos municípios de operação



Fonte: Elaboração própria, baseado em SNIS (2019a) e SABESP (2020c).

Quanto ao arranjo de sistemas produtores de águas, a RMSP é abastecida por dois tipos de sistemas: o Sistema Integrado, que compõem o sistema principal de abastecimento e conta com dez sistemas produtores que possuem reservatórios e outros de captação direta e, também, pelos Sistemas Isolados (SABESP, [s.d]a; SABESP, [s.d]b; FABHAT, 2018a; SABESP, 2020c), que são “[...] constituídos por poços ou pequenas captações superficiais, caracterizando-se por sua independência do Sistema Integrado Metropolitano [...]” (SABESP, 2020c, p. 30).

A composição do Sistema Integrado é baseada na interconexão entre dez sistemas produtores: Cantareira, Alto Tietê, Rio Claro, Guarapiranga, Rio Grande, Alto Cotia, Baixo Cotia, Ribeirão Estiva, Capivari-Embu Guaçu e São Lourenço (SABESP, [s.d]a; FABHAT, 2018a; SABESP, 2020c). Ao esclarecer sobre o funcionamento do SIM, a SABESP expõe que (SABESP, 2020c, p. 34):

“[...] Cada um desses Sistemas Produtores possui uma determinada área de atendimento, denominada área de influência, com abrangência proporcional à sua capacidade de produção e com posição geográfica relativamente próxima à respectiva Estação de Tratamento de Água – ETA, sendo estas áreas interligadas por meio do SAM, possibilitando flexibilidade no atendimento de algumas regiões, permitindo serem atendidas em determinados momentos por um ou outro Sistema Produtor [...]” (SABESP, 2020c, p. 34).

Já os Sistemas Isolados são sistemas hídricos direcionados ao abastecimento, cuja coleta é feita por poços ou pequenas captações diretas, mas que não possuem conexão com o Sistema Integrado (SABESP, 2020c). Ressalta-se que são quatro municípios pertencentes à RMSP, cujo atendimento próprio constitui-se integralmente pelos SIs operados pela SABESP (SABESP, 2020c), são eles: Biritiba-Mirim, Mairiporã, Pirapora do Bom Jesus e Salesópolis.

Somados, os sistemas produtores possuem uma capacidade de produção de 82,42 m³/s. A caracterização de cada um dos sistemas produtores está presente na Quadro 3.

Quadro 3 - Caracterização dos Sistemas Produtores de água.

Sistemas Produtores (continua)	
Sistemas Produtores	Caracterização
Cantareira	<p>Considerado o maior sistema produtor de águas da RMSP, este complexo é composto por seis represas. As represas Jaguarí, Jacareí, Cachoeira e Atibainha estão localizadas na BH-PCJ, enquanto as represas Paiva Castro e Águas Claras localizam-se na BH-AT. Estas represas são interligadas por 28 quilômetros de túneis e canais e contam com uma estação elevatória capaz de impulsionar até 33 m³/s de água, em um desnível geográfico de cerca de 120 metros. Ao todo, este sistema produtor possui capacidade volumétrica de armazenamento em 981,93 Mm³. O tratamento da água é feito na maior Estação de Tratamento (ETA) de água do Guaraú, cuja capacidade de tratamento é de até 33m³/s, sendo responsável pelo abastecimento de cerca de 40% da população da RMSP. O Sistema Cantareira conta ainda com a importação de uma vazão de 5,13 m³/s de água com a Bacia Hidrográfica Paraíba do Sul (BH-PS), realizado entre as represas Atibainha (BH-AT) e Jaguarí (BH-PS), em momentos de escassez. Para além da RMSP, este sistema ainda é responsável pelo abastecimento das cidades de Piracaia (SP) e Nazaré Paulista (SP), cujo somatório resulta em uma vazão de 0,224 m³/s, e os municípios de Extrema (MG) e Joanópolis (SP), com 0,384 m³/s. Ainda, o Sistema Cantareira deve funcionar de maneira a garantir 5,63 m³/s para suprimir as demandas à sua montante.</p>
Alto Tietê e Rio Claro*	<p>O Sistema Produtor do Alto Tietê é considerado o segundo maior Sistema Produtor metropolitano, sendo composto por cinco represas (Ponte Nova, Paraitinga, Biritiba, Jundiá e Taiapuê), cujas interligações são feitas por túneis, canais e estações elevatórias. A água é captada e tratada na estação de tratamento de Taiapuê, com capacidade produtiva de 15m³/s. A capacidade de produção de ambos os sistemas é de 19 m³/s de água atender cerca de 23,17% da população da região. Ambos os sistemas são contabilizados em conjuntos, pois a represa Ponte Nova (Alto Tietê) recebe as águas remanescentes do Sistema Rio Claro, toda vez que a disponibilidade hídrica deste sistema excede a capacidade de tratamento de sua ETA. Já o Sistema Produtor Rio Claro, localizado nas proximidades da vertente marítima da Serra do Mar, é composto pela represa do Ribeirão do Campo e também recebe água proveniente do Rio Guaratuba (para isto, conta com um sistema de captação e recalque para reversão de 1,0 m³/s). Conta com a ETA Casa Grande, com capacidade de 4m³/s de produção. Ambos os sistemas juntos possuem uma capacidade de armazenamento útil de cerca de 533,23 Mm³ de água.</p>
Alto e Baixo Cotia*	<p>O Sistema Produtor Alto Cotia é composto por duas represas: a represa Pedro Beicht e a represa Cachoeira da Graça. O tratamento da água é feito na ETA Alto Cotia, com capacidade de produção de 1,1 m³/s de água, sendo responsável pelo abastecimento de cerca de 1,34% da população da RMSP. Já o Sistema Produtor Baixo Cotia conta com a represa Isolina Inferior, cuja ETA Baixo Cotia tem a capacidade de produzir 0,8m³/s de água, sendo responsável pelo abastecimento de 0,98% da população. A capacidade total de armazenamento deste complexo é de 16,5 milhões de metros cúbicos de água.</p>

Fonte: Adaptado de Sabesp ([s.d] a), com informações de Sabesp ([s.d]a), Sabesp (2008a,b,c), Sabesp (2009 a,b,c,d), Emplasa (2016), FABHAT (2018a); Sabesp (2020c)

Nota: Ao realizar a caracterização dos sistemas produtores, alguns sistemas foram agrupados conforme a disponibilização de informações encontradas nos meios de consulta.

Quadro 3 - Caracterização dos Sistemas Produtores de água.

Sistemas Produtores (conclusão)	
Sistemas Produtores	Caracterização
Guarapiranga-Capivari e Rio Grande*	Este sistema produtor é composto por três represas (Guarapiranga, Capivari e Billings - braço Taquacetuba), sendo considerado o terceiro maior produtor metropolitano. O principal manancial, a Guarapiranga, é de propriedade da Empresa Metropolitana de Águas e Energia – EMAE - e possui uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 171 milhões de metros cúbicos de água. Seus principais afluentes são os Rios Embu-Guaçu, Embu-Mirim e Rio Palheiros, bem como as águas transferidas da represa Billings e do rio Capivari através de estações elevatórias. A água captada é tratada na ETA Rodolfo José da Costa e Silva (ETA-RJCS) com capacidade de produção de até 16 m ³ /s de água e é responsável pelo abastecimento de cerca de 19,5% da população da RMSP. Ainda, na bacia do Guarapiranga, está em operação o sistema produtor Capivari - Embu-Guaçu, de menor porte, cujo sistema de captação do rio Embu-Guaçu localiza-se a jusante do ponto que recebe as contribuições da transposição do rio Capivari, cuja ETA Embu-Guaçu tem capacidade de tratar até 0,15m ³ /s de água, em acréscimo a captação subterrânea por meio de dois poços. O Sistema Produtor Rio Grande é formado pela compartimentação do braço do Rio Grande na represa Billings e é responsável pelo abastecimento de cerca de 6,10% da população da RMSP, cuja capacidade de produção de água é de 5,5 m ³ /s pela ETA Rio Grande. Posteriormente, para evitar a contaminação das águas deste sistema, pela água proveniente do corpo central da represa Billings, foi construída uma barragem para tal separação. O volume útil de reservação total entre os sistemas Guarapiranga, Rio Grande e Capivari-Monos é de 850,84 Mm ³ .
Ribeirão da Estiva	O Sistema Produtor Ribeirão da Estiva faz captação diretamente no manancial de mesmo nome, cuja capacidade de armazenamento útil é de 5000 metros cúbicos. A ETA Ribeirão da Estiva tem capacidade de produção em até 0,1 metro cúbico por segundo e é responsável pelo abastecimento de cerca de 29,6 mil pessoas, residentes nos municípios de Rio Grande da Serra e Ribeirão Pires.
São Lourenço	O Sistema Produtor São Lourenço capta água do reservatório Cachoeira do França. Esta água é tratada na Estação de Tratamento Vargem Grande Paulista, que possui uma capacidade de produção de até 6,4 metros cúbicos de água por segundo. Este sistema é responsável por atender 1,4 milhão de habitantes. Este sistema começou a entrar em operação comercial desde 2018 para aumentar a oferta de água para a região.

Fonte: Adaptado de Sabesp ([s.d] a), com informações de Sabesp ([s.d]a), Sabesp (2008a,b,c), Sabesp (2009 a,b,c,d), Emplasa (2016), FABHAT (2018a); Sabesp (2020c)

Nota: Ao realizar a caracterização dos sistemas produtores, alguns sistemas foram agrupados conforme a disponibilização de informações encontradas nos meios de consulta.

O monitoramento do volume de água armazenado nos reservatórios é feito diariamente (FABHAT, 2018a; SABESP, [s.d]d) e os valores reportados referem-se ao *volume útil*¹³ somados à *reserva técnica*¹⁴ (LIMA, 2018).

Além do mais, a Sabesp também opera cerca de 60 poços profundos na região para atender algumas localidades que não são alcançadas pelo Sistema Integrado e nem pelos Sistemas Isolados (SABESP, [s.d]b). Contudo, estima-se que existam mais de 12 mil poços voltados para o abastecimento da região, entre poços outorgados e ilegais (CONICELLI, 2014; BICUDO *et al.*, 2020), cuja previsão das extrações somadas giram em torno de 12m³/s (BICUDO *et al.*, 2020). A demanda total da RMSP é cerca de 82m³/s e equivale a mais que o dobro da disponibilidade mínima (Q7,10)¹⁵ de 39m³/s da BH-AT, considerando o volume de 19,1m³/s resultante do somatório das reservas subterrâneas exploráveis (BICUDO *et al.*, 2020).

Além dos sistemas produtores, o sistema de abastecimento de água da RMSP conta com o Sistema de Adutor Metropolitano (SAM), cuja finalidade é a interligação entre os sistemas produtores que compõem o Sistema Integrado (LIMA; LOMBARDO, MAGAÑA, 2018; VARGAS, 2019; SABESP, 2020c), sendo responsável por transportar “[...] a água para mais de uma centena de centros de reservação interligados a sistemas setorizados de distribuição [...]” (VARGAS, 2019, p.106).

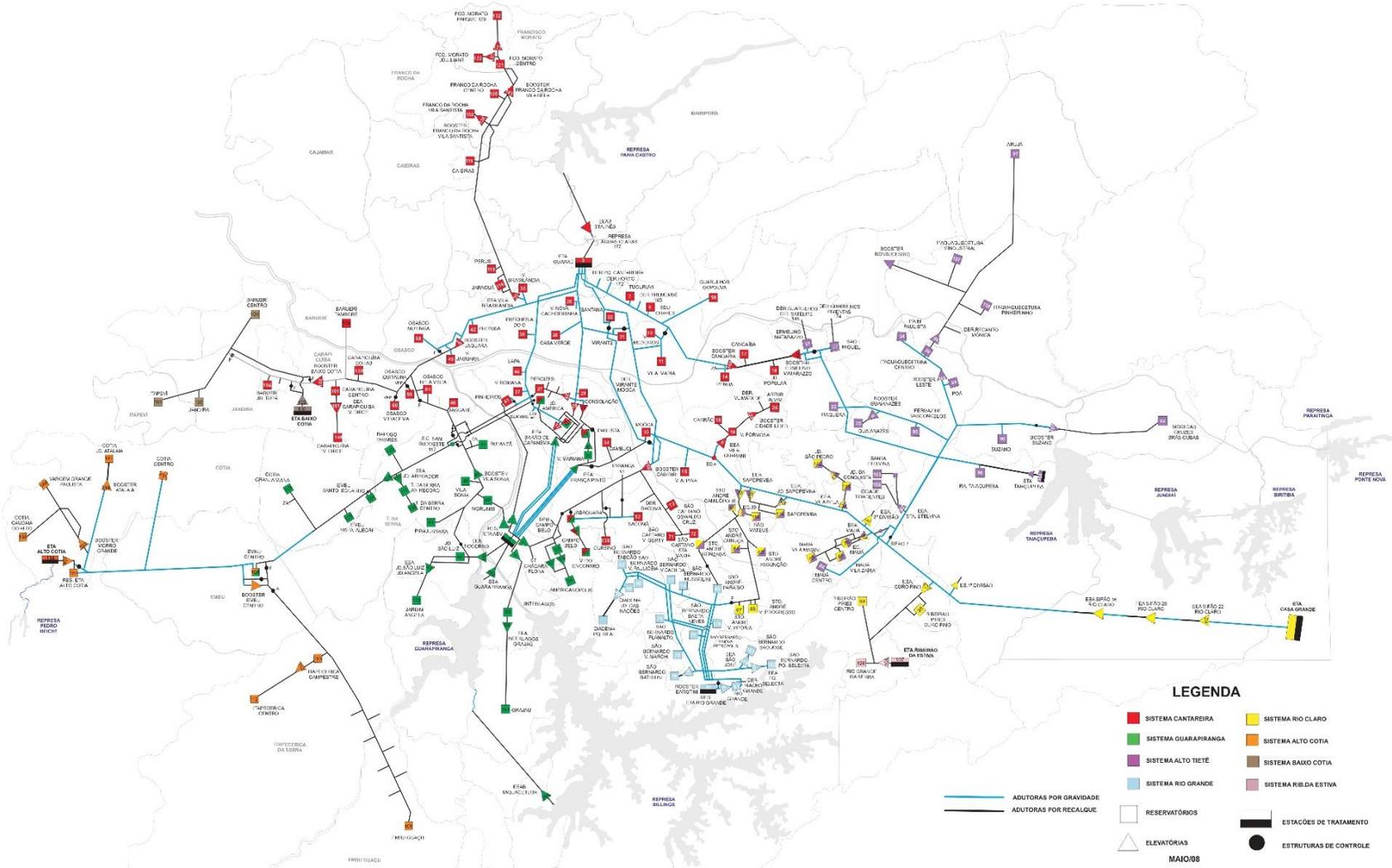
O SAM é representado pelo conjunto de linhas adutoras, reservatórios setoriais, estações elevatórias e toda a estrutura para a distribuição da água (SABESP, 2020c), conforme pode ser verificado na Figura 28. Além dos reservatórios e das ETAs, a infraestrutura em abastecimento da RMSP conta com 98 estações elevatórias e 24 *boosters*, 220 adutoras, 39870 km de rede de distribuição para que a água chegue a 4,961 milhões de ligações domiciliares cadastradas e ativas (SABESP, 2020).

¹³ *Volume útil* diz respeito ao volume de água contido nos reservatórios e que pode ser utilizado sem o auxílio de bombeamento (LIMA, 2018).

¹⁴ *Reserva técnica* diz respeito ao volume de água contido nos reservatórios, cuja utilização só é possível de ser feita com o auxílio de bombeamento (LIMA, 2018).

¹⁵ Q7,10 é a vazão mínima de sete dias de duração com dez anos de recorrência. Esta vazão reflete o comportamento de contribuição dos aquíferos ao escoamento de base dos rios, em períodos climáticos secos.

Figura 28 - Sistema Adutor Metropolitano



Fonte: COBRAPE (I.s.d.)

Sob a ótica de infraestrutura, outra característica importante a ser considerada são as perdas de água ao longo do sistema de abastecimento. Estas perdas dizem respeito à diferença entre o volume total de água produzido nas estações de tratamento de água e o somatório dos volumes medidos nos hidrômetros (SABESP, 2020b). As perdas totais do sistema de abastecimento giram em torno de 30%, e incluem os usos não faturados, as perdas aparentes (não físicas) e as perdas reais (físicas) (FABHAT, 2018b, SABESP, 2020b).

Com relação ao sistema de esgotamento sanitário, os extravasamentos, que correspondem ao “[...] fluxo indevido de esgotos ocorrido nas vias públicas, nos domicílios e nas galerias de águas pluviais como resultado do rompimento ou obstrução das redes coletoras de esgoto, interceptores ou emissários de esgotos[...]” (SNIS, 2019a, p. 167), não são informações obrigatórias de serem preenchidas pelas prestadoras de serviços e, desta maneira, as informações sobre este tipo de perda são “pouco expressivas” (SNIS, 2019a).

Contudo, alguns trabalhos indicam que estas perdas incidem sobre a recarga dos corpos de água subterrâneos, influenciando na qualidade de suas águas (CONICELLI, 2014; HIRATA, 2018). Estima-se que entre 40% e 60% das perdas oriundas de fugas das redes de água e de esgoto incrementam o volume das recargas subterrâneas em zonas urbanas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (HIRATA, 2018), o que, devido ao último, implica na sua contaminação.

4.3.3 Modelagem conceitual das relações de causalidade

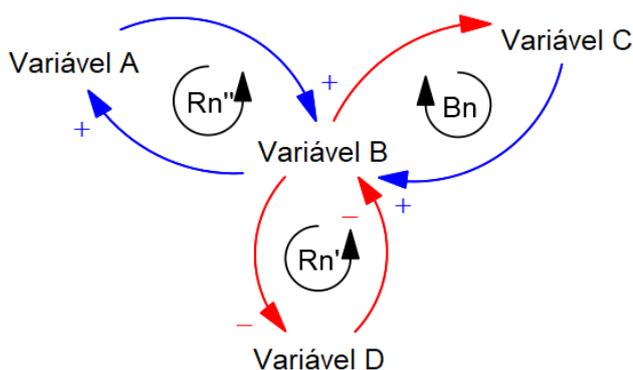
O modelo conceitual proposto é conhecido como Diagrama de Causalidade e permite a identificação tanto das inter-relações de causa-e-efeito entre os componentes do sistema como a identificação das possíveis alças de retroalimentação. As alças de retroalimentação conferem maior complexidade ao sistema, permitindo, assim, o mapeamento das interações e indicativos de intensificação ou de atenuação de fenômenos.

O Diagrama de Causalidade foi elaborado com o auxílio do software Vensim® PLE PLUS 9.0.0. A notação usual neste tipo de abordagem sistêmica foi adotada na identificação das inter-relações, na qual as setas partem de um componente e chegam

em um segundo componente, indicando o efeito causado pelo primeiro componente no segundo. Setas positivas (+) indicam uma intensificação deste segundo componente a partir da influência exercida pelo primeiro, ao passo que setas negativas (-) descrevem um efeito de atenuação destas relações (FORD, 2010).

Quando combinadas, estas setas permitem a identificação de alças de retroalimentação, também conhecidas como relações de *feedback* (FORD, 2010). No caso de uma combinação cíclica de setas de mesmo sinal, a alça de retroalimentação é positiva, podendo também ser chamada de *ciclo de reforço* e, por isto, indicada pela letra R_n ¹⁶. Já no caso de uma combinação cíclica com setas com sinais opostos, a alça de retroalimentação é negativa e conhecida como *ciclo de balanceamento*, indicada pela letra B_n . A ilustração destas relações está explicitada na Figura 29.

Figura 29 - Inter-relações entre componentes de um sistema

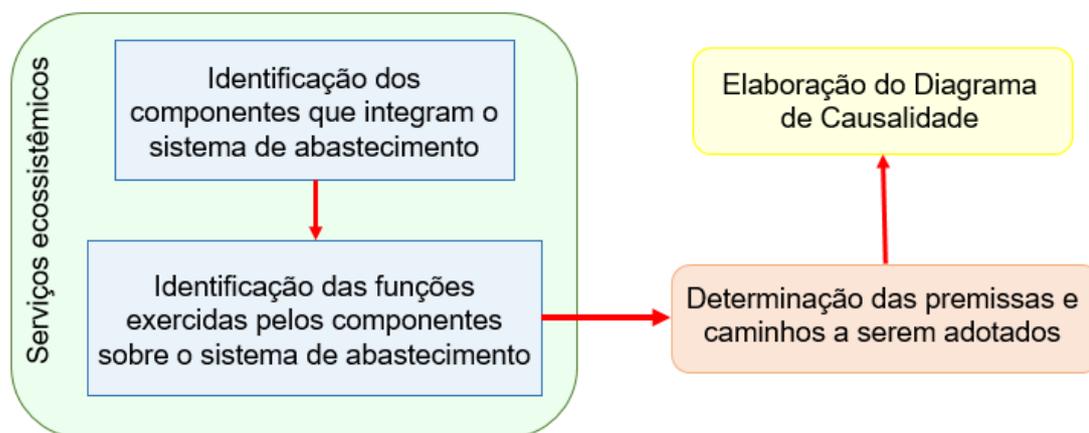


Fonte: Elaboração própria.

A partir da compreensão de como estruturar o modelo conceitual e da familiarização com os aspectos socioeconômicos, ambientais e político-infraestruturais da RMSP foi traçado um caminho para a identificação das inter-relações existentes entre os componentes do sistema de abastecimento, conforme esquematizado na Figura 30. Os argumentos utilizados constam no Quadro 4.

¹⁶ O "n" subscrito refere-se ao número de identificação da alça de retroalimentação na qual pertence.

Figura 30 - Caminho de identificação das inter-relações



Fonte: Elaboração própria.

Em acréscimo, e diante de tudo o que foi exposto até o momento, no processo de modelagem, o ser humano foi identificado como um componente endógeno ao sistema. Isto decorre do fato de que, ao passo que a influência que o ser humano exerce sobre o sistema de abastecimento é capaz de alterar mudanças nas suas variáveis de controle, o comportamento do sistema também resulta em alterações no consumo e no desenvolvimento de atividades humanas que necessitem de água. Logo, as relações estabelecidas entre o homem e o sistema de abastecimento são uma via de mão dupla.

Contudo, com a finalidade de simplificação do modelo, esta inclusão foi feita por meio de ações e características ambientais nas quais o ser humano exerce influência e, portanto, as relações humanas foram embutidas como variáveis exógenas. Esta medida foi adotada a partir do entendimento de que o objeto de pesquisa é a resiliência do sistema de abastecimento de água em sua interface socioecológica, cujo enfoque não consiste na análise de fenômenos e processos sociais específicos.

Quadro 4 – Construção do argumento para elaboração do Diagrama de Causalidade.

Diagrama de Causalidade (continua)		
Componente	Dependências e função sobre o sistema de abastecimento	Caminhos adotados no processo de modelagem
Precipitação	<p>A precipitação está estreitamente relacionada os processos de recarga dos corpos de água superficiais e subterrâneos (MANOEL FILHO, 2000; MELLO; SILVA, 2013) e, por isto, foi considerada o principal fenômeno de entrada e de garantia de água no sistema de abastecimento (LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018). Para que ocorra a precipitação é necessário que haja uma combinação de fatores que viabilizem a sua formação, tais como: umidade atmosférica, presença de núcleos higroscópicos e mecanismos de resfriamento e que viabilizem a formação de gotas (VIANELLO; ALVES, 2012). Além do mais, um padrão de chuvas regulares é necessário para manter as características da vegetação local, que está relacionada a garantia da quantidade e qualidade de água (REBELLO <i>et al.</i>, 2020). A água precipitada pode ser dividida em quatro componentes distintos, nos quais a sua respectiva magnitude relativa depende das características naturais e artificiais da região, especialmente ao que tange a permeabilidade do solo. (MANOEL FILHO, 2000).</p>	<p>A água precipitada pode tomar três caminhos diretamente relacionados ao abastecimento: 1) Precipitação direta; 2) escoamento superficial e 3) infiltração. Além do mais, água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, onde parte atingirá o solo e será um incremento aos processos de escoamento e infiltração e, outra parte, ficará sujeito ao processo de evaporação em sua copa. Por ser necessária para a manutenção da vegetação local, alterações no regime de precipitação têm o potencial de modificar e reduzir a vegetação nativa. No processo de modelagem, os quatro caminhos possíveis para a água precipitada foram considerados e sinalizados.</p>
Escoamento superficial	<p>O escoamento superficial, também chamado de <i>run-off</i> ou deflúvio, corresponde ao processo de fluxo por ação da gravidade em que a água precipitada flui das partes mais altas para as mais baixas do terreno, até atingir um corpo da água (MANOEL FILHO, 2000, MELLO; SILVA, 2013). As águas escoadas, de maneira geral, atuam como um incremento volumétrico de água nos corpos hídricos. A magnitude do escoamento superficial é função da intensidade da chuva, permeabilidade do solo/terreno, duração da chuva, tipo de vegetação, área da bacia de drenagem, distribuição espacial da precipitação, geometria dos canais dos rios e riachos, profundidade do nível das águas subterrâneas e declividade da superfície do solo (MANOEL FILHO, 2000).</p>	<p>Na modelagem, o escoamento superficial corresponde a um incremento volumétrico de água precipitada sobre os corpos de água superficiais e, portanto, possui a capacidade de potencializar a recarga dos corpos superficiais. Exclui-se deste montante, as águas escoadas em áreas urbanizadas, uma vez que o tempo de detenção destas áreas é reduzido pela configuração do ambiente urbano e pelos processos de retificação e canalização das águas, que não são direcionados aos reservatórios de abastecimento (GOUVEIA; RODRIGUES, 2017). Por tratar-se de uma das principais vias de entrada e de saída de água no sistema, o escoamento superficial foi considerado uma variável de controle sobre o sistema.</p>

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 4 – Construção do argumento para elaboração do Diagrama de Causalidade.

Diagrama de Causalidade (continuação)		
Componente	Dependências e função sobre o sistema de abastecimento	Caminhos adotados no processo de modelagem
Infiltração	<p>Por se tratar da capacidade do solo de absorver uma parcela do volume de água oriundo do fenômeno de precipitação, a infiltração é o processo responsável pela entrada de água nos corpos de água subterrâneos (MANOEL FILHO, 2000; LIMA, 2015; DELGADO; CAROL; CASCO, 2020; PRASOOD <i>et al.</i>, 2021). A infiltração é um processo lento e, portanto, ocorre com maior facilidade ao longo de eventos chuvosos menos intensos e mais constantes (LIMA, 2015). O processo de infiltração depende de características litológicas, estratigráficas e da estrutura rochosa (MANOEL FILHO, 2000).</p>	<p>O processo de infiltração viabiliza dois caminhos a serem considerados: 1) ficar retido na zona não saturada do solo, e 2) alcançar a zona saturada, possibilitando a recarga dos corpos subterrâneos e, posteriormente, participar do escoamento sub-superficial e subterrâneo na recarga dos corpos superficiais em momentos de escassez (MANOEL FILHO, 2000). Para fins de modelagem, adotou-se que a infiltração é responsável por potencializar a entrada de água no solo e viabilizar as condições de armazenamento de água subterrânea e do escoamento sub-superficial, no que diz respeito a permanência do solo saturado para que ocorra este último processo que é um dos mecanismos responsáveis pela recarga dos corpos superficiais.</p>
Escoamento de base	<p>O escoamento de base é de extrema importância para a manutenção e garantia de recarga de água dos corpos superficiais em períodos de estiagem (MANOEL FILHO, 2000). Este processo é dependente da condutividade hidráulica, que envolve as características do meio poroso, das características do solo e das propriedades do fluido, no caso, da água (MANOEL FILHO, 2000). A movimentação da água no meio poroso é bastante complexa devido as variações e irregularidades presentes no meio poroso e dos diferentes tipos de solos e rochas que estão presentes na região (MANOEL FILHO, 2000; CONICELLI, 2014)</p>	<p>Apesar de existirem classes de armazenamento de água subterrânea (aquífero, aquíclode, aquícardo) e variações de comportamento dentro destas classificações (MANOEL FILHO, 2000), para fins de modelagem o escoamento sub-superficial e subterrâneo deve ser compreendido como a movimentação da água na região saturada dos solos, isto é, abaixo do nível freático. Portanto, no modelo, o escoamento de base tem o potencial de incrementar o volume de água superficial em reservação.</p>
Evapotranspiração	<p>A evaporação é a principal via de retorno da água para atmosfera, em um processo de reciclagem da precipitação (CHRISTOFFERSEN <i>et al.</i>, 2014). Este fenômeno pode ser compreendido como o somatório entre a evaporação (ou vaporização) e a transpiração (MANOEL FILHO, 2000). O primeiro corresponde a parcela de água presente nos solos e nas superfícies que adquire energia suficiente, através da radiação solar e passa do estado líquido para vapor; já o segundo, corresponde ao processo de perda de água das plantas para atmosfera (MANOEL FILHO, 2000).</p>	<p>Para fins de modelagem, a evapotranspiração foi considerada uma das principais saídas da água do sistema, uma vez que o modelo do sistema de abastecimento está estruturado em função dos reservatórios de águas superficiais. Como a evaporação e a transpiração são fenômenos difíceis de serem contabilizados isoladamente (MANOEL FILHO, 2000), no processo de modelagem foi considerada a soma entre ambos, em um único valor, a evapotranspiração.</p>

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 4 – Construção do argumento para elaboração do Diagrama de Causalidade.

