



**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**  
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II**

**GABRIEL RIBEIRO POZZEBON**

**DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA  
O MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL**

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**GABRIEL RIBEIRO POZZEBON**

**DEFINIÇÃO E AVALIAÇÃO DE INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA PARA  
O MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL**

Atividade entregue como parte dos requisitos para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, da Universidade de Caxias do Sul.

Professora: Renata Cornelli

Orientador: Taison Anderson Bortolin

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

## Resumo

Estudos sobre a segurança hídrica envolvem a análise do acesso à água em quantidade e qualidade adequadas, o conhecimento do desenvolvimento socioeconômico da região abastecida, a manutenção dos ecossistemas que integram o sistema e os riscos atrelados a falta ou excesso da água. A segurança hídrica é melhor gerenciada através de indicadores que facilitam a tomada de decisão. Este estudo teve como objetivo a definição de indicadores para as dimensões humana, econômica, de resiliência e ecossistêmica da segurança hídrica, envolvendo uma análise qualitativa dos mesmos. O Método de Análise de Processo foi aplicado para determinar esses indicadores com base nos principais geradores e receptores de impacto identificados na área de estudo, o município de Caxias do Sul, RS. Um diagnóstico do município foi realizado, analisando as informações sobre as bacias de captação, os sistemas de abastecimento de água, a coleta e tratamento de esgoto, o crescimento populacional, a economia e a precipitação. Para encontrar a disponibilidade hídrica do município foi realizada modelagem hidrológica. Para tanto foi utilizado o *software* HEC-HMS, aplicando o método hierárquico de Klemes para encontrar as vazões no exutório de 8 bacias de captação durante um período de 10 anos. A partir destes dados foram montadas as curvas de permanência e calculadas as vazões médias de longo período. Com base nestes resultados modelados foi montado o gráfico da disponibilidade hídrica do município. Foram definidos como os principais geradores de impacto na segurança hídrica o crescimento populacional, o crescimento econômico, as legislações e políticas e mudanças climáticas. A empresa de saneamento juntamente com a população atual e futura do município foram identificadas como receptores dos impactos. Inicialmente 58 indicadores foram definidos para monitorar os problemas causados devido aos impactos, mas após a avaliação destes por profissionais da área, outros 7 indicadores foram adicionados, totalizando 65. Estes foram divididos entre uma das 4 dimensões estabelecidas para a segurança hídrica, sendo que 16 estão dentro da dimensão econômica, 18 na dimensão humana, 14 na dimensão ecossistêmica e 17 na dimensão de resiliência. Os indicadores encontrados por este estudo foram comparados com os definidos pelo Plano Nacional de Segurança Hídrica, onde foi possível concluir que este conjunto de indicadores permite uma análise mais detalhada sobre a segurança hídrica de Caxias do Sul.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Dimensões da segurança hídrica do PNSH. ....	23
Figura 2: Fluxograma da aplicação do Método de Análise de Processo. ....	34
Figura 3: Curvas teóricas de disponibilidade hídrica. ....	36
Figura 4: Fluxograma da metodologia. ....	38
Figura 5: Mapa de localização das bacias de captação. ....	41
Figura 6: Mapa de identificação dos tipos e uso do solo nas bacias Piaí e Sepultura. .....	41
Figura 7: Gráficos de precipitação registradas nas bacias de captação (abril de 2011 até maio 2020). ....	43
Figura 8: Mapa de localização do município de Caxias do Sul. ....	49
Figura 9: Mapa de localização das bacias de Caxias do Sul. ....	51
Figura 10: Mapa dos sistemas de abastecimento de água. ....	53
Figura 11: Relação entre as perdas totais e volume micromedido. ....	55
Figura 12: Localização dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto. ....	56
Figura 13: Comparação das Taxas de Crescimento Populacional. ....	59
Figura 14: Evolução do PIB anual em milhões de reais 1999 até 2018. ....	60
Figura 15: PIB <i>per capita</i> anual 2009 até 2018. ....	61
Figura 16: Evolução do VAB por Setor 2002 até 2015. ....	63
Figura 17: Precipitação registrada em Caxias do Sul 1946 até 2016. ....	64
Figura 18: Precipitação adimensional anual (1946 até 2016). ....	65
Figura 19: Precipitação média mensal. ....	66
Figura 20: Curvas de permanência para cada bacia de captação. ....	70
Figura 21: Disponibilidade hídrica de Caxias do Sul. ....	71
Figura 22: Ajuste linear dos volumes produzidos por ano. ....	72
Figura 23: Análise da disponibilidade, infraestrutura, demanda e vazão observada em 2020. ....	73
Figura 24: Retorno do questionário da etapa de verificação. ....	85

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Elementos fundamentais para se alcançar a segurança hídrica. ....	14
Quadro 2: Legislação brasileira pertinente a segurança hídrica.....	19
Quadro 3: Dimensões da segurança hídrica de Van Beek e Arriens. ....	21
Quadro 4: Dimensões da segurança hídrica do Banco Asiático de Desenvolvimento e The Nature Conservancy.....	21
Quadro 5: Dimensões da segurança hídrica de Romero-Lankao e Gnatz. ....	22
Quadro 6: Indicadores da dimensão Ecosistêmica do PNSH.....	30
Quadro 7: Indicadores da dimensão Econômica do PNSH.....	31
Quadro 8: Indicadores da dimensão Resiliência do PNSH. ....	31
Quadro 9: Legenda das métricas utilizadas. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Identificação da rede pluviométrica utilizada no estudo. ....	42
Tabela 2: Informações das bacias de captação e barramentos de Caxias do Sul. ...	52
Tabela 3: Volumes abastecidos de cada sistema de abastecimento de água. ....	53
Tabela 4: Perdas totais no abastecimento de água (2013 até 2020). ....	54
Tabela 5: Sistemas de coleta e tratamento de esgoto. ....	56
Tabela 6: População de Caxias do Sul 2000 até 2020.....	57
Tabela 7: Comparação dos métodos de projeção populacional.....	57
Tabela 8: População mundial, brasileira e de Caxias do Sul 2000 até 2050.....	58
Tabela 9: Taxas de crescimento populacional. ....	59
Tabela 10: PIB anual em milhões de reais 1999 até 2018. ....	60
Tabela 11: PIB <i>per capita</i> anual 2009 até 2018. ....	61
Tabela 12: VAB anual 2002 até 2018.....	62
Tabela 13: Parâmetros calibrados e validados para bacia Piaí.....	67
Tabela 14: Parâmetros calibrados no período seco e validado no período úmido na bacia Piaí.....	67
Tabela 15: Parâmetros utilizados para as bacias rurais e urbanas. ....	68
Tabela 16: Qmlp para cada bacia. ....	69
Tabela 17: Indicadores para cada problema gerado pelos GI.....	74
Tabela 18: Relação os indicadores e as dimensões da segurança hídrica.....	75
Tabela 19: Indicadores de segurança hídrica adicionais.....	89

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. OBJETIVOS .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	12
3.1 SEGURANÇA HÍDRICA.....	12
3.2 SEGURANÇA HÍDRICA NO BRASIL.....	15
3.3 ASPECTOS LEGAIS.....	18
3.4 DIMENSÕES DA SEGURANÇA HÍDRICA .....	20
3.4.1 Abastecimento Humano.....	23
3.4.2 Ecossistema .....	25
3.4.3 Economia.....	27
3.4.4 Resiliência .....	28
3.5 INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA.....	28
3.5.1 Indicadores do Plano Nacional de Segurança Hídrica.....	30
3.6 MÉTODOS PARA ESCOLHA DE INDICADORES .....	32
3.6.1 DPSIR.....	32
3.6.2 Método de Análise de Processo .....	33
3.7 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	35
4. METODOLOGIA.....	38
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	38
4.1.1 Modelagem Hidrológica .....	39
4.1.1.1 Modelo Hierárquico de Klemes.....	39
4.1.1.2 Pluviômetros.....	42
4.1.1.3 HEC-HMS.....	43
4.1.1.4 Calibração e Validação.....	44
4.1.1.5 Modelagem das Vazões .....	45
4.1.1.6 Disponibilidade Hídrica .....	45
4.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE PROCESSO .....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	49
5.1.1 Bacias de Captação.....	50
5.1.2 Sistemas de Abastecimento de Água .....	52
5.1.3 Coleta e Tratamento de Esgoto .....	55
5.1.4 População.....	57
5.1.5 Economia.....	59
5.1.6 Precipitação .....	63
5.1.7 Modelagem Hidrológica .....	66
5.2 ESCOLHA DOS INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA .....	74
5.2.1 Análise da Escolha dos GI e Problemas.....	77
5.2.2 Análise da Escolha dos Indicadores .....	79
5.2.2.1 Dimensão Humana.....	79
5.2.2.2 Dimensão Econômica.....	80
5.2.2.3 Dimensão Resiliência .....	81
5.2.2.4 Dimensão Ecossistêmica.....	83
5.2.3 Análise da Verificação dos Indicadores .....	84
5.2.3.1 Dimensão Humana.....	86
5.2.3.2 Dimensão Econômica.....	86
5.2.3.3 Dimensão Ecossistêmica.....	87
5.2.3.4 Dimensão Resiliência .....	88

5.2.3.5 Indicadores Adicionais.....	89
5.3 COMPARAÇÃO DOS INDICADORES COM O PNSH.....	89
6. CONCLUSÃO.....	92
REFERÊNCIAS.....	94

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos da *UN-WATER* (2018), no período de 2017 a 2050, a população mundial deverá aumentar de 7,7 bilhões para entre 9,4 e 10,2 bilhões, com dois terços vivendo em cidades. Este aumento da população gera um aumento na demanda de água para os seus diversos usos, como consumo humano, atividades industriais, irrigação e dessedentação animal.

Muitos países já estão passando por situações generalizadas de escassez hídrica, e provavelmente terão de lidar com uma menor disponibilidade de águas superficiais a partir de 2050 (*UN-WATER*, 2018). Mehta (2014) comenta que cerca de 800 milhões de pessoas não têm acesso à água segura e acessível e 2,5 bilhões de pessoas não possuem acesso ao saneamento. A disputa pelo recurso tem se expandido, inclusive em regiões com reservas hídricas abundantes (*CASTRO*, 2019).

Em 2010, a Assembleia Geral da ONU declarou que o acesso à água limpa e segura e o saneamento básico são direitos humanos fundamentais (*ONU*, 2010), fomentando novas discussões sobre aspectos constituintes da agenda das águas, tais como a garantia ao acesso da água a todos e a segurança hídrica das regiões e países (*SANTOS*, 2016a). Em 2013 a ONU definiu que para se alcançar segurança hídrica é preciso acesso a quantidades e qualidade adequadas de água, sustentando o desenvolvimento socioeconômico e proteção contra desastres.

Segundo a OCDE (2013) o crescimento populacional pressiona a segurança do abastecimento de água e a urbanização provoca um aumento na porcentagem de áreas impermeáveis, consequentemente aumentando também os riscos de inundações em casos de fortes chuvas. O aumento da geração de esgotos é uma das consequências do aumento da população e a disposição de esgoto sem tratamento em corpos hídricos gera grande impacto no meio ambiente e na sociedade. Estima-se que globalmente aproximadamente 80% de todas as águas residuárias sejam lançadas sem qualquer tipo de tratamento o que resulta em uma deterioração crescente na qualidade da água em geral, com impactos negativos para a saúde humana e para os ecossistemas (*UNESCO*, 2017).

Loë et al. (2007) afirmam que a segurança hídrica é um conceito que abrange múltiplos aspectos, reconhecendo que é necessária água com qualidade e quantidade

adequadas para usos sociais, econômicos e, ao mesmo tempo, também é necessária para manter as funções ecossistêmicas. Planos de segurança hídrica são utilizados como uma ferramenta importante no planejamento e gestão da água, os quais contêm avaliação das características relevantes ao local de estudo, com levantamento de áreas vulneráveis e ações específicas para contornar situações críticas ou prevenir complicações futuras. Gerlak e Mukhtarov (2015) afirmam que a segurança hídrica pode ser vista como uma extensão do pensamento do desenvolvimento sustentável para os recursos hídricos, com foco na quantidade e qualidade do suprimento de água para a sociedade e necessidades ecológicas.

Para a elaboração de um plano de segurança hídrica é necessário elencar índices e indicadores que reflitam a real condição do local de estudo. Diferentes regiões apresentam características intrínsecas que variam amplamente, dependendo desde condições climáticas até decisões políticas. A escolha dos indicadores a serem utilizados na tomada de decisão depende dos objetivos e características das demandas hídricas do sistema (CASTRO, 2019). Conhecer a situação atual e dados históricos da área de estudo é de grande importância neste contexto. Machado (2018) explica que não há soluções e indicadores únicos e aplicáveis para todos os contextos, uma vez que as medidas dependem das condições, especificidades e capacidades de gestão do local onde será aplicado.

O município de Caxias do Sul, localizado ao sul do Brasil, na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul ainda não possui um plano de segurança hídrica. As únicas informações oficiais a respeito deste assunto vêm do Plano Nacional de Segurança Hídrica, que estabelece um índice conforme indicadores elaborados para o país inteiro. É de grande importância para o município o monitoramento do cenário da segurança hídrica local para garantir que as gerações atuais e futuras possam utilizar a água de forma sustentável, eficiente e equitativa.

Para a elaboração de um futuro plano de segurança hídrica no município de Caxias do Sul, primeiro é necessário definir quais indicadores serão monitorados. Avaliando a região e comparando com outros estudos nas áreas de segurança hídrica e indicadores ambientais, este trabalho busca realizar uma análise qualitativa de indicadores que descrevam as características relevantes da região quanto à situação da segurança hídrica.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é propor indicadores para avaliar a situação da segurança hídrica no município de Caxias do Sul. Já os objetivos específicos considerados:

- Realizar a caracterização do perfil socioeconômico, do crescimento populacional, dos sistemas de abastecimento de água e da precipitação no município de Caxias do Sul;
- Realizar a modelagem hidrológica para encontrar as curvas de permanência e a disponibilidade hídrica através dos gráficos das curvas teóricas para as bacias de captação do município de Caxias do Sul;
- Aplicar o Método de Análise de Processo para definição de possíveis indicadores levando em consideração os principais impactos e problemas sobre a segurança hídrica no município;
- Comparar os indicadores encontrados com os indicadores utilizados no Plano Nacional de Segurança Hídrica;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata sobre a conceituação do termo segurança hídrica. Mostra como o assunto é abordado atualmente, evidenciando situações de falta de segurança hídrica ocorridas no Brasil e que levaram a elaboração do Plano Nacional de Segurança Hídrica. Os indicadores e objetivos para monitorar a segurança hídrica também são abordados, trazendo exemplos de estudos na área e a conexão com as quatro principais dimensões utilizadas neste estudo: abastecimento humano, ecossistêmica, economia e resiliência.

#### 3.1 SEGURANÇA HÍDRICA

Nos últimos anos houve uma discussão crescente sobre a crise da água devido à sua escassez (MEHTA, 2014). A ausência de segurança hídrica está diretamente conectada a escassez, onde a demanda por determinado bem acaba por ser maior que a sua disponibilidade. A escassez hídrica pode ser definida como falta de água ou de seu acesso por falha na garantia do abastecimento regular (UN-WATER, 2020). A *UN-WATER* (2007) explica que a escassez é o ponto em que o impacto agregado causado pelos diversos usuários interfere no suprimento ou qualidade da água, fazendo com que a demanda não possa ser atendida. Sempre que a disponibilidade de água for inferior às necessidades hídricas fundamentais, pode ser utilizado o termo escassez de água (FAO, 2000). A segurança hídrica busca diminuir este risco da falta de água em seus diversos usos para as gerações atuais e futuras.

Estudos publicados sobre segurança hídrica mostram que este termo possui diferentes definições e que variam ao longo do tempo desde que começou a ser utilizado. Em contrapartida, mesmo possuindo definições diferentes, os objetivos da segurança hídrica se mantêm semelhantes. Os enquadramentos da segurança hídrica dependem da perspectiva de cada autor, apresentando diversidade e evolução nas definições utilizadas na literatura acadêmica e política (COOK e BAKKER, 2012). As definições de segurança hídrica podem variar geograficamente, refletindo as condições específicas em uma região ou país. Em áreas áridas, por exemplo, as definições se concentram exclusivamente na disponibilidade de água (VAN BEEK e ARRIENS, 2014). Cook e Bakker (2012) ainda destacam que estudos realizados sobre a segurança hídrica nos anos 1990 eram tratados com um enfoque antropocentrista e

raramente abordavam os fatores ambientais, mas desde então foram atribuídos diversos significados ao termo, tendo predominância de 4 temas: disponibilidade de água, necessidades humanas relacionadas ao desenvolvimento, vulnerabilidade a riscos e sustentabilidade.

Segundo Grey e Sadoff (2007) não somente a falta, mas também a presença da água pode gerar riscos, conceituando segurança hídrica como a disponibilidade de água em quantidade e qualidade aceitáveis, juntamente com níveis aceitáveis de riscos relacionados para as pessoas, ambientes e a economia.

Utilizando a definição de que a variação nas condições e quantidade disponíveis de água pode ameaçar a segurança hídrica, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) aborda os riscos associados a água. Segundo a OCDE, (2013) para se alcançar os objetivos da segurança hídrica é preciso manter níveis aceitáveis de 4 riscos: escassez, qualidade inadequada, excesso e comprometimento da resiliência dos sistemas de água. Esta abordagem baseada no risco determina níveis aceitáveis a cada um deles, avaliando a sua probabilidade de ocorrência e as suas potenciais consequências, comparadas com os benefícios esperados. Todos os riscos relacionados à água devem ser avaliados de forma integrada, pois intervenções para reduzir apenas um risco pode aumentar os outros (OCDE, 2013).

Dunn e Bakker (2009), por sua vez, definem segurança hídrica como o acesso sustentável a uma bacia hidrográfica com quantidades adequadas de água, de qualidade aceitável, garantindo a saúde humana e do ecossistema. De forma semelhante, o Conselho Mundial da Água (WWC, 2020) conceitua a segurança hídrica como sendo a disponibilidade em quantidade e qualidade adequadas de água para sustentar desenvolvimento socioeconômico, meios de subsistência, saúde e ecossistemas, em todos os locais, sendo uma condição básica para o desenvolvimento.

Segundo Løe et al. (2014) quando água com qualidade suficientemente boa está disponível para usos sociais, econômicos e culturais, ao mesmo tempo que está disponível para manutenção das funções do ecossistema é que a segurança hídrica irá existir. Segurança contra inundações, segurança dos recursos hídricos e do ambiente aquático são os elementos básicos de um sistema de segurança hídrica, e estes elementos exibem características dinâmicas e complexas (CHEN e WEI, 2014).

Em 2013 a ONU através da *UN-WATER* definiu segurança hídrica como:

A capacidade da população de garantir o acesso seguro e sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar os meios de subsistência, bem-estar humano e desenvolvimento socioeconômico, para assegurar a proteção contra a poluição transmitidas pela água e os desastres a ela relacionados, e, para a preservação dos ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política (UN-WATER, 2013).

A *UN-WATER* (2013) também destacou os elementos fundamentais para se alcançar a segurança hídrica, levantando diversos objetivos e diretrizes, sendo estes mostrados no Quadro 1 abaixo:

Quadro 1: Elementos fundamentais para se alcançar a segurança hídrica.

Acesso a água potável segura e suficiente a um custo acessível para atender às necessidades básicas, que incluem saneamento, higiene e a conservação da saúde e do bem-estar.
Proteção dos meios de subsistência, direitos humanos e valores culturais e recreativos.
Preservação e proteção de ecossistemas em sistemas de alocação e gestão de água, a fim de manter sua capacidade de fornecer e sustentar o funcionamento de serviços ecossistêmicos essenciais.
Abastecimento de água para atividades e desenvolvimento socioeconômico (tais como energia, transporte, indústria, turismo).
Coleta e tratamento de água usada para proteger a vida humana e o meio ambiente da poluição.
Abordagens colaborativas para a gestão de recursos hídricos transfronteiriços dentro e entre os países para promover a cooperação sustentabilidade da água.
A capacidade de lidar com incertezas e riscos relacionados com a água, como inundações, secas, poluição, entre outros.
Boa governança, responsabilidade e a devida consideração dos interesses de todas as partes envolvidas através de: regimes jurídicos adequados e eficazes; instituições transparentes, participativas e responsáveis; infraestrutura devidamente planejada, operada e mantida e desenvolvimento de capacidade.

Fonte: *UN-WATER* (2013).

Para alcançar a segurança hídrica, deve-se proteger os sistemas hídricos vulneráveis, mitigar os impactos dos perigos relacionados à água, como enchentes e secas, salvaguardar o acesso às funções e serviços hídricos e gerenciar os recursos

hídricos de maneira integrada e equitativa (UNESCO, 2020). E em se tratando de segurança hídrica e gestão de recursos hídricos é inevitável que *trade-offs*<sup>1</sup> aconteçam para equilibrar a equidade e as prioridades ambientais e econômicas (SADOFF e MULLER, 2009).

A segurança hídrica em países de baixa renda e comunidades pode ser definida como o acesso confiável à água em quantidade e qualidade suficientes para as necessidades humanas básicas, meios de subsistência em pequena escala e serviços ecossistêmicos locais, juntamente com um risco bem administrado de desastres relacionados à água (WATERAID, 2012).

Segundo Melo (2016) o conceito de segurança hídrica emergiu mundialmente para designar um modelo de gestão focado no resultado e efetividade da política de água, abordando a garantia, riscos aceitáveis, quantidade e qualidade para os usos múltiplos, antrópicos e naturais da água. A autora destaca que o caminho escolhido para se atingir a segurança hídrica é fortemente influenciado pelo contexto socioeconômico, político e a dimensão dos riscos enfrentados, e que a segurança hídrica não é um objetivo estático, podendo se alterar com a mudança do clima, as economias em crescimento e a degradação dos recursos.

A segurança hídrica pode ser conectada com as metas do plano de ação da ONU Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Este plano contém 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), no qual o ODS 6 contempla a garantia, disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento (ONU, 2020). O acompanhamento do ODS 6 permite avaliar o cenário de cada país quanto à disponibilidade, demandas e usos da água para as atividades humanas, conservação dos ecossistemas, redução de desperdícios e acesso ao abastecimento de água e saneamento (ANA, 2019a).

### 3.2 SEGURANÇA HÍDRICA NO BRASIL

O Brasil é um dos países que possuem a maior disponibilidade de água doce do mundo, mas sua distribuição é desigual no território, espacial e temporalmente. Isto somado aos usos intensivos da água pelas diferentes atividades econômicas nas

---

<sup>1</sup> Entende-se por *trade-off* tomadas de decisão que envolvam uma avaliação entre diferentes ações, decidindo como alocar os recursos disponíveis através da comparação entre os custos e benefícios de ações alternativas para se atingir as metas estabelecidas, sendo que para se alcançar um objetivo geralmente temos que abrir mão de algo (MANKIWI, 2018, p. 4-5).

bacias hidrográficas e os problemas de qualidade decorrentes da poluição hídrica, exigem ações de gestão cada vez mais efetivas (ANA, 2019b).

Ações voltadas à segurança hídrica no Brasil têm grande ligação com os eventos de seca entre 2013 e 2015 em São Paulo, onde, conforme Empinotti, Budds e Aversa (2019), os reservatórios de água foram reduzidos para 5% de sua capacidade devido à falta de chuvas e problemas ligados à gestão hídrica, gerando grande exposição na mídia na época. Somente após as chuvas retornarem e a situação se estabilizar é que se começou o planejamento com respostas de longo prazo para melhorar a segurança hídrica. A crise hídrica enfrentada pelo estado de São Paulo e sua forte veiculação na mídia fomentou o aumento do debate sobre a gestão das águas no Brasil (SANTOS, 2016a).

Jacobi, Cibim e Leão (2015) também comentam que o fator climático da falta de chuva em conjunto com a ausência de ações preventivas pela Sabesp e governo do estado foram as principais causas para a crise hídrica. Os autores apontam também que os impactos variam desde interrupção do abastecimento de água nos municípios até impactos negativos sobre os ecossistemas aquáticos dos reservatórios e rios.

Dados mais recentes apontam que eventos climáticos extremos ainda são um obstáculo na segurança hídrica do país. Conforme os dados da ANA (2019a) em 2018 um milhão de brasileiros foram prejudicados por cheias e inundações, quase 43 milhões foram atingidos por secas e estiagens e estima-se que 60,9 milhões de brasileiros vivam em cidades com risco hídrico.

Veiga e Magrini (2013) explicam que os problemas de abastecimento de água no Brasil decorrem principalmente de uma combinação de crescimento excessivo da demanda local, crescimento urbano não planejado, industrialização e expansão agrícola, resultando no esgotamento dos recursos hídricos, tanto em qualidade quanto em quantidade.

O país possui um Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) que apresenta o estudo realizado pela ANA em conjunto com o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Este plano busca avaliar a segurança hídrica e reduzir o risco de escassez de água. Feito para um horizonte até 2035, apresenta um Índice de Segurança Hídrica (ISH), as obras necessárias para melhorar a segurança hídrica no país e os investimentos necessários para se atingir os resultados esperados durante o período.

O PNSH descreve que para reverter o quadro de insegurança hídrica, é possível atuar na implantação de infraestrutura hídrica, aperfeiçoando a gestão de recursos hídricos e incorporando medidas para gestão de riscos visando à proposição de ações dirigidas ao aumento da resiliência (ANA, 2019c).

As ações foram organizadas em três componentes dentro de um Programa de Segurança Hídrica, com base em seu estágio de desenvolvimento e implementação: estudos e projetos, obras e institucional (operação e manutenção), resultando em um investimento total de R\$ 27,5 bilhões (ANA, 2019c).

O plano apresenta o ISH, mostrado para o país inteiro variando seu valor de 1 a 5, sendo 1 os locais com mais segurança hídrica e 5 os locais com mais risco hídrico. Para os locais que apresentam ISH alto, um inventário dos Estudos, Planos, Projetos e Obras (EPPO) foi realizado, levantando as possíveis intervenções necessárias e seus custos. Estas intervenções foram organizadas em um cronograma físico-financeiro separado por cada Unidade da Federação (ANA, 2019c).