Diagrama de Causalidade (continuação)		
Componente	Dependências e função sobre o sistema de abastecimento	Caminhos adotados no processo de modelagem
Vegetação local	A vegetação, de forma geral, exerce uma série de serviços ecossistêmicos que contribuem diretamente na garantia qualitativa de água ou, ainda, sobre a manutenção de outros fatores que acabam por afetar a relação de balanço entre a água e o meio ambiente e, portanto, acabam atuando indiretamente sobre água. É dependente das características e qualidade do solo (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2021). Dentre as funções da vegetação no sistema, estão: estabilidade climática, regulação da qualidade do ar, interceptação da água das chuvas (entre 22% e 29%), percolação da água precipitada, preservação dos recursos hídricos, regulação de processos erosivos; evapotranspiração; produção de alimentos, biodiversidade e benefícios culturais (RODRIGUES; VICTOR, 2020).	No processo de modelagem foi considerado que a vegetação tem o potencial de aumentar o processo de evapotranspiração, devido a sua capacidade de participar do processo de transpiração e de interceptar a água das chuvas (RODRIGUES; VICTOR, 2020). Além do mais, devido a sua capacidade de interceptar a água, a vegetação aumenta o tempo de detenção de água na bacia, contribuindo ao atenuar o processo de escoamento superficial e potencializar o processo de infiltração da água no solo. Portanto, como a vegetação está relacionada a permeabilidade da superfície do solo, no processo de modelagem dinâmica a cobertura vegetal está diretamente relacionada à área permeável e indiretamente aos outros fatores comentados.
Mudanças climáticas	Diversos estudos têm apontado para os efeitos das mudanças climáticas sobre a RMSP, que têm gerado alterações no regime de precipitação da região: aumento da frequência de precipitação extrema e, também, de dias secos consecutivos (MARENGO <i>et al.</i> , 2020), além de uma singela diminuição das quantidades totais de chuvas ao longo dos anos (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2015; COELHO <i>et al.</i> , 2015). Ademais, projeções de mudanças climáticas apontam para o seu potencial em reduzir a biodiversidade de fauna e flora (IPCC 2013, 2014 e 2021) e dos solos (OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2021), e conseqüentemente, sendo capaz de afetar toda a dinâmica hidrológica da região. Estas situações têm demandado respostas por parte dos arranjos institucionais e de governança, com o intuito de minimizar possíveis alterações de influência climática.	Na construção do modelo conceitual, foram identificados os principais componentes que sofrem influências deste fenômeno; no caso, a precipitação tem o seu potencial atenuado pelas mudanças climáticas, assim como acontece também com a vegetação (IPCC, 2013, 2014 e 2022) Em consequência destas alterações, e em decorrência do seu efeito em cadeia, as mudanças climáticas acabam exigindo mais dos arranjos institucionais e de governança na promoção da resiliência e da adaptação de medidas (ALLAN; XIA; PAHL-WOSTL, 2013; SABESP, 2020).

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 4 – Construção do argumento para elaboração do Diagrama de Causalidade.

Diagrama de Causalidade (continuação)		
Componente	Dependências e função sobre o sistema de abastecimento	Caminhos adotados no processo de modelagem
Águas superficiais disponíveis para abastecimento	A Sabesp é responsável por operar a maioria dos sistemas de abastecimento da RMSP (TORRES <i>et al.</i> , 2018). Como a maior parte do atendimento pelos seus sistemas produtores, sejam eles integrantes dos Sistemas Isolados ou dos Sistemas Integrados, provem de corpos de águas superficiais - cerca de 85% do volume consumido -, este volume de água é a fonte principal do sistema de abastecimento.	O volume contabilizado no componente <i>Águas superficiais voltadas para abastecimento</i> diz respeito ao somatório dos volumes voltados para reservação de água pelos sistemas produtores operacionalizados pela Sabesp e, portanto, considerado o estoque do sistema. Este componente é voltado para suprir a demanda antrópica sobre a água e, portanto, tem o potencial de atenuar a demanda antrópica por este recurso.
Demanda antrópica sobre a água	A variável demanda antrópica sobre a água corresponde ao somatório de todos os diferentes consumos utilizados pelo homem. No caso, somam-se as vazões operacionalizadas pela Sabesp (industrial e urbano e perdas), o agrícola e as perdas.	No processo de modelagem, a demanda antrópica pelo uso da água atua como um atenuador do componente águas superficiais disponíveis para abastecimento, por tratar-se de um dos principais componentes diretamente relacionados à saída do sistema. Trata-se de um componente que resulta do somatório entre o consumo agrícola e a vazão das águas superficiais que são operacionalizadas pela Sabesp, que diz respeito aos consumos industrial e urbano e, também, às perdas do sistema de abastecimento.
Vazão das águas superficiais operacionalizadas pela Sabesp	Esta variável corresponde a vazão operacionalizada pela Sabesp, que é direcionada para atender o somatório das demandas dos consumos urbanos e industriais, acrescidos pelas perdas de produção e distribuição das águas. As perdas somam-se a esta vazão, uma vez que as perdas aparentes estão associadas às vendas e ao consumo ilegal de água e as perdas reais incrementam os custos de produção e distribuição (TARDELLI FILHO, 2016).	No modelo, a <i>vazão das águas superficiais que são operacionalizadas pela Sabesp</i> diz respeito aos consumos industrial e urbano e, também, às perdas do sistema de abastecimento. O consumo urbano considerado, refere-se ao somatório dos consumos residencial, comercial e de serviços públicos. As perdas foram consideradas um excedente no volume de água a ser disponibilizado para que a demanda de todos os consumos seja atendida. Desta maneira, além de somar-se a vazão das águas superficiais disponibilizadas pela Sabesp, também é função desta vazão e por ela é influenciada. Para fins de modelagem, os três tipos de consumos foram individualizados no Diagrama de Causalidade, assim como as perdas, totalizando o total do consumo a ser considerado no modelo.

Fonte: Elaboração própria.

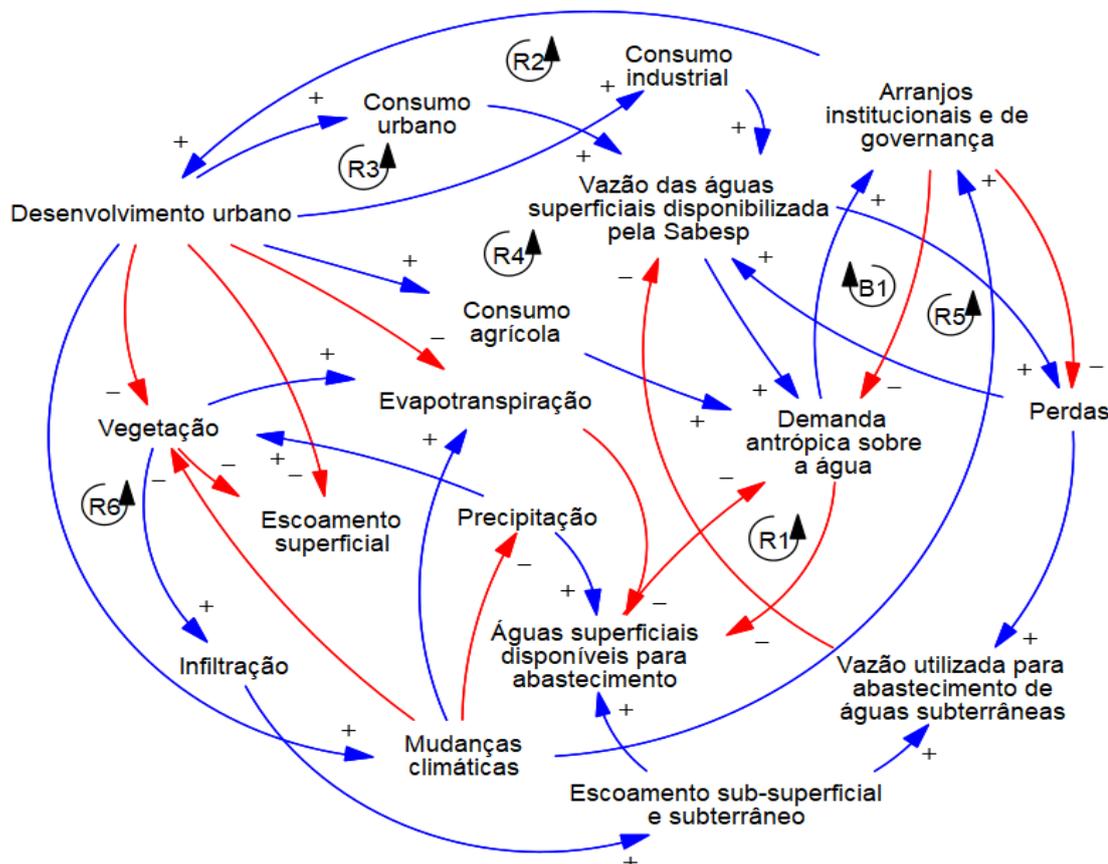
Quadro 4 – Construção do argumento para elaboração do Diagrama de Causalidade.

Diagrama de Causalidade (conclusão)		
Componente	Dependências e função sobre o sistema de abastecimento	Caminhos adotados no processo de modelagem
Vazão utilizada de poços subterrâneos	Ainda que em menor quantidade, cerca de 15% da demanda total por água, a RMSP é abastecida por cerca de 12 mil poços distribuídos pela BAT, sendo que somente cerca de 30% encontram-se legalizados e possuem licença de exploração. Estima-se que a vazão total de extração destes poços supera os 12m ³ /s (HIRATA <i>et al.</i> , 2002; CONICELLI, 2014; HIRATA, 2018; BICUDO <i>et al.</i> , 2020).	No processo de modelagem, a vazão oriunda de poços subterrâneos foi considerada um atenuador de pressão sobre os corpos de água superficiais, uma vez que estes últimos que abastecem majoritariamente a RMSP e o condicionante inicial adotada na construção do modelo foi que a sua elaboração fosse realizada em termos da disponibilidade de águas superficiais pela operadora.
Desenvolvimento urbano	O desenvolvimento urbano se reflete em toda transformação da região, em termos espaciais e de uso e ocupação do solo, resultante do crescimento populacional. Neste sentido, o desenvolvimento urbano se traduz na alteração do espaço natural pelo homem. A partir do entendimento de que o desenvolvimento urbano é a transformação do espaço natural por ações antrópicas, esta variável representa a relação espacial urbana por habitante, partindo da premissa de que a área urbanizada se torna impermeável pelas alterações antrópicas e acarretando em alterações locais do ciclo hidrológico.	No processo de modelagem, a variável <i>Desenvolvimento Urbano</i> influi sobre os processos do ciclo hidrológico, sobretudo potencializando o processo de escoamento e reduzindo a vegetação existente. Como consequência, há também a atenuação do processo de infiltração.
Arranjos institucionais e de governança	Os arranjos institucionais e de governança podem ser compreendidos como o conjunto estrutural de modelo de gestão, baseado tanto nos agentes envolvidos como na formulação conjunta de planos, políticas, programas e projetos socioambientais que possibilitem potencializar a proteção e promoção da resiliência do sistema de abastecimento de água, assim como também são incluídas medidas estruturais e não estruturais que viabilizem o aumento da disponibilidade de água no sistema.	Na construção dos modelos conceitual e dinâmico, os arranjos institucionais e de governança foram considerados dentro do espectro hidrotécnico e hidropolítico de sua estrutura e funcionamento (VARGAS, 2020), compondo a elaboração dos cenários de análise sobre a resiliência do sistema de abastecimento, em conjunto com as previsões relacionadas às mudanças climáticas, por meio de medidas estruturais e não estruturais e processos de governança adaptativa (SABESP, 2020).

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, a representação gráfica do Diagrama de Causalidade é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Diagrama de Causalidade



Fonte: Elaboração própria.

Cabe ressaltar que a etapa de elaboração do Diagrama de Causalidade foi importante para embasar a elaboração do Diagrama de Estoque-e-Fluxo (cujo detalhamento do processo de elaboração consta no tópico subsequente a este) e amparar a discussão dos resultados.

Com relação à resiliência do sistema de abastecimento, a garantia dos corpos da água é o fator determinante para que haja disponibilidade de água em termos quantitativos no sistema. Assim, as características ambientais e os fenômenos que garantem a recarga destes corpos estão intimamente relacionadas ao balanço hidrogeológico e aos fatores socioeconômicos que os influenciam.

A RMSP é historicamente marcada pelo seu intenso processo de urbanização. A ocupação rápida e desordenada da região resultou – e ainda resulta - em alterações significativas na sua configuração espacial, que afetam direta e indiretamente diversos

processos e características relacionadas ao seu balanço hidro-geomorfológico (RODRIGUES, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2019).

Diante do exposto, o *desenvolvimento urbano* foi incluído no modelo como uma variável capaz de influenciar a configuração espacial em termos de permeabilidade de solo e relacionada à elevada concentração populacional na região. Ao mesmo tempo em que a variável *desenvolvimento urbano* atua de maneira a potencializar a ocorrência de *áreas impermeáveis* e diminuir as permeáveis, atua também na potencialização dos diversos consumos ilustrados no modelo: *consumo urbano*, *consumo industrial* e *consumo agrícola*. Desta maneira, esta variável atua tanto na atenuação da *vegetação*, que está estreitamente relacionada na garantia qualitativa das águas, como também intensifica os diferentes consumos, exercendo uma pressão negativa, ainda que indiretamente, sobre a variável *águas superficiais disponíveis para o abastecimento*.

A configuração socioeconômica da região resultante de elevada concentração populacional e industrial, aliadas a existência de atividades agrícolas, e que resultam em um incremento cada vez maior na *demanda antrópica por água*, faz com que haja uma pressão crescente sobre os *arranjos institucionais e de governança* a fim de que não ocorram conflitos pelo uso da água e nem a sua sistemática degradação. O aumento da demanda por água é resultado do aumento do *consumo industrial*, do *consumo urbano* e do *consumo agrícola*. Os aumentos dos consumos por parte destes setores resultam em um incremento da demanda por água, exercendo uma influência negativa sobre as *águas superficiais disponíveis para abastecimento* por aumentarem a *demanda antrópica sobre a água*.

No modelo, estes consumos resultam em alças de retroalimentação positivas (R1, R2 e R3) sobre a *vazão das águas superficiais disponibilizadas pela Sabesp* e os *arranjos institucionais e de governança*. Isto acontece, pois com o aumento dos consumos há uma necessidade maior de que os arranjos institucionais e de governança atuem tanto para que haja uma gestão das demandas de água mais eficiente, quanto para que haja uma maior viabilidade de desenvolvimento urbano. Desta maneira, no modelo, os *arranjos institucionais e de governança* operam por meio de medidas estruturais e não estruturais na tentativa de se obter uma maior flexibilidade dos sistemas hídricos na garantia do abastecimento em termo qualitativos de água (SABESP, 2020a,c). É importante salientar que as *perdas* de

água pelo sistema de distribuição é um fator de incremento à *vazão de água disponibilizada pela Sabesp*. Assim, no modelo conceitual esta relação também é descrita e ilustrada em uma alça de retroalimentação positiva (R4).

No Diagrama de Causalidade também foi considerado que a variável de *desenvolvimento urbano* atenua o processo de *escoamento superficial*, a partir da premissa de que o avanço do desenvolvimento urbana, com consequente impermeabilização do solo e canalização e retificação dos corpos da água da RMSP, além de diminuir o tempo de detenção para que a água possa infiltrar no solo, nos mínimos espaços abertos e permeáveis nos centros urbanos, também direciona a água precipitada e acumulada para fora da bacia hidrográfica e de drenagem dos reservatórios de abastecimento (conforme argumento previamente exposto no Quadro 4). Como resultado, o aumento das *áreas impermeáveis* prejudica a ocorrência do processo de *infiltração*, que é diretamente relacionado à recarga dos corpos subterrâneos e indiretamente relacionado à manutenção dos corpos superficiais nos períodos de seca, por meio dos processos de *escoamento de base e superficial*.

Com relação às condições ambientais, a *precipitação* é a principal via de entrada e manutenção de água no sistema de abastecimento, além de estar relacionada, ainda que indiretamente, a diversos processos do ciclo hidrológico. Deste modo, o fenômeno de *precipitação* tem capacidade de potencializar as *águas superficiais disponíveis para abastecimento*, por intermédio da recarga das águas superficiais (SABESP, 2020c), conforme mostrado no modelo.

Contudo, as mudanças climáticas atuam como um importante fator de influência sobre o sistema, devido a sua capacidade em aumentar a pressão sobre a precipitação e demais processos e fenômenos relacionados ao ciclo hidrológico, suscitando preocupações com relação ao seu potencial de causar alterações (CALADO; VALVERDE, 2020; MARENGO *et al.*, 2020). Por isto, no modelo conceitual da dinâmica do sistema, foi considerado que a variável *mudanças climáticas* atenua o potencial da variável *precipitação* e, conseqüentemente, a recarga dos corpos superficiais na RMSP.

Outra variável influenciadora nas mudanças climáticas, ainda que em menor escala, é a presença *áreas impermeáveis*, descritas na literatura como uma das principais responsáveis pelo fenômeno de “ilhas de calor” na região e que é

responsável pela alteração do microclima dos municípios pertencentes à região e acabam alterando o regime de fluxos locais e, conseqüentemente, da precipitação local também (WENG; LU; SCHUBRING, 2004; HU; JIA, 2009; PENG *et al.*, 2011; MACEDO, 2020).

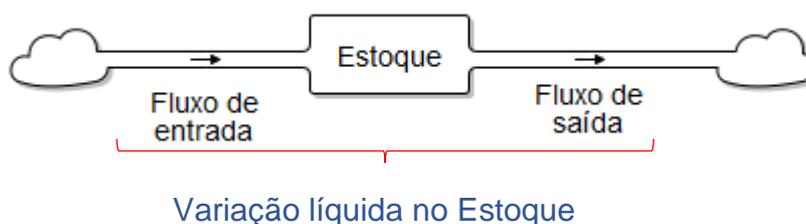
Por fim, as *mudanças climáticas* também atuam como um fator que pressiona os *arranjos institucionais e de governança* na busca por medidas que garantam a promoção de um sistema de abastecimento mais resiliente (R6).

4.3.4 A modelagem dinâmica do sistema

Como o intuito desta pesquisa é compreender a dinâmica do sistema de abastecimento para a elaboração de cenários e a discussão de medidas alternativas para promoção da sua resiliência, se faz necessária a compreensão do estado deste sistema. O estado, neste sentido, pode ser compreendido como o menor conjunto de variáveis que permita a descrição do sistema (STERMAN, 2000). Desta maneira, e a partir do conhecimento dos fluxos de entrada e saída do sistema e do arranjo de composição das suas equações dinâmicas atuais, é possível a elaboração de cenários alterando-se algumas condicionantes. Isto posto, os fluxos serão funções relacionadas a variáveis e parâmetros de estado do sistema (STERMAN, 2000; MEADOWS, 2009).

O processo de modelagem por meio do Diagrama de Estoque e Fluxo consiste basicamente em identificar os pontos de acumulação do sistema a serem analisados, chamados de *estoque*, e de agentes capazes de causar variações nesta acumulação, os agentes que somados configuram-se em *fluxos* e que podem ser de entrada ou de saída (Figura 32). Sterman (2000) e Ford (2010) explicam que as variáveis de estoque acumulam ou integram os seus fluxos, sendo que o fluxo líquido equivale à taxa de variação. No caso, a taxa de variação é a diferença entre os fluxos de entrada e de saída, definindo a equação diferencial que dita o comportamento a longo prazo no estoque (STERMAN, 2000; FORD, 2010), conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Representação gráfica da lógica do Diagrama de Estoque e Fluxo



$$\frac{d(\text{Estoque})}{dt} = \text{Fluxo de Entrada } (t) - \text{Fluxo de Saída } (t)$$

Fonte: Elaboração própria, baseada em Sterman (2000) e Ford (2010).

Isto posto, a mudança do volume de armazenamento de água nos reservatórios ao longo do tempo é determinada pelas taxas de entrada e saída de água do sistema, nas quais, basicamente, as taxas de saída são influenciadas por decisões de gerenciamento e as de entrada pela água precipitada e os diversos processos hidrológicos envolvidos (COUTINHO; KRAENKEL; PRADO, 2015).

Antes de iniciar o processo de construção do modelo, o ambiente de simulação foi ajustado para o método de integração de Euler. Este método de integração foi escolhido por ser o mais simples e aplicável em equações diferenciais de primeira ordem e dados matriciais, consistindo na aproximação da derivação de uma função em relação ao tempo (STERMAN, 2000).

$$\frac{df(t)}{dx} \cong \frac{f(t+\Delta t) - f(t)}{\Delta t}$$

Onde: Δt é o intervalo de simulação.

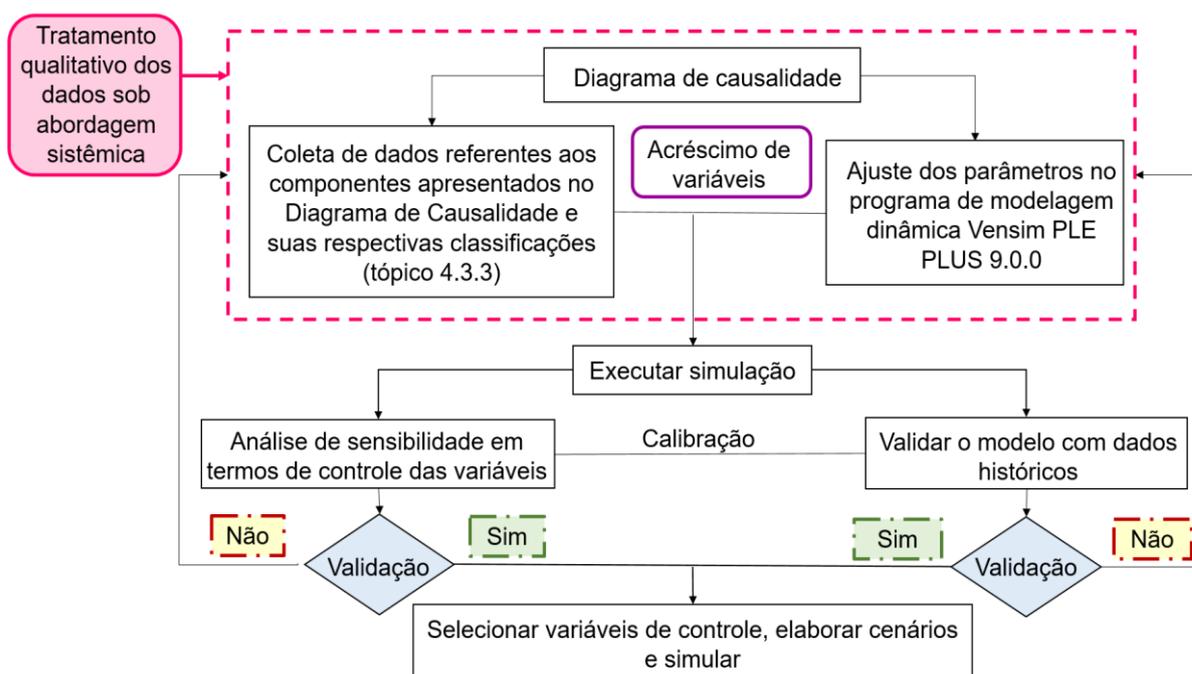
Desta maneira, a simplicidade do método de integração de Euler viabiliza a redução do modelo matemático em um conjunto de equações algébricas e, por meio da hierarquização destas equações na estrutura do modelo, é possível reproduzir o comportamento do sistema, ainda que de maneira simplificada.

Isto posto, os estoques utilizados foram escolhidos em termos quantitativos de volumes dos reservatórios das águas superficiais para que fosse possível a análise de resiliência do sistema de abastecimento (valor inicial). Restringiu-se, então, como recorte do modelo, os sistemas produtores operacionalizados pela Sabesp, para a aquisição de dados e informações referentes aos sistemas e sobre as demandas sob

a sua gestão e gerenciamento (SABESP, 2017, [s.d]c; SNIS, 2019 a, b ; SABESP, 2020 a).

Inicialmente, o modelo dinâmico foi estruturado a partir do modelo conceitual reduzido, descrito no item textual anterior (tópico 4.3.3) e, na sequência, foi realizado um processo iterativo de simulação, calibração e validação das variáveis utilizadas. As minúcias deste processo iterativo serão descritas adiante, mas consistem basicamente na aplicação de análise de sensibilidade sobre as variáveis do modelo, em termos de controle de variáveis e, conseqüentemente, no refinamento dos dados e rearranjos entre os componentes do sistema, a partir do acréscimo ou retirada de mais variáveis, conforme ilustrado na Figura 33.

Figura 33 - Quadro esquemático do processo de modelagem dinâmica



Fonte: Elaboração própria.

Alguns dos componentes presentes no Diagrama de Causalidade (tópico 4.3.3) foram desmembrados ou embutidos em outras variáveis ou condições, para melhor adequação equacional e viabilização de uso de suas bases históricas de dados e informações oficiais. Desta maneira, este procedimento foi realizado para conferir maior robustez ao modelo dinâmico simplificado no que diz respeito à sinalização e à

cadência de algumas inter-relações, por meio da identificação de taxas/proporções em comum entre variáveis diferentes.

Cabe salientar, também, que o desmembramento destes componentes foi realizado para que as variáveis pudessem ser classificadas de acordo com a sua hierarquização na lógica sistêmica, facilitando a estruturação do modelo. Tal classificação está disposta no Quadro 5.

Quadro 5- Classificação das variáveis do sistema conforme a sua função lógica

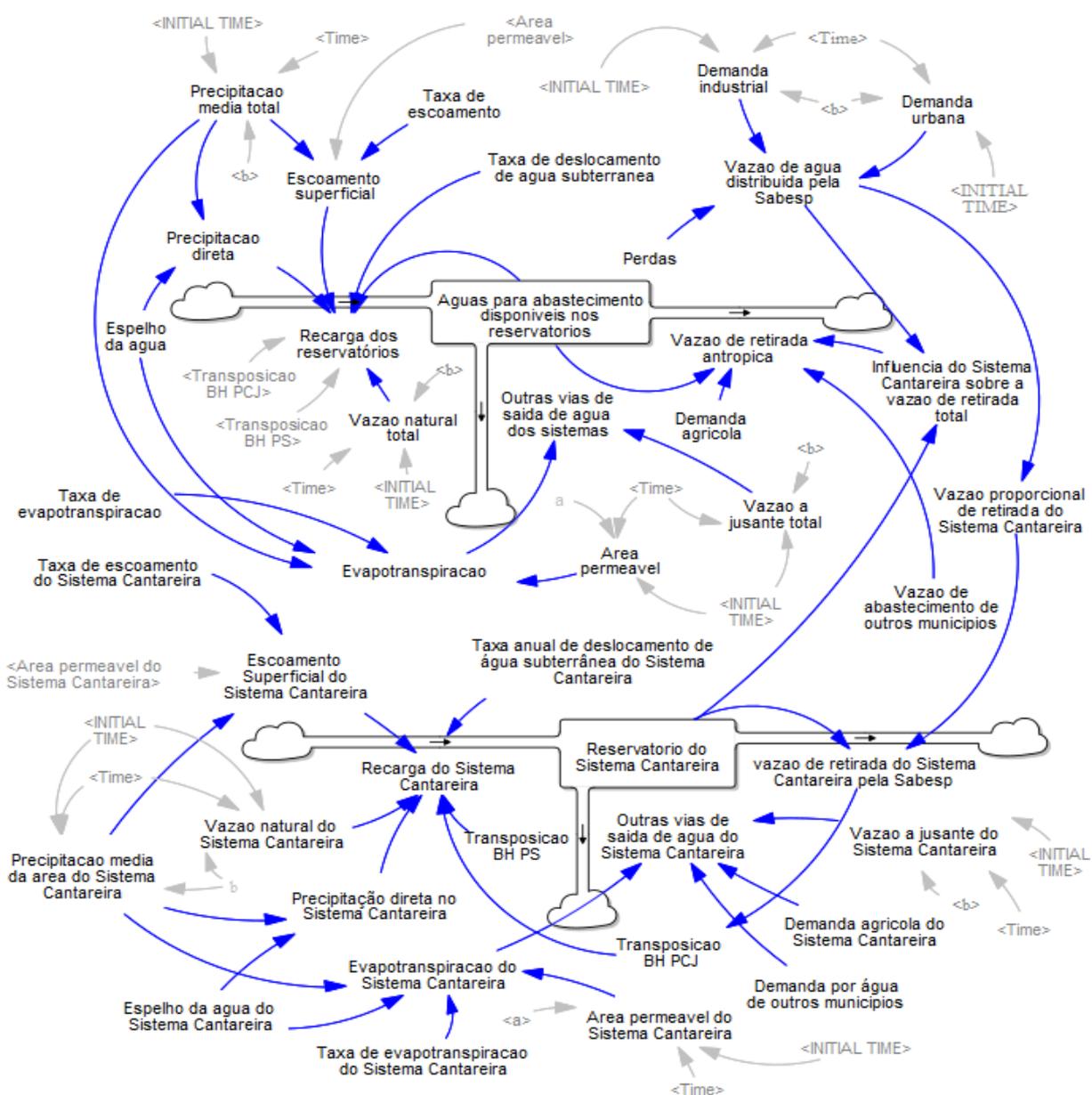
Variáveis	Função no sistema
Drivers externos	Drivers externos são variáveis que pertencem a uma escala superior ao do sistema analisado e, portanto, não são consideradas parte do sistema e não são afetadas pelo o que acontece dentro do sistema. Contudo, podem conduzir o sistema a outro estado ou regime.
Variáveis de estado	As variáveis de estado são aquelas que ilustram o estado do sistema, isto é, são os “estoques”, onde a integração dos fluxos de entrada e de saída do sistema ocorre e, portanto, descrevem o seu comportamento dinâmico.
Variáveis de controle	Variáveis de controle exercem influência direta sobre o estado do sistema e são criadas com o objetivo de estabelecer condições limítrofes para os seus possíveis estados.
Variáveis rápidas	As variáveis rápidas flutuam em torno de um atrator de longo prazo, como resultado de influências externas (drivers) ou mudanças no interior do próprio sistema.
Componente auxiliar	Componentes que foram incluídos no modelo com o intuito de manter a proporção entre variáveis, de inserir valores médios ou de corrigir unidades de uma ou entre mais variáveis.
Variáveis lentas	As variáveis lentas constituem-se de variáveis que moldam as variáveis rápidas e, por isto, exercem certa influência sobre o seu desempenho, além de responder à variação de um drive externo e das variáveis de estado

Fonte: Adaptado de Walker *et al.* (2012).

As informações sobre as variáveis, suas respectivas classificação e função, a justificativa e as informações sobre o tratamento aplicado aos seus respectivos dados, isto é, de maneira individualizada, por variável, estão dispostas nos Apêndices A e B e o modelo final está representado na Figura 34. Para uma melhor visualização, o modelo foi desmembrado entre o sistema de abastecimento total, representado em termos das águas disponíveis para abastecimento, e o Sistema Cantareira, que

podem ser conferidos no Apêndice C, junto com a explicação de algumas especificidades do modelo.

Figura 34 - Modelo dinâmico do Sistema de Abastecimento da RMSP



Fonte: Elaboração própria.

4.3.4.1 Análise de sensibilidade do modelo

A versão do programa utilizado é bastante sensível à qualidade dos dados de entrada que constituem o modelo final. Devido ao grande número de parâmetros de entrada, não é possível estudar, de maneira individualizada, e dentro do horizonte

temporal que constitui esta pesquisa, a incerteza inerente a todos eles. Como consequência, a análise de sensibilidade foi utilizada como recurso na identificação dos parâmetros que mais exercem influência sobre o comportamento do modelo e, conseqüentemente, sobre os seus resultados.

Desta maneira, a análise de sensibilidade foi utilizada com o intuito de determinar a sensibilidade do modelo dinâmico diante de mudanças nos valores dos parâmetros do modelo e também para indicar quais os valores dos parâmetros funcionam como “pontos de alavancagem” do modelo, conforme explicado por Keyhanpour, Jahromi e Ebrahimi (2021, p.1274). Segundo os autores, identificar mudanças acentuadas no comportamento de um sistema diante da variação de algum dos parâmetros envolvidos na sua estruturação, viabiliza a sua manipulação para a construção de cenários no estudo do comportamento dos sistemas.

Nesta etapa, a identificação dos “pontos de alavancagem” do modelo viabilizou que fosse realizado o maior refinamento dos dados destes parâmetros para que, assim, as incertezas associadas ao modelo fossem diminuídas, além de nortear a escolha dos critérios para a composição dos cenários. Assim, a identificação destes “pontos de alavancagem” possibilitou a discussão sobre a resiliência do sistema de abastecimento a partir da alteração das condições destes parâmetros e da análise do comportamento dos resultados gerados pelo modelo nos diferentes cenários.

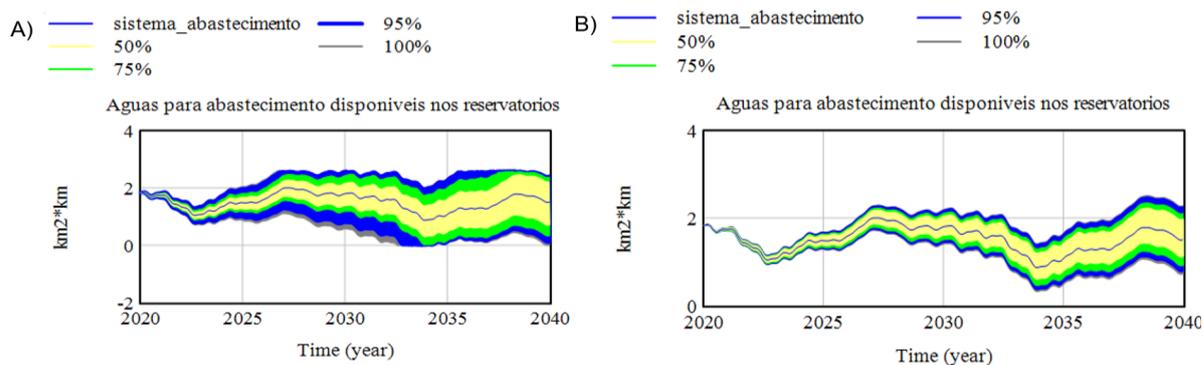
Para a realização da análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo, foi utilizada a ferramenta *Sensitivity Testing*, disponível para uso na versão do *software* empregado. A análise de sensibilidade utilizada foi a do tipo Monte Carlo, caracterizada por viabilizar a análise de sensibilidade multivariada de maneira automática (VENSIM, [s.d]).

Desta maneira, foi possível realizar diversas simulações para diferentes valores de constantes do modelo e os resultados foram armazenados para futura análise do comportamento das variáveis de destino específicos sob estas variações. Foram aplicadas 200 simulações randômicas em cada análise realizada, com uma margem de variação de 10% dos valores de cada componente testado.

Como todo o processo de modelagem foi sendo feito de maneira iterativa até chegar na versão do modelo de referência, a análise de sensibilidade foi sendo realizada, ao longo do processo de modelagem, em três blocos: i) uma análise

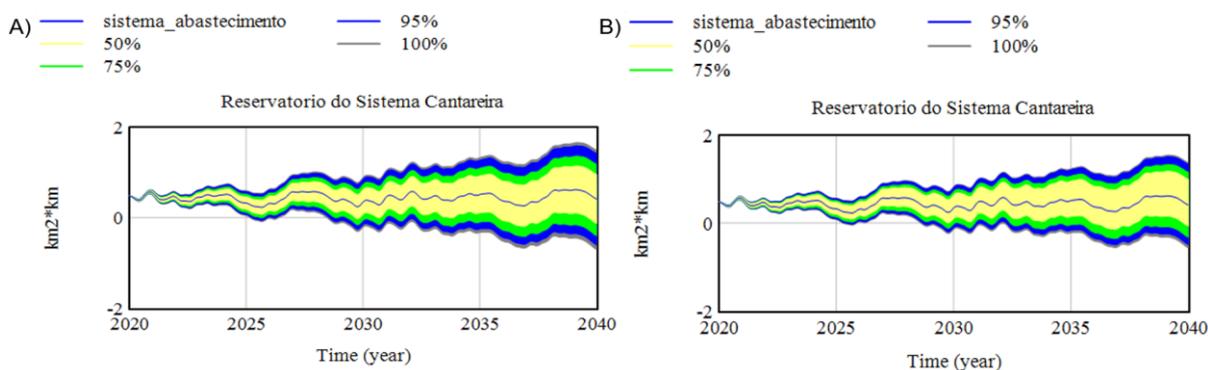
multivariada sobre a influência das demandas com a área permeável sobre os sistemas (Figura 35A e Figura 36A); ii) uma análise sobre o comportamento da precipitação sobre os sistemas (Figura 35B e Figura 36B); e, iii) uma análise multivariada conjunta sobre entre estas variáveis sobre os sistemas (Figura 37).

Figura 35- Análise de sensibilidade sobre as águas para abastecimento



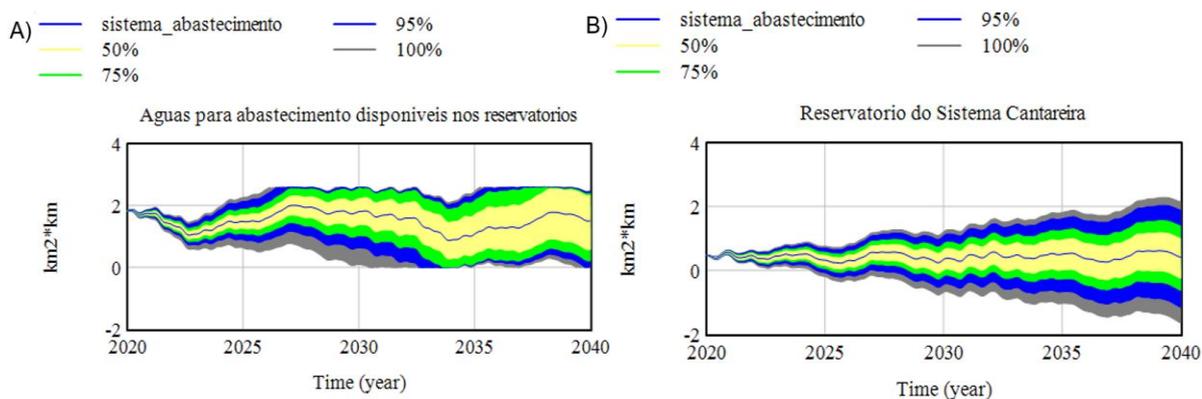
Fonte: Elaboração própria.

Figura 36- Análise de sensibilidade sobre o Sistema Cantareira



Fonte: Elaboração própria.

Figura 37- Análise de sensibilidade dos parâmetros sobre os sistemas



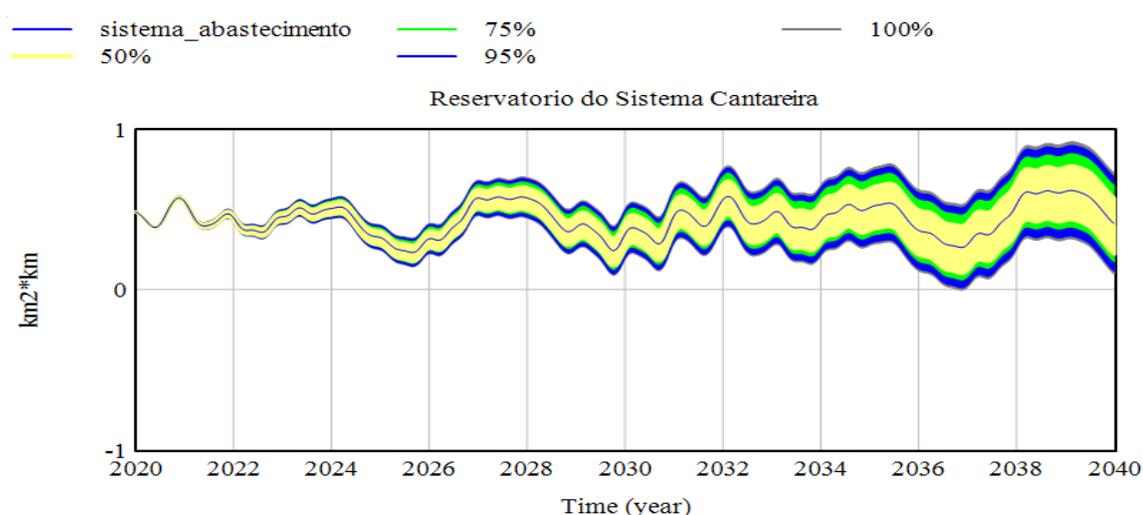
Fonte: Elaboração própria.

Quanto aos resultados obtidos pela análise de sensibilidade, o modelo apresentou alta sensibilidade às variáveis de *precipitação*, *demanda industrial*, *demanda urbana*, *área permeável* e *perdas*, no decorrer da sua estruturação; que respondem como “pontos de alavancagem” do modelo e que foram considerados na elaboração dos cenários e na discussão de alternativas para a promoção da resiliência do sistema de abastecimento.

Cabe salientar, novamente, que todas as etapas foram realizadas de maneira iterativa e cíclica, para melhor refinamento dos dados e da performance do modelo. Desta maneira, após a primeira análise de sensibilidade, aplicada sobre a estrutura primária do modelo, novas variáveis, equações e/ou valores eram adicionados a esta estrutura, que, então, passava por uma nova análise de sensibilidade. Dito isto, neste item textual constam as informações sobre a última análise de sensibilidade aplicada sobre o modelo.

Por fim, como a Transposição do Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira foi utilizada como um parâmetro para a calibração do modelo, foi realizada a análise de sensibilidade desta variável sobre o Reservatório do Sistema Cantareira, conforme mostrado na Figura 38.

Figura 38- Análise da sensibilidade da Transposição do Paraíba do Sul sobre o Sistema Cantareira



Fonte: Elaboração própria.

4.3.4.2 Calibração e validação do modelo dinâmico

A partir da identificação dos parâmetros que mais exercem influência sobre o comportamento do modelo, iniciou-se a fase de calibração. Esta etapa é importante para aumentar a confiabilidade dos resultados da modelagem. Conforme explicado por Klemeš (1986), ainda que as etapas de calibração e validação do modelo contribuam para diminuir as incertezas associadas, elas não garantem a fidedignidade das predições realizadas pelo modelo.

Diante do exposto, ressalta-se que a pretensão deste trabalho não consiste na representação numérica fidedigna dos volumes e fluxos envolvidos no sistema, até mesmo pela consciência de que foi realizado um recorte para aplicação do estudo e algumas adaptações também foram realizadas ao longo da pesquisa, mas sim viabilizar a discussão sobre a resiliência do sistema de abastecimento baseada na influência dos parâmetros escolhidos para a sua estruturação.

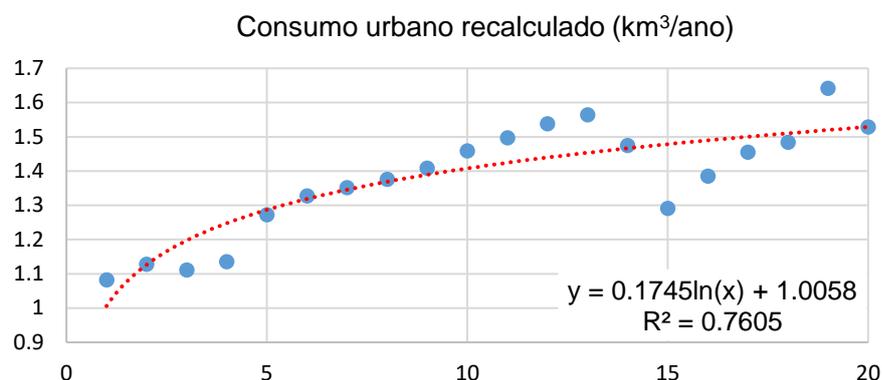
Contudo, cabe salientar que a calibração do modelo é o processo de estimar os parâmetros do modelo para obter uma correspondência entre a sua estrutura e o seu comportamento, entre o que é observado e o simulado, conforme explicado por Oliva (2003). Desta maneira, foram utilizadas as séries históricas para alguns dos parâmetros de maior sensibilidade sobre o sistema, com o intuito de adicionar um comportamento dinâmico ao modelo, ao longo do tempo.

No modelo, para as variáveis de *demanda urbana* (Figura 39) e *demanda industrial* (Figura 40) foi aplicada a análise de regressão para as médias anuais entre os anos de 2000 e 2019, calculadas em proporção pelos dados obtidos pela Sabesp e reajustadas¹⁷ com o valor do ano de 2020 obtidos pelo Portal dos Mananciais¹⁸, da mesma companhia, cujos coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,7605 e 0,5409, respectivamente.

¹⁷ Estes dados foram reajustados após a identificação de uma incongruência entre os dados repassados pela companhia e os disponibilizados no Portal dos Mananciais. O valor informado acerca dos consumos urbanos e industriais estavam muito inferiores quando comparados aos dados disponibilizados no Portal dos Mananciais, mas as proporções informadas foram utilizadas no reajuste de suas respectivas curvas de regressão.

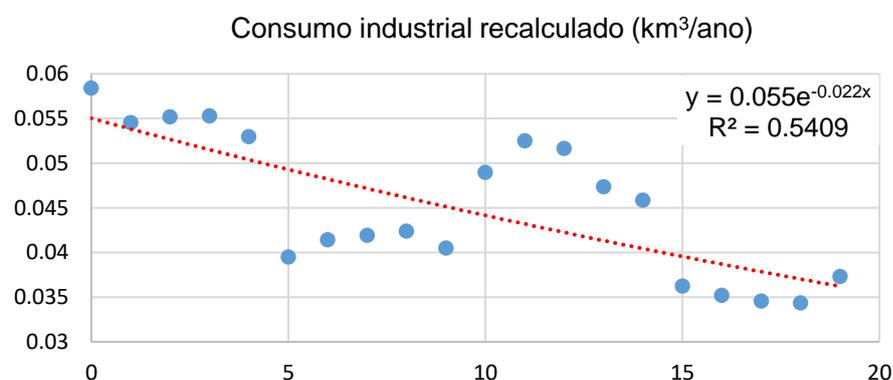
¹⁸ Disponível em: <<https://mananciais.sabesp.com.br/>>

Figura 39 - Interpolação da série histórica de consumo urbano



Fonte: Elaboração própria.

Figura 40 - Interpolação da série histórica de consumo industrial



Fonte: Elaboração própria.

Para os parâmetros da *vazão natural*, *vazão a jusante* e *precipitação* foram utilizadas as séries históricas diárias disponibilizadas pelo Portal do Mananciais¹⁸, datados entre os dias 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020. A validação destes parâmetros foi baseada no *Split-sample test* (KLEMEŠ, 1986), no qual as amostras de séries longas devem ser divididas em duas porções: a primeira, para a calibração do modelo e a segunda, para a sua validação.

Os dados destes parâmetros apresentavam ruído e comportamentos cíclicos e, portanto, optou-se pela não aplicação de uma análise de regressão e de seu coeficiente de determinação (R^2) como no caso das demandas. Diante desta situação, para ajustar o comportamento destas variáveis à sua respectiva equação, foi utilizada a Transformada de Fourier em 53,40% dos dados da série histórica diária.

Klemeš (1986, p.22, tradução livre) explica que, do ponto de vista operacional, “[...] os critérios de calibração e validação do modelo que serão adotados devem ser

relevantes para o objetivo para o qual os dados simulados serão utilizados [...]” e, diante das condições impostas pelas características dos dados adquiridos, este procedimento foi realizado com o intuito de embutir o comportamento matemático dominante destes parâmetros no sistema, uma vez que a Transformada de Fourier tem o potencial de transformar uma entrada de um espaço de representação temporal para um espaço de representação por frequência.

Esta sutil diferença existente sobre os 50% da amostra consiste no fato de que para que a Transformada de Fourier pudesse ser aplicada, era necessário o maior número amostral equivalente à potência de dois (2^n) acima dos 50%. Este procedimento foi adotado como um dos requisitos a ser aplicado à Transformada Rápida de Fourier, conforme orientado por Cooley e Tukey (1965).

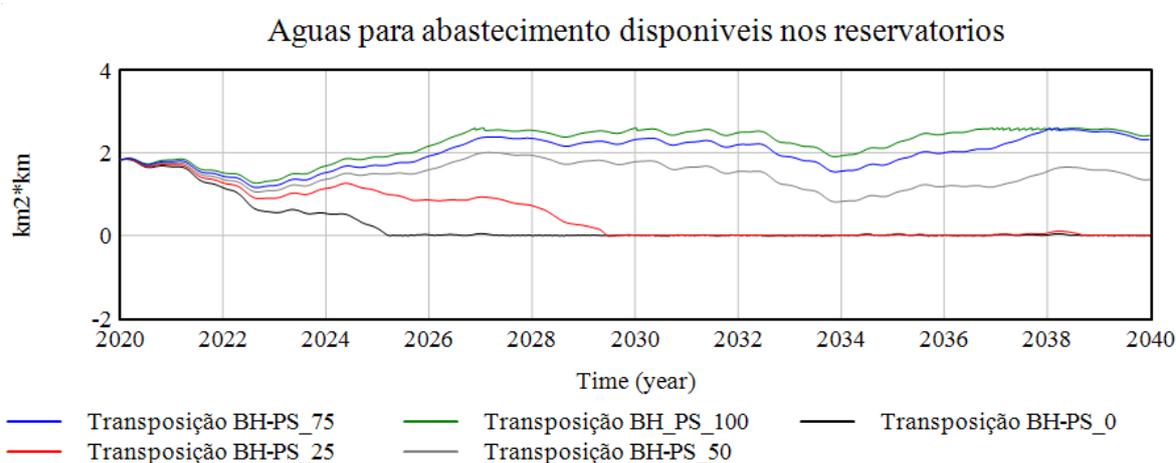
Desta maneira, foi possível considerar o comportamento dominante destes parâmetros na performance do sistema, ainda que não representados com a fidedignidade dos valores numéricos do seu comportamento no mundo real. No Apêndice D constam os gráficos com o comportamento das séries históricas supramencionadas, derivada da aplicação da Transformada de Fourier sobre a série diária histórica. Nos Apêndices A e B constam as equações derivadas da aplicação da Transformada de Fourier sobre o sistema de abastecimento e sobre o reservatório do Sistema Cantareira, respectivamente, de acordo com cada uma das variáveis.

Ainda, compondo o processo de calibração do modelo, as proporções envolvidas no ciclo hidrológico para o Sistema de Abastecimento Total (precipitação, evapotranspiração, recarga e escoamento) foram calculadas conforme disposto no Apêndice A. Para o Sistema Cantareira, estas proporções foram ajustadas manualmente dentro do limite de erro para melhor adequar-se ao modelo.

Além do mais, foi analisado o comportamento dos sistemas (Sistema de Abastecimento Total e do Sistema Cantareira) para três situações distintas, na qual houve variações sobre a capacidade total limite da Transposição da Bacia do Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira. No mundo real as condições operacionais referentes à transposição entre ambos os sistemas possuem a sua determinação (autorização de retirada) nas cotas do Reservatório de Jaguari, pertencente ao sistema do Paraíba do Sul (CBH-PS, 2016; AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS, 2017).

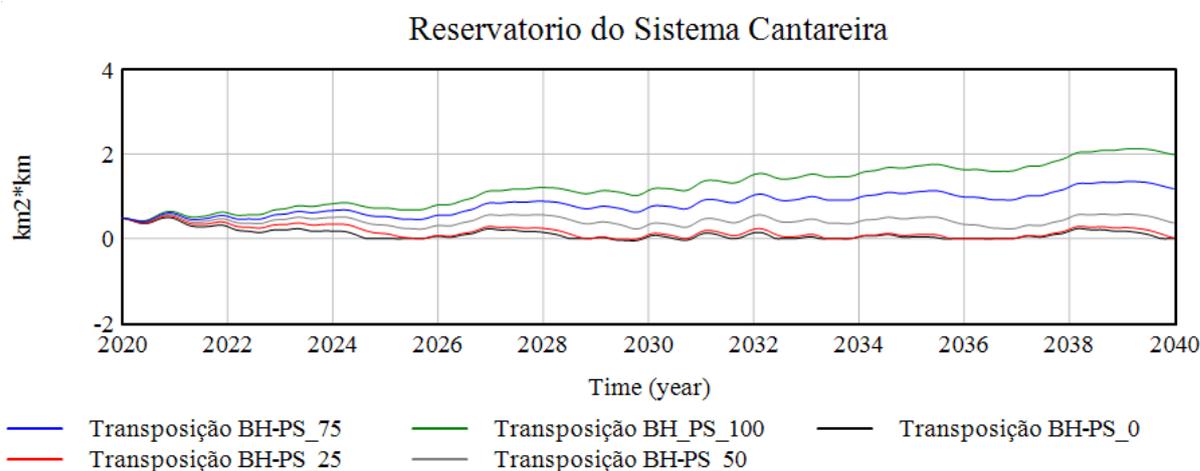
Partindo da premissa de uma situação inicial de equilíbrio dinâmico, o valor adotado foi de uma transposição sendo feita em 50% do seu limite de operação ao longo de todo o tempo, após a realização de testes com taxas equivalentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da capacidade total de transposição. Na Figura 41 e na Figura 42 estão ilustrados os comportamentos dos sistemas sob as faixas de testes para calibração do modelo.

Figura 41 – Testes sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios para calibração do modelo



Fonte: Elaboração própria.

Figura 42 – Testes de calibração sobre o Reservatório Cantareira



Fonte: Elaboração própria.

Posteriormente, após o valor escolhido as condições que passaram pelo teste de sensibilidade basearam-se em variações de 3%, 10% e 20%. Maiores informações sobre estas análises constam no item textual 6, na qual as incertezas atreladas ao modelo são discutidas. Cabe ressaltar, mais uma vez, que este processo se deu de maneira iterativa e que os resultados apresentados aqui condizem com valores finais de calibração do modelo de referência.

Como o processo de modelagem restringe-se aos principais reservatórios de abastecimento operacionalizados pela Sabesp, este procedimento foi adotado com fins de averiguação sobre a condição mais próxima do equilíbrio¹⁹ entre as entradas e saídas de água dos sistemas, como situação de referência. Por fim, percebendo a necessidade de entrada de água em ambos os sistemas, foram arbitradas duas variáveis, uma em cada um dos sistemas, chamadas *Deslocamento de água subterrânea* e *Deslocamento de água subterrânea no Sistema Cantareira*.

4.4 A CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS PARA A DISCUSSÃO SOBRE ALTERNATIVAS

Considerando os resultados da análise de sensibilidade, da calibração e validação do modelo, e baseado em estratégias de gestão de crises de recursos hídricos, nesta etapa, foram construídos cinco cenários distintos a partir da identificação dos pontos de alavancagem do modelo.

Cabe ressaltar que os cenários não são uma ferramenta de previsão exata e constituem-se enquanto descrições de futuros coerentes, estruturados sobre um arcabouço histórico e que, portanto, tornam-se coerentes sob determinadas premissas. Desta maneira, a utilização de cenários torna-se útil para mostrar como certas condições ou alternativas podem influenciar as condições futuras do sistema, por meio da lógica *if-then* na exploração de consequências impostas pelas condicionantes estipuladas para a sua composição (ALCAMO; HENRICH, 2008). As condições de simulação de cada um dos cenários estão dispostas no Quadro 6.

¹⁹ Entende-se por equilíbrio, no contexto colocado, não uma situação em que há equilíbrio dinâmico entre os fluxos de entrada e saída de água dos sistemas, mas sim a reprodução de um comportamento similar com a sua situação de referência, descritas na literatura e nas informações oficiais.

Quadro 6 - Condições dos cenários

Identificação	Premissas
Cenário 1	Este cenário reflete o comportamento do modelo de referência, abastecido com as informações contidas no Apêndice A e B, cuja projeção do comportamento de seus componentes foi realizada no horizonte de 20 anos, partindo das condições iniciais apresentadas no ano de 2020 até o ano de 2040.
Cenário 2	Foi admitida a projeção da demanda média de água a partir da tendência observada no ano de 2013, tal qual disposto no relatório de revisão do PDAA pela Sabesp (SABESP, 2020c). Esta condição foi adotada após a constatação de que a tendência de consumo por água deste ano foi superior às projeções atuais, uma vez que o padrão de consumo ainda não estava sujeito à um cenário de crise hídrica. Neste cenário, também foi adotada a premissa de que as influências das mudanças climáticas são capazes de causar um desbalanço hídrico natural de até 13% sobre os fluxos de água, ao longo dos anos, até 2040, conforme apresentado no trabalho de Calado e Valverde (2020). A partir da premissa de que quando este parâmetro foi incluído no sistema, as demais variáveis estariam constantes e o sistema em equilíbrio dinâmico, esta redução refletiu-se sobre a precipitação, principal via de entrada de água no sistema. Além do mais, foi incluída o efeito das mudanças climáticas sobre o fenômeno de evapotranspiração, cuja correlação com a precipitação considerada foi de -0.81 (SANTANA; DELGADO; SCHIAVETTI, 2020).
Cenário 3	Criado a partir do Cenário 1, este cenário foi criado com o intuito de viabiliza a discussão de alternativas para a promoção do sistema de abastecimento de água da RMSP. Para isto, as condições admitidas foram: 1) reuso de 10% da água consumida pelo setor industrial pelo próprio setor e reuso de 4% do consumo urbano; 2) redução das perdas totais de 30% para 28%. Estas condições foram inseridas no modelo de maneira que seu comportamento fosse alterado gradativamente ao longo dos anos. Portanto, os valores mencionados referem-se aos "valores finais" de cada simulação.
Cenário 4	Assim como o Cenário 3, o Cenário 4 viabiliza a discussão de alternativas para a promoção do sistema de abastecimento de água da RMSP. Para isto, as condições admitidas foram: 1) reuso de 10% da água consumida pelo setor industrial e reuso de 4% do consumo urbano; 2) redução das perdas totais de 30% para 28%; 3) diminuição de 5% das áreas impermeáveis, convertendo-se, portanto, em áreas permeáveis. Estas condições foram inseridas no modelo de maneira que seu comportamento fosse alterado gradativamente ao longo dos anos.
Cenário 5	Para dar uma maior sustentação à discussão, o Cenário 5 consiste na combinação entre o cenário mais crítico e o mais ameno. Desta maneira, todas as premissas adotadas no Cenário 2 e 4 foram simuladas concomitantemente.

Fonte: Elaboração própria.

A análise de cenários foi realizada a partir dos resultados das simulações de cada cenário e da comparação entre estes resultados, avaliando as suas consequências sobre a resiliência do sistema de abastecimento da RMSP e investigando o seu comportamento ao longo do horizonte temporal do período de investigação. Portanto, a elaboração destes cenários foi realizada com o objetivo de investigar o comportamento do sistema sob diferentes condições e,

consequentemente, projeções para os seus componentes de influência ao longo do tempo.

A discussão sobre a resiliência do sistema de abastecimento foi norteadada pelas premissas e comportamentos obtidos pelos cenários. Já a discussão sobre as alternativas para a promoção da resiliência foi norteadada pelas variáveis de maior sensibilidade sobre o modelo.