Existem alguns exemplos de planos e programas aplicados na área de segurança hídrica no Brasil. O Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica de Brasília (SEMA/DF, 2016), foi elaborado com o objetivo descrever as estratégias e ações adotadas pelo Governo do Distrito Federal para o enfrentamento da crise hídrica no início de 2016. O plano traz que os principais motivos que impactaram no abastecimento da Capital vêm da combinação de chuvas abaixo da média, altas temperaturas, ocupação desordenada no solo, captações clandestinas, aumento da população e ausência de obras estruturantes recentes. Contempla ações emergenciais e iniciativas de médio e longo prazos visando reduzir a probabilidade de colapso no abastecimento de água.

O Programa Nacional Combate ao Desperdício Água (SEDU/PR, 1997) é um Programa da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, desenvolvido em 1997 por a Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República (SEDU/PR). Tem por objetivo geral promover o uso racional da água de abastecimento público nas cidades brasileiras, em benefício da saúde pública, do saneamento ambiental e da eficiência dos serviços. Existem também outros programas públicos de planejamento e gestão dos recursos hídricos em vigor em alguns estados no Brasil, conforme traz o estudo realizado por Araújo, Rodrigues e Nunes (2008).

Os únicos planos de segurança hídrica a nível de bacias em estados brasileiros encontrados foram os realizados para as bacias hidrográficas Metropolitanas e do Acaraú no Ceará (COGERH, 2018a; COGERH, 2018b). Estes estudos foram realizados em reservatórios considerados mais relevantes dentro da Bacia Metropolitana e da Bacia do Acaraú. A definição de segurança hídrica utilizada na sua elaboração foi a estabelecida pela ONU (2013). Na sua composição foram consideradas 5 fases: avaliação da segurança hídrica quantitativa, avaliação da segurança hídrica qualitativa, identificação das vulnerabilidades dos sistemas de suprimento de água em relação a quantidade e qualidade, definição de estratégias de mitigação das vulnerabilidades e gestão de riscos com vistas à promoção da segurança hídrica e programação de ações estruturais e não estruturais. Ao final da avaliação dos planos foram elencados 3 Níveis de Criticidade (NC) para os reservatórios analisados dentro das bacias, sendo que o nível I se enquadram reservatórios que não conseguem suprir suas demandas, o nível II contém os que satisfazem as demandas para abastecimento humano, mas são insuficientes nas demandas para irrigação e o nível III inclui aqueles que conseguem atender todas as suas demandas.

Os planos também trazem Estratégias e Ações para a Mitigação e Gestão dos Riscos. Algumas dessas ações envolvem a adequação da ocupação e uso do solo, atividade agrícola, prática piscícola intensiva, bovinocultura e infraestrutura de esgotamento sanitário. Para cada um dos reservatórios estudados foi feito um orçamento para implementação e tratamento de esgoto (fossa séptica ou rede) para o aglomerado de população a volta. Todas as ações priorizam as áreas enquadradas no NC I e II.

### 3.3 ASPECTOS LEGAIS

No Brasil, mesmo que indiretamente, diversas leis nacionais, estaduais e municipais trazem consigo o conceito de segurança hídrica e continuam a evoluir neste aspecto. As leis voltadas a proteção e gestão de recursos hídricos acabam por ter um destaque maior neste assunto. O Quadro 2 apresenta a legislação vigente no país.

Quadro 2: Legislação brasileira pertinente a segurança hídrica.

(continua)

Federal	Lei nº 9.433/1997 - Política Nacional de Recursos Hídricos	Garantia da disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados as gerações atuais e futuras, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos de forma sustentável e defesa contra eventos hidrológicos naturais críticos
	Lei nº 11.445/2007 - Política Nacional de Saneamento Básico	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico trazendo diversas ferramentas para a gestão e planejamento dos recursos hídricos. Dentre os seus princípios fundamentais está o abastecimento de água e esgotamento sanitário, visando a saúde pública, à conservação dos recursos naturais e à proteção do meio ambiente.
	Resolução CONAMA nº 357/2005	Define o enquadramento dos corpos de água em classes segundo os seus usos e os padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água
	Resolução CONAMA nº 396/2008	Define o enquadramento das águas subterrâneas e sua condição de qualidade.
	Portaria 2.914/2011	Caracteriza e estabelecer padrões de qualidade para a água potável e os métodos de avaliação e amostragem. Define que a água destinada ao consumo humano deverá não oferecer riscos à saúde e atender aos padrões de potabilidade estabelecidos por ela.
	Lei nº 14.066/2020 - Política Nacional de Segurança de Barragens	Busca garantia de padrões de segurança de barragens, prevenção de acidentes ou desastre e suas consequências, regulamentando as ações para monitoramento e procedimentos emergenciais nas etapas de planejamento, construção, operação, desativação e usos futuros da barragem.
	Lei nº 12.651/2012 - Código Florestal Brasileiro	Estabelece que no entorno de recursos hídricos são necessárias Áreas de Preservação Permanente (APP), podem estar cobertas ou não por vegetação nativa, com função de preservar os recursos hídricos e assegurar o bem-estar das populações humanas. A dimensão destas áreas varia conforme o tipo do recurso hídrico e a largura dos corpos d'água.
Estadual	Lei 10.350/1994 - Sistema Estadual de Recursos Hídricos	Reconhecendo que a água é um bem escasso e dotado de valor econômico, define a Bacia Hidrográfica como unidade básica de planejamento e gestão e implanta um sistema de outorga
	Resolução CONSEMA nº 355/2017	Critérios de emissão de efluentes líquidos em águas superficiais.
	Portaria SEMA nº 110/2018	Institui a obrigatoriedade do sistema de outorga SIOUT para os usos dos recursos hídricos no estado do Rio Grande do Sul

(conclusão)

Estadual	Lei nº 15.434/2020 - Código Estadual do Meio Ambiente	Considera como APP no entorno dos recursos hídricos e suas medidas mínimas aquelas normatizadas pela legislação federal no Código Florestal Brasileiro.
	Lei Complementar nº 589/2019 - Plano Diretor Municipal	Assegurar a existência e a conservação dos recursos hídricos necessários ao atendimento da população, das atividades econômicas e do meio ambiente do Município, garantindo a atual e as futuras gerações a necessária disponibilidade de água superficial e subterrânea em padrões de qualidade adequados ao uso.
Municipal	Lei Complementar 246/2005 - Conceitos e funções da Zona das Águas (ZA)	Estabelece conceitos e funções da ZA, bacias de captação e acumulação de água para o abastecimento do município e disciplina o uso e parcelamento do solo para estes espaços.
	Lei Complementar 558/2018 - Plano Municipal de Saneamento	Devem ser asseguradas a existência e a conservação dos recursos hídricos, em especial nas áreas das bacias de captação, necessários ao atendimento da população e das atividades produtivas do Município.
	Lei. Complementar 376/2010 - Política Municipal do Meio Ambiente	Define medidas proibitórias para controle de poluição das águas, reforça as demais leis sobre preservação dos ecossistemas, APP e o tratamento e disposição final de resíduos.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2020).

Do ponto de vista legal, o Brasil e o município de Caxias do Sul possuem diversas leis que, uma vez sendo seguidas, auxiliam na garantia da segurança hídrica. Cabe ao município por em prática políticas, planos e ações que reforcem e monitorem a aplicação destas leis, incentivando boas práticas dos moradores e empreendimentos que são diretamente afetados em caso de escassez de água.

### 3.4 DIMENSÕES DA SEGURANÇA HÍDRICA

Estudos relacionados à segurança hídrica geralmente acabam realizando uma abordagem da situação dos recursos hídricos em diferentes dimensões, que avaliam os diversos elementos relacionados à água.

Em um estudo realizado para a *Global Water Partnership* (GWP), Van Beek e Arriens (2014) explicam que a segurança hídrica pode ser tratada em 3 dimensões chaves, descritas no Quadro 3:

Quadro 3: Dimensões da segurança hídrica de Van Beek e Arriens.

Eficiência econômica	Aumento da produtividade e conservação da água em todos os setores de uso da água e compartilhamento de benefícios econômicos, sociais e ambientais na gestão de rios, lagos e aquíferos transfronteiriços.
Equidade social	Garantir acesso equitativo aos serviços e recursos hídricos para todos por meio de políticas robustas e estruturas legais em todos os níveis ao mesmo tempo em que cria resiliência nas comunidades em face de eventos hídricos extremos por meio de medidas rígidas e leves.
Sustentabilidade ambiental	Gerenciar a água de forma sustentável como parte de uma economia verde e restaurar os serviços do ecossistema nas bacias hidrográficas para melhorar a saúde do rio.

Fonte: Van Beek e Arriens (2014).

O Quadro 4 apresenta, conforme o Banco Asiático de Desenvolvimento (ASIAN DEVELOPMENT BANK, 2016) e *The Nature Conservancy*, (2020), que a segurança hídrica pode ser dividida em 5 dimensões:

Quadro 4: Dimensões da segurança hídrica do Banco Asiático de Desenvolvimento e *The Nature Conservancy*.

Doméstica	Fornecendo a todas as pessoas serviços confiáveis e seguros de água potável e saneamento.
Econômica	Uso produtivo da água para sustentar o crescimento econômico nos setores de produção de alimentos, indústria e energia.
Urbana	Criação de melhores serviços e gestão da água para apoiar cidades sensíveis à água e habitáveis.
Ambiental	Medição do progresso na restauração da saúde de rios, aquíferos e ecossistemas em escala nacional e regional.
Resiliência a desastres naturais	Construção de comunidades resilientes que podem se adaptar às mudanças e são capazes de reduzir o risco de desastres naturais relacionados à água, minimizando o impacto de desastres futuros

Fonte: Banco Asiático de Desenvolvimento (2016) e *The Nature Conservancy* (2020).

Em uma abordagem sobre a segurança hídrica urbana Romero-Lankao e Gnatz (2016), explicam que a interação de entre 5 domínios em conjunto com as

dinâmicas ambientais e a sociedade geram a segurança hídrica urbana. Os objetivos dos 5 domínios podem ser descritos conforme Quadro 5:

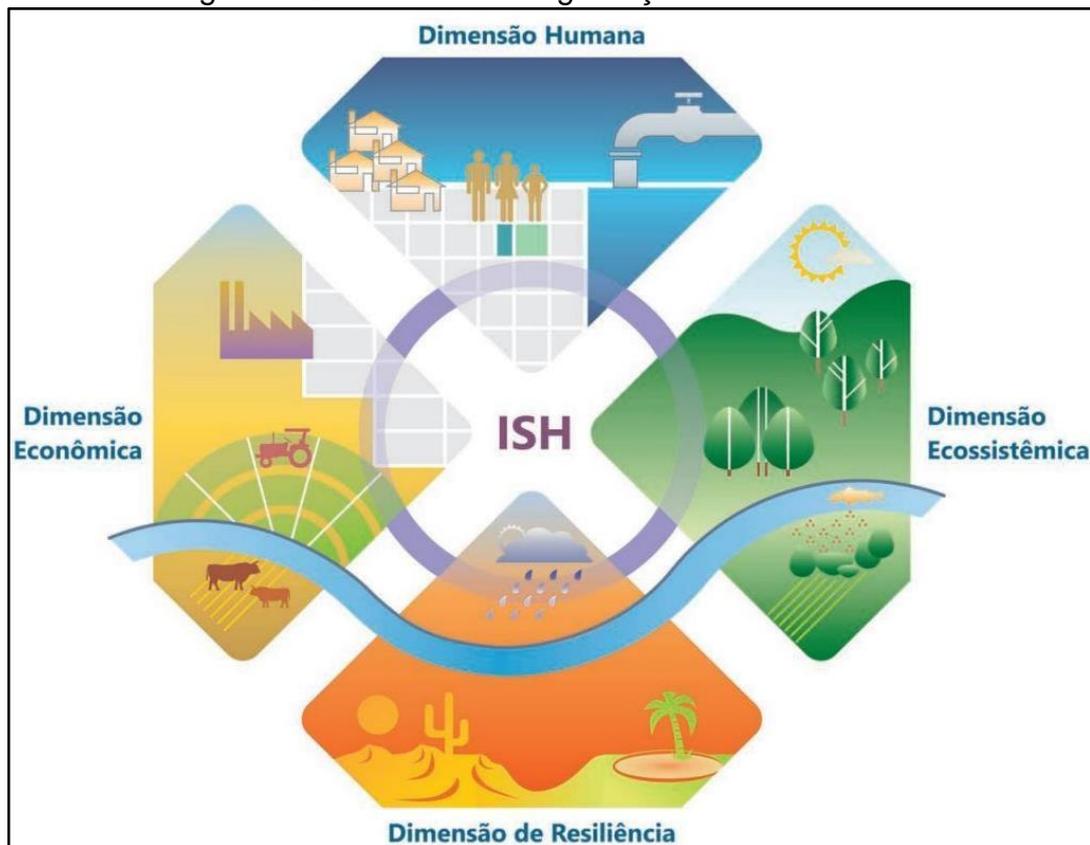
Quadro 5: Dimensões da segurança hídrica de Romero-Lankao e Gnatz.

Sociodemográfico	Atender de forma satisfatória as necessidades de água e saneamento dos usuários da região urbana e construir comunidades e ecossistemas resilientes que possam se adaptar de forma sustentável às mudanças.
Econômico	Estimula as atividades econômicas urbanas da indústria, agricultura e energia.
Tecnológico	Projetar e construir infraestruturas de abastecimento de água e saneamento (ou atualizar as existentes) para serem multifuncionais, redundantes, modulares (adaptáveis) e seguras contra falhas.
Ecológico	Manter ou restaurar corpos d'água e ecossistemas regionais.
Governança	Estimular instituições que gerenciam os recursos hídricos a serem capazes de equilibrar suas características conservadoras e reativas com a necessidade de serem adaptativas, justas e flexíveis.

Fonte: Romero-Lankao e Gnatz (2016).

O PNSH foi elaborado levando em consideração as 4 dimensões e conceito de Segurança Hídrica definidos pela ONU, sendo elas: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência conforme vista na Figura 1:

Figura 1: Dimensões da segurança hídrica do PNSH.



Fonte: PNSH (2019).

Embora os nomes e as quantidades das dimensões que cada estudo traz pode variar, os objetivos e intenções acabam por serem os mesmos. Para este estudo serão adotadas as definições de dimensões do PNSH descritas nos sub-itens abaixo.

### 3.4.1 Abastecimento Humano

Conforme já definido anteriormente, ter acesso a água em abundância não significa atingir um estado de segurança hídrica, pois a água em grande quantidade pode apresentar riscos em algumas situações, tais como enchentes, inundações e alagamentos que podem afetar direta ou indiretamente a população. Por outro lado, ainda que a quantidade de água seja suficiente para o seu uso, podem surgir riscos associados a fontes de poluição ou qualidade da água abaixo dos padrões estabelecidos. Conforme Augusto et al. (2012), os impactos ambientais relacionados aos poluentes, uso intensivo do solo para a agricultura e desmatamentos afetam negativamente a disponibilidade de água para consumo humano.

A *UN-WATER* (2018), explica que apesar de décadas de regulamentação e de grandes investimentos para reduzir fontes pontuais de poluição hídrica em países desenvolvidos, os desafios relacionados à qualidade da água permanecem devido às fontes de poluição hídrica difusas e àquelas sem regulamentação. Conforme a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2000) a água poluída é uma das grandes causas de escassez de água em termos de sua usabilidade, adicionando riscos e reduzindo as possibilidades de usos, gerando também efeitos a jusante.

Dentre os riscos relacionados à falta ou à precariedade do acesso à água pode apresentar, destaca-se os perigos à saúde humana. A má qualidade da água continua a representar uma grande ameaça à saúde humana (HATAMI, 2013) e melhorias na qualidade da água potável apresentam um benefício significativo para a saúde (OMS, 2008). Segundo Polasi et al. (2016) a água, o saneamento e a higiene têm grandes impactos na saúde e as doenças transmitidas pela água são causadas por microrganismos patogênicos que mais comumente são disseminados em águas contaminadas. A qualidade da água quanto a sua quantidade e regularidade de fornecimento são fatores determinantes para o acometimento de doenças no homem (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006).

Uma das causas de poluição nos corpos hídricos pode ser a contaminação por despejo de efluentes, como esgoto ou efluente doméstico não tratado. A capacidade de diluição de um corpo receptor deve considerar as condições iniciais da qualidade da água e a variação do regime hidrológico, impedindo o lançamento de cargas poluidoras que ultrapassem a sua capacidade de autodepuração (MARÇAL e SILVA, 2017). O fracasso contínuo em tratar o esgoto como um grande problema social e ambiental compromete os esforços para alcançar os objetivos do desenvolvimento sustentável (UN WATER e UNESCO, 2020).

A qualidade da água pode também ser severamente alterada por atividades antrópicas dentro de bacias de captação. Conforme explica Souza et al. (2017), o lançamento de esgotos domésticos sem tratamento adequado, a aplicação de agrotóxicos nas áreas de vazante, o lançamento de resíduos sólidos e rejeitos oriundos das atividades humanas degradam muito as águas dos reservatórios.

Para reduzir os impactos da falta ou excesso de água para diversos usos, os barramentos dos corpos hídricos podem ser realizados. Reservatórios podem fornecer água em tempo hábil para os seus usos produtivos, como na produção

agrícola e geração de energia, ao mesmo tempo que diminui os impactos hidrológicos, controlando enchentes e fornecendo água durante secas (SHAH, 2016).

Entretanto, apesar de apresentar muitos benefícios, a implantação de sistemas de armazenamento de água possui inevitavelmente *trade-offs* e impactos negativos. Por apresentar interdependências físicas, grandes sistemas de recursos hídricos e investimentos em uma grande infraestrutura hídrica afetam muitos setores e partes interessadas, tanto positiva quanto negativamente (WHITTINGTON, SADOFF e ALLAIRE, 2013).

Segundo Filho, Saad e Alvarenga (2010) a construção destes grandes reservatórios implicam em intervenções que alteram o equilíbrio de todos os componentes ambientais, mesmo adotando medidas preventivas, corretivas ou mitigadoras para o conjunto de impactos negativos.

Os autores ainda destacam outros impactos decorrentes de barramentos e instalações de represas, como a realocação da população das áreas de inundação; o corpo d'água formado com o represamento estabelece nova e totalmente diferente dinâmica nos processos naturais; a inundação causa impacto no habitat da fauna terrestre; as espécies de seres aquáticos sofrem expressivas modificações e gera impacto no regime hidrológico da bacia de contribuição hídrica para o reservatório, alterando a vazão dos rios no tempo e no espaço, incrementando a evaporação regionais e modificando o microclima da área do entorno.

### **3.4.2 Ecossistema**

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2020a), as interações entre os elementos de um ecossistema são chamadas de funções ecossistêmicas e dentre essas interações contam a regulação climática e do ciclo da água dentre outras. Essas funções geram serviços ecossistêmicos quando os processos naturais a suas interações desencadeiam benefícios direta ou indiretamente apropriáveis pelo ser humano.

Alahuhta et al. (2013) explicam que a compreensão dos serviços ecossistêmicos pode levar a uma melhor proteção e gestão de todos os ecossistemas, de modo que os serviços ecossistêmicos possam ser utilizados e garantidos de forma sustentável. Ainda segundo os autores, os serviços ecossistêmicos evidenciam a necessidade de integrar a proteção e o gerenciamento

de todos os tipos de ecossistemas, resultando na minimização das interações adversas e a maximização das interações sinérgicas, beneficiando as gerações presentes, futuras e toda a biosfera. Os ecossistemas aquáticos estão diretamente conectados aos ecossistemas terrestres naturais e artificiais, por isso, fontes de descarga antropogênicas podem distorcer os serviços de ciclos de trocas naturais, como a ciclagem de nutrientes (KOSENIUS et al., 2013)

Acidentes gerados em barragens de rejeitos de mineração, por sua vez, causam grande impacto na segurança hídrica. O método mais comum de disposição dos rejeitos da indústria mineral é o seu lançamento em lagos de decantação (aterros hidráulicos), represados por barragens (THOMÉ e PASSINI, 2018). Estas barragens precisam ser bem planejadas e monitoradas, passando por rigorosas inspeções para garantir a segurança de sua operação. No Brasil, planos de segurança de barragens são uma ferramenta do Plano Nacional de Segurança de Barragem, sendo exigidos para todas as barragens e aprovados pelo órgão regulador responsável pela sua outorga.

Um dos casos mais lembrados de desastre de ruptura da barragem no Brasil é o ocorrido em 2015 na cidade de Mariana em Minas Gerais. O acidente da barragem de Fundão lançou aproximadamente 40 milhões de metros cúbicos de rejeito, atingindo 663 quilômetros de rios e córregos, 1.469 hectares de vegetação, deixando dezenove mortos, dezenas de famílias desabrigadas e causando danos incalculáveis ao meio ambiente da região (THOMÉ e PASSINI, 2018). Foram registrados 19 óbitos e a região sofreu importantes impactos ambientais, sociais, econômicos, na saúde das pessoas e ecológico e na bacia do rio Doce e nos usos quali-quantitativos de suas águas (ANA, 2019b; POLIGNANO e LEMOS, 2020).

Em 2019 ocorreu o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão no município de Brumadinho em Belo Horizonte. Este acidente causou o despejo de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração de ferro, sendo identificadas 257 mortes e outras 13 pessoas desaparecidas (OLIVEIRA, ROHLFS e GARCIA, 2019; POLIGNANO e LEMOS, 2020). A contaminação por metais pesados na bacia do rio Paraopeba inviabilizou os usos da água e captações para abastecimento público nos trechos imediatamente a jusante do desastre (ANA, 2019b; OLIVEIRA, ROHLFS e GARCIA, 2019).

### 3.4.3 Economia

O consumo médio de água está fortemente relacionado com o nível de desenvolvimento do país e com o nível de renda das pessoas (MMA, 2005). Segundo Shah (2016), o que motiva a busca pelo aumento da segurança hídrica é o desenvolvimento econômico, onde a tendência é que países ricos têm segurança hídrica, não importa a quão limitada seja sua alocação de recursos hídricos, enquanto os países pobres não têm segurança hídrica, não importa quão abundantes sejam seus recursos hídricos.

A água desempenha um papel importante como recurso para a produção econômica, como seu uso na agricultura para irrigação, na produção de energia hidrelétrica e recreação (LOË et al., 2007). Os autores ainda comentam que a segurança hídrica é aprimorada por sistemas flexíveis de alocação de água fornecendo os recursos hídricos para atividades que tenham a maior eficiência técnica e econômica.

Uma análise econômica sobre a segurança hídrica foi realizada por Whittington, Sadoff e Allaire (2013), levantando a seguinte questão: qual seria o impacto econômico de se garantir ou falhar em alcançar um estado de segurança hídrica? Os autores destacam que não é recomendado tratar do valor econômico da segurança hídrica como um conceito abstrato, mas sim realizar uma comparação entre dois cenários com diferentes níveis de segurança hídrica, avaliando o benefício recebido e o valor econômico necessário e para se alcançar o nível maior de segurança hídrica. De acordo com este mesmo estudo, a análise do custo-benefício de projetos de segurança hídrica deve incluir explicitamente o custo do atraso ou hesitação, a fim de mostrar aos tomadores de decisão o cenário que poderia ser evitado por inação dos mesmos.

Avaliando os investimentos necessários para a contenção dos riscos atrelados à água, uma comparação com o conceito da redução da utilidade marginal da água (MANKIW, 2018, p. 6-7) pode ser aplicada para entender como este benefício pode ser percebido. Cada ação implementada para reduzir o risco se torna cada vez menos valiosa, até que em algum ponto este risco irá parecer tolerável em comparação ao custo (WHITTINGTON, SADOFF e ALLAIRE, 2013).

### 3.4.4 Resiliência

A dimensão resiliência está conectada a capacidade de resistir aos desastres que ocorrem devido à falta (secas) ou excesso (enchentes) de água. Muitos destes eventos extremos estão ligados a mudanças climáticas e suas consequências nos recursos hídricos. A mudança climática afeta a disponibilidade hídrica e a demanda de água e os eventos hidrológicos extremos exigirão a construção de infraestrutura para armazenar a água ou proteger contra seu excesso (OCDE, 2015).

A maioria dos impactos das mudanças climáticas antropogênicas afetará o ciclo da água, incluindo aumento na frequência de eventos de secas, inundações e ciclones (PEREIRA e FREITAS, 2017). Mudanças no clima serão amplificadas no ambiente aquático e a previsão é que o clima mundial será caracterizado por inundações e períodos de seca cada vez mais intensos. Os efeitos destas mudanças irão gerar diversos ajustes, como por exemplo, a agricultura terá que se adaptar aos novos padrões de chuva, os sistemas de saúde terão que lidar com mudanças na incidência de doenças, as infraestruturas, incluindo estradas e edifícios, terão que ser alteradas para acomodar mudanças nos padrões de precipitação e vazões dos rios (SADOFF e MULLER, 2009). A média mundial das perdas econômicas causadas pelas inundações e secas corresponde a mais de US\$ 40 bilhões por ano, em todos os setores econômicos (UN-WATER, 2018).

O PNSH trata desta dimensão como sendo a resiliência a eventos extremos. Segundo United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), resiliência pode ser definida como:

A capacidade de um sistema, comunidade ou sociedade exposta a perigos de resistir, absorver, acomodar, se adaptar, transformar e se recuperar dos efeitos de um perigo de maneira oportuna e eficiente, através da preservação e restauração de suas estruturas básicas essenciais e funções através da gestão de risco (UNDRR, 2020).

### 3.5 INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA

O termo indicador é definido como uma ferramenta, medida ou parâmetro que atua na simplificação e comunicação da informação (COUTO, 2018), podendo ajudar a incorporar o conhecimento das ciências físicas e sociais na tomada de decisões e

podem ajudar a medir e calibrar o progresso em direção às metas de desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS, 2007). O Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2020b), explica que indicadores ambientais são estatísticas selecionadas que representam ou resumem alguns aspectos do estado do meio ambiente, dos recursos naturais e de atividades humanas relacionadas.

Os indicadores ambientais revelam-se ainda de suma importância para os tomadores de decisão, uma vez que os mesmos podem ser úteis a fim de antever problemas, evitando-se, assim, danos econômicos, sociais e ambientais (UNEP, 2001). Garriga e Foguet (2013) explicam que índices e indicadores são cada vez mais reconhecidos como ferramentas poderosas no desenvolvimento de instrumentos de gestão que apoiem nas tomadas de decisão sobre os diversos usos da água.