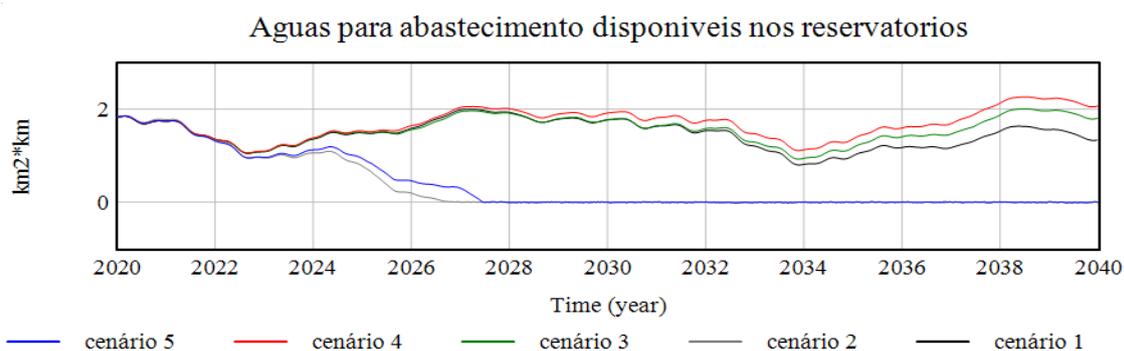
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da simulação das hipóteses dinâmicas de composição do quadro de cenários, norteadas pelos resultados da análise de sensibilidade do modelo, tanto as perspectivas sobre a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP como a discussão das alternativas que visem a sua promoção são abordados neste capítulo.

5.1 ANÁLISE DE CENÁRIOS E A RESILIÊNCIA DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

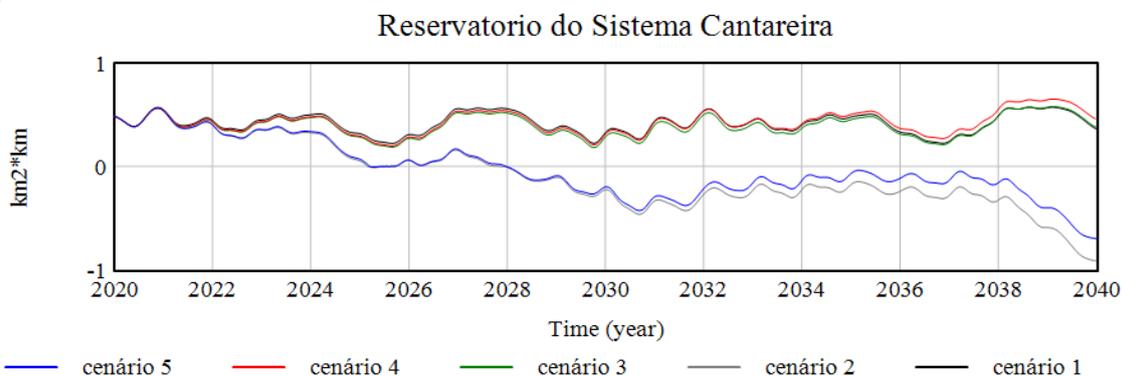
A Figura 43 e a Figura 44 ilustram os resultados das simulações dos diferentes cenários sobre as *Águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios* e sobre o *Reservatório do Sistema Cantareira*, respectivamente. O cenário 1 segue a projeção das condições do modelo-base e, portanto, diz respeito ao cenário de referência. O cenário 2 ilustra a simulação crítica, com redução da precipitação, elevação da evapotranspiração e demandas elevadas. Já o cenário 3 ilustra as simulações com o reuso de água e redução das perdas do sistema e o cenário 4 ilustra as condições aplicadas sobre o cenário 3, acrescidas da conversão de áreas impermeáveis em áreas permeáveis. Por fim, o cenário 5 ilustra a composição entre as condições mais amena e mais crítica ao sistema de abastecimento. Todos os cenários possuem um espaço temporal de 20 anos para a projeção de sua respectiva condição.

Figura 43- Comportamento do Sistema de Abastecimento da RMSP sob as condições dos diferentes cenários.



Fonte: Elaboração própria.

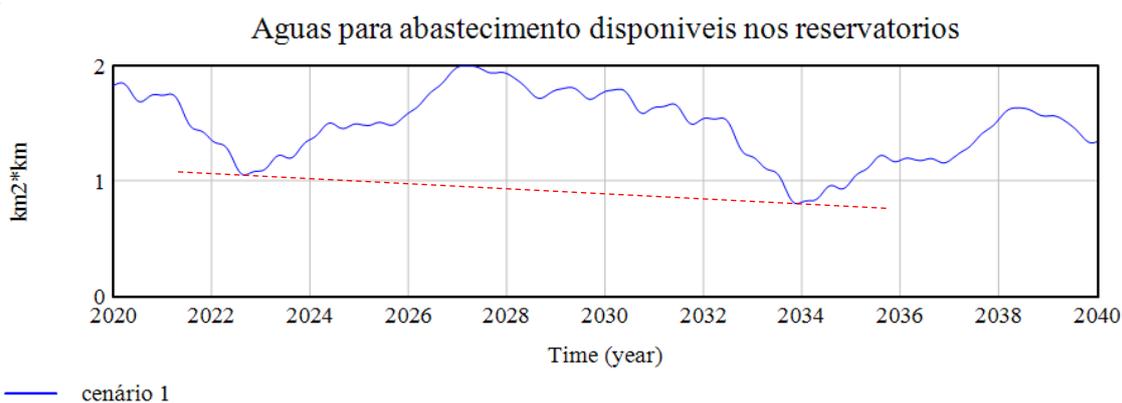
Figura 44 – Comportamento do Sistema Cantareira sob as condições dos diferentes cenários.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 45 ilustra o comportamento do sistema de abastecimento de água da RMSP em termos de reservação total de água. No caso, diz respeito ao somatório do quantitativo de água presente em todos os reservatórios pertencentes ao Sistema Integrado, operacionalizado pela Sabesp, dadas as condições para a simulação do modelo de referência.

Figura 45 - Cenário de referência sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios



Fonte: Elaboração própria.

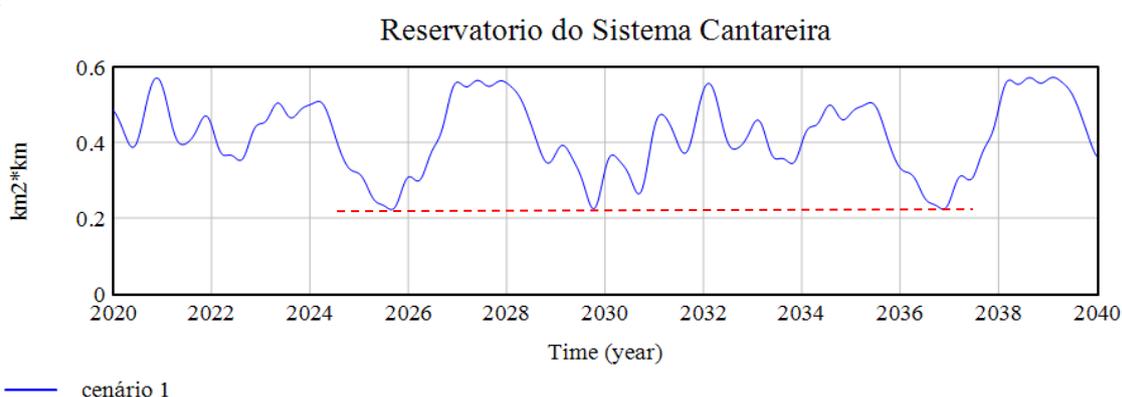
Dada a conformação inicial do modelo-base, estruturada pela utilização da séries históricas mencionadas no item 4.3.4.2, verifica-se que o cenário de referência não apresenta um comportamento de equilíbrio dinâmico. Em termos de resiliência e considerando as condições iniciais adotadas, é possível notar que, atualmente, a

demanda por água é superior a capacidade de recarga do sistema, resultando na dificuldade do sistema em recuperar a sua capacidade total de reservação de água útil a longo prazo, mesmo nos períodos mais chuvosos.

No modelo, com a aplicação da Transformada de Fourier no tratamento de dados referentes à precipitação, o comportamento de escassez ocorrido entre os anos de 2013 e 2015 foram reproduzidos de forma periódica. Desta maneira, é possível notar que, a reprodução cíclica deste comportamento pluviométrico, implica em um fator agravante na recuperação do sistema que, aliado ao crescimento modesto da tendência das demandas urbanas e industriais, impulsionou uma tendência negativa na inclinação no seu desenvolvimento, resultando em distanciamento cada vez maior do seu limite máximo de reservação, que é de aproximadamente 2.38 km^3 .

Partindo da premissa de que todos os parâmetros do sistema permanecem com seu comportamento constante, ou tendencial, ao longo do período analisado, a configuração adotada viabilizou uma tendência que gira em torno a um valor de equilíbrio para o *Reservatório do Sistema Cantareira*, com uma sutil tendência de recuperação, conforme pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 - Cenário tendencial sobre o Reservatório do Sistema Cantareira



Fonte: Elaboração própria.

Ainda que o modelo viabilize identificar esta sutil propensão de recuperação por parte do Sistema Cantareira, as médias de reservação útil do sistema oscilam em torno de 0.35 km^3 , correspondendo a 35,6 % da sua capacidade máxima de reservação, com relação ao seu volume útil. Esta situação denota certa resistência na recuperação das águas deste sistema em termos quantitativos, partindo da

compreensão de que é o Sistema Cantareira que recebe o volume de água da Transposição do Paraíba do Sul.

O valor médio de reservação do Sistema Cantareira na situação de referência já denota preocupação, conforme explicado pelo Prof. Pedro Luiz Côrtes em entrevista ao G1 no ano de 2021 ao apontar provável falta de água para abastecimento nos anos subsequentes, cujo valor de reservação correspondia a 37,1% da capacidade de armazenamento do sistema na época (G1, 2021).

Cabe ressaltar, ainda, que o valor adotado com relação a Transposição do Paraíba do Sul ocorrendo ao longo de todo o tempo e em 50% de sua capacidade máxima, somada aos limites operacionais aplicados sobre o Sistema Cantareira, podem ter sido responsáveis por este sutil comportamento. Todavia, o valor adotado é hipotético, já que as condições para ocorrência desta translocação de água possuem nas cotas do Reservatório de Jaguari as suas regras de acionamento. Este reservatório pertencente a BH-PS, que não tem o seu comportamento modelado na presente pesquisa.

A exemplo, este mesmo reservatório quase atingiu o zero operacional e esteve próximo a iniciar o uso de seu volume morto durante a crise ocorrida entre os anos de 2013 e 2015 (CBH-PS, 2016). Nestas condições, ainda que o *Reservatório do Sistema Cantareira* necessitasse do quantitativo de água oriundo desta transposição para manter a margem de segurança hídrica do seu próprio sistema, esta transposição não aconteceria em decorrência das condições operacionais de referência do Reservatório Jaguari.

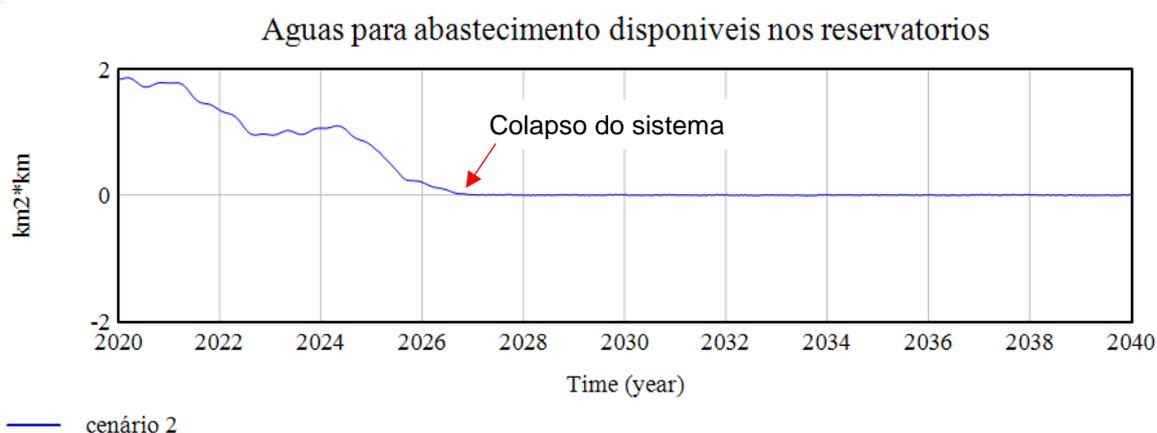
Isto posto, cabe salientar que a condição de referência do modelo dinâmico proposto possui tendência mais conservadora, em termos de variações sobre a resiliência do sistema de abastecimento de água, devido à constância da quantia de água acrescida ao sistema pela transposição oriunda da BH-PS. Por ter suas regras de acionamento condicionadas às cotas do Reservatório de Jaguari, em uma situação de escassez hídrica em ambos os sistemas, o Sistema Cantareira não pode contar com este quantitativo; situação que aumenta a sua fragilidade e diminui sua resiliência, aumentando a sua possibilidade de colapsar.

Já no cenário 2, a inclusão das influências acarretadas pelas mudanças climáticas sobre os fenômenos de precipitação e evapotranspiração, aliada as

projeções de demandas por águas mais intensas, refletiu em quadros críticos sobre ambos os sistemas analisados. Esta situação demonstra o potencial colapsante das alterações destes parâmetros sobre os sistemas.

Dadas as premissas adotadas no modelo, associadas aos argumentos empregados na construção deste cenário, a Figura 47 ilustra o sistema de abastecimento de água da RMSP entrando em colapso entre os anos de 2026 e 2027, quando atinge o zero de sua reservação útil e não apresenta uma tendência de recuperação ao longo dos anos subsequentes, sob as condições impostas por este cenário.

Figura 47 – Cenário 2 e a disponibilidade de água a longo prazo



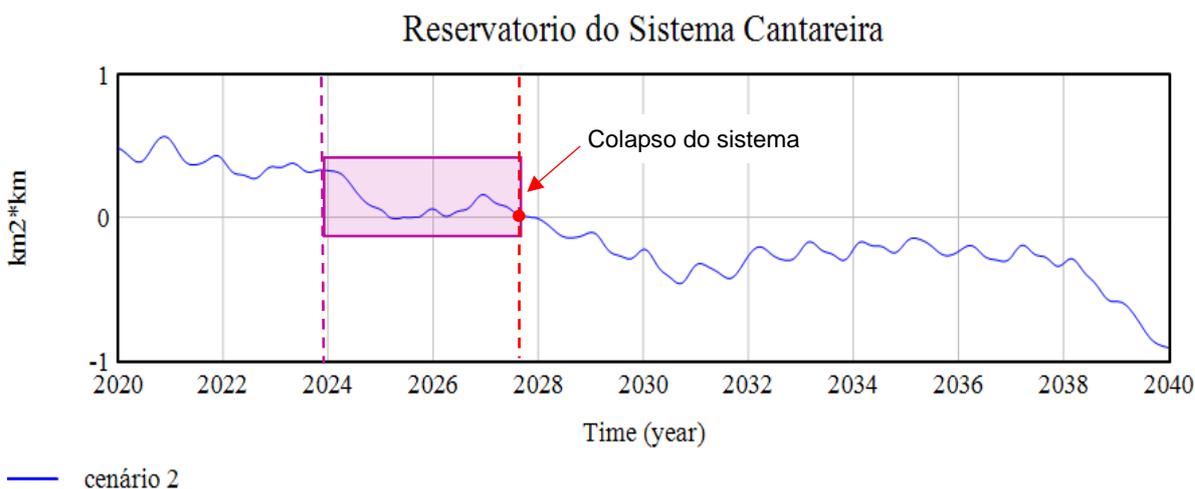
Fonte: Elaboração própria.

Cabe ressaltar que, para fins de discussão, foi considerado que a porcentagem de 0% da capacidade de reservação útil dos sistemas foi definida como o ponto de colapso do sistema, inviabilizando a prestação de serviço em abastecimento. Esta premissa foi adotada não com o intuito de desconsiderar o fato de que a ação de “entrar em colapso” tenha acontecido em algum momento anterior, conforme indicado na literatura científica, mas sim como indicativo de possíveis lacunas a serem aprofundadas em pesquisas futuras.

A aplicação do cenário 2 sobre o Sistema Cantareira permitiu a identificação de uma tentativa de recuperação do sistema diante das condições críticas, antes sofrer o colapso e perder a sua capacidade de manutenção do seu próprio estado. Esta característica sugere um efeito de histerese sobre a região demarcada em roxo, com

a coexistência de mais de um estado alternativo, e demandaria uma investigação mais detalhada e o maior refinamento dos dados para a sua confirmação, conforme pode ser observado na Figura 48.

Figura 48 – Sistema Cantareira sob as premissas adotadas para o Cenário 2



Fonte: Elaboração própria.

Os cenários 3 e 4 correspondem aos cenários dirigidos favoráveis, com condições similares de simulação, cuja única diferença é o acréscimo do aumento das áreas permeáveis no cenário 4. Como pode ser observado na Figura 49, ambos os cenários viabilizaram a recuperação do sistema de abastecimento em termos quantitativos de águas disponíveis para este fim.

Contudo, o aumento das áreas permeáveis diminui as fragilidades do sistema, promovendo uma maior resiliência com relação às suas variações internas perante as oscilações característica da precipitação, principal via de entrada de água no sistema. Nota-se esta diferença não somente pela diferença de inclinação entre as curvas, mas, também, pela diferença entre as amplitudes existente entre as curvas geradas por ambos os cenários. No caso, quanto menor a amplitude, maior a resistência ao colapso; logo, maior a resistência à mudança pelo sistema e maior é a sua resiliência.

Considerando os cenários 2 e 5, verifica-se também que sob as condições impostas pelos efeitos das mudanças climáticas, o Sistema Cantareira apresentou maior rigidez interna, pois ainda que o cenário 5 considere medidas alternativas acerca do uso e ocupação do solo e de reuso na sua composição, o sistema não mostra algum indício de recuperação ao longo do horizonte temporal de simulação. Desta maneira, verifica-se que ambas as curvas estão praticamente sobrepostas antes do sistema colapsar.

Diante desta circunstância, cabe a reflexão sobre uma condição importante abordada por Medeiros *et al.* (2017): a suavização da estrutura transitória de um sistema. Esta situação consiste em quando um sistema muda para um estado transitório e, conseqüentemente, para um regime dinâmico transitório, na qual a criticidade de sua transição é atenuada pelo fato do sistema ainda possuir características e propriedades residuais.

Desta maneira, se o sistema de abastecimento de água possuir tal comportamento, ainda que haja um aumento do aporte de água no sistema no momento atual, medidas infraestruturais não serão suficientes para a promoção da sua resiliência e da sua capacidade em prover água ao longo do tempo. Tal condição foi verificada pela projeção do cenário 5, que considera tanto a redução da pressão sobre o consumo de água pelo sistema, a partir da inclusão de taxas de reuso sobre os diferentes consumos, como pela redução de perdas totais do sistema. No caso, as medidas infraestruturais focalizadas sobre o aumento do aporte de água não aumentam a resiliência do sistema de abastecimento, mas mascaram o comportamento de transição do sistema que sinalizaria o início da sua estrutura colapsante. Um *delay* entre o comportamento real e o comportamento percebido do sistema.

Em suma, dadas as condições de modelagem e o comportamento do sistema frente aos efeitos das mudanças climáticas considerados nas condições de simulação, estes efeitos operam continuamente na saturação dos limites de ambos os sistemas, que convergem inevitavelmente para o colapso, mesmo quando medidas convencionais para a promoção da resiliência são aplicadas sobre a sua estrutura.

5.2 DISCUSSÃO SOBRE A RESILIÊNCIA E ALTERNATIVAS QUE GARANTAM A SUA PROMOÇÃO

A RMSP está localizada em uma área notadamente caracterizada pela baixa disponibilidade hídrica e alta variabilidade sazonal no seu regime de precipitação (REBOITA *et al.*, 2010; LIMA, 2015; LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018), além de também ser marcada pela alta variabilidade espacial de precipitação em decorrência do seu posicionamento geográfico e características de relevo (LIMA; LOMBARDO; MAGAÑA, 2018). Esta situação, aliada à falta de planejamento urbano ao longo do seu desenvolvimento e ao imenso conglomerado que habita a região, resulta em alterações paisagísticas que se refletem sobre o comportamento dos fluxos do ciclo hidrológico e que integram a região.

Conforme pode ser analisado no item textual anterior, ainda durante a execução do cenário 1, que corresponde ao modelo de referência, a demanda por água foi superior a capacidade de recarga de água do sistema, indicando fragilidades na configuração atual do sistema e resultando na sua incapacidade de recuperar-se ou, ainda, de atingir um comportamento de equilíbrio ao longo do horizonte temporal do estudo. Em termos quantitativos de água para consumo, este desbalanço entre as entradas e saídas é o que resulta na perda da resiliência do próprio sistema.

Diante do exposto, a discussão sobre alternativas que promovam a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP foi dividida em três itens textuais, cujo enfoque recai sobre cada uma das variáveis de maior sensibilidade identificadas no modelo, sob as condições impostas pelos cenários. Os itens textuais são:

- 1) Alternativas para gestão de demanda sobre as águas;
- 2) Alternativas para a gestão de oferta de águas para abastecimento;
- 3) Revisão do processo de desenvolvimento da RMSP e dos territórios associados.

5.2.1 Alternativas para gestão de demanda de águas da RMSP

A gestão de demanda de água envolve a atuação sobre os diferentes tipos de demandas, sejam eles diretos ou indiretos, com o intuito de uso mais eficiente e eficaz deste recurso. Diante dos resultados obtidos nas simulações do modelo, sob os

entende-se que tanto as questões infraestruturais e de gestão quanto as questões socioculturais de consumo devem ser consideradas no controle das demandas.

Operar um sistema de distribuição com a complexidade exigida pela RMSP, com o entrelaçamento entre os sistemas produtores e atuando na garantia do abastecimento de uma região, que é ao mesmo tempo tão povoada e populosa e cuja oferta natural de água é tão limitada ambientalmente, é por si só um grande desafio. Ao se considerar os atributos socioeconômicos e infraestruturais do sistema de abastecimento, aliados as condições geográficas da região, são poucas as unidades de tratamento de água junto aos mananciais para atender todas as demandas. Esta característica impõem um maior engessamento ao sistema de abastecimento de água da RMSP e, conseqüentemente, uma menor resiliência do sistema perante eventos adversativos (SABESP, 2020a).

Dentre os fatores de grande influência quantitativa sobre as demandas do sistema de abastecimento encontram-se as perdas atreladas ao sistema de distribuição de água, as quais acabam somando-se como incremento volumétrico de água de retirada dos sistemas produtores. No modelo de referência, esta condição foi embutida no sistema, na qual *a vazão de água distribuída pela Sabesp* é resultado de uma função que envolve as perdas de água pelo sistema.

Desta maneira, considerando que para a elaboração dos cenários 3 e 4 foi considerada a redução da taxa de perdas totais pelo sistema de abastecimento, dentre as possíveis alternativas para a gestão de demanda que podem ser adotadas, esta redução das perdas pode ser alcançada com a adoção de algumas medidas estruturais e não-estruturais, que são importantes de serem mencionadas quando se discute as problemáticas relacionadas à gestão de demandas.

Ao encontro do que é preconizado pela *International Water Association (IWA)*, Tardelli Filho (2015) explica que as perdas não são motivadas exclusivamente pelos vazamentos nas tubulações e que, por muitas vezes, não são fáceis de serem detectadas, o que dificulta o combate para a sua ocorrência. No Quadro 7 consta, de maneira sumarizada, a definição sobre perdas e a sua estruturação na forma de balanço hídrico proposta pela IWA.

Quadro 7 - Balanço hídrico – IWA

Volume produzido ou disponibilizado	Consumo autorizado	Consumos autorizados faturados	Consumos medidos faturados (incluindo água exportada)	Águas faturadas	
			Consumos não medidos faturados (estimados)		
		Consumos autorizados não faturados		Consumos medidos não faturados (usos próprios, caminhões-pipa)	Águas não faturadas
				Consumos não medidos não faturados (combate a incêndios, suprimentos de água em áreas irregulares)	
	Perdas	Perdas aparentes (comerciais)		Consumos não autorizados (fraudes)	
				Falhas do sistema comercial	
Perdas reais (físicas)			Submedição dos hidrômetros		
			Vazamentos nas adutoras e redes de distribuição		
		Vazamentos nos ramais prediais			
		Vazamentos e extravasamentos nos reservatórios setoriais e aquedutos			

Fonte: Modificado de Tardelli (2015).

Ainda que Tardelli Filho (2015, p.8) afirme que “[...] os desperdícios internos nos imóveis, após os hidrômetros, não constituem perdas [...]”, seguindo os preceitos preconizados pela IWA em sua discussão, as perdas estão, ainda que indiretamente, atreladas às questões culturais de consumo por parte da população (SABESP, 2020a). Neste contexto, práticas constantes de Educação Ambiental (EA) tornam-se uma alternativa enquanto um importante instrumento de conscientização coletivo no alcance da redução de desperdícios e da participação social nos processos decisórios (JACOBI; EMPINOTTI; GRANDISOLI, 2018). Em acréscimo, Ghinis Fochezatto e Kuhn (2020) também apontam a política tarifária como um instrumento de forte poder de mobilização na indução do uso racional de água e salientam que a eficácia de sua aplicação depende da elasticidade do preço da demanda por água.

Contudo, a parte mais expressiva destas perdas está atrelada às questões de qualidade da infraestrutura do sistema de abastecimento, cujos componentes devem passar por constante manutenção e substituição por equipamentos mais modernos, eficazes e de maior e melhor desempenho. Atualmente, estima-se que cerca de 60%

da rede de distribuição de água da RMSP tem mais de 60 anos (SABESP, 2020a). Estas perdas de água pelo sistema influem diretamente no custo da água, nas quais as perdas reais oneram os custos de produção e distribuição de água, enquanto que as perdas aparentes estão associadas à precificação da água enquanto produto aos clientes (m³) (TARDELLI FILHO, 2015).

Além do mais, nos cenários 3 e 4 também foram simuladas condições relativas a taxas de reuso sobre os diferentes consumos considerados. Estas simulações ilustram o potencial de tal prática no aumento da flexibilidade do sistema de abastecimento, mediante o reuso das águas residuárias industriais pela própria indústria. Já as águas residuárias urbanas foram consideradas passíveis de passar por tratamentos adequados e retornarem como insumo do sistema de abastecimento.

O reuso de águas residuárias tratadas tem crescido em todo o mundo (US EPA, 2017; UNESCO WWAP, 2017) e é comumente aplicado para fins não potáveis; não pela impossibilidade de um tratamento completo, mas devido aos desafios associados à aceitabilidade pública (DOLNICAR et al., 2011; HERING et al., 2013; UNESCO WWAP, 2017), cujo (pre)conceito torna-se um entrave para a sua promoção. Neste caso, a adesão ao reuso em maior escala pode ser alcançado ao vir associado a práticas constantes e críticas de EA, com o direcionamento na conscientização coletiva e na promoção de uma maior aceitabilidade por parte da comunidade, consolidando informações, conhecimentos e confiabilidade por parte do usuário.

5.2.2 Alternativas para gestão de oferta de água

Como pode ser observado pela simulação dos diferentes cenários, principalmente na simulação dos cenários 1, 2 e 5, a fragilidade da resiliência do sistema de abastecimento está alicerçada no desbalanço entre as entradas e saídas de água do sistema de abastecimento. Com uma demanda por água crescente, a RMSP está refém da busca constante pelo aumento dos aportes de água nos seus mananciais, principalmente pela translocação de água de origem de outras bacias hidrográficas. Neste contexto, a gestão de oferta pode ser entendida como todas ações e medidas a serem adotadas e que possuem por objetivo o aporte de água para fins de abastecimento (SABESP, 2020).

No cenário 4 foi considerada a redução das áreas impermeáveis e, conseqüente, o aumento das áreas permeáveis na recarga dos reservatórios envolvidos no abastecimento de água da RMSP. A partir da adoção desta premissa, a discussão de alternativas focalizadas na promoção da resiliência do sistema de abastecimento da RMSP, e que tangencia a gestão de oferta de água, terão seu enfoque sobre a conservação, manutenção e restabelecimento do ambiente natural para que haja a garantia deste recurso e das funções ecossistêmicas que atuam na sua garantia.

Diante da importância ambiental que a Reserva da Biosfera do Cinturão Verde (RBCV) tem na garantia dos serviços ecossistêmicos e no bem-estar humano da população que habita a RMSP, incluindo a garantia quali-quantitativa das águas da região, é necessário que haja um conjunto de medidas que atuem de maneira integrada na preservação dos ecossistemas compreendidos na própria reserva, que possui importantes remanescentes de Mata Atlântica, bioma mais representativo da área, e do Cerrado (BICUDO *et al.*, 2020) e que estejam atrelados diretamente à manutenção do sistema de abastecimento de água da região.

Diante do exposto, isto pode ser alcançado pela adoção de práticas de EA aliadas a estratégias de compreensão social do valor ambiental destes ecossistemas podem tornar-se importantes ferramentas comunitárias de conservação, fiscalização e denúncias sobre as irregularidades cometidas, além de viabilizar o desenvolvimento de comportamentos de vivência coletiva pautadas na sustentabilidade aos moradores que dependem das práticas e do manejo florestal na região (PLANO DE DESENVOLVIMENTO E PROTEÇÃO AMBIENTAL DA SUB-BACIA ALTO JUQUIÁ, 2019; PLANO DE DESENVOLVIMENTO E PROTEÇÃO AMBIENTAL DA SUB-BACIA DO CABUÇU E DA SUB-BACIA DO TANQUE GRANDE, [ca.2019]).