Em contrapartida, alguns autores destacam que na avaliação dos indicadores existe certa subjetividade, dependente de uma avaliação arbitrária sobre o que é aceitável ou inaceitável com relação ao desempenho do sistema (LOUCKS, 1997). Van Ginkel et al. (2018) ressaltam que incertezas emergem da interpretação qualitativa da literatura e subjetividade dos dados quantitativos, por isso os resultados devem ser interpretados com cautela.

Diversos índices e indicadores são aplicados para avaliar, medir e comparar o desempenho da sustentabilidade hídrica e definir as prioridades para a intervenção de políticas a respeito da água (EL-GAFY, 2018). A autora destaca que dentre os índices e indicadores aplicados com maior frequência na gestão dos recursos hídricos estão o índice de disponibilidade hídrica, índice de escassez de água, índice de vulnerabilidade de recursos hídricos, índice de estresse hídrico social, indicador de estresse hídrico e o índice de pobreza hídrica.

O monitoramento da segurança hídrica também pode ser realizado através de indicadores. Conforme Van Beek e Arriens (2014), indicadores de segurança hídrica devem ser quantificáveis e preferencialmente baseados em dados disponíveis e complementado com opinião de especialistas. Lautze e Mathrithilake (2012) explicam que existem vários benefícios em representar a segurança hídrica em termos numéricos, trazendo clareza e entendimento ao seu conceito, ajudando a gerar discussão e facilita a avaliação de até que ponto o conceito está realmente sendo alcançado em diferentes locais.

### 3.5.1 Indicadores do Plano Nacional de Segurança Hídrica

Para ilustrar a segurança hídrica nacional, o PNSH apresentou um Índice de segurança hídrica, definindo indicadores categorizados dentro de 4 dimensões: Humana, Ecológica, Econômica e Resiliência.

Segundo o PNSH (ANA, 2019c), a dimensão que aborda o abastecimento é denominada humana, avaliando a garantia da oferta de água para o abastecimento. Esta dimensão só possui um indicador, que mede a disponibilidade hídrica dos mananciais superficiais e subterrâneos utilizados para abastecimento da população. Para isso é aplicado o cálculo para o balanço hídrico nos pontos de captação, e define-se os percentuais da população exposta a situações de desabastecimento. Outro fator utilizado para esse indicador é o nível de cobertura da rede urbana de distribuição de água.

A dimensão ecológica é avaliada por indicadores de qualidade da água e a disponibilidade ao meio ambiente. Possui três objetivos, buscando sinalizar a vulnerabilidade dos mananciais quanto a quantidade suficiente para usos ecológicos, qualidade adequada para manutenção da vida aquática e riscos ambientais decorrentes de rompimentos de barragens de rejeitos de mineração (ANA, 2019c). Os indicadores podem ser observados no Quadro 6 abaixo:

Quadro 6: Indicadores da dimensão Ecológica do PNSH.

Quantidade adequada de água para usos naturais	Contempla a quantidade mínima de vazão necessária para atendimento às demandas para usos naturais (sobrevivência da biota aquática) em um determinado trecho de curso d'água, representada pela razão entre a vazão remanescente do trecho após as retiradas de usos consuntivos e a vazão natural com permanência de 95% no trecho (Q95%).
Qualidade adequada da água para usos naturais	Avaliada mediante a análise das concentrações de DBO <sub>5,20</sub> nos cursos d'água, considerando padrões definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Os dados utilizados foram retirados do Atlas Esgotos da ANA.
Segurança das barragens de rejeitos	Considera a existência de um total de mais de 700 barragens de rejeitos de mineração no país em 2017 e os danos potenciais (impactos) nos trechos de jusante decorrentes de um eventual rompimento, com base na avaliação da sua condição de segurança (risco de rompimento).

Fonte: Ana (2019c).

A dimensão econômica do PNSH conforme (ANA, 2019c), trata das possíveis

utilizações dos recursos hídricos nos setores de produção do país, principalmente os usos para a agricultura, pecuária, extrativismo e setor industrial. Estes setores representam o uso mais expressivo dentro do território nacional. Os indicadores desta dimensão foram calculados através da quantificação das perdas econômicas resultantes da variabilidade da oferta hídrica e são os descritos no Quadro 7:

Quadro 7: Indicadores da dimensão Econômica do PNSH.

Garantia de água para irrigação e pecuária	Valor da produção agrícola e da criação animal perdida no caso de oferta hídrica insuficiente. Foi obtido com emprego do Valor Adicionado Bruto da produção primária (VAB Agropecuário) municipal e do resultado do balanço hídrico para irrigação e dessedentação animal.
Garantia de água para a atividade industrial	Valor da produção industrial perdida em condições de escassez hídrica, quantificado com utilização do Valor Adicionado Bruto da produção secundária (VAB industrial) municipal e do resultado do balanço hídrico para abastecimento industrial.

Fonte: Ana (2019c).

A dimensão de resiliência do ISH expressa o potencial dos estoques de água naturais e artificiais. A análise dessa dimensão permite identificar as áreas com menor grau de resiliência, em que um balanço hídrico deficitário é mais crítico devido à alta variabilidade pluviométrica somada à ausência de reservatórios ou de águas subterrâneas (ANA, 2019c). Os indicadores utilizados para esta dimensão do índice são os apresentados no Quadro 8:

Quadro 8: Indicadores da dimensão Resiliência do PNSH.

Reservação artificial	Oferta potencial de água fornecida pelo conjunto de reservatórios artificiais existentes no País.
Reservação natural	Oferta natural de água nos rios, representada pela relação entre a vazão média dos cursos d'água e a vazão de estiagem.
Potencial de armazenamento subterrâneo	Estoque de águas subterrâneas nos aquíferos do País, estimado com base no coeficiente de infiltração (CI), representado, no presente caso, pelo valor médio desse coeficiente para cada tipo de aquífero.
Variabilidade pluviométrica	Representada pelo coeficiente de variação (CV) de 3.368 séries de precipitação anual, espacializado para todo o território nacional.

Fonte: Ana (2019c).

### 3.6 MÉTODOS PARA ESCOLHA DE INDICADORES

Mesmo existindo um plano nacional específico para avaliar a segurança hídrica do Brasil, é importante avaliar as características próprias de cada município. Conforme Tahir e Darton (2010), o uso de conjuntos generalizados de indicadores apresenta um problema prático fundamental quando utilizado em locais específicos, pois foram projetados para aplicação em grandes áreas geográficas, não refletindo as questões intrínsecas relevantes. Em menor escala, fatores particulares a certas regiões podem ter peso maior ou menor na avaliação da segurança hídrica local. Este fator pode levar a conclusões precipitadas que não condizem com a situação real dos municípios frente a possíveis cenários futuros de demanda hídrica.

Com uma avaliação mais precisa e estudos aprofundados foi possível confirmar se a métrica utilizada no PNSH pode ser aplicada para a área de estudo ou se modificações devem ser implantadas, para se chegar ao melhor resultado possível para o planejamento a nível municipal. Para a elaboração de um conjunto de indicadores é necessário inicialmente se estabelecer uma definição do assunto a ser avaliado e que propósito estes indicadores devem servir (TAHIR e DARTON, 2010).

#### 3.6.1 DPSIR

Um dos modelos mais usados para sistematizar problemas ambientais é o sistema DPSIR (Força Motriz, Pressão, Estado, Impacto e Resposta) (FELINTO, RIBEIRO e BRAGA, 2019). Este método foi desenvolvido a partir do modelo PSR (Pressão, Estado e Resposta), inicialmente proposto por Rapport e Friend (1979) e utilizado para solucionar problemas em diversas aplicações (PATRÍCIO et al., 2016). O método é baseada na relação entre os efeitos gerados por intervenção de atividades humanas no meio ambiente (Pressão), as mudanças geradas nos recursos naturais (Estado) e a resposta que a sociedade apresenta através das mudanças econômicas, ambientais e políticas (Resposta) (FELINTO, RIBEIRO e BRAGA, 2019; OCDE, 1993). O modelo DPSIR adiciona ainda a Força Motriz, sendo as atividades humanas básicas para o desenvolvimento que geram Pressão no ambiente e o Impacto, que são os efeitos observados no Estado e geram uma Resposta na sociedade (NETO, 2013; PATRÍCIO et al., 2016).

Porém estes métodos possuem algumas falhas, devido principalmente a

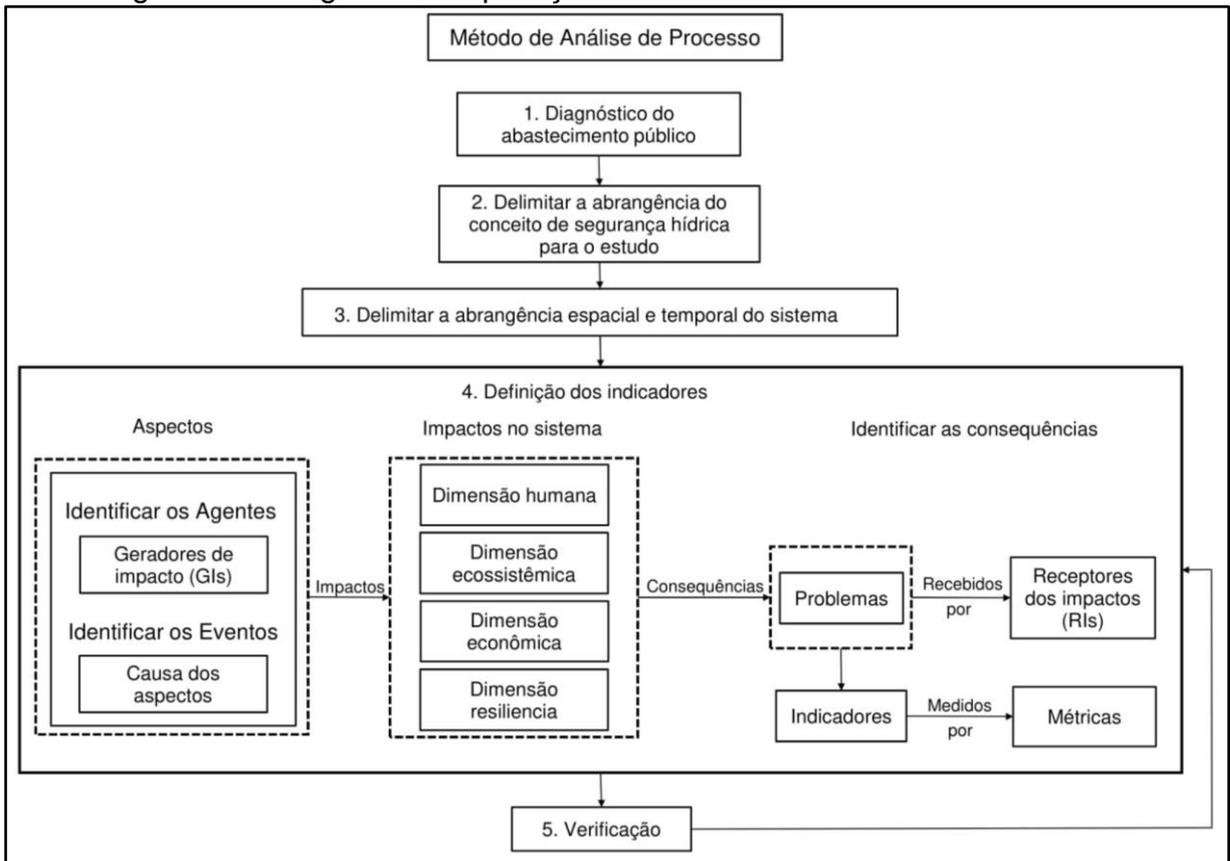
distintas interpretações das suas componentes por cada autor e a simplificação dos problemas ambientais, onde estas interações presentes no mundo real são muito mais complexas e não podem ser adequadamente compreendidas por relações causais simples na análise de sistemas (EDITH e ROB, 1999; NETO, 2013; PATRÍCIO et al., 2016).

### **3.6.2 Método de Análise de Processo**

Para ajudar um empreendimento a definir indicadores de sustentabilidade sem exigir enorme esforço para determinar o grande número de relações entre forças motrizes, impactos e respostas que o método DPSIR apresenta, Tahir e Darton (2010) criaram o Método de Análise de Processo. Este método foca nos geradores do impacto, os impactos e os receptores do impacto dentro do sistema ao invés da dinâmica de interação entre causas e efeitos.

Desenvolvido inicialmente para avaliar a sustentabilidade em empreendimentos, também já foi aplicado em estudos com a finalidade de encontrar indicadores de segurança hídrica urbana (JENSEN; WU, 2018), sustentabilidade em bacias (WU, DARTON e BORTHWICK, 2015) e análise de água subterrânea (ETMANNSKI; DARTON, 2014). Para encontrar os indicadores, o método envolve a aplicação de 5 passos, identificados em detalhe no fluxograma da Figura 2:

Figura 2: Fluxograma da aplicação do Método de Análise de Processo.



Fonte: Adaptado de Tahir e Darton (2010), Jensen e Wu (2018) e Moura (2005).

O primeiro passo inclui uma parte da caracterização da área de estudo, onde é realizado um diagnóstico do abastecimento público. O segundo passo requer a seleção de uma definição apropriada para o termo a ser estudado, estabelecendo uma referência na qual o sistema será avaliado. O terceiro passo é a delimitação temporal e espacial da área de estudo. O quarto passo é onde acontece a escolha dos indicadores com base nas definições anteriores, levantando os principais geradores e receptores de impacto nos limites da área de estudo. O último passo é a verificação dos resultados encontrados, onde especialistas da área de estudo e as partes interessadas avaliam os indicadores até que se encontre um conjunto final de indicadores e métricas adequado ao local de estudo. Conforme Jensen e Wu (2018), esta metodologia fornece diretrizes transparentes para a seleção de indicadores ao mesmo tempo que permite flexibilidade e adaptação a casos específicos, apresentando resultados simplificados, porém significativos.

### 3.7 MODELAGEM HIDROLÓGICA

O conhecimento da quantidade de água nos rios e nos arroios é de grande interesse dos engenheiros de recursos hídricos, pois ela representa o produto final do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica (DAVIE e QUINN, 2019) e permite analisar os efeitos das ações antrópicas sobre o ambiente, bem como avaliar a sustentabilidade ambiental (BONUMÁ et al., 2013). A quantificação do escoamento superficial é uma tarefa complexa e dependente de vários fatores, os quais são agregados a parâmetros ou variáveis em modelos de chuva-vazão (SARTORI, GENOVEZ e NETO, 2005). Os modelos hidrológicos chuva-vazão são aplicados com o objetivo de simular a resposta da bacia em termos de vazão a partir de uma precipitação conhecida, mas utilizam diversas simplificações, tornando o modelo imperfeito ao mesmo tempo que permite compreender melhor a natureza (GONÇALVES, 2008; MOREIRA, 2005).

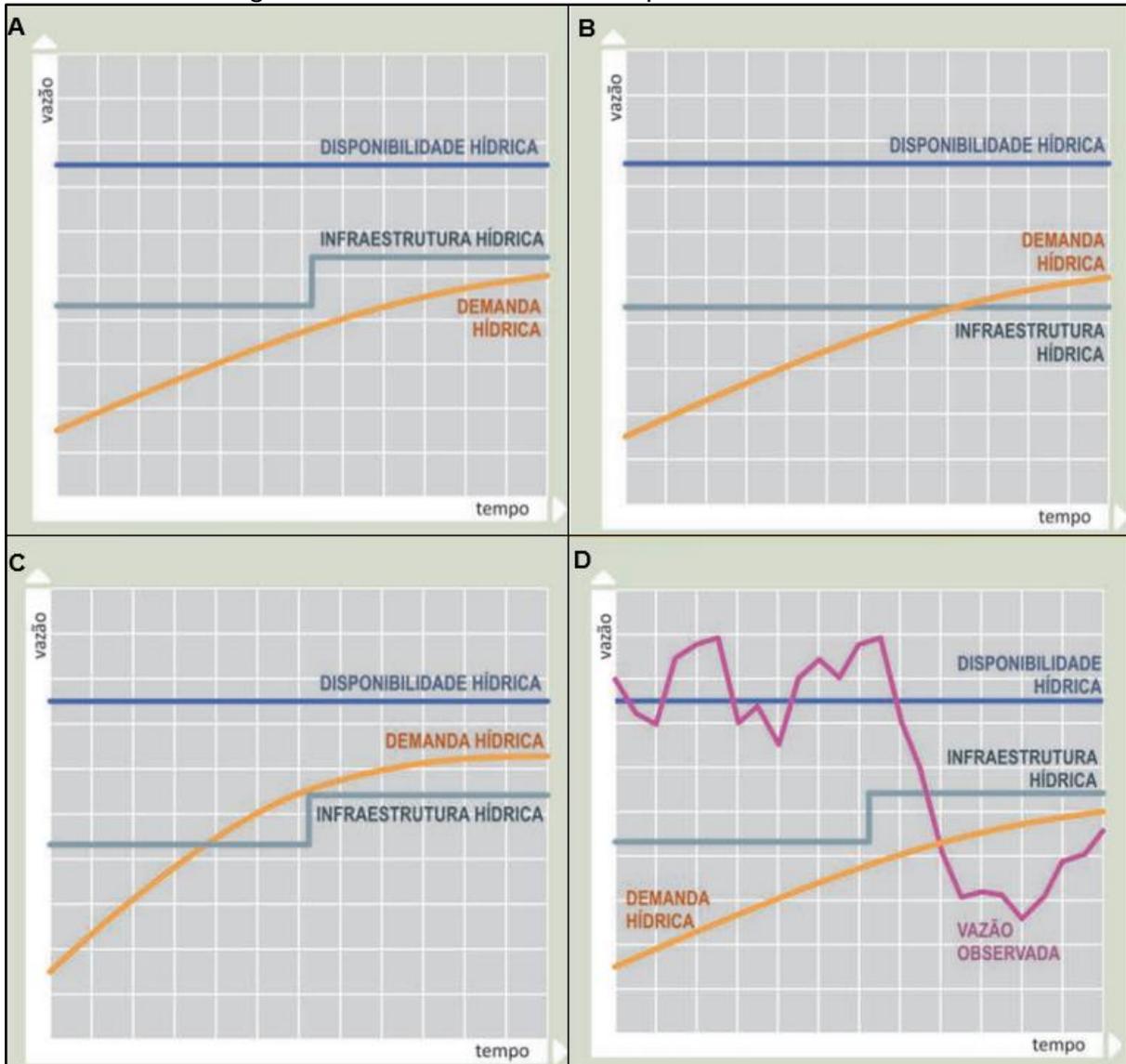
Em uma modelagem hidrológica é possível quantificar as vazões encontradas em certo período em uma bacia hidrográfica, envolvendo as condições edafoclimáticas referentes a área de estudo. A modelagem de uma bacia que não possui dados monitorados gera incertezas, sendo necessária a aplicação de métodos alternativos para contornar a falta de informação disponível. Para o usuário, o interesse de um certo modelo reside na capacidade de fornecer uma resposta satisfatória às perguntas feitas sobre o objeto modelado (MOKHTARI, REMINI e HAMOUDI, 2016). A estrutura de teste hierárquica pode ser aplicada neste caso, onde diferentes abordagens são ordenadas de acordo com a possibilidade de transferir os resultados do modelo para diferentes usos do solo, clima e outras formas de mudanças ambientais (SANTOS et al., 2018).

A avaliação do potencial hídrico da região pode ser verificada através da curva de permanência e vazões médias, encontradas a partir das vazões modeladas. O conhecimento das vazões de permanência de um curso d'água é de relevante importância para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (COSTA et al., 2012). Segundo Vogel e Fennessey (1995), a curva de permanência mostra a porcentagem de tempo que certa vazão é igualada ou excedida durante um certo período de tempo, podendo ser utilizadas em estudos hidrológicos de uso da água, sedimentação, qualidade da água, controle de cheias e dimensionamento de hidrelétricas. Já a vazão média de longo período ( $Q_{mlp}$ ) demonstra a média das vazões médias anuais para toda a série de dados, permitindo encontrar a maior vazão

possível de ser regularizada em certa bacia (ALEXANDRE; MARTINS, 2005).

O PNSH (ANA, 2019c) apresenta algumas curvas teóricas de disponibilidade hídrica, infraestrutura e demanda hídrica, podendo ser vistas na Figura 3. O objetivo destas curvas é relacionar eventos que causam insegurança hídrica com a vazão ao longo do tempo.

Figura 3: Curvas teóricas de disponibilidade hídrica.



A- Balanço hídrico equilibrado; B- Infraestrutura hídrica e gestão insuficientes; C- Aumento dos usos; D- Evento climático extremo.

Fonte: ANA (2019c)

Em casos que o balanço hídrico é equilibrado (Figura 3A), a infraestrutura é construída de forma que cubra a demanda. Os valores de infraestrutura e demanda não alcançam a disponibilidade hídrica total.

Quando a infraestrutura e gestão são insuficientes (Figura 3B), a demanda continua aumentando ao longo do tempo sem um planejamento de expansão e implantação de infraestrutura aconteça, causando racionamento e falta de água.

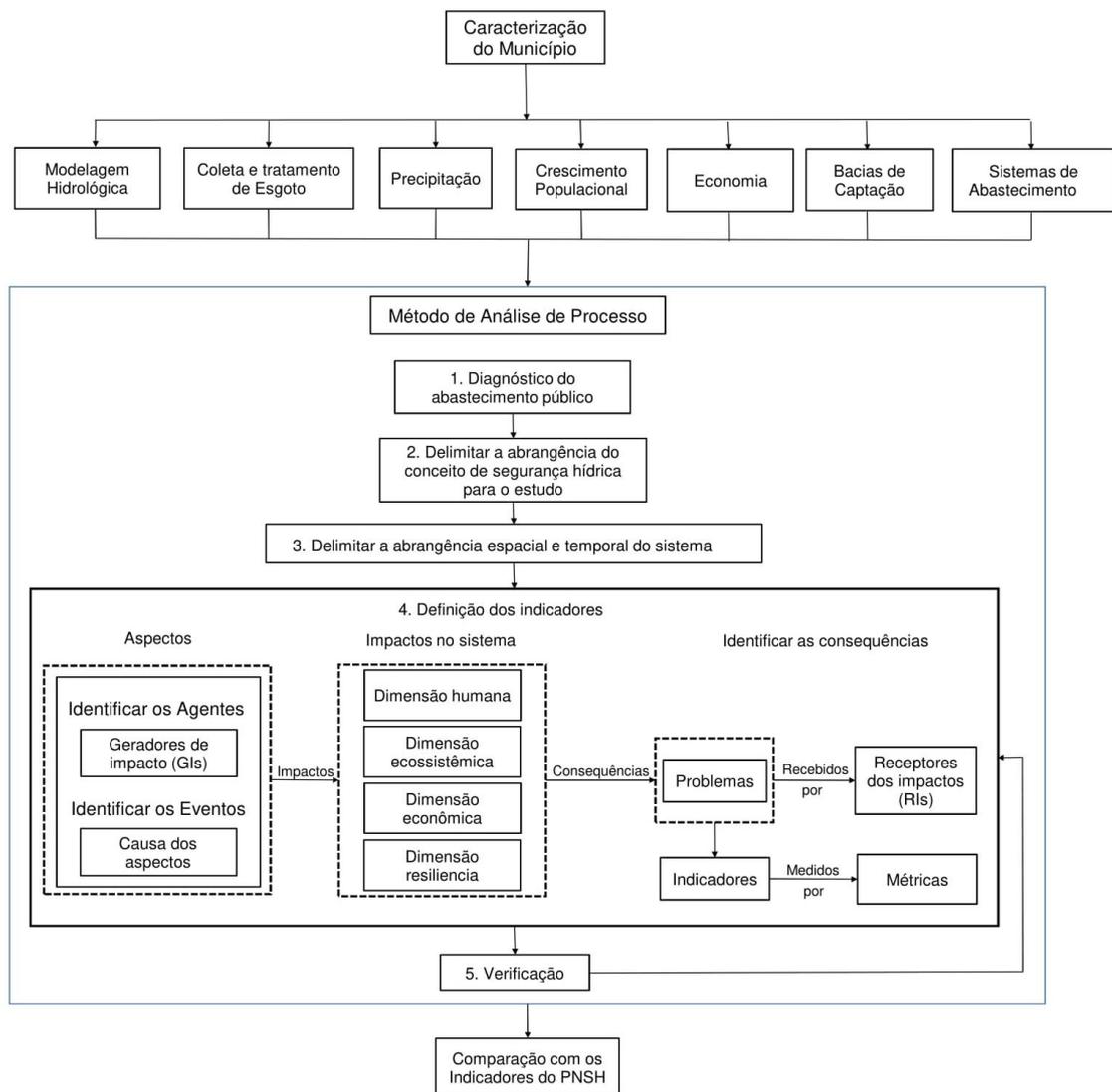
Se o aumento dos usos de água ocorrer sem o planejamento correto (Figura 3C), a demanda começa a chegar muito perto da disponibilidade. Neste caso a implantação tardia de infraestrutura atende a demanda por pouco tempo antes que a demanda volte a ultrapassar a estrutura novamente.

Eventos climáticos extremos podem acontecer, resultando na variação da vazão observada e períodos em que vazão disponível seja menor que a demanda, mesmo existindo infraestrutura suficiente para o abastecimento (Figura 3D).

## 4. METODOLOGIA

Este estudo busca selecionar indicadores para avaliar a segurança hídrica no município de Caxias do Sul. Para isto foram avaliadas as características relevantes do município e encontrar indicadores que consigam retratar o estado da segurança hídrica. O fluxograma da Figura 4 mostra as etapas da metodologia que foram aplicadas neste estudo.

Figura 4: Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autor (2021).

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A primeira etapa foi a caracterização da área de estudo, que abrange o município de Caxias do Sul. Nesta etapa foi realizado um diagnóstico do sistema de

abastecimento de água, descrevendo as informações relevantes sobre os barramentos, bacias de captação, sistemas de captação, tratamento e abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto e precipitação. Estes dados foram obtidos através do banco de dados do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMA E), a autarquia responsável pelos serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário de Caxias do Sul.

As demais informações demográficas e socioeconômicas do município, como o PIB, PIB *per capita*, VAB e população também foram apresentadas e analisadas para contextualizar o município quanto às suas principais forças motrizes e possíveis geradores de impacto à segurança hídrica. Os dados econômicos foram retirados de relatórios do Departamento de Economia e Estatística (DEE) e Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser (FEE), ambos vinculados a Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Governo do Estado do Rio Grande do Sul (SPGG-RS), Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae/RS) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Utilizando informações fornecidas pelo município e pelo IBGE, os dados populacionais desde 2000 até 2020 foram utilizados para projetar a população até 2050. Para este cálculo foram comparados os resultados obtidos através da aplicação dos métodos da taxa decrescente de crescimento e projeção geométrica.

#### **4.1.1 Modelagem Hidrológica**

A disponibilidade hídrica do município foi analisada através da Q50 das bacias de captação do município obtidas através das curvas de permanência geradas conforme resultados das modelagens hidrológicas realizada a partir da aplicação do modelo hierárquico de Klemes para cada bacia de captação em conjunto com os dados de volumes dos barramentos e quantidade consumida fornecidas pelo SAMA E.

##### **4.1.1.1 Modelo Hierárquico de Klemes**

O modelo hierárquico de Klemes (1986) propõe a divisão das simulações em duas categorias: (1) condições estacionárias, onde as características da bacia não se alteram significativamente ao longo do tempo e (2) condições não estacionárias,

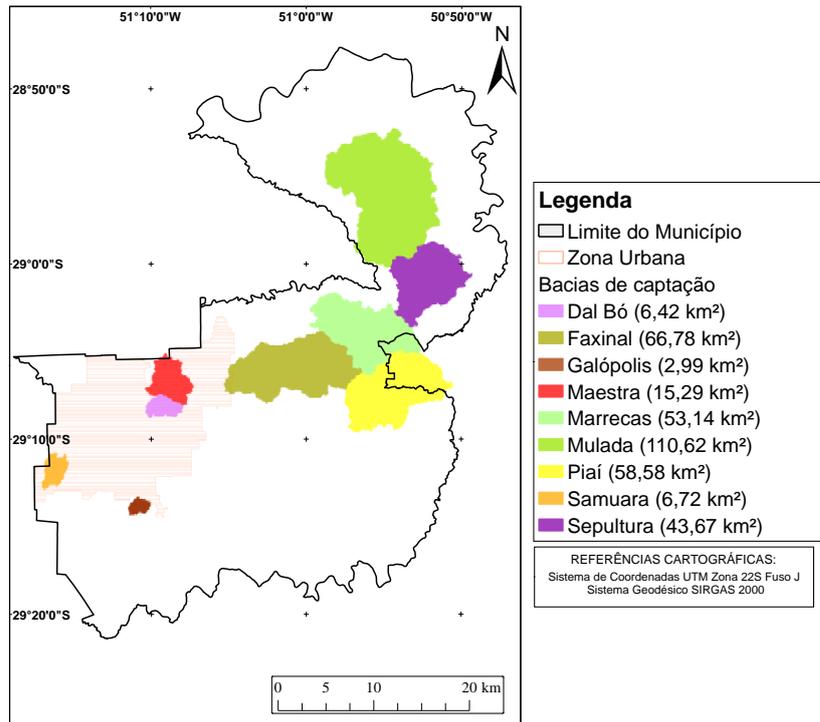
modelando as vazões em bacias que passaram por mudanças climáticas ou no uso do solo. Estas categorias ainda podem ser divididas em dois subgrupos, (a) onde a calibração e validação ocorrem na mesma bacia ou (b) em bacias deferentes. Conectando as categorias com os possíveis subgrupos, surge o método organizado de maneira hierárquica conforme a complexidade da modelagem e validação. O primeiro é o teste de divisão da amostra (1a, *split sample test*) onde os dados observados disponíveis são divididos em dois períodos, utilizando uma parte para a calibração e o restante para a validação.

O teste diferencial de divisão de amostra (2a, *differential split-sample test*) consiste na divisão dos dados observados considerando desta vez a precipitação na bacia, separando os períodos com maior (úmido) ou menor (seco) precipitação. O teste da bacia substituta (1b, *proxy-basin test*), utiliza duas bacias (ex: A e B), onde o modelo é calibrado nas condições observadas para a bacia A e validado na bacia B e vice-versa. O teste diferencial de divisão de amostra da bacia substituta (2b, *proxy-basin differential split-sample test*) é utilizado para modelar bacias com diferentes condições climáticas e de uso do solo, onde uma bacia C, que não possui dados observados, pode ser modelada utilizando os parâmetros obtidos da validação das bacias A e B calibradas e validadas para os períodos chuvoso e secos.

Para aplicação (calibração e validação) do método hierárquico proposto por Klemes (1986) foram utilizados os dados das bacias Piaí e Sepultura, cuja o mapa de localização juntamente com as demais bacias de captação do município pode ser visto na Figura 5. O mapa contendo os dados de tipo e uso do solo para as bacias Piaí e Sepultura são apresentados na Figura 6. Os dados de tipo de solo foram obtidos de Flores et al. (2007), classificados conforme Embrapa (2018) e o uso do solo vem da vetorização realizada em software de geoprocessamento fornecida pelo SAMAE.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) das bacias foi obtido da ferramenta *Topo to Raster* do software ArcGIS versão 10.7.1 (ESRI, 2020). O MDE da bacia Sepultura vem das curvas de nível de 5m da restituição de imagem de satélite para município em 2011. O MDE da bacia Piaí utilizou imagem de satélite SRTM com resolução espacial de 30m. As altitudes das bacias variam de 720 até 934 metros e 765 até 945 metros para Piaí e Sepultura respectivamente.

Figura 5: Mapa de localização das bacias de captação.



Fonte: Adaptado de GeoCaxias (2021).

Figura 6: Mapa de identificação dos tipos e uso do solo nas bacias Piaí e Sepultura.

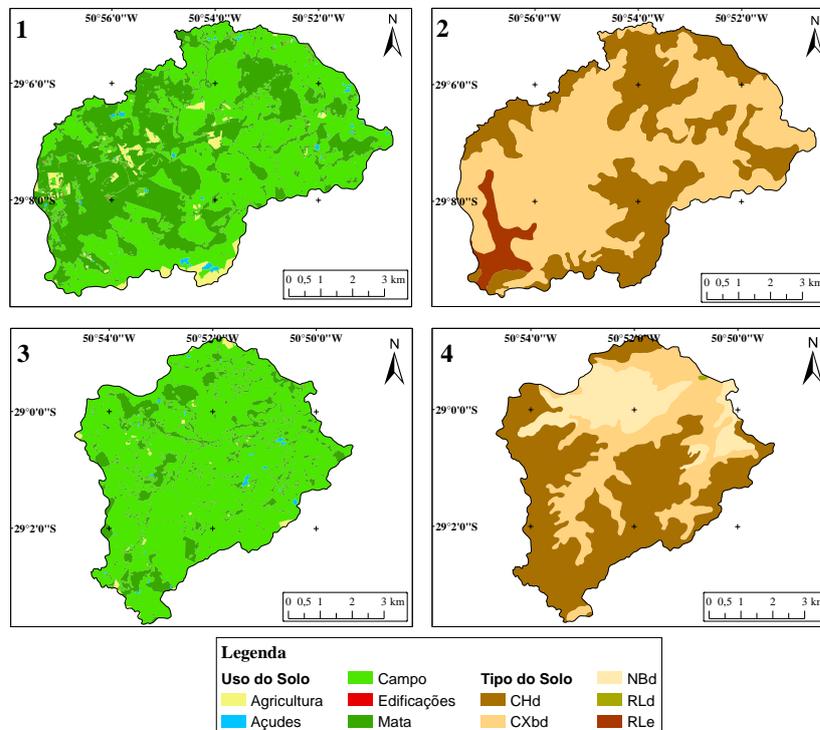


Figura 5B: Vetorização do uso do solo e tipos de solo encontrados nas bacias Piaí e Sepultura. (1) uso do solo da bacia Piaí; (2) tipo do solo da bacia Piaí; (3) uso do solo da bacia Sepultura; (4) tipo do solo bacia Sepultura.

Fonte: Autor (2021).

#### 4.1.1.2 Pluviômetros

Para os dados de entrada de precipitação no modelo chuva-vazão foram utilizados os pluviômetros mais próximos de cada bacia. A Tabela 1 mostra os dados de cada um dos 11 pluviômetros utilizados.

Tabela 1: Identificação da rede pluviométrica utilizada no estudo.

Nome <sup>1</sup>	Código da Estação	Início de Operação	Operador	Latitude	Longitude
Piaí	1	2005	SAMAE	-29,15	-50,95
Parque da Imprensa	2	2010	SAMAE	-29,17	-51,16
Sepultura	3	2011	SAMAE	-28,99	-50,84
Ana Rech	4	2011	SAMAE	-29,1	-51,08
Maestra	5	2011	SAMAE	-29,11	-51,17
Morro Alegre	6	2011	SAMAE	-29,08	-50,96
Galópolis	7	2012	SAMAE	-29,23	-51,17
São Paulo da Cruz	8	2012	SAMAE	-29,2	-51,27
Mulada	9	2011	SAMAE	-28,88	-50,93
Vila Seca <sup>2</sup>	10	1944	CPRM	-29,07	-50,97
Serrano <sup>3</sup>	11	2011	SAMAE	-29,12	-51,15

<sup>1</sup>Nome do pluviômetro está associado ao local em que se encontra ou à bacia de captação na qual se insere.

<sup>2</sup>Os dados do pluviômetro de Vila Seca são periodicamente obtidos junto ao banco de dados do sistema Hidroweb disponível no endereço eletrônico da Agência Nacional de Águas.

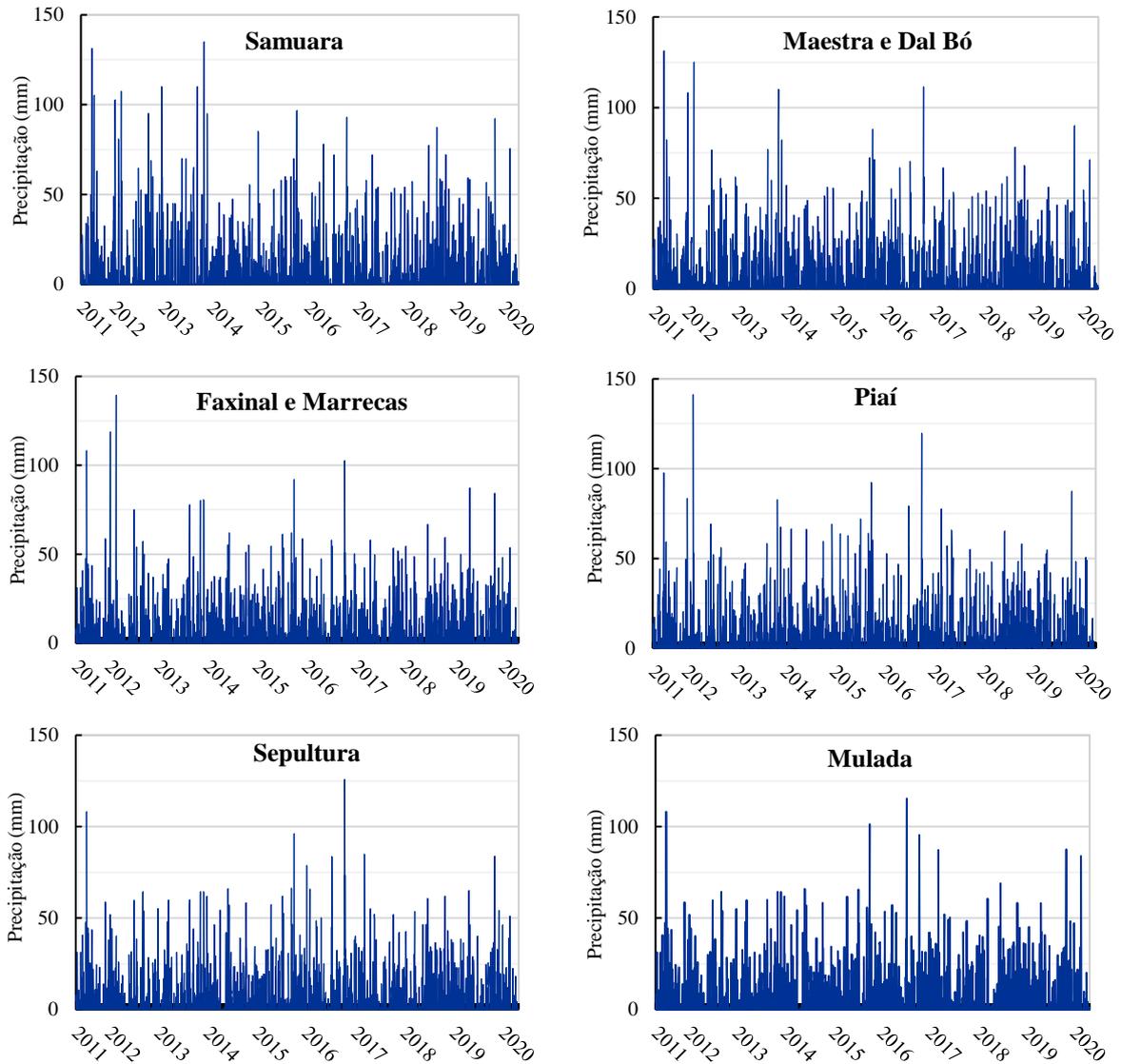
<sup>3</sup>Desativado em 2014.

Latitude e longitude informadas em grau no Sistema Geográfico de coordenadas.

Fonte: Adaptado de Belladonna e De Vargas (2017).

As análises das chuvas e das vazões dos rios são geralmente feitas tomando como referência o ano hidrológico (ANA, 2018). Os dados de precipitação têm início em maio de 2011 e terminam em abril de 2020, utilizando o ano hidrológico para a região (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Os gráficos da Figura 7 mostram as precipitações registradas para cada bacia ao longo dos 10 anos analisados. Os dados de vazão utilizados foram obtidos junto ao SAMAE.

Figura 7: Gráficos de precipitação registradas nas bacias de captação (abril de 2011 até maio 2020).



Fonte: Autor (2021).

#### 4.1.1.3 HEC-HMS

O software HEC-HMS permite o processamento de cálculos e análise de escoamento em bacias hidrográficas, possibilitando formular vários processos hidrológicos, entre eles, os processos de transformação de precipitação em escoamento superficial, possibilitando melhor entendimento dos processos hidrológicos (CRUZ, 2019; LAZZARI et al., 2019; OLEYIBLO e LI, 2010; SANTOS, 2016b). Este estudo utilizou o software HEC-HMS versão 4.3 (USACE, 2018),

baseado no modelo CN-SCS (Curve Number – Soil Conservation Service) e no método de transformação do Hidrograma Unitário de Clark. A equação para o cálculo do tempo de concentração foi escolhida conforme Silveira (2005), onde a fórmula de Simas-Hawkins foi considerada a mais adequada. O CN inicial foi escolhido conforme análise do uso do solo e tipo do solo vistos na Figura 6. Os demais dados de entrada foram arbitrados conforme conhecimento prévio das bacias de captação pelos autores. A calibração automática do modelo foi realizada através da função objetivo de minimização da Raiz do Erro Quadrático Médio (Equação 1), para todos os parâmetros inseridos no modelo. Nesta equação o  $Y_i^{obs}$  representa o valor observado, sendo correspondente a simulação de número  $i$  dentro das  $n$  simulações totais realizadas na modelagem.  $Y_i^{sim}$  representa o valor simulado correspondente ao mesmo número  $i$  da modelagem. Os resultados estatísticos utilizados foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe e o viés, calculados no próprio software.

$$REQM = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \quad (1)$$

#### 4.1.1.4 Calibração e Validação

Devido a série histórica de monitoramento das vazões ser relativamente pequena e conter diversas falhas, a calibração utilizou 11 dias, no período de 21 de outubro até 31 de outubro de 2005. Já a validação foi no período de 20 de abril até 30 de abril de 2008.

Para a próxima etapa do modelo hierárquico, foi definido através da análise da série histórica das médias mensais de precipitações para o município que o mês de maio seria o menos chuvoso (seco) e o mês de outubro teria maiores precipitações (úmido). Conforme Klemes (1986), se o modelo se destina a simular a vazão para um cenário de clima úmido, ele deve ser calibrado em um segmento seco do registro histórico e validado em um segmento úmido. O modelo então foi inicialmente calibrado para o período seco (maio de 2013) e validado no período úmido (outubro de 2013). Para os dados iniciais foram inseridos no *software* os resultados da modelagem anterior.

Para confirmar que o modelo é transponível climaticamente e geograficamente, foram utilizados os parâmetros da bacia Piaí, resultantes da calibração no período

seco e validados no período húmido, submetidos aos dados observados na bacia Sepultura. A validação foi realizada para o único período encontrado com dados disponíveis na bacia Sepultura (11 de julho até 31 de agosto de 2013) que pode ser considerado como úmido.

#### 4.1.1.5 Modelagem das Vazões

Buscando encontrar resultados mais precisos de vazão, dois modelos distintos foram utilizados. As bacias urbanas (Dal Bó, Maestra e Samuara) possuem uma parte de sua área urbanizada, enquanto que o restante é mais preservado, semelhantes as bacias rurais. A porção urbana utiliza o modelo calibrado conforme Missiaggia (2018) e a parte remanescente utiliza os parâmetros do modelo hierárquico. O resultado final para estas três bacias surge a partir da junção destas duas modelagens. As demais bacias (Faxinal, Marrecas, Mulada, Piaí e Sepultura) utilizam para toda a sua extensão apenas os parâmetros obtidos através do modelo hierárquico calibrado.

#### 4.1.1.6 Disponibilidade Hídrica

Para encontrar a disponibilidade hídrica foi elaborado um gráfico baseado nas curvas teóricas de disponibilidade presentes no PNSH (ANA, 2016c). A demanda hídrica foi calculada conforme a extrapolação da linha de tendência dos volumes de água produzidos para cada ano desde 2000 até 2050. A infraestrutura foi obtida a partir dos dados de vazão captada em cada barramento. A disponibilidade foi calculada através da soma das vazões Q50 para cada uma das 9 bacias de captação do município, vindas das curvas de permanência.

## 4.2 MÉTODO DE ANÁLISE DE PROCESSO

Para avaliar os impactos e consequências no monitoramento da segurança hídrica na região foi aplicado o modelo de causa-efeito chamado Método de Análise de Processo (TAHIR e DARTON, 2010), que considera as informações levantadas na caracterização da área de estudo para obter indicadores. O desenvolvimento do método utiliza 5 passos descritos abaixo:

### Passo 1: Diagnóstico do Município

Nesta etapa foi realizada uma análise dos sistemas de abastecimento, situação dos recursos hídricos, bacias de captação, barramentos atuais e futuros, coleta e tratamento de esgoto e demandas atuais e futuras. Esta análise busca avaliar os riscos e possíveis problemas relacionados a água no município. Os dados utilizados nesta parte foram obtidos a partir do levantamento de dados disponibilizados pelo SAMAE.

### Passo 2: Delimitação da abrangência do conceito de segurança hídrica

A definição utilizada para segurança hídrica estabelece os critérios e referências pelos quais o sistema foi avaliado. Para este estudo a definição utilizada é a da ONU (2013), que explica que para se alcançar segurança hídrica é preciso ter acesso a quantidade e qualidade adequadas de água, sustentando o desenvolvimento socioeconômico e proteção contra desastres. Utilizando esta definição o estudo foi baseado nas 4 dimensões propostas pelo PNSH: humana, econômica, ecossistêmica e resiliência.

### Passo 3: Definição da abrangência espacial e temporal

A abrangência do estudo foi definida em escala espacial e temporal. A escala espacial é o tamanho físico do sistema, sendo que para este estudo foram adotados os limites do município de Caxias do Sul. A escala temporal consiste no período o qual os impactos são considerados, tendo em vista ser amplo o suficiente para abordar os efeitos intrageracionais e intergeracionais. Para este estudo foram utilizados dados históricos do município compreendendo o período de 2000 até 2020, projetados para até o ano de 2050.

### Passo 4: Definição dos indicadores

Com base na definição estabelecida para a segurança hídrica e dos limites do sistema, foi realizada a seleção e categorização de um conjunto personalizado de indicadores que descrevem as consequências dos impactos para os receptores destes impactos.

Nesta etapa inicialmente foram identificados os aspectos causadores de impactos no sistema. Um aspecto ambiental se caracteriza pela associação de um agente da poluição (ou recurso natural esgotável) com um dado evento ou causa do

aspecto ambiental (MOURA, 2004). Os agentes geradores destes impactos são denominados Geradores de Impacto (GI's), podendo ser classificados como Geradores de Impacto Interno (GII's) quando se referem às atividades dentro do limite estabelecido e sobre controle do município ou Geradores de Impacto Externos (GEE's) quando estão além dos limites e controle do sistema. Exemplos de GII's podem ser consideradas as ações antrópicas dos próprios moradores e as atividades econômicas da cidade, que geram impacto negativo na ausência de projetos, ações de controle e gerenciamento adequado dos efluentes e resíduos. Os GIE's podem ser consideradas as mudanças climáticas e alterações nas legislações nacionais.

Esta combinação de agente e causa do aspecto resultam em um impacto no sistema, podendo ser positivo ou negativo. Um impacto ambiental se refere a alteração que ocorre no meio ambiente como um resultado do aspecto (MOURA, 2004). Após definidos, estes impactos foram organizados no sistema conforme uma das quatro dimensões da segurança hídrica estabelecida anteriormente.

As consequências destes impactos, quando negativas, causam problemas no sistema. Quem precisa enfrentar de alguma forma esses problemas são as partes interessadas, chamadas de Receptores dos Impactos (RIs). Foram definidos como os RIs todos os habitantes do município, considerando os moradores atuais e também os futuros. Tendo em vista atingir a segurança hídrica para suprir a necessidade de abastecimento da população de maneira sustentável, eficiente e equitativa. Outra parte interessada seria a empresa de saneamento, que faz a gestão dos recursos hídricos municipais e age de modo a evitar os impactos negativos e maximizar os impactos positivos no sistema na medida do possível.

Para poder descrever o estado da segurança hídrica foi avaliado os impactos gerados por cada GI e cada problema que esses impactos geram sobre os RI. Para monitorar cada um destes problemas foram definidos indicadores e métricas, possibilitando o monitoramento e o nível de segurança hídrica atual, assim como projetar ações necessárias para se atingir cenários futuros desejáveis para o município.

As métricas selecionadas para os indicadores são numéricas e representam os quantitativos ou a existência do respectivo indicador. A denominação das métricas para este estudo estão apresentadas no Quadro 9. Dependendo da região avaliada, a unidade da métrica pode ser atribuída conforme a disponibilidade da informação

do usuário interessado, como por exemplo, ao volume (V) pode ser atribuído  $m^3$  ou  $hm^3$ , porém a unidade não deve variar para um mesmo indicador. Neste último caso, por exemplo, o usuário não deve utilizar um volume em  $m^3$  na análise inicial e, posteriormente, compará-lo com  $hm^3$ , pois os resultados comparativos não possuem a mesma grandeza escalar.

Quadro 9: Legenda das métricas utilizadas.

\$ Valor monetário	Hab. nº de habitantes
V Volume	Adm Valor Adimensional
A Área	t Tempo
Q Vazão	T Temperatura
% Percentual	

Fonte: Autor (2021).

#### Passo 5: Verificação.

Para garantir que os indicadores desenvolvidos sejam aplicáveis, a última etapa deste método busca passá-los por uma verificação através de revisão e consulta de especialistas e das partes interessadas. Foi enviado o conjunto final de indicadores e métricas em conjunto com um formulário para preenchimento para 29 pessoas, divididas entre professores e alunos da Universidade de Caxias do Sul, funcionários do SAMAE e outros profissionais da área de recursos hídricos. As perguntas enviadas podem ser vistas no Apêndice A e ao final da pesquisa se obteve 22 respostas. Neste formulário foi questionado a importância de cada uma das dimensões, se algum dos indicadores não é apropriado para a região, se precisaria adicionar algum indicador diferente dos sugeridos, buscando. Para avaliar se algum aspecto importante da segurança hídrica local acabou sendo omitido na análise, os participantes podem expressar a sua opinião e comentar sobre estes indicadores de segurança hídrica no final do questionário.

Caso este retorno tivesse sugestões de alterações pertinentes, possíveis modificações seriam realizadas. Essa série de processos de verificação/modificação deveria se repetir até que seja obtido um conjunto refinado de indicadores e métricas que fossem aceitas por todas as partes interessadas.

Por fim foi comparado os indicadores existentes no PNSH com as condições encontradas para o município e indicadores encontrados como resultado do Método de Análise de Processo.