Conforme apontado por RODRIGUES e VICTOR (2020), a falta da conscientização sobre o valor ambiental e os serviços e funções prestados pelos ecossistemas constitui-se enquanto um entrave na proteção do patrimônio natural. Maiores informações sobre a importância e as ressalvas atreladas à prática de valoração ambiental podem ser conferidas no trabalho de Romeiro *et al.*, (2020), que apontam para a necessidade da adoção de uma abordagem dinâmico-integrada entre as ciências sociais e naturais, para maior aprofundamento das relações de *feedbacks* entre estas áreas no processo de valoração ambiental. Ainda que toda a RMSP esteja inserida dentro dos limites da RBCV e que, portanto, possua áreas densamente

urbanizadas e degradadas, a garantia quali-quantitativa das águas de abastecimento da região depende da preservação dos remanescentes.

Práticas de reuso também são importantes na gestão de oferta, sendo que as questões relacionadas à provisão de água estão diretamente relacionadas ao bem-estar da população e à superação da pobreza e das desigualdades socioeconômicas (UNESCO WWAP, 2019). Práticas de reuso foram adotadas nas simulações dos cenários 3 e 4 e comentadas anteriormente.

Em acréscimo, outra alternativa viável e que poderia ser fortemente consolidada e aplicada tanto nas áreas verdes como nas áreas urbanizadas da RMSP, é o reforço da articulação e comunicação entre os diferentes entes públicos e a polícia ambiental. Sobretudo, para que haja o fortalecimento de um monitoramento constante de queimadas e desmatamentos e da fiscalização sobre retiradas ilegais de água dos mananciais, ocupações irregulares e lançamento indevido de efluentes e resíduos poluidores nos corpos hídricos (BUCKERIDGE, RIBEIRO, 2018a).

Em termos de resiliência do sistema de abastecimento, estes fatores atuam como estressores e exercem influências negativas sobre o sistema, sendo capazes, em conjunto, de colapsá-lo e induzi-lo a um estado na qual a sua função quali-quantitativa de abastecimento não poderia ser operada. Portanto, estes elementos possuem a capacidade de colocar em risco a continuidade dos serviços ecossistêmicos da região.

Aqui, cabe a reflexão de como seria a qualidade das águas fluviais-da RMSP se os corpos hídricos interiores às áreas urbanizadas da RMSP não tivessem sido transformados em verdadeiros “esgotos a céu aberto”? A Represa Billings é um exemplo cujo corpo hídrico não pode ser plenamente utilizado para abastecimento, devido a elevada carga de poluentes industriais e urbanos que recebe (AUTOMARE, 2018). Os rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí também se enquadram nesta mesma situação (AUTOMARE, 2018; VILAR; FONSECA, 2019).

Diante do exposto, como opção final acerca de alternativas de gestão de oferta de água para a RMSP, recomenda-se a ampliação do sistema de coleta e tratamento de esgoto, principalmente nos recursos hídricos interiores à região; multas e penalizações às pessoas físicas e jurídicas que contribuírem para a degradação dos corpos hídricos da região; aumento da fiscalização das áreas a serem preservadas e

a despoluição dos corpos hídricos interiores das áreas urbanizadas da RMSP, que poderiam ser utilizadas enquanto incremento de oferta no seu próprio sistema de abastecimento.

5.2.3 Revisão do processo de desenvolvimento da RMSP e dos territórios associados

Como pode ser visto ao longo do trabalho, a disponibilidade hídrica para abastecimento e as condições relacionadas à sua resiliência são pautadas sobre um arranjo complexo de transposição entre bacias hidrográficas, aliadas a sistemas de distribuição e de adução labirínticos. Ao se considerar os atributos socioeconômicos e geográficos da RMSP, acrescidos da configuração infraestrutural do seu sistema de abastecimento, nota-se que são poucas as unidades de tratamento de água junto aos mananciais para atender todas as demandas da região, ainda que, somadas, tenham uma elevada capacidade produtiva (SABESP, 2020 a). Estas características impõem maior rigidez ao sistema de abastecimento de água da RMSP e, conseqüentemente, menor resiliência do sistema perante eventos adversos e/ou extremos.

A atual configuração de interligação do sistema de água bruta também confere menor flexibilidade ao sistema de abastecimento da RMSP, que em decorrência das longas distâncias e questões físicas que funcionam como obstáculos à sua conexão, requerem medidas e infraestruturas mais complexas e potentes na garantia de oferta de água (SABESP, 2020a).

Contudo, verifica-se que, apesar da compreensão de que o maior engessamento do sistema de abastecimento de água o torna menos flexível, devido ao acúmulo de fragilidades em decorrência da sua complexidade, pauta-se continuamente a ampliação da sua infraestrutura por novos sistemas para a translocação de água de outras regiões (SABESP, 2020 a, c), aumentando, desta maneira, a interdependência entre os sistemas – e estas regiões – e, conseqüentemente, a sua complexidade e rigidez.

Ao focalizar as ações no aumento do aporte de água por outras regiões, o sistema de abastecimento de água acaba sendo considerado de maneira parcializada nos processos de tomada de decisão; isto é, o *pensamento em silo* (INTERNATIONAL

INTEGRATED REPORTING COUNCIL, 2016) posto em prática acaba inviabilizando a promoção de sua resiliência, causando apenas um *delay* da sua estrutura colapsante, anteriormente mencionada (item 4.1). Sob esta condição, pauta-se continuamente a necessidade de maior encadeamento entre os diversos setores de desenvolvimento que estão relacionados à água e deve-se considerar as inter-relações e influências que exercem entre si (RYU, PARK, 2018; RODINA, 2019; VAIO *et al.*, 2021; WANG *et al.*, 2021).

No trabalho de SILVA *et al.* (2019), os autores discutem a necessidade da gestão integrada das águas urbanas para redução da vulnerabilidade hídrica, considerando o sistema de abastecimento, de esgotamento sanitário e de drenagem urbana um sistema unitário como medida estratégica no planejamento público e de estrutura comum. Esta prerrogativa é importante, pois a estrutura gerencial das águas, em especial das águas voltadas para abastecimento, não tem competência legal para abranger os demais setores que, apesar de influírem continuamente nas condições quali-quantitativas da água, não são reconhecidos legalmente como usuários deste recurso.

Diante de tudo o que foi exposto até o momento, em um contexto recente de aprovação do Novo Marco Legal do Saneamento (BRASIL, 2020), no que diz respeito ao abastecimento de água em si, cabe a reflexão de que até que ponto abrir o setor de saneamento para o capital privado não implicaria apenas no aumento da infraestrutura na entrega por água, com enfoque apenas na ampliação da rede de distribuição e na translocação de água, sem considerar os limites ambientais próprios da região.

Ao se discutir o sistema de abastecimento da RMSP sob a ótica sistêmica, percebe-se que a promoção de maior rigidez no sistema acontece em decorrência da desconsideração da capacidade de resposta da variável ambiental. Conforme pode ser observado novamente na Figura 51, sob as alterações previstas no ciclo hidrológico em decorrência das mudanças climáticas (cenário 2), o sistema de abastecimento entra em colapso e perde a capacidade de recuperação do seu volume útil em termos quantitativos, ainda que sejam adotadas medidas do gerenciamento de demanda e de oferta de água sobre as condições de referência embutidas no modelo (cenário 5).

demanda e oferta da água não foram suficientes para reverter potencial colapso futuro do sistema de abastecimento (cenário 5).

Diante de condições impostas pelo ambiente geográfico e suas peculiaridades contextuais, outras regiões do globo tiveram que revisar o seu próprio modelo de desenvolvimento e replanejar toda a sua estrutura e dinâmica interna para salvaguardar a própria população, a economia e o meio ambiente, em decorrência das interligações entre setores e do comportamento da variável ambiental face a condição de cada caso.

A exemplo, a cidade de Kiruna, uma província ártica sueca com mais de 18 mil habitantes e que concentra a maior mina de minério de ferro da Europa, está em processo de realocação completa, como resultado da intensa atividade extrativista em seu território (RATHI, 2017; RIZZO; SORDI, 2020). Devido ao risco decorrente da expansão das atividades de mineração no município e consequente ocorrência de deformações no interior do seu terreno, os moradores podem ser dragados no caso de uma movimentação mais intensa do solo e, por isto, a realocação planejada destas pessoas está sendo realizada (RIZZO; SORDI, 2020).

Outro exemplo emblemático é o caso da China, que além de já ter mudado a sua política fundiária há alguns anos com o intuito de promover o (re)desenvolvimento de diversas regiões, inclusive sobre as terras coletivas em Shenzhen, mais recentemente estipulou a criação de uma nova zona econômica especial perto de Pequim (ISTO É DINHEIRO, 2017; LAI; WANG; LOK, 2017). A nova área de Xiongan será desenvolvida com o intuito de “desafogar” a capital Pequim dos efeitos da sua densa concentração urbana, em termos de redução de tráfego e de poluição (ISTO É DINHEIRO, 2017).

Neste sentido, considerando todos os papéis e funções desempenhados pela água na região e considerando, também, as experiências internacionais e as imposições imprevisíveis de novos cenários do ciclo hidrológico em decorrência das mudanças climáticas, verificou-se que há a necessidade de discussão sobre o modelo de desenvolvimento adotado para a RMSP e de seus territórios associados, com a descentralização planejada do seu polo industrial.

6 LIMITAÇÕES DO MODELO

Enquanto o arcabouço teórico da dinâmica de sistemas é utilizado majoritariamente na definição de limites socioecológicos, como na estrutura original dos limites planetários (ROCKSTROM *et al.*, 2009), a estrutura do modelo de referência não viabiliza uma investigação esmiuçada da dinâmica dos condicionantes socioambientais e estruturais que foram consideradas na sua elaboração, nem a imposição de seus limites de resiliência em decorrência da sua limitação numérica.

As análises das séries temporais que foram consideradas na estruturação do modelo por si só denotam a complexidade e necessidade de cautela ao se considerar as ligações causais entre as diversas variáveis, sendo necessária a toda uma gama de escalas temporais e aplicações estatísticas a serem consideradas e incorporadas ao modelo.

Conforme descrito no item textual 4.3.4.1., para além da identificação dos “pontos de alavancagem” do modelo, o teste de sensibilidade foi utilizado no seu processo de calibração e aplicado, inclusive, sobre o parâmetro que diz respeito à Transposição do Paraíba do Sul para o Sistema Cantareira, chamado *Transposicao_BH PS*, em que foram consideradas 200 simulações por intervalo de análise. O resultado de tal procedimento foi utilizado na análise das limitações do modelo. Cabe ressaltar que as variações utilizadas no teste de sensibilidade foram realizadas a partir do valor escolhido e embutido no modelo, sob as faixas de variação estipuladas em cada caso.

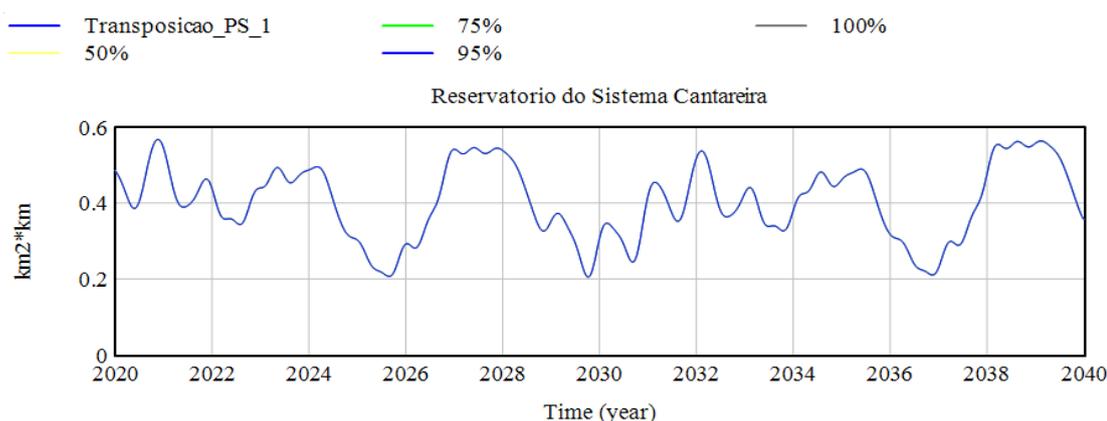
Na Figura 53 e na Figura 54 é possível verificar o teste de sensibilidade desta transposição sobre os sistemas sob a condição de uma variação de 0%, isto é, sem alteração do seu valor ao longo das simulações, para as variáveis de estado *águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios e reservatório do Sistema Cantareira*, respectivamente.

Figura 53 – Análise de sensibilidade sobre as águas disponíveis para abastecimento com variação de 0%



Fonte: Elaboração própria.

Figura 54- Análise de sensibilidade sobre o Reservatório do Sistema Cantareira com variação de 0%

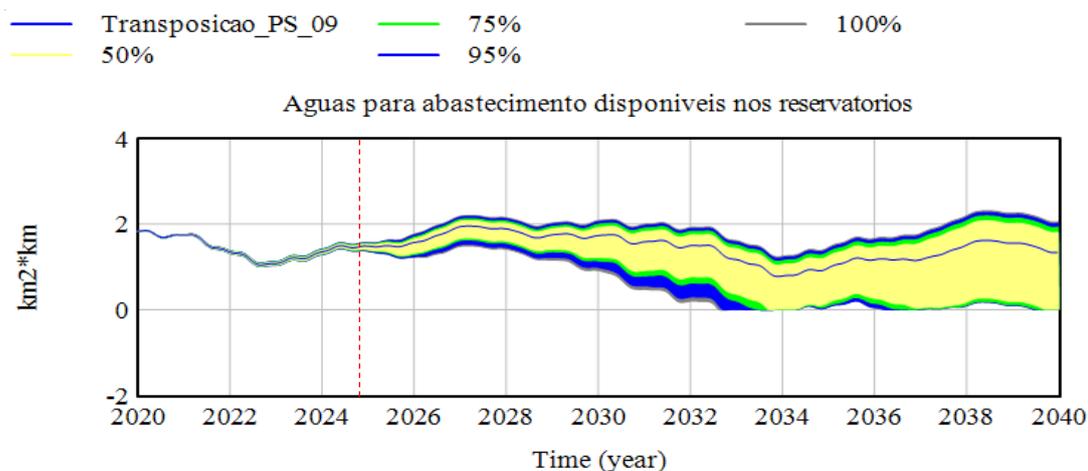


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 55 e na Figura 56 é possível verificar a análise de sensibilidade desta transposição sobre os sistemas sob a condição de uma variação de $\pm 10\%$ e considerando 200 simulações no intervalo estipulado. Nota-se que, dada a configuração do modelo de referência e a qualidade dos dados utilizados, entre os anos de 2024 e 2026 há um aumento da divergência entre os valores de entrada e saída do modelo e, conseqüentemente, um alargamento do intervalo de confiança.

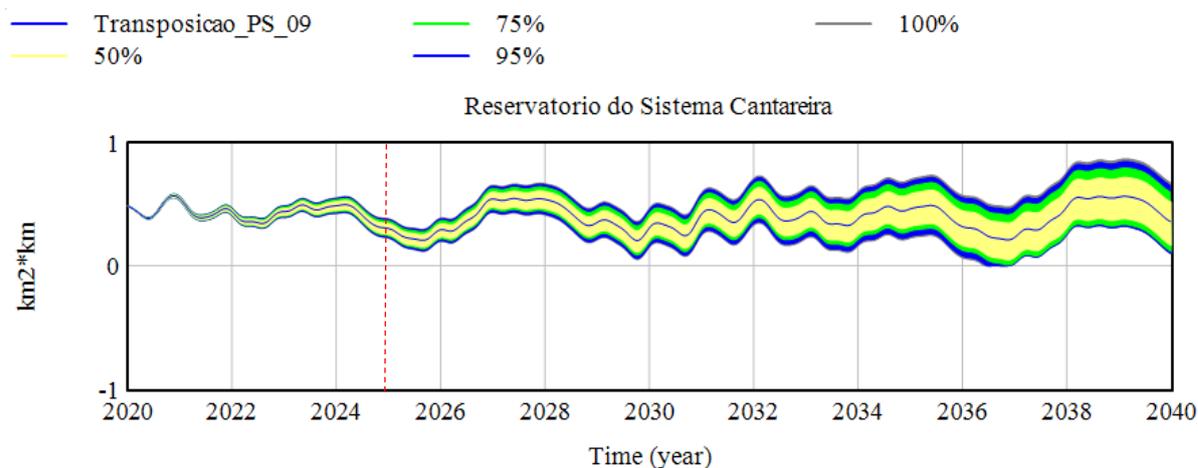
Na Figura 55, ainda é possível verificar que o limite do intervalo de confiança ultrapassa o zero, atingindo um valor supostamente negativo. O gráfico não apresenta o valor negativo devido às condições operacionais que foram incluídas no modelo, que impossibilitam valores negativos em decorrência das premissas adotadas na sua estruturação.

Figura 55- Análise de sensibilidade sobre as águas disponíveis para abastecimento com variação de $\pm 10\%$



Fonte: Elaboração própria.

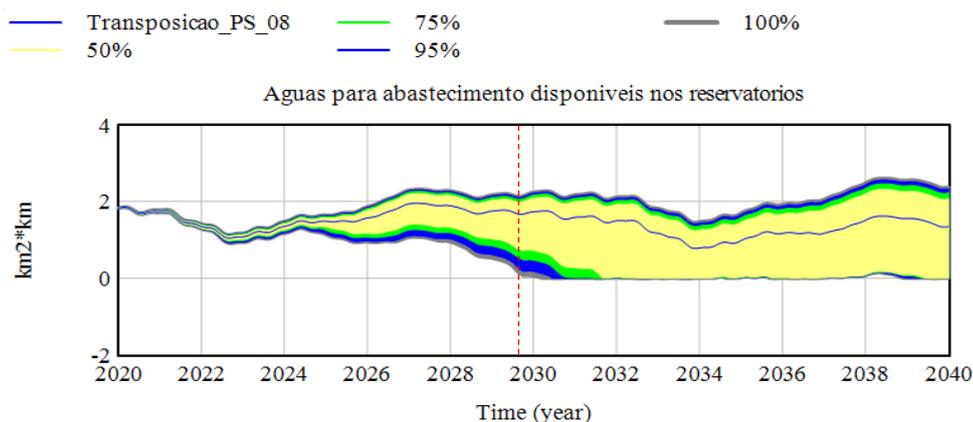
Figura 56- Análise de sensibilidade sobre o Reservatório do Sistema Cantareira com variação de $\pm 10\%$



Fonte: Elaboração própria.

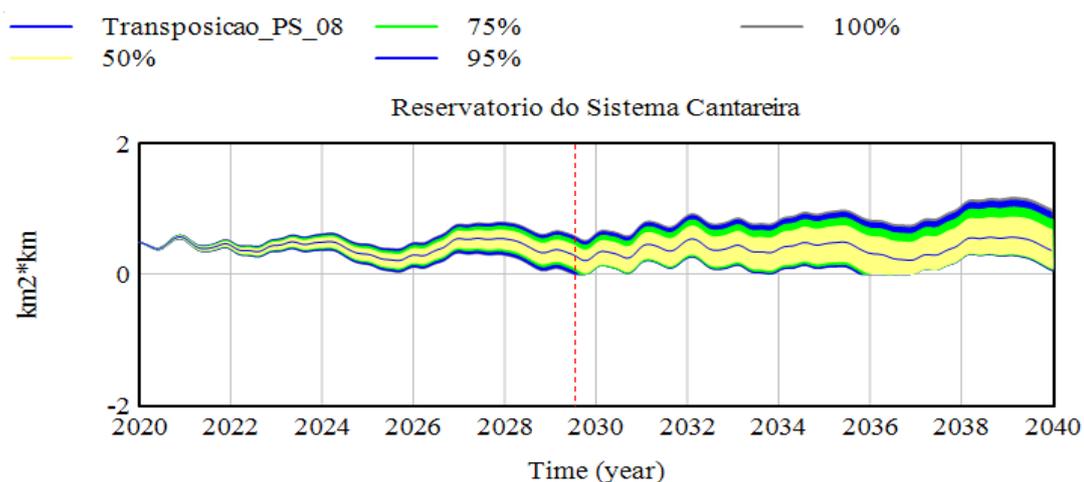
Para fins observacionais, o intervalo da análise de sensibilidade foi ampliado para $\pm 20\%$. A partir de meados do ano de 2029 o zero é ultrapassado pelo limite inferior do intervalo de confiança de ambos os sistemas, conforme mostrado na Figura 57 e na Figura 58, respectivamente.

Figura 57- Análise de sensibilidade sobre as águas disponíveis para abastecimento com variação de $\pm 20\%$



Fonte: Elaboração própria.

Figura 58- Análise de sensibilidade sobre o Reservatório do Sistema Cantareira com variação de $\pm 20\%$



Fonte: Elaboração própria.

Considerando que o software Vensim PLE PLUS 9.0 realiza a integração numérica de taxas, e para as variáveis de estado, esta taxa é a diferença entre as suas entradas e saídas, a cada ciclo de execução é adicionado ao valor das variáveis de estado a incerteza do ciclo atual. Sendo assim, pequenas variações nos valores de entrada ou de saída são integradas nas variáveis de estado, gerando grandes divergências entre os limites do intervalo de confiança ao longo do horizonte temporal.

Como no modelo proposto foram utilizados muitos valores médios e séries históricas curtas, estas incertezas foram sendo propagadas como uma maior divergência nos intervalos de confiança supramencionados, resultando em uma maior sensibilidade ao erro nos espaços temporais mais longos. Desta maneira, recomenda-

se a substituição das variáveis que possuem valores médios no modelo pelas equações que representem o seu comportamento, ao longo de suas séries históricas estatisticamente trabalhadas, além da utilização de séries temporais mais longas.

Diante do exposto, o modelo de referência fornece uma base para julgar o estado relativo da resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP e da manutenção dos papéis e funções que exercem diante da confrontação de hipóteses. Isto é, o modelo apresentado fornece uma estrutura dinâmica passível de ser utilizada para a aplicação de hipóteses e viabilização de investigações relativas ao estado do sistema sob as condições de sua estrutura.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a abordagem sistêmica não seja recente, por ser amparada pelo paradigma da complexidade, talvez ofereça metodologias necessárias para o enfrentamento de muitos problemas de interface socioecológica experimentados atualmente, tal qual os que envolvem a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP e todos os percalços que circundam possíveis cenários críticos de escassez.

Esta pesquisa não teve um caráter de investigação exaustivo sobre todos os subsistemas inter-relacionados ao sistema de abastecimento e dos problemas internos a cada um, mas teve por intuito discutir a resiliência do sistema de abastecimento e abordar algumas possíveis alternativas para a sua promoção, através da utilização de cenários e da base teórico-metodológica dos sistemas dinâmicos com uso de um modelo simplificado.

No tocante das informações obtidas a partir do emprego da metodologia adotada, a discussão sobre a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP foi realizada ao longo de toda a pesquisa, integrando conceitos importantes e relevantes para a área do conhecimento e abrindo caminhos para maior aprofundamento sobre a temática.

A construção do modelo conceitual na investigação e identificação dos principais componentes do sistema viabilizou a identificação do seu arranjo estrutural, o entendimento qualitativo do seu comportamento e a identificação de algumas alças de retroalimentação, que além de configurarem maior complexidade ao modelo, abrem caminhos a serem explorados com maior afinco.

A despeito das limitações apresentadas pelo modelo dinâmico em termos qualitativos e de refinamento dos dados, a metodologia empregada viabilizou a identificação dos “pontos de alavancagem” e a simulação de cenários que viabilizassem a discussão da resiliência e da complexidade inerente ao sistema de abastecimento, possibilitando o levantamento de questões imprescindíveis, as quais merecem uma reflexão mais profunda.

Sem dúvidas, o ideal seria a aquisição de séries históricas temporais longas de todos as variáveis que constituem a estrutura do modelo, com exceção das variáveis de estado, para construir um modelo mais robusto para o estabelecimento de critérios mais refinados acerca das alternativas. Contudo, ao reconhecer a limitação de execução, do seu caráter temporal e das condições de funcionamento do modelo, a discussão sobre a resiliência não sofreu prejuízos e a pesquisa conseguiu indicar o uso de sistemas dinâmicos enquanto um caminho metodológico nos estudos sobre a resiliência e na integração entre diferentes áreas do conhecimento. Portanto, ainda que a escolha dos critérios não tenha sido exaustiva, foi considerada adequada dada a abrangência do estudo e a disponibilidade de dados no espaço temporal de execução da pesquisa.

Por fim, com relação a resiliência do sistema de abastecimento de água da RMSP, é possível notar que o fator ambiental não é considerado com a devida complexidade que lhe cabe na gestão e gerenciamento do setor. Ao focar sempre em medidas infraestruturais para o aumento do aporte de água, através da translocação de águas entre bacias, e de aumentar a sua rede de distribuição sem, contudo, descentralizar as estações de tratamento, limita-se ainda mais a flexibilidade do sistema. Sistemas menos flexíveis possuem menor resiliência e estão mais propensos a colapsar-se diante de um evento extremo climático ou de um evento disruptivo de outra natureza.

8 REFERÊNCIAS

ABED-ELMDOUST, A.; KERACHIAN, R.. Water Resources Allocation Using a Cooperative Game with Fuzzy Payoffs and Fuzzy Coalitions. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 26, n. 13, p. 3961-3976, 1 ago. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0115-0>.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. Resolução nº 1.931, de outubro de 2017. Tornar públicas as recomendações constantes do Ofício nº 2/2015/AA-ANA, bem como as condicionantes operativas referentes à transposição do reservatório da UHE Jaquari para o reservatório Atibainha constantes do Relatório Conjunto. **Agência Nacional das Águas**, Brasília, out. 2017. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=137551><https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=137551>. Acesso em: 07 fev. 2022.

AHMAD, S.; JIA, H.; CHEN, Z.; LI, Q.; XU, C. Water-energy nexus and energy efficiency: a systematic analysis of urban water systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 134, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110381>.

ALLAN, C.; XIA, J.; PAHL-WOSTL, C.. Climate change and water security: challenges for adaptive water management. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [S.L.], v. 5, n. 6, p. 625-632, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cosust.2013.09.004>.

ALCAMO, J.. Introduction: the case for scenarios of the environment. In: ALCAMO, J. (ed.). **Developments in Integrated Environmental Assessment**. [S.L.]: Elsevier, 2008. Cap. 1. p. 1-11.

ALCAMO, J.; HENRICHS, T.. Towards Guidelines for Environmental Scenario Analysis. In: ALCAMO, J. (ed.). **Developments in Integrated Environmental Assessment**. [S.L.]: Elsevier, 2008. Cap. 2. p. 13-25.

AMBRISSE, T.; COELHO, C. A. S. A crise hídrica e a seca de 2014 e 2015 em São Paulo: contribuições do clima e das atividades humanas. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água. A crise hídrica na região metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018. Cap. 2. p. 22-35.

ANDERIES, J. M.; JANSSEN, M. A.; OSTROM, E. A Framework to Analyze the Robustness of Social-ecological Systems from an Institutional Perspective. **Ecology and Society**, Online, 09 jun. 2004. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss1/art18/>. Acesso em: 07 fev. 2021.

ARANTES, L. T.; CARVALHO, A. C. P.; CARVALHO, A. P. P.; LORANDI, R.; MOSCHINI, L. E.; LOLLO, J. A. Surface runoff associated with climate change and land use and land cover in southeast region of Brazil. **Environmental Challenges**, [S.L.], v. 3, p. 100054, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2021.100054>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021000330>. Acesso em: 11 maio 2021.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 486, p. 351-364, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.02.010>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169413001224>. Acesso em: 19 jun. 2019.

ASHBY, W. R. An introduction to cybernetics. [Português]. **Uma introdução à cibernética**. São Paulo: Perspectiva, 1971. p.362.

ATTANASIO, C. M.; GANDOLFI, S.; ZAKIA, M. J. B.; VANIZIANI JÚNIOR, J. C. T.; LIMA, W. P. A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas. **Bragantia**, [s.l.], v. 71, n. 4, p.493-501, 8 jan. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052013005000001>.

AUTOMARE, Marcio Miguel. A visão econômica da crise hídrica 2014/2015. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água: A crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018. Cap. 12. p. 167-174.

BAKER, J.; SHEATE, W.R.; PHILLIPS, P.; EALES, R.. Ecosystem services in environmental assessment — Help or hindrance? **Environmental Impact Assessment Review**, [S.L.], v. 40, p. 3-13, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2012.11.004>.

BALAEI, B.; WILKINSON, S.; POTANGAROA, R.; HASSANI, N.; ALAVI-SHOSHTARI, M.. Developing a Framework for Measuring Water Supply Resilience. **Natural Hazards Review**, [s.l.], v. 19, n. 4, nov. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)nh.1527-6996.0000292](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000292).

BALVANERA, P.; ASTIER, M.; GURRI, F. D.; ZERMEÑO-HERNÁNDEZ, I.. Resiliencia, vulnerabilidad y sustentabilidad de sistemas socioecológicos en México. **Revista Mexicana de Biodiversidad**, [S.L.], v. 88, p. 141-149, dez. 2017. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.005>.

BARROW, C.J.. **Environmental Management for Sustainable Development**. London:Routledge, 2006.p.454

BARNOSKY, A. D.; HADLY, E. A.; BASCOMPTE, J.; BERLOW, E. L.; BROWN, J. H.; FORTELIUS, M.; GETZ, W. M.; HARTE, J.; HASTINGS, A.; MARQUET, P. A. Approaching a state shift in Earth's biosphere. **Nature**, [S.L.], v. 486, n. 7401, p. 52-58, jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11018>.

BERROUET, L.; VILLEGAS-PALACIO, C.; BOTERO, V.. Vulnerability of Rural Communities to Change in an Ecosystem Service Provision: surface water supply. a case study in the northern andes, colombia. **Land Use Policy**, [S.L.], v. 97, p. 104737, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104737>.