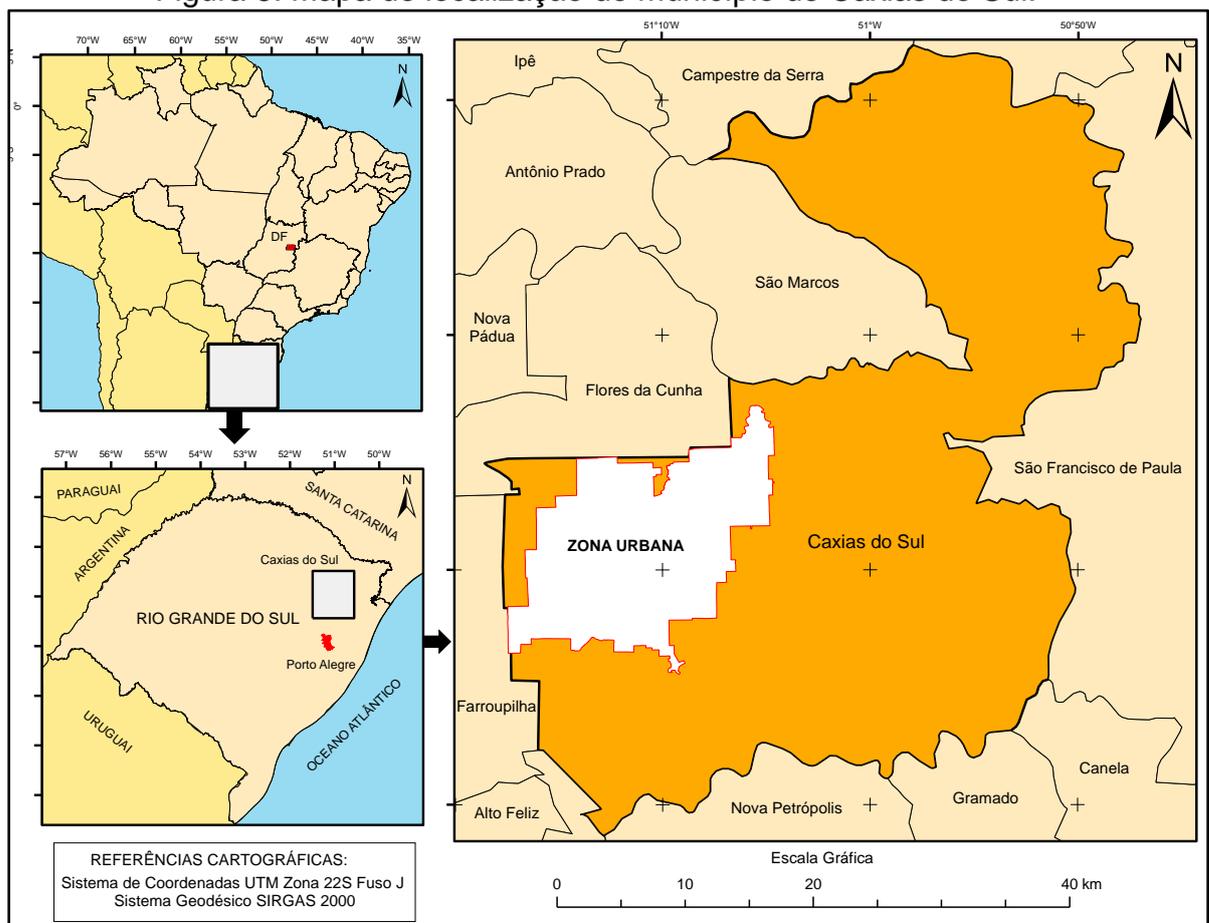
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira parte dos resultados corresponde a etapa 1 do Método de Análise de Processo, sendo o diagnóstico do município. Os sub-itens abaixo explicam em detalhe a caracterização que compõe o diagnóstico de Caxias do Sul.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Caxias do Sul está localizado na parte nordeste do estado do Rio Grande do Sul, no sul do Brasil. A latitude sul é de  $29^{\circ}10'25''$  e longitude oeste de  $51^{\circ}12'21''$ . Ocupa uma área de 1.638,34 km<sup>2</sup>, sendo que a zona urbana possui 216,51 km<sup>2</sup>. A Figura 8 mostra o mapa de localização de Caxias do Sul.

Figura 8: Mapa de localização do município de Caxias do Sul.



Fonte: Adaptado de IBGE (2019) e GeoCaxias (2020).

O clima é subtropical, com temperaturas média anual variando entre  $14^{\circ}\text{C}$  e  $17^{\circ}\text{C}$ , enquanto que a temperatura média do mês mais frio oscila entre  $8$  e  $14^{\circ}\text{C}$  e a

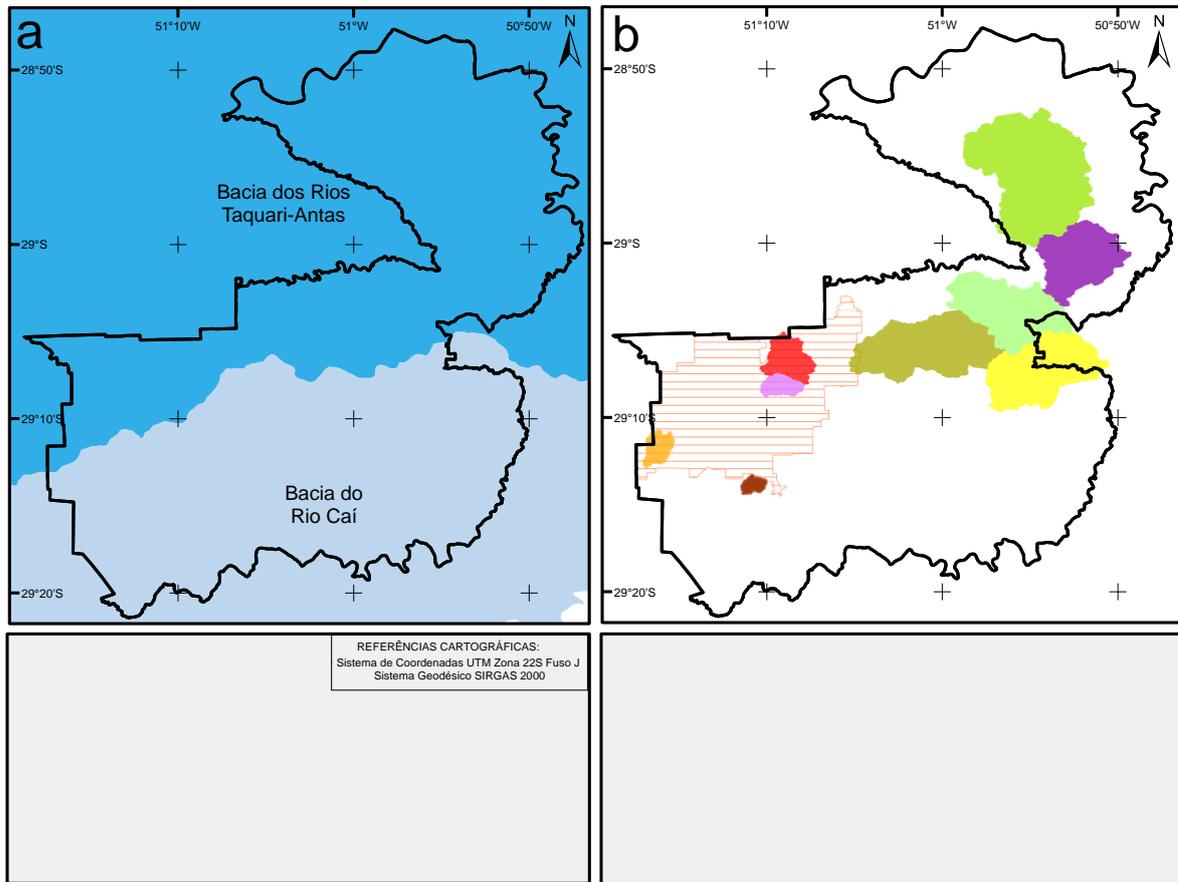
temperatura média do mês mais quente varia entre 17 e 23°C (CAXIAS DO SUL, 2014; ROSSATO, 2011).

Caxias do Sul, RS, está inserida na Região Geomorfológica Planalto das Araucárias, nas Unidades Geomorfológicas Planalto dos Campos Gerais e da Serra Geral (IBGE, 1986). A altimetria da região varia de 30 metros em relação ao nível médio dos mares pelas margens do Rio Caí até 1.000 metros na região nordeste (BELLADONA e DE VARGAS, 2017). Devido a sua posição geográfica e geomorfologia, os sistemas de abastecimento de Caxias do Sul se limita a barramento de seus arroios para abastecer a população urbana, e utiliza poços para abastecer as comunidades localizadas nas áreas rurais que não possuem redes de água. O município tem, pela sua natureza topográfica, um sistema complexo de abastecimento de água, o que dificulta sobremaneira sua operação (CAXIAS DO SUL, 2014).

#### 5.1.1 Bacias de Captação

Inserido entre duas bacias hidrográficas, o município integra ao norte a bacia dos rios Taquari-Antas e ao sul a bacia do rio Caí. A bacia do rio Caí possui área de 4.945,70 km<sup>2</sup>, ocupando aproximadamente 47% do território de Caxias do Sul (SEMA/RS, 2020a), enquanto a bacia do Taquari Antas possui área de 26.491,82 km<sup>2</sup> e ocupa aproximadamente 53% do território de Caxias do Sul (SEMA/RS, 2020b). As duas bacias possuem Plano de Bacia próprio (SEMA/RS e PROFILL, 2008; SEMA/RS e STE, 2012), com estudos de enquadramento das suas sub-bacias. A Figura 9a mostra o mapa da divisão do município dentre as bacias hidrográficas do estado e a Figura 9b ilustra a localização das bacias de captação previstas no município.

Figura 9: Mapa de localização das bacias de Caxias do Sul.



Fonte: Adaptado de IBGE (2019) e GeoCaxias (2020).

Dentro do zoneamento estabelecido pelo Plano Diretor Municipal (CAXIAS DO SUL, 2019), as áreas de bacia de captação atuais e futuras são denominadas Zona das Águas (ZA). Estas zonas possuem uma lei específica (Lei Complementar 246/2005) que estabelece conceitos e funções da ZA, bacias de captação e acumulação de água para o abastecimento do município e disciplina o uso e parcelamento do solo para estes espaços (CAXIAS DO SUL, 2005). Existem 5 bacias de captação atualmente em uso, totalizando 9 barramentos. As informações de todas as barragens podem ser vistas na Tabela 2. Outras 3 áreas são destinadas para uso futuro, conforme demandas de abastecimento no município aumentar. A bacia de Galópolis possui barramento, mas não é utilizada atualmente para abastecimento humano.

Tabela 2: Informações das bacias de captação e barramentos de Caxias do Sul.

Bacias	Barragem	Área Total Bacia (ha)	Área Alagada (ha)	Volume (m³)	Tipo Barragem	Data Barragem	Altura (m)	Comprimento (m)	Captação (L/s)
Dal Bó	São Paulo		5,5	205.811,90	Alvenaria de pedra	1928	7,5	150,8	
	São Pedro		14,5	411.405,30	Alvenaria de pedra	1942	7,7	101	
	São Miguel		25,9	1.286.676,30	Alvenaria de pedra	1952	11,8	418	
	Total	642,8	45,9	1.903.893,50					80
Galópolis	Montante		0,1	1.321	Alvenaria de pedra	1980	3	29,7	
	Jusante		0,2	3.939	Alvenaria de pedra	1967	8,5	35	
	Total	304,6	0,3	5.260					0
Maestra	Maestra	1.526,50	48,7	4.996.849,80	Enrocamento terra zoneada	1971	27	330	325
Samuara	Samuara	687,1	19,1	728.104,90	Terra	1957	7	147	38
Faxinal	Faxinal	6.679,30	248	24.851.436,60	Enrocamento núcleo de argila CCR e enrocamento núcleo de argila	1992	30	305	1100
Marrecas	Marrecas	5.325,50	200,9	29.950.375,90	Enrocamento núcleo de argila	2012	58	833,5	760
Sepultura		4.365,80			Não explorado				
Piaí		5.855,50			Não explorado				
Mulada		11.062,10			Não explorado				
<b>Total</b>		<b>36.449,20</b>	<b>609,1</b>	<b>64.345.074,20</b>					<b>2.303</b>

Fonte: SAMAE (2020).

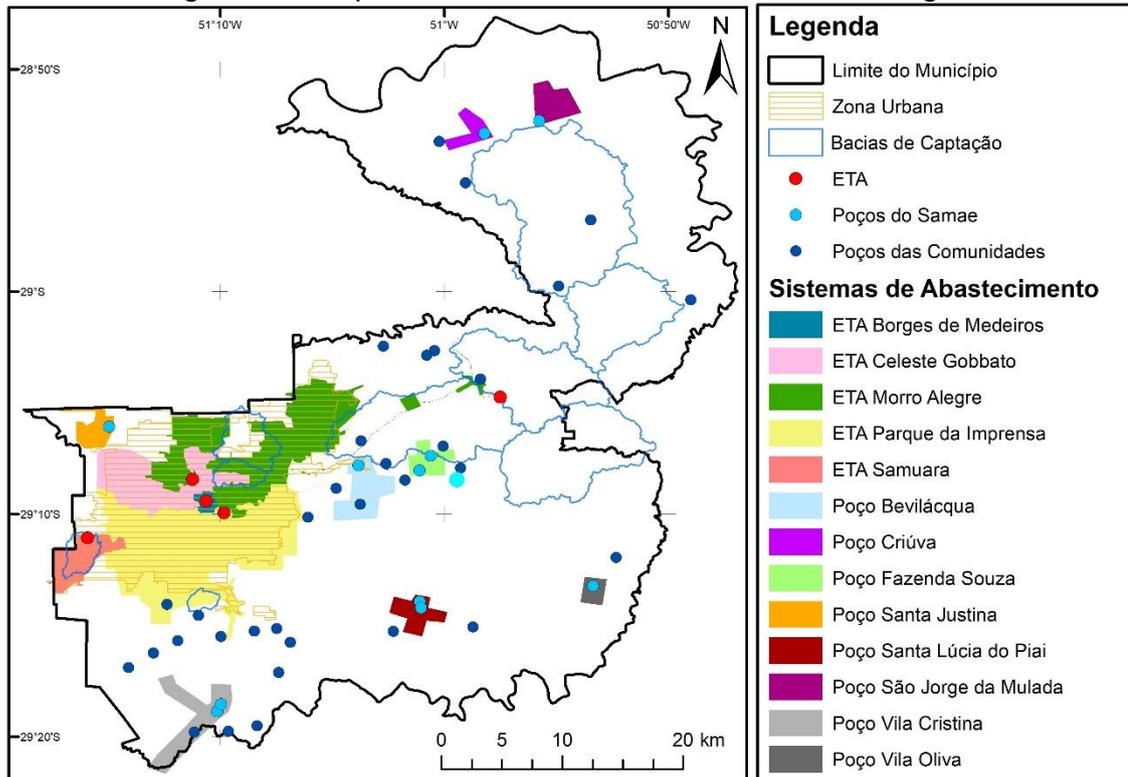
A área que as bacias de captação ocupam no município correspondem a aproximadamente 22% do território total. Dentre as Bacias de captação, 4 estão totalmente em área rural, 3 estão inteiramente inseridas dentro na área urbana e outras 2 possuem apenas uma parcela urbana. Estas bacias urbanas acabam por enfrentar situações mais desafiadoras de controle de uso e ocupação do solo e poluição advinda das atividades humanas. Somando todas os barramentos, são captados aproximadamente 2.303 L/s de água bruta, que são direcionados para uma das 5 estações de tratamento do município.

### 5.1.2 Sistemas de Abastecimento de Água

A Prefeitura Municipal é responsável pelo abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto através do SAMAE. Atualmente 5 estações de tratamento de água estão em funcionamento abastecendo aproximadamente 96% da população urbana, enquanto a população rural em sua maioria é abastecida por poços. Dentre os poços, 16 são de controle do SAMAE e 33 são de responsabilidade das

comunidades. A Figura 10 apresenta o mapa de localização dos poços e Estações de Tratamento de Água (ETA) distribuídas no município, enquanto a Tabela 3 mostra os dados de vazão e população atendida por cada sistema de abastecimento de água.

Figura 10: Mapa dos sistemas de abastecimento de água.



Fonte: Autor (2020).

Tabela 3: Volumes abastecidos de cada sistema de abastecimento de água.

Sistema de Abastecimento de Água		Q (L/s)	Pop. (hab.)
ETA	Borges de Medeiros	66	19.495
	Celeste Gobbato	197	84.487
	Morro Alegre	296	116.240
	Parque da Imprensa	816	259.794
	Samuara	25	6.018
Poços	Bevilácqua	0,17	148
	Fazenda Souza	4,17	1.708
	Vila Oliva	0,55	299
	Santa Lúcia	1,23	684
	Criúva	0,71	639
	São Jorge da Mulada	0,23	329
	Vila Cristina	1,38	616
	Santa Justina	0,72	237
	Comunidades	68,64	-
	<b>Total:</b>		<b>1.477,80</b>

Fonte: Adaptado de SAMAE (2020).

Avaliando os sistemas de abastecimento de água, aproximadamente 1.400 L/s da água tratada vem das ETAs e é distribuída através da rede do SAMAE. Os poços do SAMAE somam aproximadamente 9,16 L/s enquanto os poços das comunidades contribuem com 68,24 L/s. Não se tem um valor exato de quantos habitantes utilizam a água dos poços comunitários para consumo, entretanto, estima-se que 481 famílias, 2 escolas e 7 salões comunitários se beneficiam do abastecer destes poços. Os sistemas de abastecimento mais relevantes em questão de volume de água tratada fornecida são o Parque da Imprensa e Morro Alegre, fornecendo respectivamente 54,98% e 19,94% da demanda municipal.

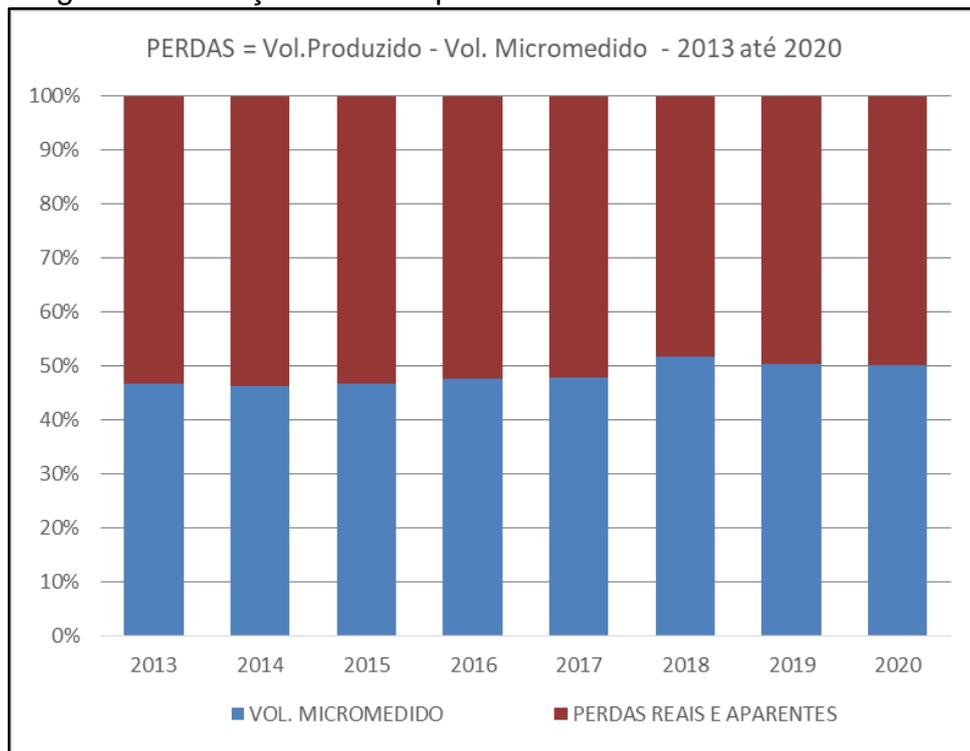
Quanto às perdas totais, foram encontrados dados desde 2013, estando atualmente em 49,9%. A Tabela 4 mostra o volume produzido, o micromedido e a soma das perdas reais e aparentes. A Figura 11 ilustra, em porcentagem, o gráfico da comparação entre os volumes micromedidos e as perdas.

Tabela 4: Perdas totais no abastecimento de água (2013 até 2020).

Ano	Volume Produzido (m <sup>3</sup> )	Volume Micromedido (m <sup>3</sup> )	Perdas Reais e Aparentes (m <sup>3</sup> )	Micromedido (%)	Perdas (%)
2013	40.647.951,00	18.980.280,00	21.667.671,00	46,69%	53,31%
2014	42.470.478,00	19.644.233,00	22.826.245,00	46,25%	53,75%
2015	42.430.203,00	19.772.122,00	22.658.081,00	46,60%	53,40%
2016	42.479.261,00	20.234.381,00	22.244.880,00	47,63%	52,37%
2017	42.698.837,91	20.406.292,00	22.292.545,91	47,79%	52,21%
2018	41.084.411,69	21.265.404,00	19.819.007,69	51,76%	48,24%
2019	42.606.458,25	21.493.762,00	21.112.696,25	50,45%	49,55%
2020	44.560.223,12	22.325.997,00	22.234.226,12	50,10%	49,90%

Fonte: Autor (2020).

Figura 11: Relação entre as perdas totais e volume micromedido.



Fonte: Autor (2020).

Analisando estas informações é possível perceber que as perdas vinham diminuindo até 2019, único ano que apresentou valor maior em relação ao ano anterior. Em 2020 o valor voltou a reduzir, mas ainda assim as perdas totais estão em torno de 50%. O método utilizado pelo SNIS para calcular as perdas na distribuição é diferente do utilizado no gráfico da Figura 11, apresentando diferença nos resultados. O SNIS utiliza o cálculo dos volumes produzidos menos os volumes consumidos dividido pelo volume produzido para encontrar a porcentagem de perdas. Segundo o SNIS (2018), o valor de perdas na distribuição (indicador IN049) para o município de Caxias do Sul era de 32,7%, apresentando menos perdas que a média brasileira, calculada em 38,5%.

### 5.1.3 Coleta e Tratamento de Esgoto

Segundo o SAMAE (2020) historicamente o esgoto do município era coletado e afastado de forma individual, através de fossa e sumidouro ou fossa e posterior lançamento na rede de esgoto pluvial, sendo que apenas em 1996 que foi implantada a primeira Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Nos anos subsequentes foram sendo realizadas várias obras e implantações do sistema de esgoto sanitário na

maioria das zonas da cidade (KIELING, 2010).

Os sistemas de coleta e tratamento de esgoto podem ser vistos na Tabela 5 e a sua localização no município, divididos em Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES), estão presentes na Figura 12.

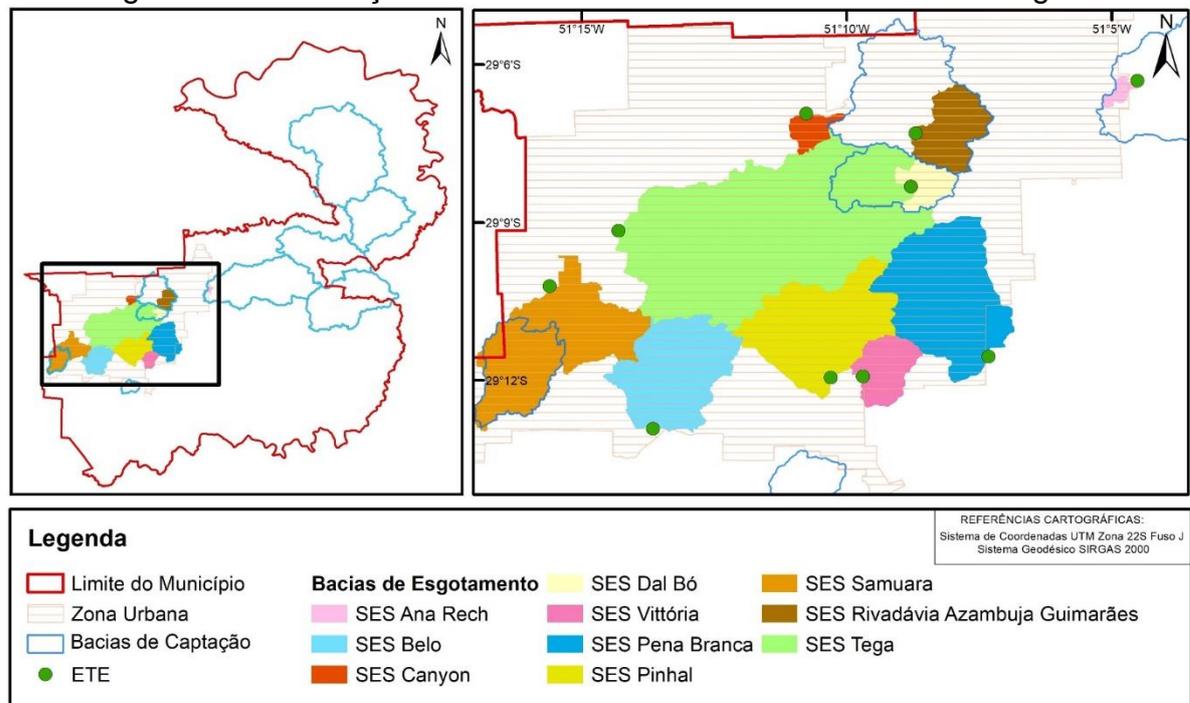
Tabela 5: Sistemas de coleta e tratamento de esgoto.

ETE	Início da Operação	Pop. Atendida* (hab)	Capacidade (l/s)
Rivadavia Azambuja	1992	25.000	25
Guimarães			
Dal Bó	2003	12.000	19
Vitória	2006	4.500	7,5
Canyon	2007	30.000	42
Ana Rech	2008	2.500	10
Belo	2012	38.000	120
Samuara	2012	15.000	60
Tega	2012	200.000	440
Pinhal	2014	130.000	240
Pena Branca	2014	40.000	120
Total:		497.000	1.083,50

\*Numero aproximado de habitantes atendidos por cada ETE.

Fonte: Adaptado de SAMAE (2020).

Figura 12: Localização dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto.



Fonte: Autor (2020).

### 5.1.4 População

O município possui aproximadamente 517.451 habitantes com densidade demográfica de 265 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2020). Aproximadamente 96,23% dos moradores residem em área urbana e apenas 3,77% em área rural (SEBRAE/RS, 2019).

Uma projeção da população foi realizada para analisar a tendência de desenvolvimento do município. A Tabela 6 mostra os dados utilizados para projetar a população até 2050. Para este cálculo foram utilizados os métodos da taxa decrescente de crescimento e projeção geométrica. A população estimada de 2020 até 2050 para cada método pode ser vista na Tabela 7:

Tabela 6: População de Caxias do Sul 2000 até 2020.

Ano	População	Ano	População
2000	360.419	2011	441.332
2001	365.557	2012	446.911
2002	370.970	2013	465.304
2003	376.135	2014	470.223
2004	381.597	2015	474.853
2005	387.213	2016	479.236
2006	393.021	2017	483.377
2007	399.038	2018	504.069
2008	405.858	2019	510.906
2009	410.166	2020	517.451
2010	435.564		

Fonte: Adaptado de Caxias do Sul (2014), SEBRAE/RS (2019) e IBGE (2020).

Tabela 7: Comparação dos métodos de projeção populacional.

Ano	Projeção Geométrica	Taxa decrescente de Crescimento
2025	566.415	548.208
2030	620.012	576.168
2035	678.681	601.585
2040	742.901	624.690
2045	813.198	645.695
2050	890.147	664.789

Fonte: Autor (2020).

O método optado para projetar o crescimento populacional foi o da taxa decrescente de crescimento, pois apresenta valores mais adequados ao crescimento observados nos últimos 20 anos no município.