BICUDO, D. C.; BICUDO, C. E. M.; MALDANER, C.; SIDAGIS-GALLI, C.; ABE, D. S.; RODRIGUES, E. A.; ARCOVA, F. C. S.; QUITÉRIO, L. A. D.; NASCIMENTO, M.; RANZINI, M.; TAGNIM, R.; HIRATA, R.; COSTA-BÖDDEKER, S.; CICCIO, V.; MARTINS, V. Provisão, regulação da água e bem-estar humano. In: São Paulo (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Instituto Floresta. **Serviços ecossistêmicos e bem-estar humano na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2020. Parte 1. Item 1.4, p.175-235.

BLANCHARD, C.; DURUSSEL, C.; BOTELER, B. Socio-ecological resilience and the law: exploring the adaptive capacity of the BBNJ agreement. **Marine Policy**. [S.L.], v. 108, julho 2019. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103612>.

BIGGS, R.; SCHLÜTER, M.; SCHOON, M. L. An introduction to the resilience approach and principles to sustain ecosystem services in social-ecological system. In: BIGGS, Reinette; SCHLÜTER, Maja; SCHOON, Michael L. (ed.). **Principles for Building Resilience: sustaining ecosystem services in social-ecological systems**. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. p. 1-32.

BIGGS, R.; SCHLÜTER, M.; BIGGS, D.; BOHENSKY, E. L.; BURNSILVER, S.; CUNDILL, G.; DAKOS, V.; DAW, T. M.; EVANS, L. S.; KOTSCHY, K. Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. **Annual Review of Environment and Resources**, [S.L.], v. 37, n. 1, p. 421-448, 21 nov. 2012. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-environ-051211-123836>.

BOLIN, B.; SEETHARAM, M.; POMPEII, B.. Water resources, climate change, and urban vulnerability: a case study of Phoenix, Arizona. **Local Environment**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 261-279, mar. 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13549830903575604>.

BRASIL. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. **Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 06 abr. 2021.

BRASIL 247. **Crise hídrica aumenta e ao menos 14 cidades de São Paulo já adotam o racionamento**. 2021. Disponível em: < <https://www.brasil247.com/regionais/sudeste/crise-hidrica-aumenta-e-ao-menos-14-cidades-de-sao-paulo-ja-adotam-o-acionamento>>. Acesso em: 16 jan 2022.

BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K.; MOONEY, H. A. The Nature and Value of Ecosystem Services: an overview highlighting hydrologic services. **Annual Review of Environment and Resources**, [S.L.], v. 32, n. 1, p. 67-98, nov. 2007. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>.

BOLUND, Per; HUNHAMMAR, Sven. Ecosystem services in urban areas. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 293-301, maio 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0921-8009\(99\)00013-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0921-8009(99)00013-0).

BUSCHBACHER, R. A Teoria da Resiliência e os Sistemas Socioecológicos: Como se Preparar para um Futuro Imprevisível? **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, n. 09, p. 11-24. Brasília: Ipea, 2014.

BUCKERIDGE, M.; RIBEIRO, W. C. (org.). **Livro branco da água. A crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. 11. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018a. 175 p. Disponível em: <http://www.iea.usp.br/publicacoes/ebooks/livro-branco-da-agua>. Acesso em: 10 abr. 2019.

BUCKERIDGE, M.; RIBEIRO, W. C. Uma visão sistêmica das origens, consequências e perspectivas das crises hídricas na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água. A crise hídrica na região metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018b. Cap. 1. p. 14-21.

CALADO, G. G.; VALVERDE, M. C.. Assessing future scenarios of water availability using cmpi5 high resolution climate models – case study of the alto tietê basin. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, [S.L.], v. 55, n. 3, p. 401-419, 5 set. 2020. Zeppelini Editorial e Comunicacao. <http://dx.doi.org/10.5327/z2176-947820200658>.

CARPENTER, S.; WALKER, B.; ANDERIES, J. M.; ABEL, N. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? **Ecosystems**, [s.l.], v. 4, n. 8, p.765-781, dez. 2001. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10021-001-0045-9>.

CHALVIN, F.; LEJOYEUX, M. Quelles échelles utiliser pour mesurer la résilience en psychiatrie adulte? **Annales Médico-Psychologiques, Revue Psychiatrique**, [S.L.], v. 178, n. 8, p. 867-870, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amp.2020.06.012>.

CEOLA, S.; MONTANARI, A.; KRUEGER, T.; DYER, F.; KREIBICH, H.; WESTERBERG, I.; CARR, G.; CUDENNEC, C.; ELSHORBAGY, A.; SAVENIJE, H.. Adaptation of water resources systems to changing society and environment: a statement by the international association of hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 61, n. 16, p. 2803-2817, 6 out. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2016.1230674>.

CHRISTOFFERSEN, B. O.; RESTREPO-COUBE, N.; ARAIN, M A.; BAKER, I. T.; CESTARO, B. P.; CIAIS, P.; FISHER, J. B.; GALBRAITH, D.; GUAN, X.; GULDEN, L. Mechanisms of water supply and vegetation demand govern the seasonality and magnitude of evapotranspiration in Amazonia and Cerrado. **Agricultural and Forest Meteorology**, [S.L.], v. 191, p. 33-50, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.02.008>.

CNN. **Estado de São Paulo registrou pior condição de seca no Brasil em março**. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sao-paulo-registrou-pior-condicao-de-seca-no-brasil-em-marco/>. Acesso em: 23 nov. 2021.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [S.L.], v. 125, n. 3-4, p. 769-784, 9 jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>.

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L.P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M.S.; DUTRA, L.M. M. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, [S.L.], v. 46, n. 11-12, p. 3737-3752, 15 ago. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê Sistemas Alto Cotia e Baixo Cotia**. São Paulo, 2008a.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê sistema Cantareira**. São Paulo, 2008b

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê sistema Guarapiranga**. São Paulo, 2008c.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê Sistema Alto Tietê**. São Paulo, 2009a.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê Sistema Ribeirão da Estiva**. São Paulo, 2009b.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê Sistema Rio Claro**. São Paulo, 2009c.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. Espaço de Águas. **Dossiê Sistema Rio Grande**. São Paulo, 2009d.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Relação de Municípios Operados pela Sabesp**. 2017. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/asabesp_doctos/relacao_municipios_nov17.pdf. Acessado em: 04 fev 2021.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Sabesp amplia para 78% a cobertura vegetal no entorno de represas do Sistema Cantareira**. 2019. Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/releases-Detalhes.aspx?secaold=193&id=8102> >. Acesso em 07 jun 2021.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Estratégias Resilientes**: Um plano de adaptação às variações climáticas na gestão de Recursos Hídricos para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo. 2020a. Disponível em: <http://www.sabesp.com.br/estrategias_resilientes/> Acesso em: 19 mai. 2021.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Controle de perdas**. 2020b. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=37>. Acesso em: 08 jun 2021.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Relatório Síntese PDAA**: revisão e atualização do Plano Diretor de Abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP. 2020c.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). [s.d]a. Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=31> >. Acesso em 15 jun 2019.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). [s.d]b. **Poços profundos**. Disponível em: < <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=34> >. Acesso em: 18 ago. 2019

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Portal dos Mananciais**. [s.d]c. Disponível em:

<<https://mananciais.sabesp.com.br/HistoricoSistemas?Sistemald=17>>. Acesso em: 08 jun 2021.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO PARAÍBA DO SUL (CBH-PS). **Diagnóstico**. Parte II. Revisão e Atualização do Plano de Bacias da UGRHI 02. São Paulo, 2016. (Contrato 408/2015, Código do empreendimento: 2015-OS-350).

CONICELLI, B.P.. **Gestão das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP)**. 2014. 163 f. Tese (Doutorado) - Curso de Hidrologia e Meio Ambiente, Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

COOLE, J. W.; TUKEY, J.W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. 1965. Disponível em: < <https://www.ams.org/journals/mcom/1965-19-090/S0025-5718-1965-0178586-1/S0025-5718-1965-0178586-1.pdf>>. Acesso em: 07 fev 2022.

COSTA JUNIOR, A. L.. **Estruturação de um modelo de dinâmica de sistemas com Group Model Building**: um estudo de caso em recursos humanos do IPEV. 2018. p.201. Dissertação. Programa de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

COUTINHO, R. M.; KRAENKEL, R. A.; PRADO, P. I.. Catastrophic Regime Shift in Water Reservoirs and São Paulo Water Supply Crisis. **Plos One**, [S.L.], v. 10, n. 9, p. 11-15, 15 set. 2015. Public Library of Science (PLoS). <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0138278>. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0138278>. Acesso em: 13 abr. 2021.

DAVIES, E. G.R.; SIMONOVIC, S. P.. Global water resources modeling with an integrated model of the social–economic–environmental system. **Advances In Water Resources**, [S.L.], v. 34, n. 6, p. 684-700, jun. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.02.010>.

DAVOUDI, S.; SHAW, K.; HAIDER, L. J.; QUINLAN, E.; PETERSON, D.; WILKINSON, C.; FÜNFELD, H.; MCEVOY, D.; PORTER, L.; DAVOUDI, S.. Resilience: a bridging concept or a dead end? “Reframing” Resilience: Challenges for Planning Theory and Practice Interacting Traps: Resilience Assessment of a Pasture Management System in Northern Afghanistan Urban Resilience: What Does it Mean in Planning Practice? Resilience as a Useful Concept for Climate Change Adaptation? The Politics of Resilience for Planning: A Cautionary Note. **Planning Theory & Practice**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 299-333, jun. 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/14649357.2012.677124>.

DELGADO, M. I.; CAROL, E.; CASCO, M. A. Land-use changes in the periurban interface: hydrologic consequences on a flatland-watershed scale. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 722, p. 137836, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137836>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720313486>. Acesso em: 16 jun. 2021.

DESSAVRE, D. G.; RAMIREZ-MARQUEZ, J. E.; BARKER, K. Multidimensional approach to complex system resilience analysis. **Reliability Engineering & System Safety**, [S.L.], v. 149, p. 34-43, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2015.12.009>.

DIETZ, T.; KLAMROTH, K.; KRAUS, K.; RUZIKA, S.; SCHÄFER, L. E.; SCHULZE, B.; STIGLMAYR, M.; WIECEK, M. M. Introducing multiobjective complex systems. **European**

Journal of Operational Research, [s.l.], v. 280, n. 2, p.581-596, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.027>.

DOLNICAR, S.; HURLIMANN, A.; GRÜN, B.. What affects public acceptance of recycled and desalinated water? **Water Research**, [S.L.], v. 45, n. 2, p. 933-943, jan. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.09.030>.

DULLEY, R. D. Noções de Natureza, Ambiente, Meio Ambiente, Recursos Ambientais e Recursos Naturais. In: **Agricultura São Paulo**, Vol. 51, n.2, julho a dezembro de 2004, p. 15 – 26.

DURAN-ENCALADA, J.A.; PAUCAR-CACERES, A.; BANDALA, E.R.; WRIGHT, G.H.. The impact of global climate change on water quantity and quality: a system dynamics approach to the us-mexican transborder region. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 256, n. 2, p. 567-581, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.016>.

ECHKOUT, J. P.C.; BOIX-FAYOS, C.; PÉREZ-CUTILLAS, P.; VENDE, J.. The impact of reservoir construction and changes in land use and climate on ecosystem services in a large Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 590, p. 125208, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125208>.

EL-GAFY, I.; APUL, D.. Expanding the Dynamic Modeling of Water-Food-Energy Nexus to Include Environmental, Economic, and Social Aspects Based on Life Cycle Assessment Thinking. **Water Resources Management**, [S.L.], 30 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-021-02951-y>.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. (EMPLASA). **Caracterização e Quadros de Análise Comparativa da Governança Metropolitana no Brasil: Arranjos Institucionais de Gestão Metropolitana**. São Paulo: IPEA, 2013. Disponível em: https://ipea.gov.br/redeipea/images/pdfs/governanca_metropolitana/re1_1_caracterizacao_rmsp.pdf. Acessado em: 19 mai 2021.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. (EMPLASA). **Atlas de uso e ocupação do solo da Região Metropolitana de São Paulo e Bacia Hidrográfica do Alto Tietê**. São Paulo. 2014

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. (EMPLASA). **Visão da Metrôpole: Subsídios para a elaboração do PDUI Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: 2016.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. (EMPLASA). **Região Metropolitana de São Paulo**. [s.d]a. Disponível em: <https://emplasa.sp.gov.br/RMSP>. Acesso em: 30 ago 2019.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO. (EMPLASA). [s.d.]b. **Megametrôpole Paulista**. Disponível em: <https://emplasa.sp.gov.br/MMP>. Acesso em: 3 set 2019.

ERNSTSON, H. The social production of ecosystem services: a framework for studying environmental justice and ecological complexity in urbanized landscapes. **Landscape And Urban Planning**, [S.L.], v. 109, n. 1, p. 7-17, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.005>.

FALKENMARK, M.; WANG-ERLANDSSON, L.; ROCKSTRÖM, J. Understanding of water resilience in the Anthropocene. **Journal of Hydrology X**, [S.L.], v. 2, p. 1-2, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100009>.

FENZL, N.; MACHADO, J. A. C. **A Sustentabilidade de Sistemas Complexos: Conceitos básicos para uma ciência do desenvolvimento sustentável: Aspectos Teóricos e Práticos.** Belém: NUMA/UFBA, 2009. 285 p.

FERREIRA, P.; VAN SOESBERGEN, A.; MULLIGAN, M.; FREITAS, M.; VALE, M. M. Can forests buffer negative impacts of land-use and climate changes on water ecosystem services? The case of a Brazilian megalopolis. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 685, p. 248-258, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.065>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719320777>. Acesso em: 15 fev. 2020.

FIGUEIRÓ, F.; WOLKMER, M.F.S. Interface da água enquanto recurso ambiental econômico e a sua interconexão com a tutela do meio ambiente. **FURB – Revista Jurídica**, Blumenau, v.17, n. 34, p.37-54,jul/dez. 2013.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Secretário de Doria reconhece cenário de crise hídrica no estado de SP.** 2021. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2021/10/secretario-de-doria-reconhece-cenario-de-crise-hidrica-no-estado-de-sp.shtml>>. Acesso em: 17 jan 2022.

FOLLONI, A. **Introdução à Teoria da Complexidade.** Curitiba: Juruá, 2016. 138 p.

FOLKE, C. Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses. **Global Environmental Change**, [s.l.], v. 16, n. 3, p.253-267, ago. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>.

FOLKE, C. Resilience (Republished). **Ecology and Society**, [S.L.], v. 21, n. 4, p. 1-2, 2016. Resilience Alliance, Inc.. <http://dx.doi.org/10.5751/es-09088-210444>.

FOLKE, C.; CARPENTER, St. R.; WALKER, B.; SCHEFFER, M.; CHAPIN, T.; ROCKSTRÖM, J.. 2010. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. **Ecology and Society** 15(4): 20. [online] URL: <http://www.ccologyandsociety.org/voll5!iss4/art20/Insight>.

FONTES, G. **Desmatamento deve causar mais secas, e isso aumenta sua conta de luz.**2021. Uol Economia. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/noticias/redacao/2021/06/14/seca-sul-sudeste-conta-de-luz-desmatamento-amazonia.htm>. Acesso em: 23 nov. 2021.

FORD, A. **Modeling the environment.** 2. ed. Washington: Island Press, 2010. 380 p.

FRANCIS, R.; BEKERA, B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. **Reliability Engineering & System Safety**, [s.l.], v. 121, p.90-103, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.004>.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO-TIÊTE (FABHAT). **Relatório de situação dos Recursos Hídricos: Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – UGRHI-06.** São Paulo: FABHAT, 2017.

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO-TIÊTE (FABHAT). **Estudos hidrológicos:** disponibilidades hídricas e garantias de atendimento. Serviços profissionais técnicos e especializados, de acessoria e consultoria, destinados a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê - UGRHI-06. São Paulo: FABHAT, 2018a . (Contrato S-002/2017-FABHAT-Anexo 3).

FUNDAÇÃO AGÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO-TIÊTE(FABHAT). **Relatório Final – Minuta RFM**. Serviços profissionais técnicos e especializados, de acessoria e consultoria, destinados a elaboração do plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tiête - UGRHI-06. São Paulo: FABHAT, 2018b . (Contrato S-002/2017-FABHAT-Volume I).

FURTADO, B.; SAKOWSKI, P. A. M.; TÓVOLLI, M. H. (ed.). **Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas**. Brasília: Ipea, 2015. 436 p. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=25860. Acesso em: 17 abr. 2019.

GARCÍA, M. M.; HILEMAN, J.; BODIN, Ö. Collaboration and conflict in complex water governance systems across a development gradient: addressing common challenges and solutions. **Ecology and Society**, [S.L.], v. 24, n. 3, 2019. Resilience Alliance, Inc. <http://dx.doi.org/10.5751/es-11133-240328>.

GARCÍA, N. G.; FERNÁNDEZ, J. M.; FITZ, Carl. Environmental Scenario Analysis on Natural and Social-Ecological Systems: a review of methods, approaches and applications. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 18, p. 7542, 13 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12187542>.

GARNETT, P.. Total systemic failure? **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 626, p. 684-688, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.075>.

GASPODINI, V.. **Crise hídrica: duas das maiores hidrelétricas de SP já operam no volume morto**. 2021. DCM. Disponível em: <<https://www.diariodocentrodomundo.com.br/essencial/crise-hidrica-duas-das-maiores-hidreletricas-de-sp-ja-operam-no-volume-morto/>>. Acesso em: 23 nov. 2021.

GASTELUM, J. R.; KRISHNAMURTHY, G.; OCHOA, N.; SIBBETT, S.; ARMSTRONG, M.; KALARIA, P.. The Use of System Dynamics Model to Enhance Integrated Resources Planning Implementation. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 32, n. 7, p. 2247-2260, 23 fev. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-018-1926-4>.

GERBELLI, L G. **Crise hídrica se agrava e vira mais um entrave para o crescimento da economia brasileira**. 2021. G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/crise-da-agua/noticia/2021/09/01/crise-hidrica-se-agrava-e-vira-mais-um-entrave-para-o-crescimento-da-economia-brasileira.ghtml>. Acesso em: 25 nov. 2021.

GHASHGHAIE, M.; MAROFI, S.; MAROFI, H.. Using System Dynamics Method to Determine the Effect of Water Demand Priorities on Downstream Flow. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 28, n. 14, p. 5055-5072, 18 set. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0791-z>.

GIULIO, G. M.; BEDRAN-MARTINS, A. M. B.; VASCONCELLOS, M. P.; RIBEIRO, W. C.; LEMOS, M. C.. Mainstreaming climate adaptation in the megacity of São Paulo, Brazil. **Cities**, [S.L.], v. 72, p. 237-244, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2017.09.001>.

GOHARIAN, E.; BURIAN, S. J.; LILLYWHITE, J.; HILE, R.. Vulnerability Assessment to Support Integrated Water Resources Management of Metropolitan Water Supply Systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [S.L.], v. 143, n. 3, p. 04016080, mar. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000738](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000738).

GOLFAM, P.; ASHOFTEH, P.; LOÁICIGA, H. A. Modeling adaptation policies to increase the synergies of the water-climate-agriculture nexus under climate change. **Environmental Development**, [S.L.], v. 37, p. 100612, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100612>.

GOUVEIA, I. C. M-C.; RODRIGUES, C.. Mudanças morfológicas e efeitos hidrodinâmicos do processo de urbanização na bacia hidrográfica do rio Tamanduateí – RMSP. **Geosp: Espaço e Tempo (Online)**, [S.L.], v. 21, n. 1, p. 257, 14 ago. 2017. Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2017.105342>.

GROS, C. **Complex and Adaptative Dynamic Systems: a primer**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2011. 282 p.

GUNDERSON, Lance H.; HOLLING, C. S. (ed.). **Panarchy: understanding transformations in human and natural systems**. Washington: Island Press, 2002. 507 p.

G1. São Paulo. 2021. **Todos os reservatórios que abastecem a Grande SP estão abaixo do nível de 2013, pré-crise hídrica; especialista prevê falta de água em 2022**. Disponível em: < <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2021/09/01/todos-os-reservatorios-que-abastecem-a-grande-sp-estao-em-deficit-em-relacao-a-2013-pre-crise-hidrica-especialista-preve-falta-de-agua-em-2022.ghtml>>. Acesso em: 16 jan 2022.

HASTINGS, A.; WYSHAM, D. B.. Regime shifts in ecological systems can occur with no warning. **Ecology Letters**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 464-472, abr. 2010. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01439.x>.

HEMMERS, J.; PICKL, S.; SCHWARZE, R.; THIEBES, B.; LORETH, T.; ZUCCARO, G.. Beyond ESPREsSO - Integrative risk assessment 2025 synergies and gaps in climate change adaptation and disaster risk reduction. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 51, p. 101817, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101817>.

HERING, J. G.; WAITE, T. D.; LUTHY, R. G.; DREWES, J. E.; SEDLAK, D.L.. A Changing Framework for Urban Water Systems. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 47, n. 19, p. 10721-10726, 8 mai. 2013. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es4007096>.

HIRATA, R. As águas subterrâneas na Macrometrópole de São Paulo e o enfrentamento da crise hídrica. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água. A crise hídrica na região metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018. Cap. 10. p. 148-154.

HIRATA, R.; FERRARI, L.C.; FERREIRA, L.M.R; P.; PEDE, M. La explotación de las aguas subterráneas em la cuenca hidrográfica del Alto Tietê (São Paulo, Brasil): crónica de una crisis anunciada. **Boletín Geológico Minero**, n. 3, v. 113, p. 273-282, 2002.

HOLLING, C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, 4, p1-23, 1973. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>>. Acessado em: 09 jul 2020.

HOLLING, C. S. The resilience of terrestrial ecosystems: local surprise and global change. Pages 292-317 in W. C. Clark and R. E. Munn, editors. **Sustainable development of the biosphere**: Cambridge University Press, Cambridge, UK, p. 292-317, 1986.

HOLLING, C. S. Engineering Resilience versus Ecological Resilience. **Engineering Within Ecological Constrains**, 1996. Disponível em: <<http://www.environmentalmanager.org/wp-content/uploads/2008/03/holling-eng-vs-eco-resilience.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2019.

HOLLING, C. .; GUNDERSON, L. H. Resilience and Adaptative Cycles. In: GUNDERSON, Lance H; HOLLING, Crawford Stanley (org.). **Panarchy: understanding transformations in human and natural systems**. Washington: Island Press, 2002. Cap. 2. p. 25-62.

HOU, X.; WU, S.; CHEN, D.; CHENG, M.; YU, X.; YAN, D.; DANG, Y.; PENG, M. Can urban public services and ecosystem services achieve positive synergies? **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 124, p. 107433, mai. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107433>.

HU, Y.; JIA, G.. Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data. **International Journal of Climatology**, [S.L.], v. 30, n. 9, p. 1382-1395, 28 jul. 2009. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1984>.

HUANG, W.; LING, M. System resilience assessment method of urban lifeline system for GIS. **Computers, Environment and Urban Systems**, [s.l.], v. 71, p.67-80, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.04.003>.

HWANG, H.; FORRESTER, A.; LANSEY, K. Decentralized Water Reuse: regional water supply system resilience benefits. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 70, p. 853-856, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.093>.

INTERNATIONAL INTEGRATED REPORTING COUNCIL (IIRC). 2016. **Creating value: The Cyclical Power of Integrated Thinking and Reporting**. Acesso em: 17 fev 2022.

IMANI, M.; HASAN, M. M.; BITTENCOURT, L. F.; MCCLYMONT, K.; KAPELAN, Z.. A novel machine learning application: water quality resilience prediction model. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 768, p. 144459, mai. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144459>

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER, T. F. et al. (Ed.)]. Cambridge, UK: Cambridge University Press; New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p.

IPCC. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. 2014. Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf> . Acesso em: 15 mar 2022.

ISTO É DINHEIRO. **China vai criar nova zona econômica perto de Pequim**. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/china-vai-criar-nova-zona-economica-perto-de-pequim/>>. Acesso em: 26 mar 2022.

JACOBI, P. R.; EMPINOTTI, V.; GRANDISOLI, E.. Alternativas para o futuro da água em São Paulo. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água: A crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018. p. 101-121.

JIA, B.; ZHOU, J.; ZHANG, Y.; TIAN, M.; HE, Z.; DING, X.. System dynamics model for the coevolution of coupled water supply–power generation–environment systems: upper yangtze river basin, china. **Journal of Hydrology**, [S.L.], v. 593, p. 125892, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125892>.

JIN, J. G.; TANG, L. C.; SUN, L.; LEE, D. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, [S.L.], v. 63, p. 17-30, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2014.01.002>.

JOANNOU, D.; KALAWSKY, R.; SARAVI, S.; CASADO, M. R.; FU, G.; MENG, F. A Model-Based Engineering Methodology and Architecture for Resilience in Systems-of-Systems: A Case of Water Supply Resilience to Flooding. **Water**, [s.l.], v. 11, n. 3, p.496-2, 8 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11030496>.

KARIMLOU, K.; HASSANI, N.; MEHRABADI, A. R.; NAZARI, M. R.. Developing a Model for Decision-Makers in Dynamic Modeling of Urban Water System Management. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 481-499, 3 dez. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-019-02428-z>.

KEYHANPOUR, M. J.; JAHROMI, S. H. M.; EBRAHIMI, H.. System dynamics model of sustainable water resources management using the Nexus Water-Food-Energy approach. **Ain Shams Engineering Journal**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 1267-1281, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.029>.

KLEMEŠ, V.. Operational testing of hydrological simulation models. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 13-24, mar. 1986. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626668609491024>.

KLISE, K. A.; BYNUM, M.; MORIARTY, D.; MURRAY, R. A software framework for assessing the resilience of drinking water systems to disasters with an example earthquake case study. **Environmental Modelling & Software**, [s.l.], v. 95, p.420-431, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.022>.

KOESTLER, A.. **The Ghost in the Machine**. London: Arkana Books, 1989. 384 p.

KOMBIADOU, K.; COSTAS, S.; CARRASCO, A. R.; PLOMARITIS, T. A.; FERREIRA, Ó.; MATIAS, A. Bridging the gap between resilience and geomorphology of complex coastal systems. **Earth-Science Reviews**, [S.L.], v. 198, p. 102934, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102934>.

KOSOVAC, A.; LOGAN, T.. Resilience: lessons to be learned from safety and acceptable risk. **Journal of Safety Science And Resilience**, [S.L.], p. 11-22, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnlssr.2021.10.002>.

KUANG, Da; LIAO, Kuei-Hsien. Learning from Floods: linking flood experience and flood resilience. **Journal of Environmental Management**, [S.L.], v. 271, p. 111025, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111025>.

KUHN, T. S.. **A estrutura das revoluções científicas**. 5. ed. São Paulo: Perspectiva, 1997. 257 p.

LABAKA, L.; HERNANTES, J.; SARRIEGI, J. M. Resilience framework for critical infrastructures: An empirical study in a nuclear plant. **Reliability Engineering & System**

Safety, [s.l.], v. 141, p.92-105, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2015.03.009>.

LASPIDOU, C. S.; MELLIOS, N. K.; SPYROPOULOU, A. E.; KOFINAS, D. T.; PAPADOPOULOU, M. P.. Systems thinking on the resource nexus: modeling and visualisation tools to identify critical interlinkages for resilient and sustainable societies and institutions. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 717, p. 137264, mai. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137264>.

LEE, E. J.; CRIDDLE, C. S.; GEZA, M.; CATH, T. Y.; FREYBERG, D. L. Decision support toolkit for integrated analysis and design of reclaimed water infrastructure. **Water Research**, [s.l.], v. 134, p.234-252, mai. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.037>.

LEVIN, S.; XEPAPADEAS, T.; CRÉPIN, A.; NORBERG, J.; ZEEUW, A.; FOLKE, C.; HUGHES, T.; ARROW, K.; BARRETT, S.; DAILY, G. Social-ecological systems as complex adaptive systems: modeling and policy implications. **Environment and Development Economics**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 111-132, 27 nov. 2012. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s1355770x12000460>.

LI, R.; GAO, Y.. On the component resilience importance measures for infrastructure systems. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, [S.L.], p. 100481, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2021.100481>.

LI, X.; LI, Y.P.; HUANG, G.H.; LV, J.; MA, Y.; LI, Y.F.. A multi-scenario input-output economy-energy-environment nexus management model for Pearl River Delta urban agglomeration. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 317, p. 128402, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128402>.

LI, Y.; KAPPAS, M.; LI, Y.. Exploring the coastal urban resilience and transformation of coupled human-environment systems. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 195, p. 1505-1511, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.227>.

LI, Y.; KHALKHALI, M.; MO, W.; LU, Z.. Modeling spatial diffusion of decentralized water technologies and impacts on the urban water systems. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 315, p. 128169, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128169>.

LIMA, G. N. **O desafio da manutenção do abastecimento hídrico na Região Metropolitana de São Paulo**: busca por uma gestão sustentável. 2015. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia Física, Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-22122015-110409/en.php>. Acesso em: 17 mar. 2019.

LIMA, G. N.; LOMBARDO, M. A.; MAGAÑA, V. Urban water supply and the changes in the precipitation patterns in the metropolitan area of São Paulo – Brazil. **Applied Geography**, [S.L.], v. 94, p. 223-229, mai. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.03.010>.

LIU, D. Evaluating the dynamic resilience process of a regional water resource system through the nexus approach and resilience routing analysis. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 578, nov. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124028>.

LIU, T.; TUNG, C. P.; KE, K. Y.; CHUANG, L. H.; LIN, C. Y.. Application and development of a decision-support system for assessing water shortage and allocation with climate change.

Paddy and Water Environment, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 301-311, 8 out. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10333-009-0177-7>.

LIU, W.i; SONG, Z.; OUYANG, M.. Lifecycle operational resilience assessment of urban water distribution networks. **Reliability Engineering & System Safety**, [S.L.], v. 198, p. 106859, jun. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2020.106859>.