A Divisão de População da ONU disponibilizou as planilhas de Perspectivas da

População Mundial (UNITED NATIONS, 2019), contendo dados da população estimada para cada país do mundo desde 1950 até projeções para 2100. Destas tabelas foram retiradas a população mundial e brasileira para o período de 2000 até 2020 e projeções para até 2050. Com estes dados é possível ser avaliado o crescimento projetado para o município quando comparado com as tendências mundial e brasileira. A Tabela 8 mostra a comparação da população mundial, brasileira e de Caxias do Sul.

Tabela 8: População mundial, brasileira e de Caxias do Sul 2000 até 2050.

Ano	População Caxias do Sul	População Mundial	População Brasileira
2000	360.419	6.143.493.806	169.799.170
2001	365.557	6.222.626.531	172.385.826
2002	370.970	6.301.773.172	174.632.960
2003	376.135	6.381.185.141	176.871.437
2004	381.597	6.461.159.391	181.569.056
2005	387.213	6.541.906.956	184.184.264
2006	393.021	6.623.517.917	186.770.562
2007	399.038	6.705.946.643	184.014.516
2008	405.858	6.789.088.672	189.605.006
2009	410.166	6.872.766.988	191.480.630
2010	435.564	6.956.823.588	190.755.799
2011	441.332	7.041.194.168	192.379.287
2012	446.911	7.125.827.957	193.904.015
2013	465.304	7.210.582.041	201.032.714
2014	470.223	7.295.290.759	202.768.562
2015	474.853	7.379.796.967	204.450.049
2016	479.236	7.464.021.934	206.081.432
2017	483.377	7.547.858.900	207.660.929
2018	504.069	7.631.091.113	208.494.900
2019	510.906	7.713.468.205	210.147.125
2020	517.451	7.794.798.729	211.755.692
2025	548.208	8.184.437.453	219.020.908
2030	576.168	8.548.487.371	223.852.116
2035	601.585	8.887.524.229	227.183.587
2040	624.690	9.198.847.382	229.058.886
2045	645.695	9.481.803.272	229.604.529
2050	664.789	9.735.033.900	228.980.400

Fonte: Adaptado de Caxias do Sul (2014), ONU (2019), SEBRAE/RS (2019) e IBGE (2020).

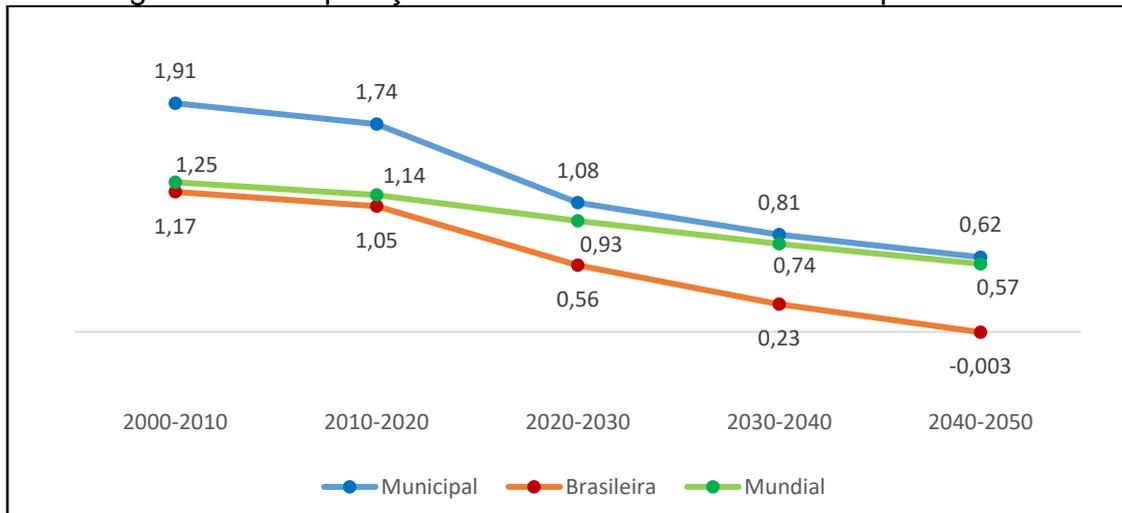
Através destes valores, foram calculadas as taxas de crescimento populacional, por década, que podem ser vistas na Tabela 9 e Figura 13.

Tabela 9: Taxas de crescimento populacional.

Período	Caxias do Sul	Brasileira	Mundial
2000-2010	1,91	1,17	1,25
2010-2020	1,74	1,05	1,14
2020-2030	1,08	0,56	0,93
2030-2040	0,81	0,23	0,74
2040-2050	0,62	-0,003	0,57

Fonte: Autor (2020).

Figura 13: Comparação das Taxas de Crescimento Populacional.



Fonte: Autor (2021).

Analisando apenas os dados da população municipal, a tendência é de se manter em um cenário de crescimento a longo do tempo, mas a taxa de crescimento vem reduzindo desde 2000 até 2050. Já quando comparadas as três taxas de crescimento é possível concluir que o município apresenta valores maiores que os encontrados para o Brasil e no restante do mundo, apesar da projeção indicar uma tendência de redução no crescimento nos três locais. Isto mostra que a população do município está crescendo e, em comparação a um cenário previsto para 2050, a taxa de crescimento populacional é maior que a apresentada para país e a mundial.

### 5.1.5 Economia

A economia caxiense apresenta um perfil diversificado, com segmentos em diversas áreas. Esta característica de diversificação em Caxias do Sul foi importante para o seu desenvolvimento, tornando a região mais adaptável e flexível às mudanças econômicas (BREITBACH, 2002).

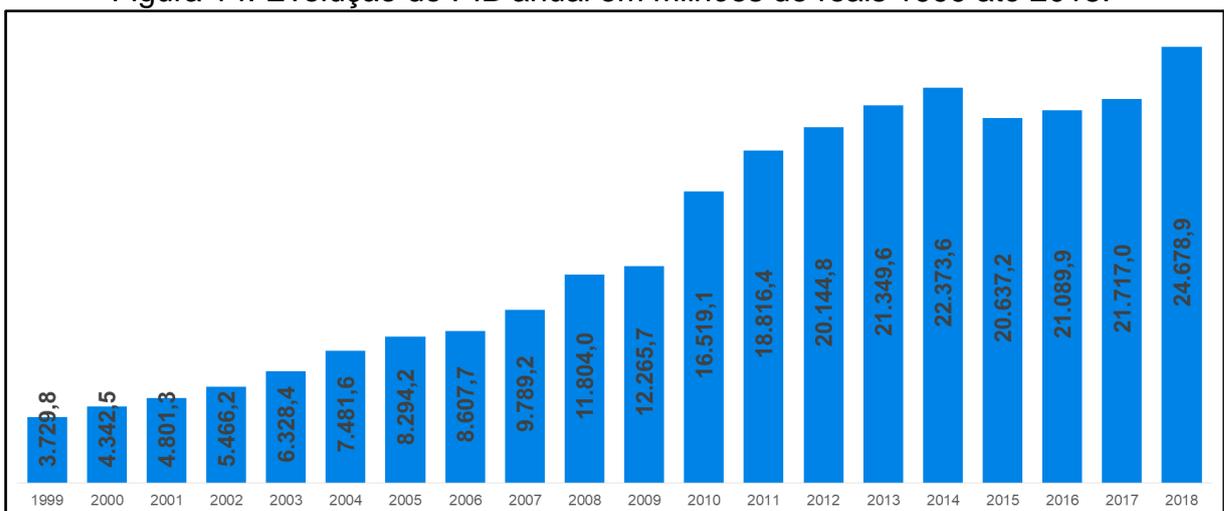
O Produto Interno Bruto (PIB) representa a soma, em valores monetários, de todos os bens e serviços finais produzidos por uma região em um determinado período e a última informação oficial sobre este valor no município é para o período de 2018, calculado em R\$ 24.678,90 milhões, estando em 37º maior PIB dentre as cidades brasileiras e 2º maior no Rio Grande do Sul (IBGE, 2020; SPGG/DEE, 2020). O salário médio mensal dos trabalhadores formais para 2018 era de 3,1 salários mínimos e o PIB *per capita* do mesmo ano era de R\$ 48.959,40 (IBGE, 2020). A Tabela 10 e a Figura 14 mostram o crescimento do PIB ao longo do tempo e o a Tabela 11 e a Figura 15 o comportamento do PIB *per capita*.

Tabela 10: PIB anual em milhões de reais 1999 até 2018.

Ano	PIB (Milhões)	Ano	PIB (Milhões)
1999	3.729,80	2009	12.265,70
2000	4.342,50	2010	16.519,10
2001	4.801,30	2011	18.816,40
2002	5.466,20	2012	20.144,80
2003	6.328,40	2013	21.349,60
2004	7.481,60	2014	22.373,60
2005	8.294,20	2015	20.637,20
2006	8.607,70	2016	21.089,90
2007	9.789,20	2017	21.717,00
2008	11.804,00	2018	24.678,90

Fonte: Adaptado de Sebrae/RS (2019) e SPGG-RS/DEE (2020).

Figura 14: Evolução do PIB anual em milhões de reais 1999 até 2018.

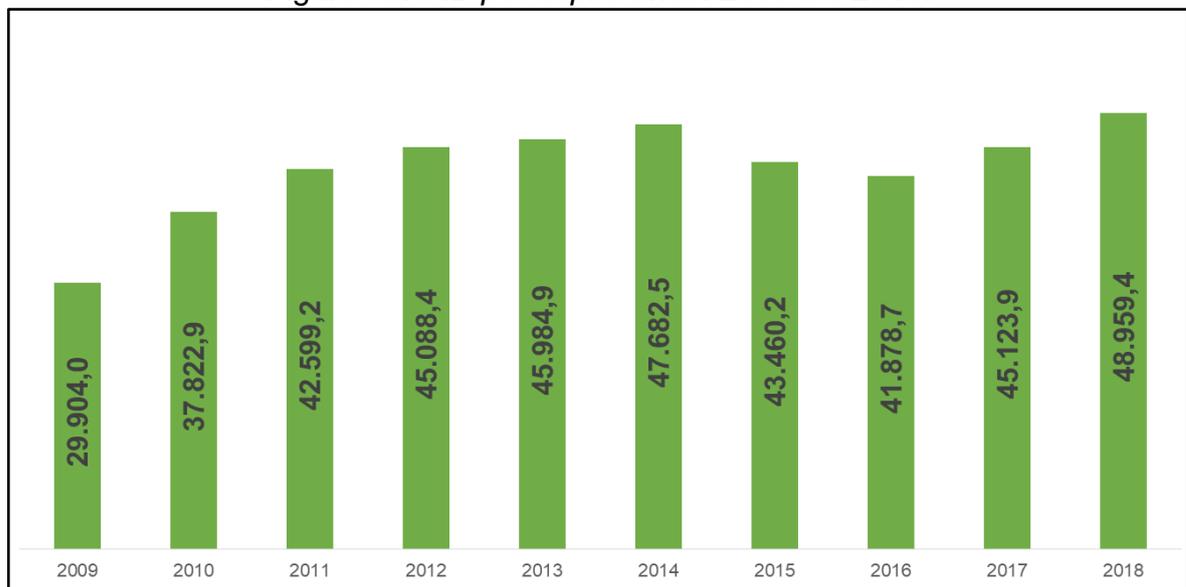


Fonte: Adaptado de Sebrae/RS (2019), IBGE (2020) e SPGG-RS/DEE (2020).

Tabela 11: PIB *per capita* anual 2009 até 2018.

Ano	PIB <i>per capita</i>
2009	29.904,00
2010	37.822,90
2011	42.599,20
2012	45.088,40
2013	45.984,90
2014	47.682,50
2015	43.460,20
2016	41.878,70
2017	45.123,90
2018	48.959,40

Adaptado de FEE (2014), SEBRAE/RS (2019) e IBGE (2020).

Figura 15: PIB *per capita* anual 2009 até 2018.

Fonte: Adaptado de FEE (2014), SEBRAE/RS (2019) e IBGE (2020).

O município é reconhecido nacionalmente como polo metal-mecânico, tendo proeminência no setor industrial de material de transporte, veículos, reboques e carrocerias. O setor primário de Caxias do Sul destaca-se pela presença marcante da atividade agropecuária, cuja característica é a de pequena propriedade (CAXIAS DO SUL, 2014), tendo como principais culturas agrícolas a maçã, uva, milho, caqui e pêsego e rebanhos de bovinos, suínos e galináceos (SEBRAE/RS, 2019).

O Valor Adicionado Bruto (VAB) é o valor que a atividade acrescenta aos bens e serviços consumidos no seu processo produtivo e o VAB da indústria de Caxias do Sul, quando comparando com os demais municípios do estado em 2018, ocupava a primeira colocação, enquanto que o VAB dos serviços era o segundo maior. Avaliando

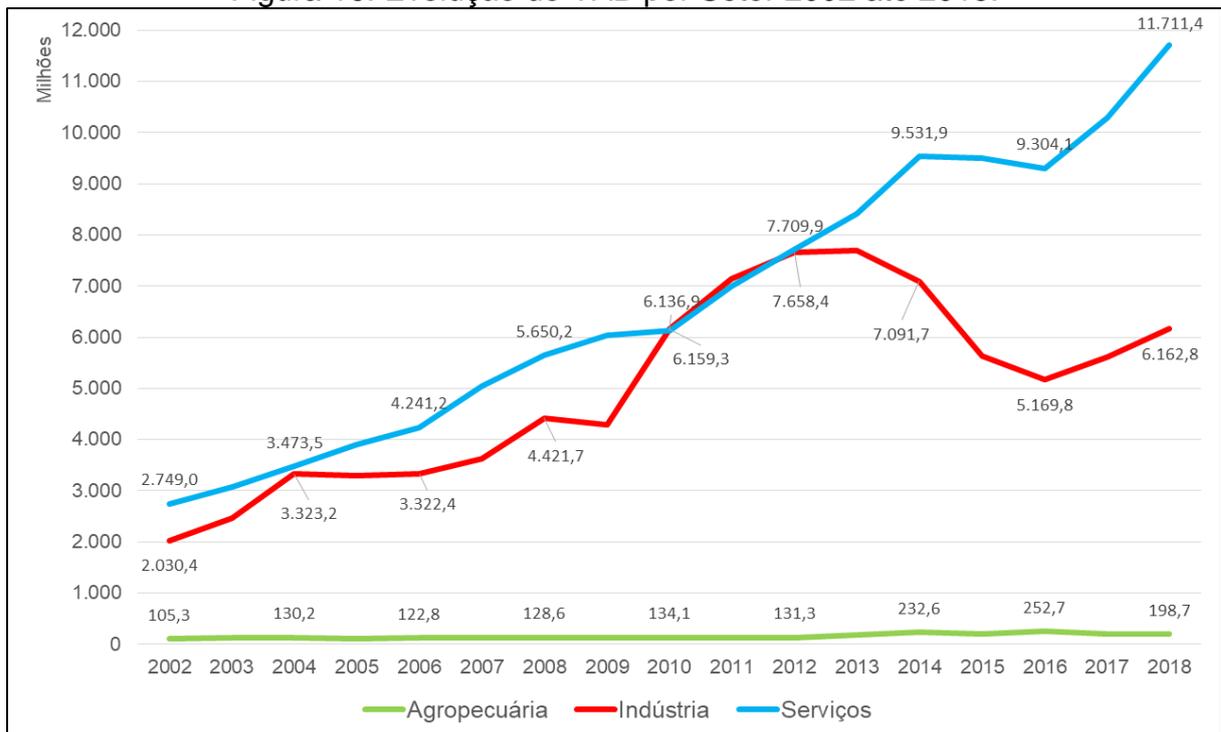
as atividades dentro do município, a maior parcela do VAB vem das atividades de comércio de bens e à prestação de serviços, que apresenta o maior crescimento dentre os três setores nos últimos anos conforme pode ser visto na Tabela 12 e na Figura 16.

Tabela 12: VAB anual 2002 até 2018.

Ano	VAB		
	Agropecuária	Indústria	Serviços
2002	105.257.890	2.030.442.331	2.748.950.018
2003	121.520.465	2.460.258.847	3.073.183.554
2004	130.195.711	3.323.197.666	3.473.490.479
2005	114.066.748	3.292.909.690	3.899.276.653
2006	122.752.625	3.322.439.129	4.241.218.385
2007	117.306.084	3.630.197.243	5.040.282.264
2008	128.603.532	4.421.655.967	5.650.180.338
2009	129.998.252	4.282.793.109	6.029.929.523
2010	134.143.275	6.159.310.447	6.136.943.000
2011	133.038.958	7.147.923.499	6.994.991.650
2012	131.274.062	7.658.423.253	7.709.918.436
2013	185.464.645	7.698.246.339	8.414.452.500
2014	232.585.616	7.091.742.824	9.531.912.070
2015	204.213.017	5.624.755.543	9.493.518.700
2016	252.709.270	5.169.775.070	9.304.138.420
2017	192.169.640	5.608.458.820	10.285.815.180
2018	198.743.340	6.162.848.530	11.711.409.340

Fonte: Adaptado de FEE (2014) e IBGE (2020).

Figura 16: Evolução do VAB por Setor 2002 até 2015.



Fonte: Adaptado de FEE (2014) e IBGE (2020).

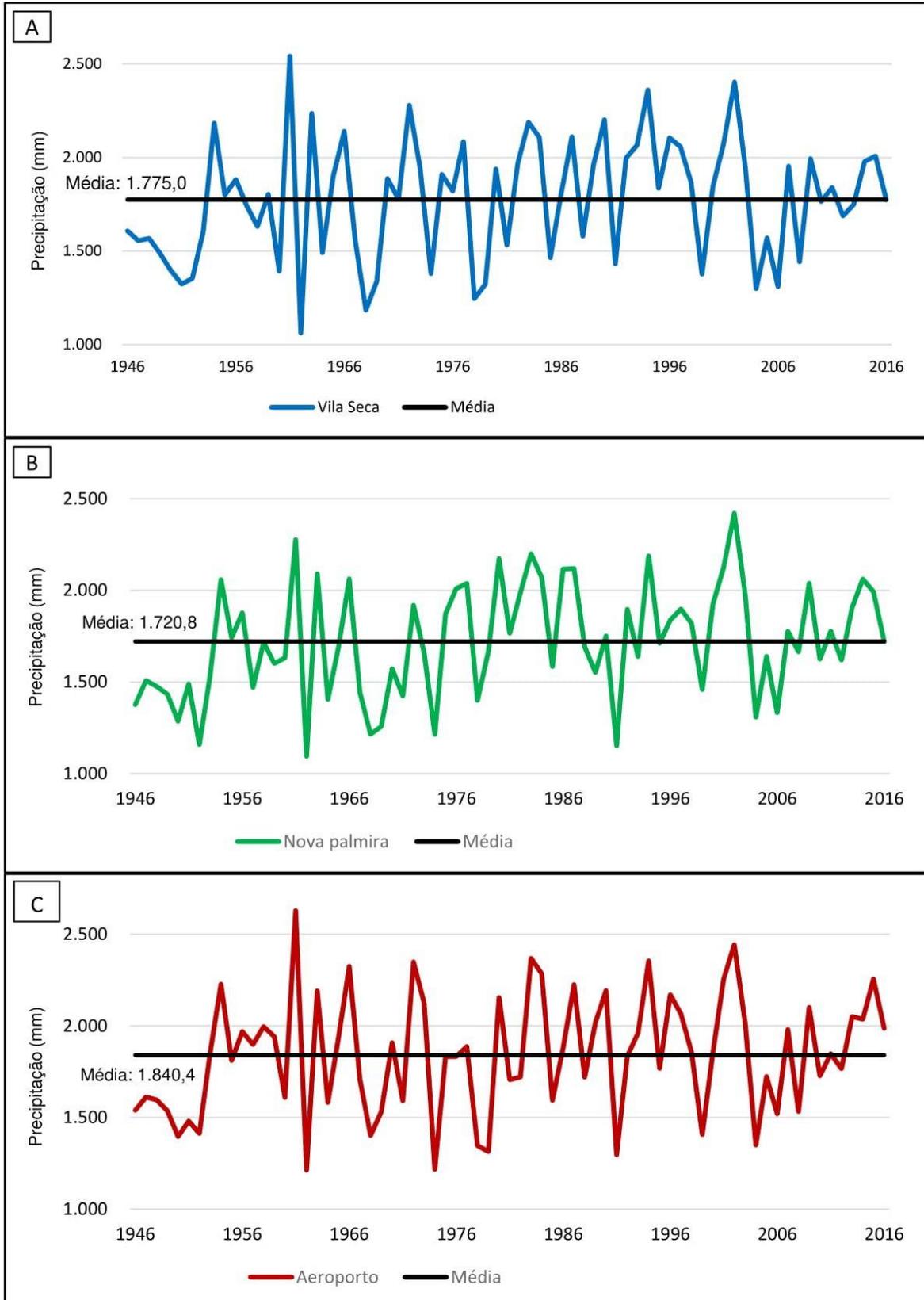
Observado as informações apresentadas sobre a economia, é possível perceber que o crescimento econômico é um dos principais fatores que incentivam o desenvolvimento do município. A constante evolução das atividades econômicas locais e locais se mostram de grande importância para a região, registrando os maiores valores históricos no ano de 2018, mas também podem trazer consigo riscos quando instaladas em bacias de captação.

### 5.1.6 Precipitação

A análise da precipitação tem papel importante na avaliação da segurança hídrica, pois gera consequências nas vazões dos rios e enchimento das barragens, sendo que as suas variações causam impacto direto nos problemas relacionados ao abastecimento. A precipitação na região foi analisada utilizando os dados retirados do Hidroweb (ANA, 2020), utilizando os pluviômetros de Vila Seca (Cód. 2950033), Nova Palmira (Cód. 2951022) e Aeroporto (Cód. 2951008). O SAMAE possui as informações de precipitação de 1946 até 2016 destes pluviômetros, contendo as chuvas diárias com as falhas já corrigidas. A partir disto, foram elaborados os gráficos da Figura 17, contendo as médias mensais de precipitado em cada pluviômetro por

ano e a média do período.

Figura 17: Precipitação registrada em Caxias do Sul 1946 até 2016.

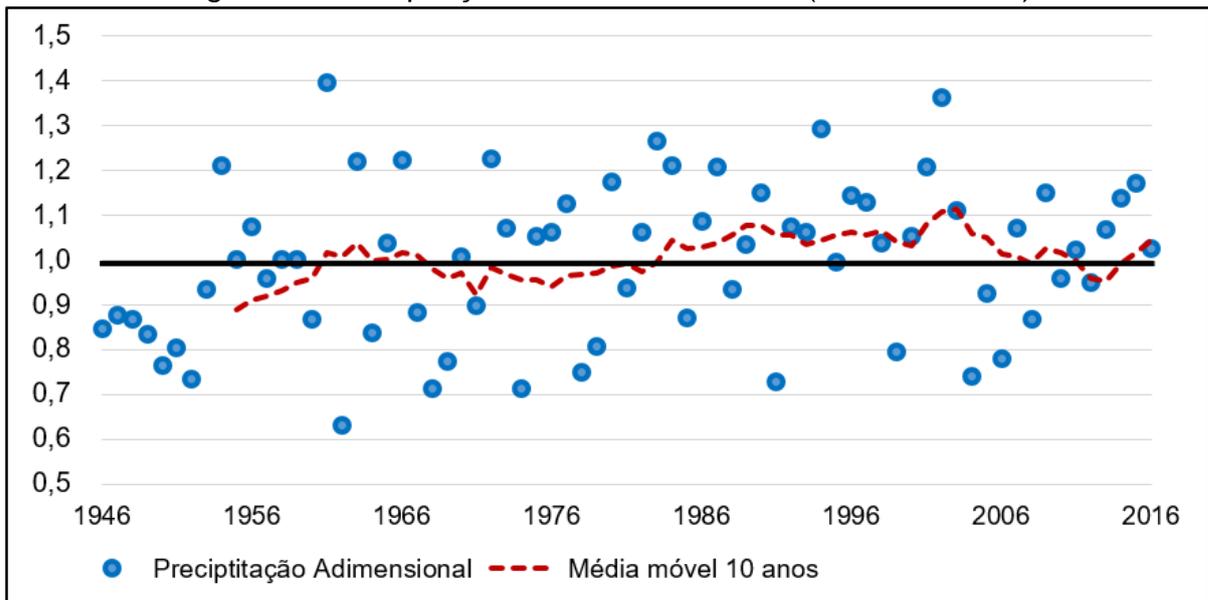


Fonte: Autor (2020).

A média encontrada entre os 3 pluviômetros neste período é de 1.778,73 mm, valor este que coincide com a média esperada para a região norte do estado do Rio Grande do Sul, estimada entre 1.500 e 1.800 mm (SPGG, 2020).

Com a intenção de avaliar este comportamento histórico das chuvas, o seu valor em milímetros foi transformado em um valor adimensional. Para isto foi calculada a precipitação adimensional anual, que segundo (TUCCI, 2012) é o valor precipitado dividido pela média, indicando que uma chuva é menor que a média quando apresenta valor menor que 1 e maior que a média quando for maior que 1. A Figura 18 mostra como se comporta o gráfico da precipitação adimensional com a média das chuvas registradas nos três pluviômetros. Neste gráfico é possível visualizar também a média móvel de 10 anos, permitindo uma comparação do comportamento de períodos menores com a média de todo o período.

Figura 18: Precipitação adimensional anual (1946 até 2016).



Fonte: Autor (2020).

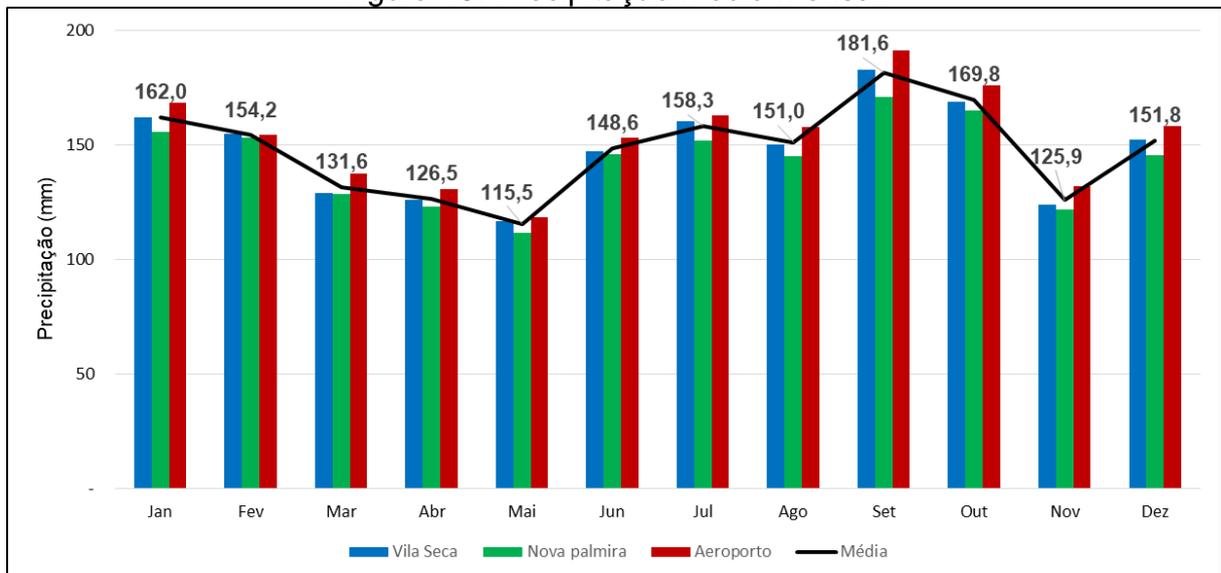
Durante boa parte dos anos iniciais, de 1946 até 1960, a precipitação registrada esteve abaixo da média, indicando um período mais seco. A partir de 1960 até 1981 a média móvel acompanhou a média do período total e de 1982 até 2007 apresentou valores acima da média. Uma leve redução na média móvel ocorreu nos anos de 2007 até 2012, mas desde então vem subindo e apresenta valores acima da média para os últimos anos da avaliação.

É possível concluir a partir destes dados que a precipitação se mantém dentro

da média esperada ou supera este valor na maior parte do tempo, mas anos que apresentam precipitação abaixo da média podem causar dificuldades no abastecimento de água. Nestes casos de estiagem, acontece uma redução dos níveis das barragens, evento que aconteceu nos primeiros meses de 2020. Mas estes casos só apresentaram déficit na precipitação em alguns meses do ano, logo normalizando a situação hídrica e não sendo notadas na análise de precipitação anual.

As tendências observadas de meses com mais ou menos precipitação podem ser vistas no gráfico da Figura 19. Este gráfico apresenta a média encontrada para cada mês em cada um dos pluviômetros no período de 1946 até 2016, junto com a média entre os 3 pluviômetros para cada mês.

Figura 19: Precipitação média mensal.



Fonte: Autor (2021).

As médias das precipitações observadas nos três pluviômetros foram parecidas, apresentando pouca variação entre eles na maioria dos meses. Historicamente as menores precipitações são encontradas no mês de maio, já as maiores estão no mês de setembro.

### 5.1.7 Modelagem hidrológica

Aplicando a primeira etapa do modelo hierárquico de Klemes, os resultados obtidos, calibrados e validados, podem ser vistos na Tabela 13. A calibração automática do modelo para a bacia Piaí retornou valores de coeficiente de Nash-

Sutcliffe de 0,88 e viés de 1,36%. A validação do modelo encontrou Nash-Sutcliffe de 0,69 e viés de -6,66%. Conforme Moriasi et al., (2007), os resultados estatísticos foram Muito Bons e Bons para a calibração e validação respectivamente, concluindo a primeira etapa do modelo hierárquico e mostrando que é possível descrever as características da bacia para os períodos selecionados.

Tabela 13: Parâmetros calibrados e validados para bacia Piaí.

Parâmetros	Valores
Abstração Inicial (mm)	31,201
CN	54,909
Tempo de Concentração (h)	5,349
Coefficiente de Armazenamento (h)	3,21
Descarga Inicial (m <sup>3</sup> /s)	0,244
Constante de Recessão	0,941
Vazão Limite (m <sup>3</sup> /s)	0,698

Fonte: Autor (2021).

Os resultados do modelo calibrado para o período seco e validado no período húmido podem ser vistos na Tabela 14. A calibração automática do modelo retornou valores de Nash-Sutcliffe de 0,76 e viés de -0,1%. A validação do modelo encontrou Nash-Sutcliffe de 0,67 e viés de -11,69%, enquadrando os resultados novamente como Muito Bons e Bons para a calibração e validação respectivamente. Terminada esta etapa, foi possível concluir que o modelo consegue reproduzir as características da bacia em diferentes condições climáticas.

Tabela 14: Parâmetros calibrados no período seco e validado no período úmido na bacia Piaí.

Parâmetros	Valores
Abstração Inicial (mm)	61,854
CN	54,909
Tempo de Concentração (h)	5,627
Coefficiente de Armazenamento (h)	5,181
Descarga Inicial (m <sup>3</sup> /s)	0,305
Constante de Recessão	0,822
Vazão Limite (m <sup>3</sup> /s)	0,442

Fonte: Autor (2021).

Os parâmetros calibrados no período úmido na bacia Piaí não permitiam uma validação no período seco na bacia Sepultura pois não apresentaram bons índices de consistência, mas conforme explicado por Klemes (1986) o modelo pode ser calibrado

em um segmento seco e validado em um segmento úmido para a aplicação desta modelagem. Foram encontrados Nash-Sutcliffe de 0,65 e viés de -39,95%. Enquanto o coeficiente se enquadra em um resultado satisfatório, o viés ultrapassa os valores aceitáveis. Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que o viés tende a apresentar maior diferença na calibração automática de períodos secos quando comparado com os mais chuvosos, devendo ser levado em consideração quando um teste de divisão de novamente como Muito Bons e Bons para a calibração e validação respectivamente. Terminada esta etapa, foi possível concluir que o modelo consegue reproduzir as características da bacia em diferentes condições climáticas.

Os parâmetros calibrados no período úmido na bacia Piaí não permitiam uma validação no período seco na bacia Sepultura pois não apresentaram bons índices de consistência, mas conforme explicado por Klemes (1986) o modelo pode ser calibrado em um segmento seco e validado em um segmento úmido para a aplicação desta modelagem. Foram encontrados Nash-Sutcliffe de 0,65 e viés de -39,95%. Enquanto o coeficiente se enquadra em um resultado satisfatório, o viés ultrapassa os valores aceitáveis. Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que o viés tende a apresentar maior diferença na calibração automática de períodos secos quando comparado com os mais chuvosos, devendo ser levado em consideração quando um teste de divisão de amostra for realizado (GUPTA, SOROOSHIAN e YAPO, 1999; MORIASI et al., 2007). Sendo esta a última parte do modelo hierárquico, é possível concluir que os resultados estatísticos apresentados são aceitáveis e o modelo pode ser utilizado em uma terceira bacia sem dados medidos de vazão.

Ao final das modelagens foi possível encontrar os resultados para os parâmetros de entrada das bacias rurais. Em conjunto com os parâmetros calibrados para bacia urbana conforme Missiaggia (2018), a Tabela 15 apresenta os dados utilizados para modelar os 10 anos de dados de precipitação e possibilitar a construção das curvas de permanência e o cálculo da Qmlp.

Tabela 15: Parâmetros utilizados para as bacias rurais e urbanas.

(continua)

Dados Calibrados	Bacias Rurais	Bacias Urbanas
Área Total (km <sup>2</sup> )	Específico para cada bacia.	
Abstração Inicial (mm)	26,728	10,877
CN	46,102	35,31
Área Impermeável (%)	Específico para cada bacia.	
Tempo de Concentração (h)	1,083	2,061

(conclusão)		
Dados Calibrados	Bacias Rurais	Bacias Urbanas
Coefficiente de Armazenamento (h)	1,943	0,888
Descarga Inicial (m <sup>3</sup> /s)	0,305	0,075
Constante de Recessão	0,893	0,255
Vazão Limite (m <sup>3</sup> /s)	0,496	0,213

Fonte: Autor (2021).

#### 5.1.7.1 Curva de permanência e Vazão média de longo período

As vazões encontradas como resultado da modelagem foram reorganizadas, gerando as curvas de permanência, destacando as vazões que são igualadas ou excedidas para 50% e 95% do tempo, podendo ser observadas na Figura 20.

A Q<sub>mlp</sub> também foi determinada, através das médias calculadas entre as médias encontradas para cada ano hidrológico e estão dispostas na Tabela 16. A permanência correspondente a Q<sub>mlp</sub> encontrada conforme as curvas de permanência.

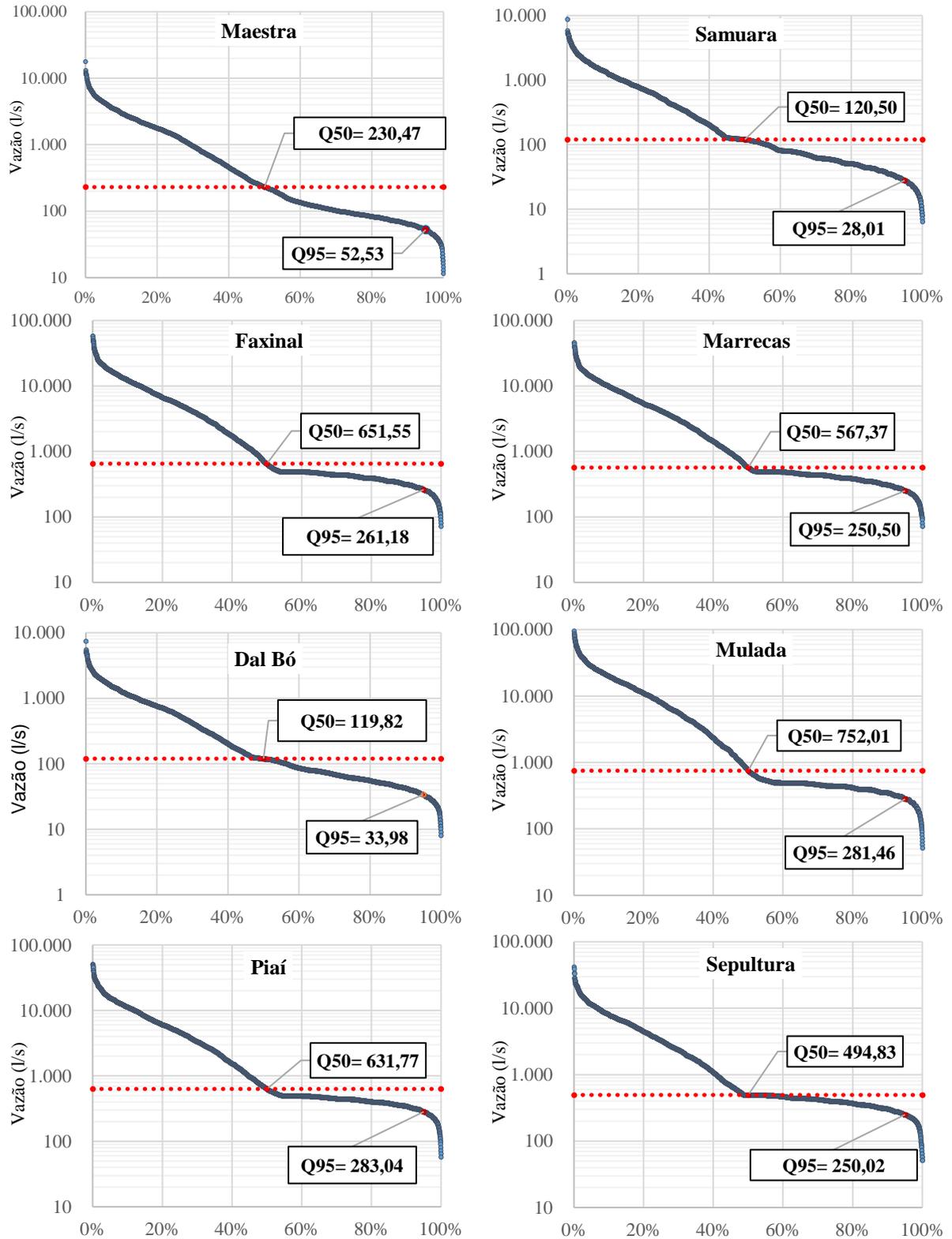
Tabela 16: Q<sub>mlp</sub> para cada bacia.

Bacia	Maestra	Samuara	Faxinal	Marrecas	Dal Bó	Mulada	Piaí	Sepultura
Q <sub>mlp</sub> (l/s)	978,43	467,68	4.091,07	3.222,27	439,38	6.253,59	3.638,17	2.663,76
Permanência	29,64%	28,11%	28,72%	29,18%	29,36%	28,14%	28,69%	27,93%

Fonte: Autor (2021).

Relacionando os valores das Q<sub>mlp</sub> para cada bacia nas suas respectivas curvas de permanência, todos apresentam vazões próximas a 30% do tempo de permanência. Em todas as bacias modeladas o tempo de concentração determinado foi baixo, principalmente pelo fato de utilizar bacias pequenas, gerando respostas rápidas no exutório e registrando grandes picos de vazão nos momentos de chuva. No restante do tempo, sem precipitação, as vazões encontradas são consideravelmente menores, podendo justificar o fato da Q<sub>mlp</sub> situar-se em torno de apenas 30% do tempo de permanência.

Figura 20: Curvas de permanência para cada bacia de captação.

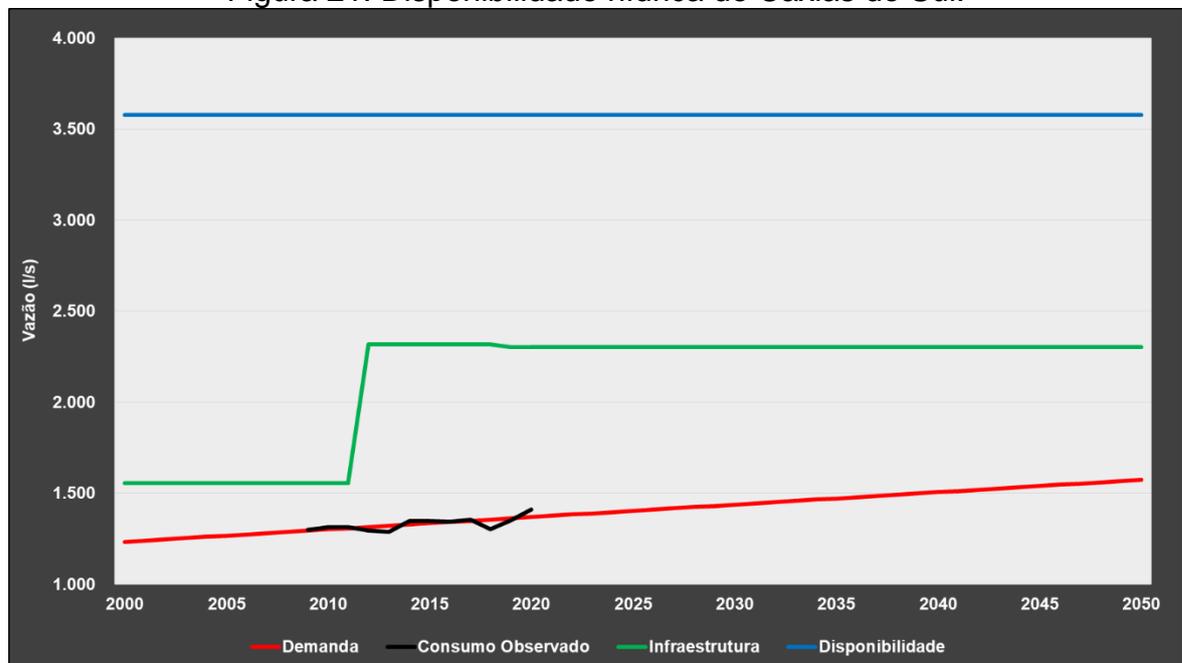


Fonte: Autor (2021).

### 5.1.8 Disponibilidade Hídrica

Para avaliar a disponibilidade hídrica do município ao longo do tempo foi elaborada um gráfico que relaciona as curvas teóricas apresentadas no capítulo 3.6 com as condições encontradas no município de Caxias do Sul. A Figura 21 mostra o gráfico quando observada a disponibilidade hídrica das bacias de captação, a infraestrutura hídrica dos barramentos existentes e a demanda observada e projetada para o município até 2050.

Figura 21: Disponibilidade hídrica de Caxias do Sul.

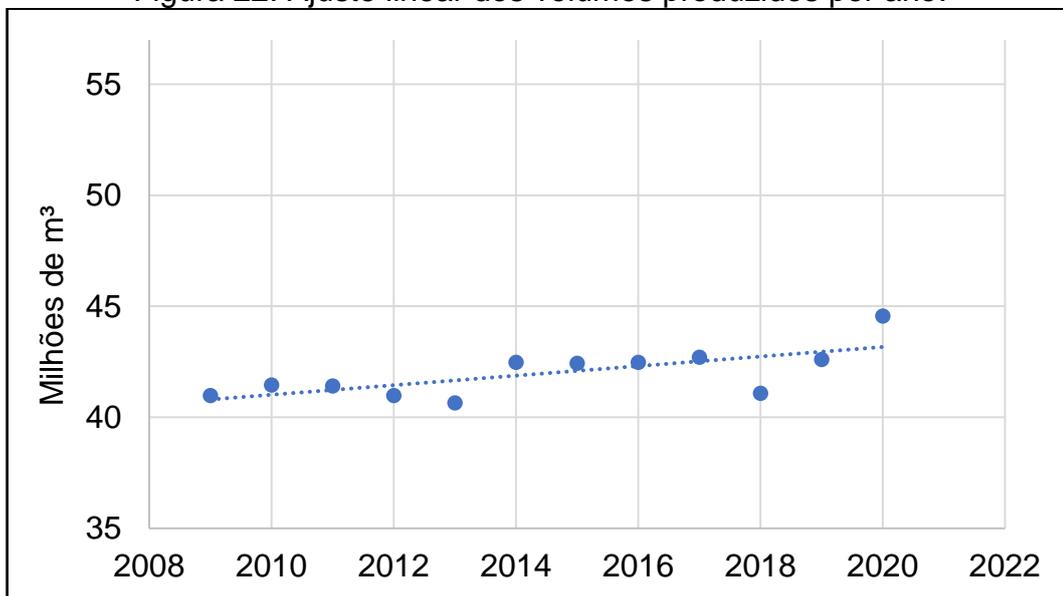


Fonte: Autor (2021).

Para encontrar a disponibilidade hídrica do município poderia ser utilizada a  $Q_{mlp}$ , usualmente utilizada para avaliar a disponibilidade de mananciais. Porém os valores encontrados na Tabela 16 somados resultam em uma vazão de 21.754,35 L/s. Para uma melhor visualização dos valores nos gráficos de disponibilidade, infraestrutura e demanda foram utilizadas as  $Q_{50}$ , vindas da modelagem da curva de permanência segundo do capítulo 5.1.7.1 somadas as vazões apresentadas na Tabela 2 para os poços. Isto demonstra que, mesmo em uma avaliação de forma mais conservadora, utilizando apenas  $Q_{50}$ , o município possui grande disponibilidade hídrica quando comparada com a demanda e infraestrutura projetadas. O valor encontrado para a disponibilidade foi de 3.577,52 L/s.

A infraestrutura foi obtida a partir dos dados de vazão captada da Tabela 1, variando ao longo do tempo conforme barramentos deixaram de ser utilizados (Galópolis em 2019) ou novos foram construídos (Marrecas em 2012), estabilizando em 2.303 L/s a partir de 2019. Para poder estimar as demandas futuras foi encontrado uma equação para extrapolação da linha de tendência gerada a partir dos volumes produzidos para cada ano, conforme visto no gráfico da Figura 22. A partir desta informação foram calculadas as demandas para cada ano, vistas na linha vermelha da Figura 21.

Figura 22: Ajuste linear dos volumes produzidos por ano.



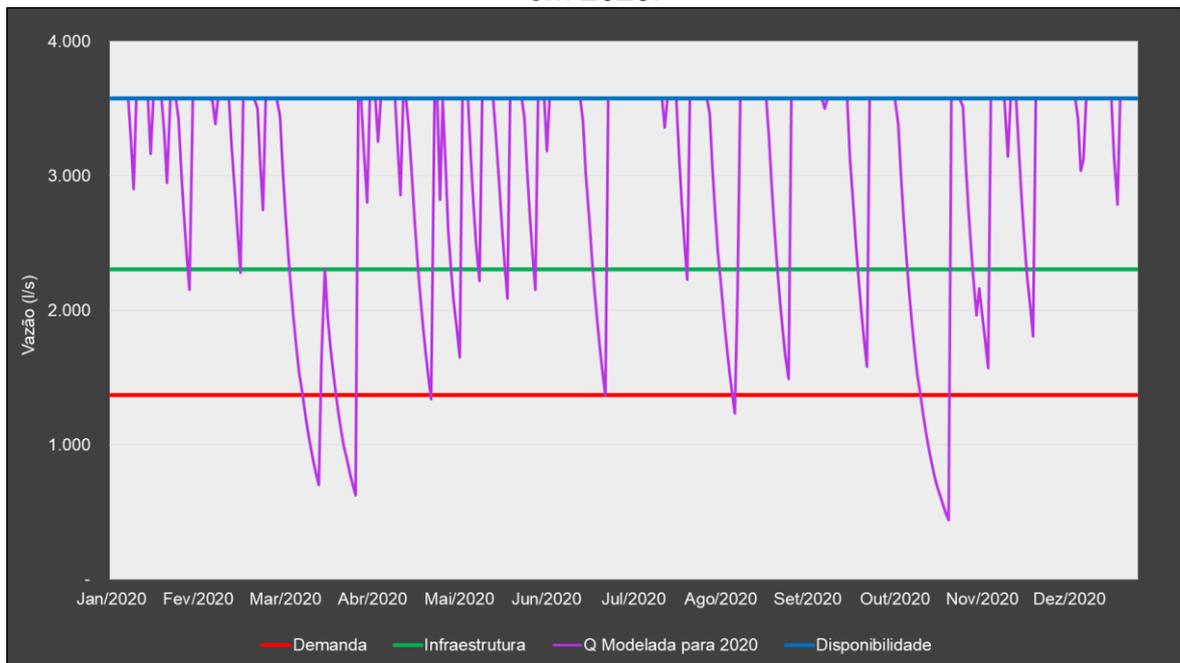
Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 21, é possível observar que a infraestrutura disponível no município é maior que a demanda atual e prevista para 2050. E, mesmo em um caso de um crescimento abrupto da demanda, existem mais três bacias de captação sem barramento que podem ser utilizadas para aumentar a infraestrutura existente. A disponibilidade observada também apresenta valor maior que a demanda prevista, evidenciando um cenário futuro sem escassez de água para o município na análise anual das vazões.

É possível concluir que o município de Caxias do Sul não possui problemas de disponibilidade hídrica ou de infraestrutura disponível para atender as demandas atuais e futuras, estando, nesta análise preliminar, em uma condição muito boa de segurança hídrica. Porém, casos de estiagem acontecem em alguns meses de anos mais secos, como foi o caso de 2020, em que os primeiros meses do ano

apresentaram pouca precipitação no município. Para avaliar esta condição foi construído um gráfico similar ao da Figura 21, para comprovar se em algum momento ao longo do ano a vazão observada estaria abaixo da demanda. A Figura 23 mostra o resultado encontrado, onde a demanda, infraestrutura e disponibilidade se mantem igual a apresentada na Figura 21 e a vazão observada foi obtida através da modelagem conforme os resultados do capítulo 5.1.7.

Figura 23: Análise da disponibilidade, infraestrutura, demanda e vazão observada em 2020.



Fonte: Autor (2021).

É possível ver no gráfico em várias ocasiões ao longo do ano a vazão observada foi menor que a infraestrutura, fazendo com que o nível das barragens baixasse. Nos períodos de março até abril, começo de maio, final de agosto e de outubro a vazão observada apresentou valores menores que a demanda para o ano. Esta situação apresenta grandes riscos à segurança hídrica, gerando racionamento e, se por períodos prolongados a vazão observada não aumentar, falta de água para o abastecimento do município. Devido aos barramentos e a volta das chuvas na região não houve falta de água neste período, mas mostra a importância do acompanhamento da segurança hídrica para evitar cenários críticos, mesmo que em apenas alguns dias do ano, de falta de água.

## 5.2 ESCOLHA DOS INDICADORES DE SEGURANÇA HÍDRICA

Com base nos dados levantados na caracterização do município, foram elencados os principais Geradores de Impacto Internos e Geradores de Impacto Externo. A partir de cada um dos GIs foram definidos os principais aspectos e impactos relacionados à segurança hídrica. Estes impactos causam problemas para os RIs e cada um destes problemas levantados foi atribuído um indicador. A Tabela 17 mostra o resultado desta análise, indicando os GIs, aspectos, impactos, problemas e indicadores. A legenda dos indicadores pode ser vista na Tabela 17.

Cada conjunto de indicadores busca monitorar o avanço de cada um dos problemas levantados. Alguns indicadores e problemas acabaram por se repetir ao longo da elaboração da Tabela 17, podendo ser concluído que diferentes geradores de impactos podem causar problemas similares e problemas diferentes podem ser monitorados com os mesmos indicadores e métricas. A partir disto, os indicadores foram classificados dentro de cada uma das dimensões da segurança hídrica, sem a repetição dos mesmos, apresentado a escolha final do conjunto de indicadores e métricas. Assim, a Tabela 18 apresenta o resultado dos indicadores escolhidos com as suas respectivas métricas para monitorar a segurança hídrica conforme as condições apresentadas para o município.

Tabela 17: Indicadores para cada problema gerado pelos GI.

(continua)

Geradores de Impacto		Aspecto	Impacto	Problema	Indicadores
Internos	Crescimento populacional	Consumo de água	Aumento da exigência hídrica do recurso hídrico	Racionamento	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.
			Aumento na geração de esgoto	Poluição e Doenças	48, 49, 50, 51, 52, 57 e 58.
Crescimento econômico	Ocupação do solo	Contaminação dos corpos hídricos e bacias de captação		Racionamento	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.
				Redução das áreas de preservação	34, 38, 52, 53, 54, 55 e 56.
	Ocupação do solo	Contaminação dos corpos hídricos e bacias de captação		Racionamento	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.
				Redução das áreas de preservação	34, 38, 52, 53, 54, 55 e 56.
Desenvolvimento de atividades econômicas		Geração de renda, emprego e arrecadação		Maior a perda econômica em caso de falta de abastecimento de água nas indústrias	1, 2, 3, 4 e 5.
				Maior a perda econômica em caso de falta de abastecimento de água para atividades de comércio de bens e prestação de serviços.	1, 2, 6, 7 e 8.