LOURENÇO, D. B. **Qual o valor da natureza?** São Paulo: Elefante, 2019. 456 p.

LUDWIG, D.; WALKER, B.; HOLLING, C.S.. Sustainability, Stability, and Resilience. **JSTOR**, [S.L.], v.1, n.1, p.2-21, jun. 1997. Disponível em: < <https://www.jstor.org/stable/26271645?seq=2>>. Acesso em: 17 jun 2021.

MACEDO, L. R.. **Cenários de urbanização e seus impactos nas variáveis atmosféricas que contribuem para formação de ilha urbana de calor na Região Metropolitana de São Paulo**. 2020. 121 f. Tese (Doutorado) - Curso de XX, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-29032021-114711/publico/Macedo_2020_vf_Corrigida.pdf. Acesso em: 24 ago. 2021.

MAHMOUDI, H.; SAYAHNIA, R.; ESMAEILZADEH, H.; AZADI, H.. Integrating Resilience Assessment in Environmental Impact Assessment. **Integrated Environmental Assessment and Management**, [S.L.], v. 14, n. 5, p. 567-570, 17 ago. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ieam.4075>.

MAIOLO, M.; PANTUSA, D.; CARINI, M.; CAPANO, G.; CHIARAVALLLOTI, F.; PROCOPIO, A. A New Vulnerability Measure for Water Distribution Network. **Water**, [s.l.], v. 10, n. 8, 30 jul. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w10081005>.

MANOEL FILHO, J. Ocorrências das águas subterrâneas. In: FEITOSA, Fernando A. C.; MANOEL FILHO, João (org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2. ed. Fortaleza: Cprm/Refo, Labhid-Ufpe, 2000. Cap. 2. p. 13-32.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ALVES, L. M.; BARRETO, N. J. C.; REBOITA, M. S.; RAMOS, A. M. Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: causes and impacts. **Frontiers in Climate**, [S.L.], v. 2, p. 1-13 7 ago. 2020. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fclim.2020.00003>.

MATINZADEH, M. M.; ABEDI KROUPAI, J.; SADEGHI-LARI, A.; NOZARI, H.; SHAYANNEJAD, M.. System dynamic modeling to assess the effect of subsurface drain spacing and depth on minimizing the environmental impacts. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [S.L.], v. 14, n. 3, p. 563-576, 9 fev. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-017-1262-x>.

MCPHEARSON, T.; HAASE, D.; KABISCH, N.; GREN, A. Advancing understanding of the complex nature of urban systems. **Ecological Indicators**, [S.L.], v. 70, p. 566-573, nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.054>.

MEADOWS, D. H. **Thinking in Systems: a primer**. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing, 2009. 218p.

MEDEIROS, E. S.; CALDAS, I. L.; BAPTISTA, M. S.; FEUDEL, U.. Trapping Phenomenon Attenuates the Consequences of Tipping Points for Limit Cycles. **Scientific Reports**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 10-11, 9 fev. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/srep42351>.

MEEROW, S.; NEWELL, J. P. Urban resilience for whom, what, when, where, and why? **Urban Geography**, [s.l.], v. 40, n. 3, p.309-329, 12 jul. 2016. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02723638.2016.1206395>.

MELLO, Carlos Rogério de; SILVA, Antônio Marciano da. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MENG, F.; FU, G.; FARMANI, R.; SWEETAPPLE, C.; BUTLER, D.. Topological attributes of network resilience: a study in water distribution systems. **Water Research**, [S.L.], v. 143, p. 376-386, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.06.048>.

MILLER, J. H.; PAGE, S. E. **Complex Adaptive Systems: An introduction to computational models of social life**. Princeton: Pup, 2007. 254 p.

MILLINGTON, N.. Producing water scarcity in São Paulo, Brazil: the 2014-2015 water crisis and the binding politics of infrastructure. **Political Geography**, [S.L.], v. 65, p. 26-34, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polgeo.2018.04.007>.

MILMAN, A.; SHORT, A. Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector. **Global Environmental Change**, [s.l.], v. 18, n. 4, p.758-767, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.08.002>.

MIRCHI, A.; MADANI, K.; WATKINS, D.; AHMAD, S.. Synthesis of System Dynamics Tools for Holistic Conceptualization of Water Resources Problems. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 26, n. 9, p. 2421-2442, 23 mar. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0024-2>.

MONTANARI, A.; YOUNG, G.; SAVENIJE, H.H.G.; HUGHES, D.; WAGENER, T.; REN, L.L.; KOUTSOYIANNIS, D.; CUDENNEC, C.; TOTH, E.; GRIMALDI, S.. “Panta Rhei—Everything Flows”: change in hydrology and societ: the iahs scientific decade 2013: 2022. **Hydrological Sciences Journal**, [S.L.], v. 58, n. 6, p. 1256-1275, 5 jul. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. Porto Alegre: Sulina, 2015. 120 p.

MOTTAHEDI, A.; SERESHKI, F.; ATAIEI, M.; QARAHASANLOU, A. N.; BARABADI, A.. Resilience estimation of critical infrastructure systems: application of expert judgment. **Reliability Engineering & System Safety**, [S.L.], v. 215, p. 107849, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2021.107849>.

MULVIHILL, P. R.; ALI, S. H. Disaster incubation, cumulative impacts and the urban/ex-urban/rural dynamic. **Environmental Impact Assessment Review**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 343-358, maio 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2007.01.003>.

NIKEL, D. **Kiruna: A Mining Town On The Move In Northern Sweden**. Disponível em: < <https://www.forbes.com/sites/davidnikel/2021/03/23/kiruna-a-mining-town-on-the-move-in-northern-sweden/?sh=22fae0824080>>. Acesso em : 26 mar. 2022.

NIKOO, M. R.; KARIMI, A.; KERACHIAN, R.. Optimal Long-term Operation of Reservoir-river Systems under Hydrologic Uncertainties: application of interval programming. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 27, n. 11, p. 3865-3883, 29 jun. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-013-0384-2>.

NOVAK, J. D., CAÑAS, A. J. The theory underlying concept maps and how to construct and use them. Pensacola: Florida Institute for Human and Machine Cognition. 36p. 2008.

Recuperado de: <http://cmap.ihmc.us/Publications/ResearchPapers/TheoryUnderlyingConceptMaps.pdf>.

OLIVA, Rogelio. Model calibration as a testing strategy for system dynamics models. **European Journal of Operational Research**, [S.L.], v. 151, n. 3, p. 552-568, dez. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217\(02\)00622-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0377-2217(02)00622-7)

OLIVEIRA, G.C.; ARRUDA, D.M.; FERNANDES FILHO, E.I.; VELOSO, G.V.; FRANCELINO, M.R.; SCHAEFER, C.E.G.R. Soil predictors are crucial for modelling vegetation distribution and its responses to climate change. **Science of the Total Environment**, [S.L.], v.780, mar 2021. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146680>

OLSSON, L.; JERNECK, A.; THOREN, H.; PERSSON, J.; O'BYRNE, D. Why resilience is unappealing to social science: theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience. **Science Advances**, [S.L.], v. 1, n. 4, maio 2015. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1400217>.

OSTROM, E. A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. **Science**, [S.L.], v. 325, n. 5939, p. 419-422, 23 jul. 2009. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.1172133>.

PARK, J.; RAO, P. S. C. Regime shifts under forcing of non-stationary attractors: conceptual model and case studies in hydrologic systems. **Journal of Contaminant Hydrology**, [S.L.], v. 169, p. 112-122, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2014.08.005>.

PLANO DE DESENVOLVIMENTO E PROTEÇÃO AMBIENTAL DA SUB-BACIA ALTO JUQUIÁ: elaboração e revisão dos planos de desenvolvimento e proteção ambiental das áreas de proteção e recuperação dos mananciais da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, p.166, 2019.

PLANO DE DESENVOLVIMENTO E PROTEÇÃO AMBIENTAL DA SUB-BACIA DO CABUÇU E DA SUB-BACIA DO TANQUE GRANDE: elaboração e revisão dos planos de desenvolvimento e proteção ambiental das áreas de proteção e recuperação dos mananciais da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, p.52, [ca. 2019].

PENG, Y.; CHEN, L.; TIAN, J.; SUN, B.; JIANG, C.; LU, Y.; SHANG, J.. Ecosystem services help alleviate the intensity of dryness/wetness. **Global Ecology and Conservation**, [S.L.], v. 27, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01581>.

PENG, S.; PIAO, S.; CIAIS, P.; FRIEDLINGSTEIN, P.; OTTLE, C.; BRÉON, F.; NAN, H.; ZHOU, L.; MYNENI, R. B.. Surface Urban Heat Island Across 419 Global Big Cities. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 46, n. 2, p. 696-703, 21 dez. 2011. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es2030438>.

PRASOOD, S.P.; MUKESH, M.V.; RANI, V.R.; SAJINKUMAR, K.S.; THRIVIKRAMJI, K.P.. Urbanization and its effects on water resources: scenario of a tropical river basin in south India. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 23, p. 100556, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100556>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938521000926>. Acesso em: 01 set. 2021.

RAJARETHINAM, K.; VARUVEL, D.; BAGODI, V.. System dynamic modelling for assessing the vulnerability of water resources: a case of chennai city, tamil nadu, india. **Arabian Journal of Geosciences**, [S.L.], v. 14, n. 19, p. 111-1112, 14 set. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-021-08258-x>.

RAND, W. Sistemas Complexos: conceitos, literatura, possibilidades e limitações. In: FURTADO, Bernardo Alves; SAKOWSKI, Patrícia A. M.; TÓVOLLI, Marina H. (ed.). **Modelagem de Sistemas Complexos para Políticas Públicas**. Brasília: Ipea, 2015. Cap. 2. p. 43-63.

RANJBARI, M.; ESFANDABADI, Z. S.; ZANETTI, M. C.; SCAGNELLI, S. D.; SIEBERS, P.; AGHBASHLO, M.; PENG, W.; QUATRARO, F.; TABATABAEI, M. Three pillars of sustainability in the wake of COVID-19: a systematic review and future research agenda for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, [S.L.], v. 297, p. 126660, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126660>.

RATHI, A.. **A Swedish mining company is moving an entire town of 18,000 people - including its buildings - to a new location**. Disponível em: <<https://qz.com/991623/a-swedish-mining-company-is-moving-the-entire-town-of-kiruna-with-18000-people-and-several-buildings-to-a-new-location/>>. Acesso em: 26 mar. 2022.

REBELLO, V. P. A.; GETIRANA, A.; ROTUNNO FILHO, O. C.; LAKSHMI, V.. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 18, p. 100294, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100294>.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 25, n. 2, p. 185-204, jun. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/rbmet/a/yhrG5QPXhBCKZXcGKgyzWvf/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 13 jun. 2020.

REBOUÇAS, A. C.; RICCOMINI, C.; ELLERT, N.; DUARTE, U.; MELLITO, K.M.; SENF, L. A.; SOUZA, J. C. S.. **Diagnóstico hidrogeológico da RMSP: uso e proteção**. Recife: Abas, 1994. 93-102 p. Disponível em: https://repositorio.usp.br/single.php?id=000875211&locale=en_US. Acessado em: 17 ago. 2021.

RESILIENCE ALLIANCE. **Assessing Resilience in Social-Ecological Systems**: workbook for practitioners. 2. versão. Atlanta, 2010. 54 p. Disponível em: <https://www.resalliance.org/files/ResilienceAssessmentV2_2.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2020.

RETALLACK, M.. The intersection of economic demand for ecosystem services and public policy: a watershed case study exploring implications for social-ecological resilience. **Ecosystem Services**, [S.L.], v. 50, p. 101322, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101322>.

RICHTER, R. M.; JACOBI, P. R.. Conflitos na macrometrópole paulista pela perspectiva da crise hídrica | Conflicts in the São Paulo macrometropolis from the perspective of the water crisis. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, [S.L.], v. 20, n. 3, p.556-569, 27 jul. 2018. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais (RBEUR). <http://dx.doi.org/10.22296/2317-1529.2018v20n3p556>.

RIO, G. A. P.; DRUMMOND, H. R.; RIBEIRO, C. R.. Water: the urgency of a territorial agenda. **Ambiente & Sociedade**, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 121-136, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc0075r1v1942016>.

RIZZO, A.; SORDI, J.. Resources and urbanization in the global periphery: perspectives from urban and landscape studies. **Cities**, [S.L.], v. 100, p. 102647, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2020.102647>.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN III, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, C. A.; HUGHES, T.; LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R.W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature** v. 461, p. 472–475 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a>.

RODINA, L. Planning for water resilience: Competing agendas among Cape Town's planners and water managers. **Environmental Science & Policy**, [S.L.], v. 99, p.10-16, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2019.05.016>.

RODRIGUES, C. Avaliação do impacto humano da urbanização em sistemas hidrogeomorfológicos. Desenvolvimento e aplicação de metodologia na Grande São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v.20, p. 111-125, 2010. Disponível em: < <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47245/50981>>. Acessado em: 14 jul. 2021.

RODRIGUES, C.; GOUVEIA, I. C. M.; LUZ, R. A.; VENEZIANI, Y.; SIMAS, I. T. H.; SILVA, J. P.. Antropoceno e mudanças geomorfológicas: sistemas fluviais no processo centenário de urbanização de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, [S.L.], v. 40, n. 1, p. 105-123, 26 jun. 2019. Instituto Geológico. <http://dx.doi.org/10.33958/revig.v40i1.631>.

RODRIGUES, C. G.; VANNUCCHI, F. S.; LUZZI, R. Sobre modelagem matemática e formalismos estatísticos de sistemas complexos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, [s.l.], v. 42, 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2019-0090>.

RODRIGUES, E. A.; VICTOR, R. A. B. M.; PIRES, B. C. C.; LUCA, E. F.(ed.). **Serviços ecossistêmicos e bem-estar humano na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2020. 608 p.

RODRIGUES, E. A. (Coord.) **Resumo Executivo: Serviços Ecossistêmicos e Bem-Estar Humano na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da Cidade de São Paulo**. 1 ed. São Paulo: Instituto Florestal, 2014.

RODRIGUES, E. A.; VICTOR, R. A. B. M. Um cinturão de vida ao redor de São Paulo. Autora contribuinte: A.M.F.Barradas. In: São Paulo (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Instituto Floresta. **Serviços ecossistêmicos e bem-estar humano na reserva da biosfera do cinturão verde da cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2020. p.6-34.

ROMEIRO, A. R.; MAIA, A. G.; PUGA, B.; ANDRADE, D. C.; SARCINELLI, O.; TÔSTO, S.G. Ferramentas de apoio à tomada de decisão. In: São Paulo (Estado). Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. Instituto Floresta. **Serviços ecossistêmicos e bem-estar humano na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da cidade de São Paulo**. São Paulo: Instituto Florestal, 2020. Parte 5. Item 5.1, p. 545-569.

ROMESÍN, H. M.; GARCÍA, F. J. V. **De máquinas y seres vivos: Autopoiesis: la organización de lo vivo**. 5. ed. Santiago de Chile: Universitaria, 1998. 132 p.

ROTHMAN, D. S.. A Survey of Environmental Scenarios. In: ALCAMO, J. (ed.). **Developments in Integrated Environmental Assessment**. [S.L.]: Elsevier, 2008. Cap. 3. p. 37-65.

RYU, J.; PARK, H. Resilience assessment for interdependent water supply systems based on a system dynamics model. **Environmental Impact** Iv, [s.l.], 20 jun. 2018. WIT Press. <http://dx.doi.org/10.2495/eid180221>.

SANTANA, R. O.; DELGADO, R. C.; SCHIAVETTI, A.. The past, present and future of vegetation in the Central Atlantic Forest Corridor, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [S.L.], v. 20, p. 100357, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100357>.

SANTOS, B. S. **Um discurso sobre a ciências**. São Paulo: Cortez, 2008. 90 p.

SANTOS, G. N., KIRCHHEIM, R. E., LAZZAROTTO, E. M., FRANZINI, A. S., MOURÃO, M. A.A. (2021). Possíveis influências da Zona De Convergência do Atlântico Sul no comportamento freático e isotópico das águas subterrâneas do SAB e SAG (RIMAS) na região sudeste do brasil. **Águas Subterrâneas**. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29467>

SANTOS, M. **A Natureza do Espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006. 255 p.

São Paulo (Estado). Lei Complementar nº 14, de 8 de junho de 1973. Estabelece as regiões metropolitanas de São Paulo, Belo Horizonte, Porte Alegre, Recife, Salvador, Curitiba, Belém e Fortaleza. 1973. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/leicom/1970-1979/leicomplementar-14-8-junho-1973-367020-norma-pl.html>. Acesso em: 05 mar. 2020.

São Paulo (Estado). Lei Complementar nº1.139, de 16 de junho de 2011. Reorganiza a Região Metropolitana da Grande São Paulo, cria o respectivo Conselho de Desenvolvimento e dá providências correlatas. 2011. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei.complementar/2011/lei.complementar-1139-16.06.2011.html>. Acesso em: 05 mar. 2020.

SCHEFFER, M.; CARPENTER, S.; FOLEY, J. A.; FOLKE, C.; WALKER, B. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature**, v. 413, p. 591-596, 11 out. 2001. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/35098000>. Acesso em: 16 out. 2021.

SCHLÜTER, M.; KHASANKHANOVA, G.; TALSKIKH, V.; TARYANNIKOVA, R.; AGALTSEVA, N.; JOLDASOVA, I.; IBRAGIMOV, R.; ABDULLAEV, U.. Enhancing resilience to water flow uncertainty by integrating environmental flows into water management in the Amudarya River, Central Asia. **Global and Planetary Change**, [S.L.], v. 110, p. 114-129, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.05.007>.

SCHMIDT, K.; SACHSE, R.; WALZ, A.. Current role of social benefits in ecosystem service assessments. **Landscape And Urban Planning**, [S.L.], v. 149, p. 49-64, maio 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.005>.

SCHRÖTER, M.; STUMPF, K. H.; LOOS, J.; VAN OUDENHOVEN, A. P.E.; BÖHNKE-HENRICH, A.; ABSON, D. J.. Refocusing ecosystem services towards sustainability. **Ecosystem Services**, [S.L.], v. 25, p. 35-43, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.03.019>.

SEADE. **Perfil dos Municípios: Região metropolitana de São Paulo – Território e População**. 2021. Disponível em: <<https://perfil.seade.gov.br/#>>. Acessado em:13 mai 2021.

SEADE. **Perfil dos Municípios: Região metropolitana de São Paulo – Economia**. 2018. Disponível em: <<https://perfil.seade.gov.br/#>> Acessado em:13 mai 2021.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. (SIMA) [s.d]a. **Coordenadoria de Educação Ambiental**. São Paulo. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/a-secretaria/coordenadorias/>. Acessado em: 14 out 2021.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE. (SIMA) [s.d.]b **O Cinturão Verde**. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/o-instituto/rbcv/o-cinturao-verde/>>. Acessado em: 15 mai. 2020.

SETH, A.; FERNANDES, K.; CAMARGO, S. J. Two summers of São Paulo drought: origins in the western tropical pacific. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 42, n. 10, p. 816-823, 19 dez. 2015. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1002/2015gl066314>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2015GL066314>. Acesso em: 02 mar. 2019.

SILVA, I. A.; DUPAS, F. A.; COSTA, C. W.; MEDEIROS, G. O. R.; SOUZA, A. R. Spatiotemporal changes in land cover land use in protected areas of Serra da Mantiqueira, Southeastern Brazil. **Environmental Challenges**, [S.L.], v. 4, p. 100195, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envc.2021.100195>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667010021001748>. Acesso em: 06 set. 2021.

SILVA, L. S. **A cidade e a floresta: o impacto da expansão urbana sobre áreas vegetadas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)**. 2013. 269 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/90/90131/tde-01112013-162410/en.php>. Acesso em: 19 abr. 2019.

SILVA, P. S.; BASTOS, A.; LIBONATI, R.; RODRIGUES, J. A.; DACAMARA, C. C. Impacts of the 1.5 °C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, [S.L.], v. 446, p. 193-203, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.047>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112719301914>. Acesso em: 17 abr. 2021.

SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO, F.A.; CID, D. A. C.; AQUINO, S. H. S.; XAVIER, L. C. P.. Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de fortaleza. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 239-250, abr. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019181776>.

SIMONOVIC, S. P. **Managing Water Resources: methods and tools for a systems approach**. Paris: UNESCO, 2009. 640 p.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto**. Brasília. 2019a.. Disponível em: <http://snis.gov.br/diagnosticos>. Acessado em: 05 fev 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS).. **Municípios**. Brasília. 2019b. Disponível em: <<http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/#>>. Acessado em: 04 jul 2021.

SORIANO, É.; LONDE, L. R.; GREGORIO, L. T.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L.. Water crisis in São Paulo evaluated under the disaster's point of view. **Ambiente & Sociedade**,

[S.L.], v. 19, n. 1, p. 21-42, mar. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc150120r1v1912016>.

STANLEY, C. Living to spend another day: exploring resilience as a new fourth goal of ecological economics. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 178, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106805>.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Cambridge: Irwin McGraw-Hill, 2000. 982 p.

SWEETAPPLE, C.; ASTARAIE-IMANI, M.; BUTLER, D.. Design and operation of urban wastewater systems considering reliability, risk and resilience. **Water Research**, [s.l.], v. 147, p.1-12, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.032>.

TAMAKI, H. O.. **A medição setorizada como instrumento de gestão da demanda de água em sistemas prediais - Estudo de caso**: programa de uso racional da água da universidade de são paulo. 2003. 151 f. Tese (Doutorado), Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12042005-113615/publico/HUMBERTOTAMAKI.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2021.

TAMBOSI, L. R.; VIDAL, M. M.; FERRAZ, S. F. B.; METZGER, J. P. Funções eco-hidrológicas das florestas nativas e o Código Florestal. **Estudos Avançados**, [S.L.], v. 29, n. 84, p. 151-162, ago. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142015000200010>.

TARDELLI FILHO, J.. Aspectos relevantes do controle de perdas em sistemas públicos de abastecimento de água. **Revista DAE**, [S.L.], v. 64, n. 201, p. 6-20, 2015. Revista DAE. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2015.012>.

TORRES, P. H. C.; RAMOS, R. F.; JACOBI, P. R.; FREY, K.. ODS 6 e a Macrometrópole Paulista: uma análise das ações de governança ambiental da água no pós crise hídrica (2014-2015). In: 1º ANPASS SUDESTE, 1., 2018, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Each/Usp, 2018. p. 1-17.

TUNDISI, J. G. A crise hídrica e a qualidade da água na Região Metropolitana de São Paulo. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água. A crise hídrica na região metropolitana de São Paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018. Cap. 3. p. 39-45.

UN-Water: **Water Scarcity**. SI: United Nations, [s.d]. Disponível em: <https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/>. Acesso em: 03 out 2019.

UEZU, A.; SARCINELLI, O., CHIODI, R., JENKINS, N., MARTINS, C. S.. (São Paulo). Ipê - Instituto de Pesquisas Ecológicas (org.). **Atlas dos Serviços Ambientais do Sistema Cantareira**. 2017. Disponível em: [file:///C:/Users/sthef/Downloads/Atlas_Sistema_Cantareira%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/sthef/Downloads/Atlas_Sistema_Cantareira%20(3).pdf). Acesso em: 08 out. 2021.

URETA, J. Carl; VASSALOS, Michael; MOTALLEBI, Marzieh; BALDWIN, Robert; URETA, Joan. Using stakeholders' preference for ecosystems and ecosystem services as an economic basis underlying strategic conservation planning. **Heliyon**, [S.L.], v. 6, n. 12, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05827>.

UNESCO WWAP. **2017 UN World Water Development Report, Wastewater: The Untapped Resource**. 2017. Disponível em: < <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>>. Acesso em: 02 fev 2022.

UNESCO WWAP. **World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind**. 2019. Disponível em: < <https://en.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2019>>. Acesso em: 05 fev 2022.

US EPA. **2017 Potable Reuse Compendium**. 2017. Disponível em:< <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/2017-potable-reuse-compendium>>. Acesso em: 14 fev 2022.

UTAMI, I. D.; SANTOSA, I.; LEILA, M. R. V. Priority resilience strategy for micro, small, and medium enterprises for dealing with natural disasters. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S.L.], v. 55, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102074>.

VAIO, A.; TRUJILLO, L.; D'AMORE, G.; PALLADINO, R.. Water governance models for meeting sustainable development Goals: a structured literature review. **Utilities Policy**, [S.L.], v. 72, p. 101255, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jup.2021.101255>.

VARDON, Michael; KEITH, Heather; LINDENMAYER, David. Accounting and valuing the ecosystem services related to water supply in the Central Highlands of Victoria, Australia. **Ecosystem Services**, [S.L.], v. 39, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101004>.

VARGAS, Marcelo. **Mudanças climáticas e hidropolítica na Macrometrópole Paulista: uma análise da "crise hídrica" (2014-2015) a partir do Sistema Cantareira**. Curitiba: Appris, 2020. 259 p.

VENSIM. **Vensim Help: Sensitivity Testing**. [s. d]. Disponível em: <<https://www.vensim.com/documentation/usr15.html>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R.. **Meteorologia básica e aplicações**. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2021, 460 p.

VICTOR , R. A. B. M.; RODRIGUES , E. A.; PIRES, B. C.C.; LUCA, E. F.; GRAVEL, N.; CARVALHO, Y. M. C. A escassez hídrica e seus reflexos sobre os serviços ecossistêmicos e o bem-estar humano na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde da Cidade de São Paulo; o caso da provisão de alimentos, produção madeireira, lazer e turismo aquático. In: BUCKERIDGE, Marcos; RIBEIRO, Wagner Costa (org.). **Livro Branco da Água: a crise hídrica na região metropolitana de são paulo em 2013-2015: origens, impactos e soluções**. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados, 2018. Cap. 5. p. 54-73.

VILAR, D. D.; FONSECA, F. P.. A recusa do projeto do engenheiro Rebouças: tietê, um rio abandonado à própria sorte. **Khronos**, [S.L.], n. 8, p. 64-81, 30 dez. 2019. Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA). <http://dx.doi.org/10.11606/khronos.v0i8.165026>.

VOLKOV, A.; MORKUNAS, M.; BALEZENTIS, T.; STREIMIKIENE, D.. Are agricultural sustainability and resilience complementary notions? Evidence from the North European agriculture. **Land Use Policy**, [S.L.], p. 105791, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105791>.

VON BERTALANFFY, L.. **Teoria Geral dos Sistemas**: Fundamentos, desenvolvimento e aplicações. 5 ed. Petrópolis: Vozes, 2010.

WALKER, B. H.; CARPENTER, S. R.; ROCKSTROM, J.; CRÉPIN, A.; PETERSON, G. D. Drivers, “Slow” Variables, “Fast” Variables, Shocks, and Resilience. **Ecology and Society**, [S.L.], v. 17, n. 3, 2012. <http://dx.doi.org/10.5751/es-05063-170330>. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol17/iss3/art30/>. Acesso em: 05 jul. 2021.

WALKER, B.; HOLLING, C. S.; CARPENTER, S. R.; KINZIG, A. Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. **Ecology and Society**, [S.L.], v. 9, n. 2, 2004. Resilience Alliance, Inc. <http://dx.doi.org/10.5751/es-00650-090205>. Disponível em: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/>. Acesso em: 17 jun. 2021.

WANG, K.; LIU, J.; XIA, J.; WANG, Z.; MENG, Y.; CHEN, H.; MAO, G.; YE, B. Understanding the impacts of climate change and socio-economic development through food-energy-water nexus: a case study of mekong river delta. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 167, p. 105390, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105390>.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J.. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing Of Environment**, [S.L.], v. 89, n. 4, p. 467-483, fev. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>.

YUXI, Z.; JINGKE, H.; CHANGLIN, X.; ZHANGMIAO, L. Unfolding the synergy and interaction of water-land-food nexus for sustainable resource management: a supernetwork analysis. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 784, p. 147085, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147085>.

ZAMBRANO, L.; PACHECO-MUÑOZ, R.; FERNÁNDEZ, T. A spatial model for evaluating the vulnerability of water management in Mexico City, Sao Paulo and Buenos Aires considering climate change. **Anthropocene**, [S.L.], v. 17, p.1-12, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2016.12.001>.

ZAMORA-MALDONADO, H. C.; AVILA-FOUCAT, V. S.; SÁNCHEZ-SOTOMAYOR, V. G.; LEE, R. Social-ecological Resilience Modeling: water stress effects in the bighorn sheep management system in baja california sur, mexico. **Ecological Complexity**, [S.L.], v. 45, p. 1-2, jan. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecocom.2020.100884>.

ZHANG, Y.; FU, Z.; XIE, Y.; LI, Z.; LIU, Y.; ZHANG, B.; GUO, H. Dynamic metabolism network simulation for energy-water nexus analysis: a case study of liaoning province, china. **Science of The Total Environment**, [S.L.], v. 779, p. 146440, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146440>

ZHAO, G.; GAO, H.; KAO, S.; VOISIN, N.; NAZ, B. S. A modeling framework for evaluating the drought resilience of a surface water supply system under non-stationarity. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 563, p.22-32, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.037>.

ZHAO, S.; LIU, X.; ZHUO, Y. Hybrid Hidden Markov Models for resilience metrics in a dynamic infrastructure system. **Reliability Engineering & System Safety**, [S.L.], v. 164, p.84-97, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2017.02.009>.

APÊNDICE A – INFORMAÇÕES PERTINENTES AO MODELO DINÂMICO DO SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Tabela 3 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios

Sistema de abastecimento da RMSP (continua)				
Variáveis	Classificação	Equações/valores	Unidade	Informações importantes
Águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios	Variável de estado	Recarga dos reservatórios-Outras vias de saída de água dos sistemas-Vazão de retirada antropica Valor inicial: 1.82893	km ² *km	O valor inicial de armazenamento corresponde à média do somatório do volume útil entre todos os reservatórios pertencentes ao S.I., entre os anos de 2000 e 2020, obtidos pelo Portal dos Mananciais (mananciais.sabesp.com.br).
Área permeável	Variável lenta	$((-9.4411*(\text{Time}-\text{INITIAL TIME})+5903.7)*a)$	km ²	Este cálculo foi efetuado a partir de informações obtidas diretamente da plataforma do <i>Google Earth Engine</i> (GEE), com a utilização do toolkit disponibilizado pelo <i>MapBiomas</i> (mapbiomas.org) e com o shapefile da BH-AT. Para isso, foram escolhidos e interpolados os dados para cinco anos distintos (2000, 2005, 2010, 2015 e 2020)
Demanda agrícola	Componente auxiliar	0.22687	km ² *km/year	FABHAT (2018a)
Demanda industrial	Variável lenta	$0.055*EXP(-0.022*(\text{Time}-\text{INITIAL TIME}+20)*b)$	km ² *km/year	As demandas industrial e urbana foram calculadas a partir do ajuste de curvas entre os dados obtidos junto a Sabesp, de maneira direta, e os dados disponíveis para o ano de 2020 no website do Portal dos Mananciais.
Demanda urbana	Variável lenta	$(0.1745*(LN((\text{Time}-\text{INITIAL TIME}+20)*b)))+1.0058$	km ² *km/year	
Escoamento superficial	Variável rápida	Área permeável*Precipitação média total*Taxa de escoamento	km ² *km/year	-
Espelho da água	Componente auxiliar	220.44	km ²	EMPLASA (2014)
Evapotranspiração	Variável rápida	$(\text{Área permeável}+\text{Espelho da água})*(\text{Taxa de evapotranspiração}*\text{Precipitação média total})$	km ² *km/year	-

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

Tabela 3 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios.

Sistema de abastecimento da RMSP (continuação)				
Variáveis	Classificação	Equações/valores	Unidade	Informações importantes
Influencia do Sistema Cantareira sobre a vazao de retirada total	Variável de controle	IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.6*0.98193) , MIN(2.58595, Vazao de agua distribuida pela Sabesp) , IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.4*0.98193), MIN(2.52288 , Vazao de agua distribuida pela Sabesp) , IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.3*0.98193), MIN(2.42827 , Vazao de agua distribuida pela Sabesp) , IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.2*0.98193), MIN(2.27059 , Vazao de agua distribuida pela Sabesp) , MIN(2.09714, Vazao de agua distribuida pela Sabesp))))))	km2*km/year	As condições de operacionais do Sistema Cantareira foram retiradas dos Estudos Hidrológicos (FABHAT, 2018a).
Outras vias de saída de agua dos sistemas	Driver externo	Evapotranspiracao+Vazao a jusante total	km2*km/year	-
Perdas	Componente auxiliar	0.3	Dmnl	(FABHAT, 2018b; SABESP, 2020b)
Precipitacao direta	Variável rápida	Espelho da agua*Precipitacao media total	km2*km/year	-
	Variável rápida	(3.99091+0.338889*SIN(2.24016*(((Time - INITIAL TIME)*c) +10.2219)+1.09476) +0.49642*SIN(5.6004*(((Time - INITIAL TIME)*c) +10.2219)+1.04839) +1.46936*SIN(6.16044*(((Time - INITIAL TIME)*c) +10.2219)+0.994239) +0.369791*SIN(12.3209*(((Time - INITIAL TIME)*c) +10.2219)+1.99124))*(365/1e+06)	km/year	Esta equação foi obtida pela aplicação da Transformada de Fourier sobre a série de dados obtidos pelo Portal dos Mananciais (https://mananciais.sabesp.com.br/), datados do dia 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020, conforme explicado no item textual 4.3.4.2.

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

Tabela 3 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios.

Sistema de abastecimento da RMSP (continuação)				
Variáveis	Classificação	Equações/valores	Unidade	Informações importantes
Recarga dos reservatórios	Variável de controle	IF THEN ELSE(Aguas para abastecimento disponíveis nos reservatórios ≥ 2.59912 , 0 , (Escoamento superficial + Precipitação direta + Vazão natural total + Taxa de deslocamento de água subterrânea + Transposição BH PCJ + Vazão anual de recarga por perda de água + Transposição BH PS))	km ² *km/year	-
Taxa de deslocamento de água subterrânea	Componente auxiliar	1.03278	km ² *km/year	Este valor foi arbitrado, conforme explicado no item textual 4.3.4.2.
Taxa de escoamento	Componente auxiliar	0.2998	Dmnl	As proporções entre os componentes do ciclo hidrológico (taxa de escoamento e taxa de evapotranspiração) foram obtidas pelo tratamento das imagens apresentadas no trabalho de Conicelli (2014), através da utilização dos softwares eCognition e Qgis 3.16, com erro girando em torno de 15%. A imagem foi georreferenciada, segmentada e reclassificada com a utilização dos softwares mencionados.
Taxa de evapotranspiração	Componente auxiliar	0.4773	Dmnl	

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

Tabela 3 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre as águas para abastecimento disponíveis nos reservatórios.

Sistema de abastecimento da RMSP (conclusão)				
Variáveis	Classificação	Equações/valores	Unidade	Informações importantes
Vazao a jusante total	Driver externo	$0.775482+0.280019*\text{SIN}(0.56004*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+0.339404)+0.140372*\text{SIN}(1.12008*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+0.352772)+0.115915*\text{SIN}(1.68012*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.06243) +0.119034*\text{SIN}(6.16044*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.63109) +0.120469*\text{SIN}(11.7608*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)-3.04592)+0.11737*\text{SIN}(12.3209*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)-2.99308)$	km ² *km/year	Esta equação foi obtida pela aplicação da Transformada de Fourier sobre a série de dados obtidos pelo Portal dos Mananciais (https://mananciais.sabesp.com.br/), datados do dia 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020, conforme explicado no item textual 4.3.4.2.
Vazao de abastecimento de outros municípios	Componente auxiliar	0.0191739	km ² *km/year	FABHAT (2018a)
Vazao de agua distribuida pela Sabesp	Variável rápida	(Demanda industrial+Demanda urbana)*(1+Perdas)	km ² *km/year	
Vazao de retirada antropica	Variável de controle	IF THEN ELSE(Aguas para abastecimento disponiveis nos reservatorios>0, MIN(2.55442 , Influencia do Sistema Cantareira sobre a vazao de retirada total)+Vazao de abastecimento de outros municipios+Demanda agricola , 0)	km ² *km/year	FABHAT (2018a)
Vazao natural total	Driver externo	$2.50549+0.350631*\text{SIN}(0.56004*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)-0.30257) +0.264199*\text{SIN}(2.24016*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.71655) +0.295991*\text{SIN}(5.6004*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.58947) +0.662557*\text{SIN}(6.16044*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.43742)$	km ² *km/year	Esta equação foi obtida pela aplicação da Transformada de Fourier sobre a série de dados obtidos pelo Portal dos Mananciais (https://mananciais.sabesp.com.br/), datados do dia 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020, conforme explicado no item textual 4.3.4.2..

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

APÊNDICE B – INFORMAÇÕES PERTINENTES AO MODELO DO SISTEMA CANTAREIRA

Tabela 4 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre Reservatório do Sistema Cantareira.

Sistema Cantareira (continua)				
Variáveis	Classificação	Equação/valores	Unidade	Informações importantes
Area de drenagem do Sistema Cantareira	Variável lenta	$-0.9164 * (((\text{Time} - \text{INITIAL Time}) * A) / 4) + 20) + 3389.1$	km ²	Este cálculo foi efetuado a partir de informações obtidas diretamente da plataforma do <i>Google Earth Engine</i> (GEE), com a utilização do toolkit disponibilizado pelo <i>MapBiomas</i> e com o shapefile da área da Bacia Hidrográfica do Sistema Cantareira. Para isso, foram escolhidos e interpolados os dados para cinco anos distintos (2000, 2005, 2010, 2015 e 2020).
Demanda agrícola do Sistema Cantareira	Componente auxiliar	0.125009	km ² *km/year	FABHAT (2018a)
Demanda por água de outros municípios	Componente auxiliar	0.1967	km ² *km/year	FABHAT (2018a)
Escoamento Superficial do Sistema Cantareira	Variável rápida	Area de drenagem do Sistema Cantareira*Precipitacao media da area do Sistema Cantareira*Taxa de escoamento do Sistema Cantareira	km ² *km/year	-
Espelho da água do Sistema Cantareira	Componente auxiliar	122.014	km ²	Valor calculado através do tratamento de imagens, utilizando o software Qgis 3.16 e o shapefile da área da Bacia Hidrográfica do Sistema Cantareira e dos reservatórios de água.
Evapotranspiracao do Sistema Cantareira	Variável rápida	(Area de drenagem do Sistema Cantareira+ Espelho da água do Sistema Cantareira)*Taxa de evapotranspiracao do Sistema Cantareira *Precipitacao media da area do Sistema Cantareira	km ² *km/year	-

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

Tabela 4 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre Reservatório do Sistema Cantareira.

Sistema Cantareira (continuação)				
Variáveis	Classificação	Equação/valores	Unidade	Informações importantes
Outras vias de saída de água do Sistema Cantareira	Driver externo	Evapotranspiracao do Sistema Cantareira + Demanda por água de outros municipios + Demanda agricola do Sistema Cantareira+ IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>0 , Vazao a jusante do Sistema Cantareira , 0)	km2*km/year	-
Precipitacao direta no Sistema Cantareira	Variável rápida	Espelho da agua do Sistema Cantareira*Precipitacao media da area do Sistema Cantareira	km2*km/year	-
Precipitacao media da area do Sistema Cantareira	Variável rápida	$((3.796+0.372367*\text{SIN}(1.12008*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+0.872827)$ $+0.331954*\text{SIN}(2.24016*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.06651)$ $+0.379034*\text{SIN}(5.04036*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+0.501937)$ $+0.571037*\text{SIN}(5.6004*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.01861)$ $+1.5394*\text{SIN}(6.16044*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+0.918245)$ $+0.399644*\text{SIN}(12.3209*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)+1.87595)$ $+0.353301*\text{SIN}(14.001*(((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})*c) +10.2219)-0.962318))*(365/1e+06))$	km/year	Esta equação foi obtida pela aplicação da Transformada de Fourier sobre a série de dados obtidos pelo Portal dos Mananciais (https://mananciais.sabesp.com.br/), datados do dia 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020, conforme explicado no item textual 4.3.4.2...
Recarga do Sistema Cantareira	Variável rápida	Precipitação direta no Sistema Cantareira+Escoamento Superficial do Sistema Cantareira+Taxa anual de deslocamento de água subterrânea do Sistema Cantareira+Vazao de agua perdida do Sistema Cantareira + Vazao natural do Sistema Cantareira + Transposicao BH PCJ + Transposicao BH PS	km2*km/year	-

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

Tabela 4 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre Reservatório do Sistema Cantareira.

Sistema Cantareira (continuação)				
Variáveis	Classificação	Equação/valores	Unidade	Informações importantes
Reservatório do Sistema Cantareira	Variável de estado	Recarga do Sistema Cantareira-(Outras vias de saída de água do Sistema Cantareira+vazão de retirada do Sistema Cantareira pela Sabesp) Valor inicial: 0.485749	km ² *km	FABHAT (2018a)
Taxa anual de deslocamento de água subterrânea do Sistema Cantareira	Componente auxiliar	0.49855	km ² *km/year	Este valor foi arbitrado, conforme explicado no item textual 4.3.4.2.
Taxa de escoamento do Sistema Cantareira	Componente auxiliar	0.27405	Dml	As proporções entre os componentes do ciclo hidrológico (taxa de escoamento e taxa de evapotranspiração do Sistema Cantareira) foram obtidas pelo tratamento das imagens apresentadas no trabalho de Conicelli (2014), através da utilização dos softwares eCognition e Qgis 3.16, com erro girando em torno de 15%. A imagem foi georreferenciada, segmentada e reclassificada com a utilização dos softwares mencionados. No caso do Sistema Cantareira, foi realizado um ajuste manual destes valores, cuja variação foi testada dentro do limite do erro procedimental.
Taxa de evapotranspiração do Sistema Cantareira	Componente auxiliar	0.50305	Dml	
Transposição BH PCJ	Variável de controle	IF THEN ELSE(vazão de retirada do Sistema Cantareira pela Sabesp<=1.04069 , vazão de retirada do Sistema Cantareira pela Sabesp , 1.04069) Vazão máxima de retirada: 1.04069 km ³ /ano	km ² *km/year	FABHAT (2018a)

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

Tabela 4 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre Reservatório do Sistema Cantareira.

Sistema Cantareira (continuação)				
Variáveis	Classificação	Equação/valores	Unidade	Informações importantes
Transposição BH PS	Driver externo	0.08088984	km ² *km/year	FABHAT (2018a)
Vazão a jusante do Sistema Cantareira	Driver externo	$0.22567+0.134007*\text{SIN}(0.56004*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})^*c) + 10.2219)+0.397185)$ $+0.160348*\text{SIN}(1.68012*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})^*c) + 10.2219)+1.32122)$ $+0.118525*\text{SIN}(5.04036*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})^*c) + 10.2219)+1.64821)$ $+0.124489*\text{SIN}(6.72048*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})^*c) + 10.2219)+0.939459)$ $+0.146968*\text{SIN}(7.28052*((\text{Time} - \text{INITIAL TIME})^*c) + 10.2219)+1.53493)$	km ² *km/year	Esta equação foi obtida pela aplicação da Transformada de Fourier sobre a série de dados obtidos pelo Portal dos Mananciais (https://mananciais.sabesp.com.br/), datados do dia 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020, conforme explicado no item textual 4.3.4.2..
Vazão de retirada do Sistema Cantareira pela Sabesp	Variável de controle	<p>IF THEN ELSE(Reservatorio do Sistema Cantareira>0, IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.6*0.98193) , MIN(1.04069, Vazao proporcional de retirada do Sistema Cantareira) , IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.4*0.98193), MIN(0.977616 , Vazao proporcional de retirada do Sistema Cantareira) , IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.3*0.98193), MIN(0.851472 , Vazao proporcional de retirada do Sistema Cantareira) , IF THEN ELSE (Reservatorio do Sistema Cantareira>= (0.2*0.98193), MIN(0.725328 , Vazao proporcional de retirada do Sistema Cantareira) , MIN(0.488808, Vazao proporcional de retirada do Sistema Cantareira)))) , 0)</p>	km ² *km/year	As condições de operacionais do Sistema Cantareira foram dos Estudos Hidrológicos (FABHAT, 2018a).

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

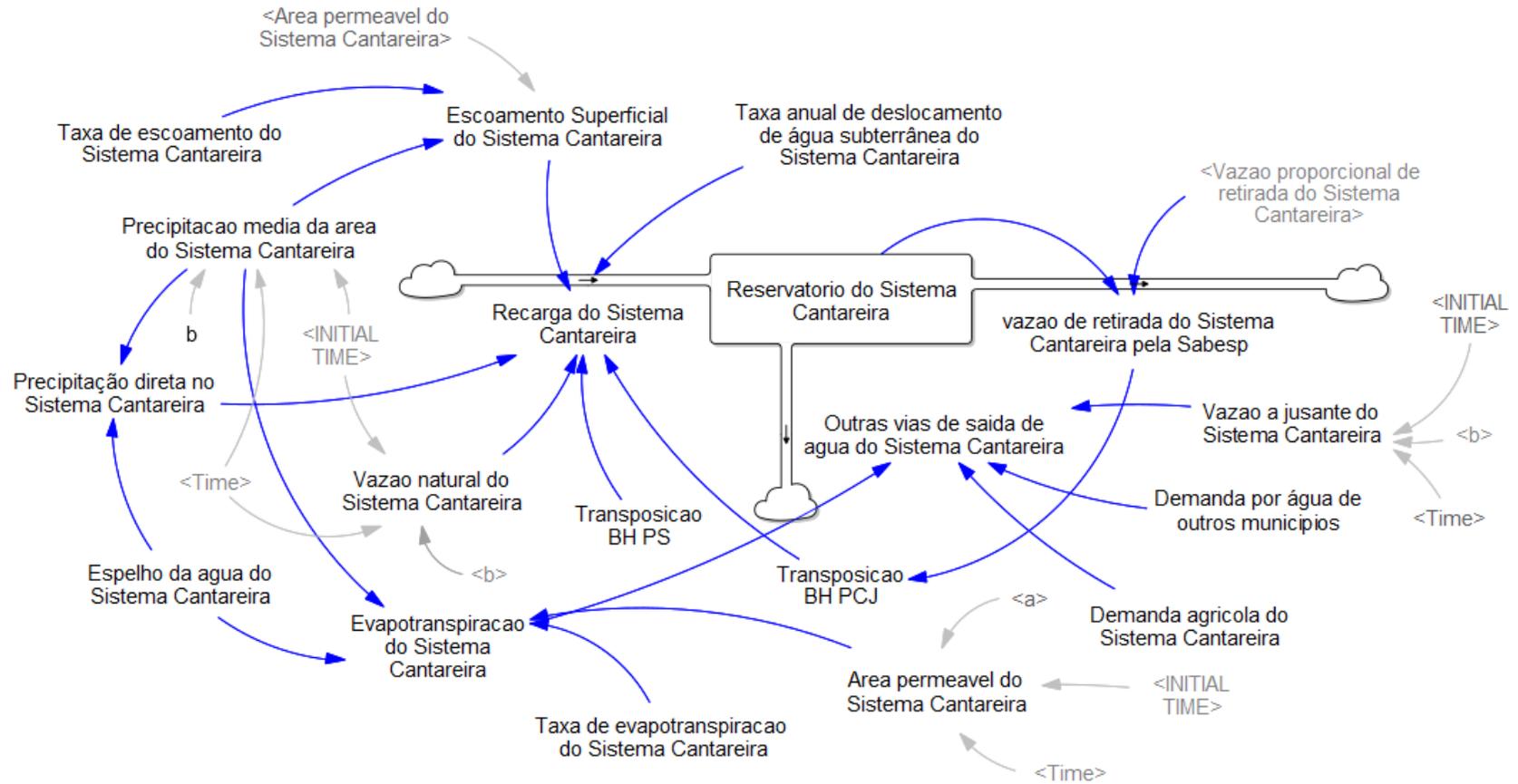
Tabela 4 - Equações e valores utilizados nos componentes do Sistema de Abastecimento de Água da RMSP, com enfoque sobre Reservatório do Sistema Cantareira.

Sistema Cantareira (conclusão)				
Variáveis	Classificação	Equação/valores	Unidade	Informações importantes
Vazao natural do Sistema Cantareira	Driver externo	$0.956431 + 0.134007 * \sin(0.56004 * ((\text{Time} - \text{INITIAL TIME}) * c) + 10.2219) + 0.397185$ $+ 0.160348 * \sin(1.12008 * ((\text{Time} - \text{INITIAL TIME}) * c) + 10.2219) + 1.32122$ $+ 0.118525 * \sin(2.24016 * ((\text{Time} - \text{INITIAL TIME}) * c) + 10.2219) + 1.64821$ $+ 0.124489 * \sin(5.04036 * ((\text{Time} - \text{INITIAL TIME}) * c) + 10.2219) + 0.939459$ $+ 0.146968 * \sin(5.6004 * ((\text{Time} - \text{INITIAL TIME}) * c) + 10.2219) + 1.53493$ $+ 0.284261 * \sin(6.16044 * ((\text{Time} - \text{INITIAL TIME}) * c) + 10.2219) + 1.47709$	km2*km/year	Esta equação foi obtida pela aplicação da Transformada de Fourier sobre a série de dados obtidos pelo Portal dos Mananciais (https://mananciais.sabesp.com.br/), datados do dia 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2020, conforme explicado no item textual 4.3.4.2..
Vazao proporcional de retirada do Sistema Cantareira	Variável rápida	0.4004*Vazao de agua distribuida pela Sabesp	km2*km/year	No Relatório Síntese do PDAA (SABESP, 2020c) é comentado que a área de atendimento de cada um dos sistemas produtores é proporcional à sua capacidade de produção. Desta maneira, como a capacidade de produção do sistema Cantareira corresponde à 40.04% da produção total de água, este valor foi multiplicado pela vazão total de distribuição, a partir da premissa que a proporções de área e população abastecida sejam equivalentes.
a	Componente auxiliar	1	Km2/year	-
b	Componente auxiliar	1	1/year	-

Fonte: Elaboração própria.

Nota: Os nomes das variáveis seguem o mesmo formato utilizado no processo de modelagem, no caso, sem caracteres especiais.

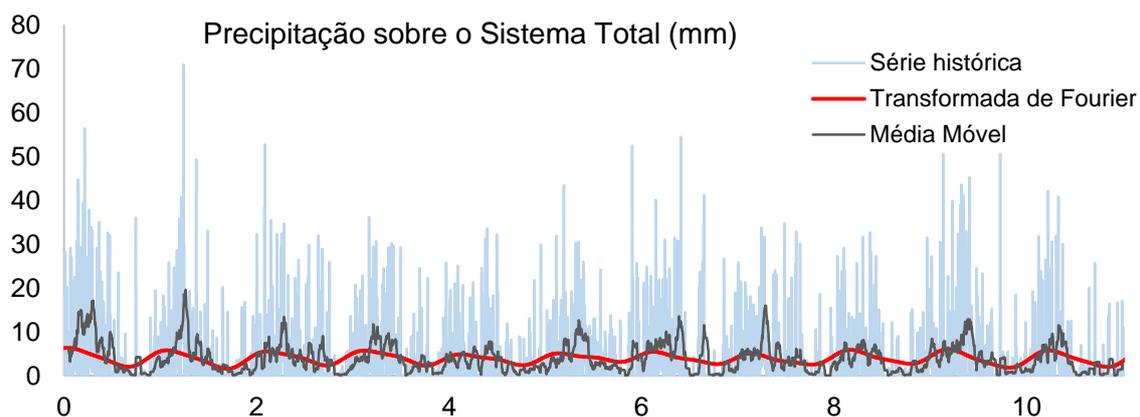
Figura 60 - Reservatório Cantareira ampliado



Fonte: Elaboração própria.

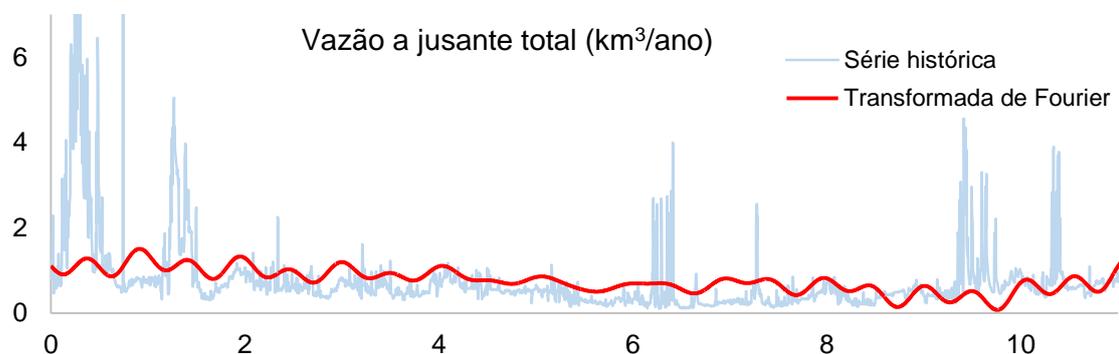
APÊNDICE D – TRANSVERSA DE FOURIER APLICADA SOBRE OS PARÂMETROS PERTENCENTES AO SISTEMA TOTAL

Figura 61- Transformada de Fourier aplicada à precipitação total



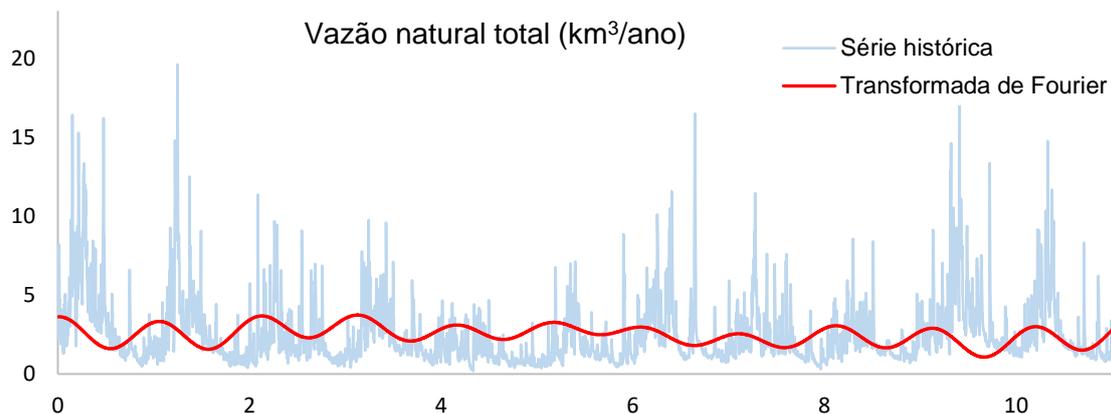
Fonte: Elaboração própria.

Figura 62 - Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão a jusante total



Fonte: Elaboração própria.

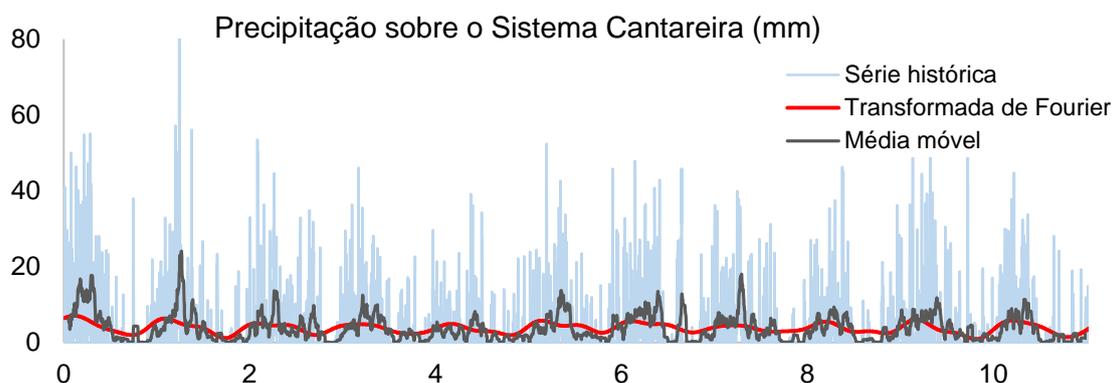
Figura 63 - Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão natural total



Fonte: Elaboração própria.

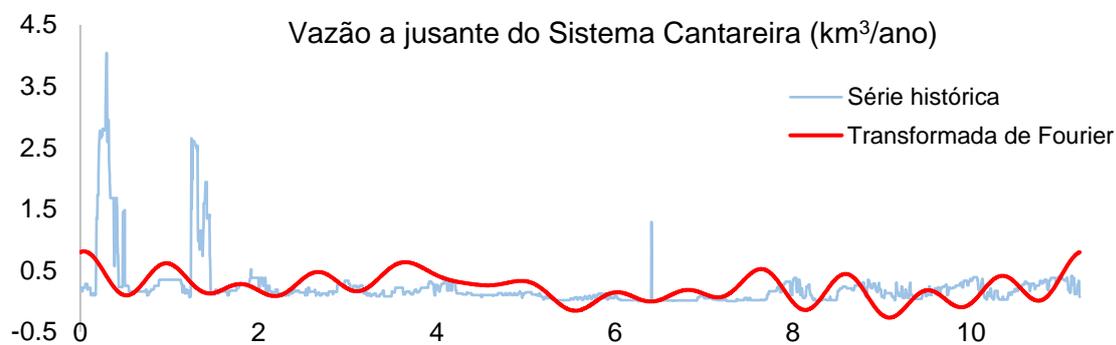
APÊNDICE E- TRANSVERSA DE FOURIER APLICADA SOBRE OS PARÂMETROS PERTENCENTES AO SISTEMA CANTAREIRA

Figura 64 - Transformada de Fourier aplicada sobre a precipitação do Sistema Cantareira



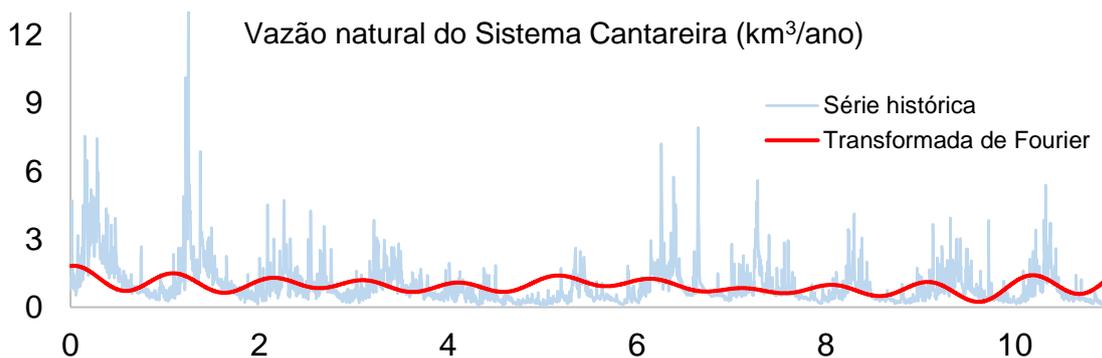
Fonte: Elaboração própria.

Figura 65 - Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão a jusante do Sistema Cantareira



Fonte: Elaboração própria.

Figura 66- Transformada de Fourier aplicada sobre a vazão natural do Sistema Cantareira



Fonte: Elaboração própria.