					(conclusão)	
Geradores de Impacto		Aspecto	Impacto	Problema	Indicadores	
Internos	Crescimento econômico	Desenvolvimento de atividades econômicas	Geração de renda, emprego e arrecadação	Maior a perda econômica em caso de falta de abastecimento de água para atividades agropecuárias	1, 2, 9, 10 e 11.	
			Aumento da exigência hídrica do recurso hídrico	Racionamento	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.	
	Legislação e Políticas	Legislação mais rígida	Preservação recursos hídricos, uso consciente e redução do desperdício de água	Redução da viabilidade econômica e financeira dos empreendimentos	Ineficiência da aplicação das leis e políticas	28, 29, 30, 31 e 56.
					Redução da arrecadação do município	1, 2, 5, 8, 11, 13 e 14.
					Racionamento	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.
					Poluição e Doenças	48, 49, 50, 51, 52, 57 e 58.
		Legislação menos rígida	Descaracterização das bacias de captação, redução das APP's, expansão da zona urbana	Incentivo a instalação/expansão de atividades econômicas potencialmente poluidoras	Redução das áreas de preservação	34, 38, 52, 53, 54, 55 e 56.
					Maior a perda em caso de falta de abastecimento de água nas atividades econômicas	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 23 e 24.
					Racionamento	15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.
Externos	Mudanças Climáticas	Alteração no ciclo hidrológico	Danos causados por eventos meteorológicos extremos	Aumento na quantidade ou frequência de precipitação	32, 33, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 43, 46 e 47.	
				Redução na quantidade ou frequência de precipitação	32, 33, 35, 36, 37, 39, 40, 44, 45, 46 e 47.	

Fonte: Autor (2021).

Tabela 18: Relação dos indicadores com as dimensões da segurança hídrica.

(continua)

Dimensão	Indicador	Métrica	nº
Econômica	PIB per capita	\$	1
	PIB municipal	\$	2
	Produção industrial em relação à água utilizada no setor	\$/V	3
	Área ocupada por indústrias dentro de bacias de captação	A	4
	Quantidade de indústrias no município	Adm	5
	Produção de estabelecimentos de comércio e serviços em relação à água utilizada no setor	\$/V	6
	Área ocupada por estabelecimentos de comércio e serviços dentro de bacias de captação	A	7
	Quantidade de estabelecimentos de comércio e serviços dentro do município	Adm	8
	Produção agropecuária em relação à água utilizada no setor	\$/V	9
	Área ocupada para produção agropecuária dentro de bacias de captação	A	10
	Quantidade de estabelecimentos agropecuários no município	Adm	11

Dimensão	Indicador	(conclusão)	
		Métrica	nº
Econômica	Área anual ocupada por novos empreendimentos em bacia de captação	A	12
	Quantidade de empreendimentos dentro de bacia de captação	Adm	13
Humana	Relação entre o valor arrecadado e valor necessário para recuperar a poluição gerada	%	14
	Volume captado	V	15
	Capacidade das estações de tratamento de água	Q	16
	Perdas reais	V	17
	Perdas aparentes	V	18
	Área do município com redes de distribuição de água	A	19
	População abastecida total	Hab	20
	População abastecida por poços	Hab	21
	População abastecida por ETAs	Hab	22
	Gastos com tratamento	\$	23
	Existência de planejamento estratégico de expansão dos sistemas para atender demandas futuras	Adm	24
	Taxa de crescimento populacional	Adm	25
	Densidade populacional	Hab/A	26
	Consumo per capita de água	Q/Hab	27
	Existência de políticas para incentivar a redução do consumo	Adm	28
	Existência de fiscalização nas bacias/recursos hídricos pelo órgão responsável	Adm	29
	Quantidade de autos de infração gerados	Adm	30
	Quantidade de infrações reincidentes	Adm	31
	Resiliência	Precipitação média	V
Reservas exploráveis de águas subterrâneas		V	33
Existência de zoneamento da vulnerabilidade dos aquíferos		Adm	34
Volume máximo dos reservatórios		V	35
Volume atual dos reservatórios		V	36
Tempo que o reservatório mantém o abastecimento em condições de seca		t	37
Percentual da população que vive em áreas de risco		Adm	38
Temperatura média do município		T	39
Evapotranspiração média dos reservatórios		V	40
Quantidade de eventos extremos relacionados ao excesso de água (cheias, deslizamentos)		Adm	41
Existência de plano de drenagem urbana municipal		Adm	42
Existência de plano de segurança de barragem		Adm	43
Quantidade de eventos extremos relacionados à falta de água (secas ou estiagens)		Adm	44
Existência de estudos de fontes alternativas para abastecimento do município		Adm	45
Eossistêmica		Vazão média de longo período das Bacias de captação	Q
	Vazão Q50 das Bacias de captação	Q	47
	Volume de esgoto gerado	V	48
	Percentual da população com rede de coleta e tratamento de esgoto	Adm	49
	Capacidade das estações de tratamento de esgoto	Q	50
	Taxa de internações por Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado (DRSAI)	Adm	51
	WCI (OD, Cianobactérias, turbidez, Manganês, nitrito e pH)	Adm	52
	Percentual do município com vegetação preservada	%	53
	Relação entre a área total das bacias de captação e APP de recursos hídricos	%	54
	Percentual de impermeabilização do solo no município	%	55
Existem políticas para incentivar a preservação dos recursos hídricos	Adm	56	
Percentual dos resíduos sólidos gerados no município que possuem destinação correta	%	57	
Taxa de cobertura do serviço de coleta de resíduos sólidos	%	58	

Fonte: Autor (2021).

O conjunto de indicadores apresentados na Tabela 18 podem ser aplicados em sua totalidade em outros municípios, desde que apresente características semelhantes de abastecimento e apresentem os mesmos GI e RI. É também possível a aplicação para cada GI separados, onde as consequências causadas apenas pelo crescimento econômico, por exemplo, podem ser observadas para qualquer município que apresente esse GI, analisando os aspectos e impactos decorrentes sobre a segurança hídrica. Ainda é possível analisar apenas os problemas, onde um município que esteja enfrentando racionamento, por exemplo, pode aplicar apenas os indicadores que monitorem o avanço deste observando a tabela 17.

### **5.2.1 Análise da Escolha dos GI e Problemas**

O crescimento populacional foi apontado como um GI, considerando que o aumento da população nas últimas décadas e projeções futuras tendem a gerar impactos negativos na segurança hídrica dos RI, a própria população do município. O contínuo aumento da população exige que os recursos hídricos tenham disponibilidade suficiente para abastecer a população e que o município tenha condições de tratar e distribuir a água. O aumento do consumo de água e a urbanização das áreas de bacia de captação podem gerar racionamento ou, em casos mais extremos, a contaminação dos corpos hídricos. Esse último processo pode exigir que o município invista em infraestrutura adicional e avançada para remover ou reduzir elementos a fim de atender aos padrões de potabilidade.

O crescimento econômico foi considerado outro GI, tendo em vista que o perfil econômico diversificado é um dos principais fatores de expansão do município. A implantação de novas atividades econômicas ou expansão das já existentes afetam diretamente a ocupação do solo, prejudicando a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Em áreas de bacia de captação este problema é ainda mais grave, impactando de forma negativa toda a população e até mesmo os próprios empreendimentos que dependem diretamente deste recurso. Como impacto positivo, o crescimento econômico traz aumento da renda, emprego e arrecadação para o município, mas torna as perdas econômicas para os empreendimentos e o município maiores frente a casos de falta de abastecimento.

Outro GI encontrado para o município são as políticas e legislações. Podendo ser federais, estaduais ou municipais, as leis acerca dos recursos hídricos têm grande

impacto na segurança hídrica. Para avaliar os problemas gerados a partir deste GI foram consideradas dois cenários, um onde a legislação seria mais rígida e outro menos rígida.

No caso onde a legislação aplicada fosse mais rígida e políticas de oferta e demanda existissem, o efeito esperado seria uma maior preservação dos recursos hídricos e a redução do desperdício de água, tendo um impacto positivo no sistema (BORGES et al., 2011; GARCIA, 2012). Para a aplicação desta legislação seria necessário existir uma estrutura de fiscalização por parte do órgão responsável, podendo medir se o aumento da exigência legal realmente tem efeito sobre a redução da degradação dos recursos hídricos e áreas de preservação, aplicando punição de forma proporcional os danos causados pelos infratores (SOARES, 2012). Outro impacto da aplicação da legislação é a redução da viabilidade econômica e financeiras das atividades econômicas. Novas atividades com potencial poluidor que outrora poderiam ser instaladas em bacias de captação agora não possuem mais permissão, reduzindo o crescimento econômico e arrecadação para o município nestas áreas.

Sendo a legislação menos rígida, como por exemplo, permitindo a descaracterização parcial ou total de bacias de captação e possibilitando a expansão urbana para áreas de preservação, uma maior exigência hídrica é esperada e maior possibilidade de racionamento em situações futuras de estiagem. Uma alteração nas exigências legais tornaria áreas, em que antes possuíam fiscalização constante e limitações no uso do solo, em locais aptos a instalação e a expansão das atividades e instalação de novos empreendimentos. Isso gera um conflito contraditório para as empresas, onde a redução das áreas preservadas causa uma redução na segurança hídrica. Nesse caso se observa um *trade-off* que deve ser integrado ao planejamento municipal.

Como GI final escolhido foram as mudanças climáticas. Mesmo este apresentando que o município não possui grandes problemas de variação na precipitação ao longo de grandes períodos, casos de estiagem ainda podem ocorrer, como exemplificado na Figura 23. Para evitar estes casos o monitoramento da situação climática é essencial. As alterações no ciclo hidrológico podem gerar eventos meteorológicos extremos devido ao aumento ou redução da precipitação, possivelmente causando danos aos moradores do município.

## 5.2.2 Análise da escolha dos indicadores

A análise dos indicadores será dividida nos sub-itens abaixo correspondentes a cada uma das quatro dimensões da segurança hídrica, onde será detalhada a importância e o motivo da aplicação dos indicadores no município de Caxias do Sul.

### 5.2.2.1 Dimensão Humana

Os indicadores da dimensão humana focam na garantia do abastecimento e aplicação das legislações. Para analisar o tratamento de água foram escolhidos os indicadores de volume captado, a capacidade de cada estação de tratamento e os gastos com o tratamento de água. Todos estes dados podem ser obtidos com a empresa de saneamento. O volume captado indica a quantidade de água que será utilizada para o abastecimento do município. Os gastos com o tratamento indicam como está a qualidade da água bruta que chega na estação de tratamento, avaliando o valor investido em produtos químicos. Porém não são todas as situações que o aumento deste indicador apresenta uma redução na segurança hídrica, pois pode variar conforme a quantidade de água que está sendo tratada. Por isto o indicador de gastos com o tratamento deve ser analisado em conjunto com o volume que está sendo captado. A capacidade das estações de tratamento importante para monitorar a necessidade de instalação de novas infraestruturas para atender o consumo do município.

Na etapa de distribuição foram escolhidos os indicadores de perdas de água, quantidade de habitantes abastecida por um dos sistemas de abastecimento, o crescimento e densidade populacional, consumo *per capita* e a área do município que possui rede de distribuição. Ao analisar os valores encontrados para estes resultados será possível identificar como a empresa de saneamento deve agir para garantir a segurança hídrica.

As perdas reais e aparentes são importantes para avaliar a quantidade de água que está sendo desperdiçada por vazamentos, erros de medição e ligações clandestinas. Reduzir estes desperdícios ao máximo possível aumenta a segurança hídrica. Avaliar quantos habitantes são abastecidos por cada sistema de abastecimento indica a representatividade do uso de poços ou ETA no município. A população urbana de Caxias do Sul em sua totalidade é abastecida através das ETAs

e a parte da população rural é abastecida por poços, adicionando mais essa característica a estes dois indicadores.

A população total abastecida vem da junção dos dois indicadores apresentados anteriormente e acaba por ser mais importante do que os dois, pois independente de se a população é abastecida por poço ou por ETA, o importante é que o maior percentual possível da população seja abastecido. A taxa de crescimento populacional é utilizada para monitorar o aumento da população. Quanto mais a população estiver crescendo, maior a pressão sobre os recursos hídricos para atender as demandas de água. O indicador de área do município com redes de água é necessário para monitorar a abrangência das redes de distribuição de água tratada, avaliando se este valor está crescendo em conjunto com a expansão das áreas urbanas do município. O consumo *per capita* indica a demanda individual de água tratada, sendo importante para controlar a quantidade de água necessária para abastecer todos os habitantes do município e planejar infraestruturas adicionais caso este valor continue aumentando.

A segunda parte dos indicadores da dimensão humana envolve a análise da aplicação da legislação relacionada a segurança hídrica. Para tanto, é necessário avaliar a existência de legislação e políticas locais que assegurem a preservação dos recursos hídricos e incentivem o consumo consciente de água. Para garantir a aplicação da lei deve-se manter uma fiscalização constante nas áreas de captação. A quantidade de autos de infração gerados indica se realmente há fiscalização nas bacias de captação e os infratores estão sendo notificados e cobrados por seus crimes ambientais. Já a avaliação de casos reincidentes mostra se a legislação realmente é efetiva e os valores de multa aplicados realmente desencorajam os infratores a repetir o ato.

#### 5.2.2.2 Dimensão Econômica

Avaliando os indicadores classificados na dimensão econômica, os mais básicos e de fácil acesso são o PIB municipal e o PIB *per capita*, necessários para medir o crescimento do município e a condição financeira dos habitantes como um todo. Mas especificamente avaliando as atividades econômicas, foi escolhido monitorar a área ocupada, a quantidade de estabelecimentos e a produção em relação a quantidade de água consumida para cada setor da economia. Estes indicadores

conseguem mostrar o impacto que cada setor tem na ocupação do solo em bacia de captação e o quanto impactaria a falta de abastecimento em algum destes segmentos. O valor da produção utilizado pode vir do VAB dos setores e o monitoramento do volume de água utilizada pode ser feito pela empresa de saneamento.

A área anual ocupada por novos empreendimentos mostra o quanto o município está se desenvolvendo e, o mais importante, a área que está sendo comprometida nas bacias de captação, aumentando o risco de poluição e contaminações antrópica dos corpos hídricos. Idealmente o valor arrecadado pelo município com os empreendimentos deve compensar o valor necessário para se recuperar o impacto gerado sobre os recursos hídricos. Para tanto pode ser aplicado uma ou taxa corretiva, também conhecida como taxa pigouviana, às atividades que apresentam externalidades negativas e subsidiar as atividades que possuem externalidades positivas no município (MANKIW, 2018, pg. 196).

#### 5.2.2.3 Dimensão Resiliência

A dimensão resiliência avalia a disponibilidade atual de água para o abastecimento através dos indicadores de volume máximo, controle da variação do volume dos reservatórios e volume de água subterrânea passíveis de exploração sem prejuízo aos aquíferos. O volume máximo mostra a capacidade dos barramentos existentes, sendo útil na avaliação da disponibilidade atual e necessidade da construção de novos barramentos em caso de aumento da demanda. A variação dos volumes de cada reservatório pode ser feita para comparar se o valor encontrado no momento está abaixo ou acima da média histórica para certo mês do ano. Casos em que o valor esteja abaixo do esperado é possível pôr em ação políticas de controle da demanda até o nível normalizar para evitar racionamento. O tempo que o reservatório mantém o abastecimento em condições de seca pode ser medido através do volume útil menos a evapotranspiração e consumo médio diário do município, quantificando quantos dias sem chuva são necessários para se atingir o volume morto. Com esta medida é possível saber previamente quantos tempo o sistema ainda consegue abastecer o município em casos extremos de seca, facilitando o planejamento de alternativas para o abastecimento e evitando ações desnecessárias nos primeiros dias sem chuva.

Os indicadores de água subterrânea escolhidos foram o volume explotável e

de existência de um zoneamento da vulnerabilidade dos aquíferos. O volume explotável de águas subterrâneas mede as reservas que, em casos críticos, podem ser utilizadas como forma alternativa para o abastecimento da população. Já a existência de um zoneamento da vulnerabilidade dos aquíferos é um passo importante qualquer município manter a segurança hídrica. É uma ferramenta de gestão do uso do solo, podendo ser utilizado no planejamento das áreas aptas a receber empreendimentos com alto potencial poluidor e zonedar áreas vulneráveis que precisam de atenção especial quanto ao seu uso para prevenir problemas de contaminação futuros.

A análise de fontes alternativas de abastecimento é parte importante da garantia ao acesso à água para todos os seus usos e assegurar que as necessidades futuras de água para o município sejam atendidas. Com isto é possível o planejamento em casos de escassez ou de falha dos sistemas existentes.

Os indicadores das médias da precipitação e temperatura do município e evapotranspiração dos reservatórios são importantes para monitorar as variações climáticas ao longo dos anos, sendo esperado que esses valores tenham mínima alteração ao longo dos anos para manter a segurança hídrica. Dentre estes, a precipitação é um indicador muito importante, pois tem ligação direta com a disponibilidade de água no município.

As quantidades de eventos extremos relacionados com as variações climáticas são acompanhados juntamente com o tempo que o reservatório pode manter o abastecimento, resultando na quantificação dos possíveis efeitos que os eventos meteorológicos de origem hidrológica possam causar na segurança hídrica. O monitoramento dos eventos extremos por falta ou excesso de água é um indicador importante para avaliar os efeitos das variações climáticas na região. A intensidade das precipitações está fora do controle do município, mas precisa ser monitorada para avaliar a necessidade da construção de estrutura específica para atenuação dos efeitos causados pelos eventos extremos. A existência de planos de drenagem urbana, plano de segurança de barragem como também o percentual da população que vive em áreas de risco suscetíveis a inundações e movimentos de massa, estão diretamente relacionados a análise de eventos climáticos extremos. A existência destes planos possibilita a avaliação da infraestrutura existente ou a construção de novas obras que garantam a segurança hídrica e da população, reduzindo ao máximo a existência de moradias em áreas de risco.

#### 5.2.2.4 Dimensão Ecológica

A dimensão ecológica utiliza indicadores que relaciona a qualidade e disponibilidade de água, tanto para o ecossistema local quanto para o abastecimento atual e futuro. Para monitorar os efeitos do saneamento na qualidade da água e saúde, não só dos recursos hídricos, mas também da população, foram escolhidos os indicadores de geração de esgoto no município e seu tratamento, os resíduos sólidos gerados e a sua destinação e a taxa de internações por DRSAI. O volume de esgoto gerado constitui em uma informação que pode indicar o quanto precisa ser tratado no município e capacidade das estações de tratamento precisa ser mais que este valor.

O percentual da população com rede de coleta e tratamento de esgoto é utilizado para medir a abrangência dos locais com tratamento adequado, devendo estar sempre aumentando para garantir a que não haja despejo de esgoto não tratado. Estes indicadores são importantes no planejamento da empresa de saneamento responsável, avaliando a necessidade de construção de novas ETE e expansão das redes coletoras. A avaliação da taxa de cobertura do serviço de coleta de resíduos sólidos e a sua destinação correta é importante, pois locais que não possuem coleta e destinação correta podem acabar descartando-os em locais inadequados, possivelmente poluindo recurso hídricos próximos. A taxa de internação por DRSAI foi escolhida para monitorar se a saúde dos habitantes está sendo afetada devido à falta de saneamento adequado no município.

A água bruta é avaliada quanto a sua disponibilidade para o abastecimento e para o ecossistema. As vazões escolhidas foram a Q50 e Qmlp das bacias de captação, sendo importantes para avaliar a disponibilidade e alocação dos seus usos. A aplicação dos indicadores de percentual da área do município preservada, percentual de área impermeabilizada e percentual de áreas de APP nas bacias de captação é importante para avaliar a preservação dos ecossistemas e APP's dos recursos hídricos. A existência de políticas para incentivar a preservação dos recursos hídricos foi considerada importante, mantendo a população informada sobre objetivos e ações necessárias para se atingir um estado de segurança hídrica.

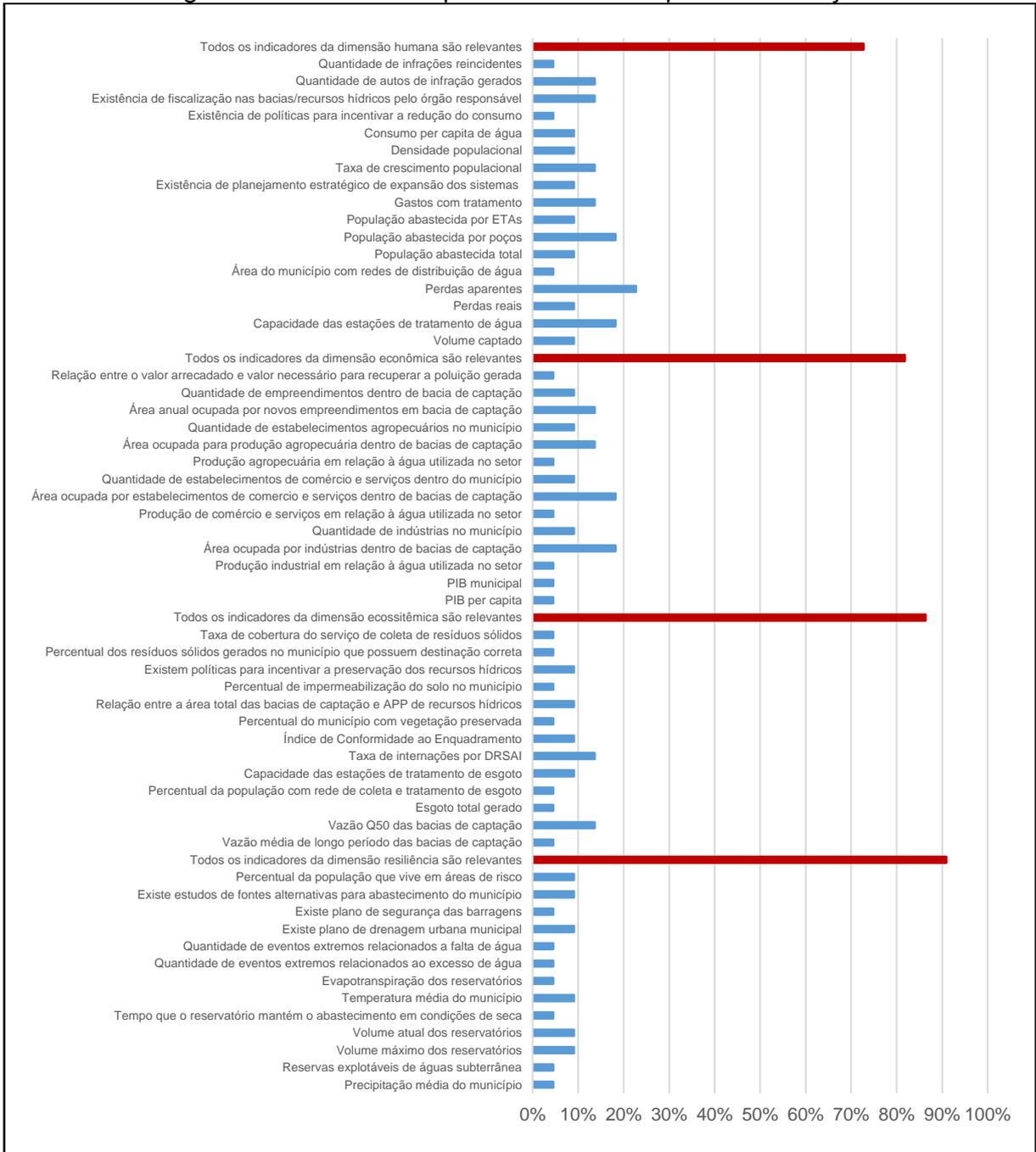
No SAMAE, uma das formas utilizadas para monitorar a qualidade da água é utilizado o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) (CCME, 2001), adaptado para os parâmetros que a empresa monitora nas bacias do município. Estes parâmetros são: OD, Cianobactérias, turbidez, Mn, nitrito e pH. A qualidade da água

bruta indica os seus possíveis usos, se pode ser utilizada para tratamento e abastecimento humano e, conforme os resultados encontrados, permite definir se o método de tratamento atual é adequado para torná-la potável.

### **5.2.3 Análise da Verificação dos Indicadores**

O retorno do questionário realizado para a verificação dos indicadores é apresentado no gráfico da Figura 24 e os sub-itens abaixo apresentam os comentários feitos para cada uma das quatro dimensões, evidenciando as sugestões pertinentes. Os percentuais da Figura 24 mostram as respostas dos entrevistados quanto a escolha dos indicadores que não são relevantes para aplicação em cada dimensão da segurança hídrica, vistos nas linhas azuis. As linhas em vermelho mostram as respostas obtidas quando os entrevistados consideraram que todos os indicadores apresentados são relevantes.

Figura 24: Retorno do questionário da etapa de verificação.



Fonte: Autor (2021).

É possível ver uma aceitação grande dos indicadores escolhidos, evidenciada nas escolhas dos entrevistados que todos os indicadores da dimensão são relevantes. Por este motivo, nenhum dos indicadores inicialmente escolhidos deve ser removido, apenas algumas sugestões dos sub-itens abaixo devem ser adicionadas.

### 5.2.3.1 Dimensão Humana

Dentre os entrevistados, 72,7% consideraram os indicadores da dimensão humana como muito importantes e 27,3% como importante. Na avaliação individual dos indicadores, 72,7% responderam que todos os indicadores são relevantes e nenhuma sugestão notável de indicador para esta dimensão foi encontrada no questionário.

### 5.2.3.2 Dimensão Econômica

O resultado da pesquisa de entrevista para a dimensão econômica mostrou que 68,2% dos entrevistados considera os indicadores como muito importantes e 31,8% como importante. Na avaliação individual dos indicadores, 81,8% dos entrevistados responderam que todos os indicadores são relevantes, e foram sugeridos indicadores abaixo para ser adicionados na dimensão econômica:

- Percentual de esgoto tratado pelas indústrias.
- Percentual de água de reuso em relação a quantidade fornecida aos setores produtivos.
- PIB gerado nas bacias de captação.
- Valor acumulado total dos cálculos de dosimetria de penalidade de multas ambientais em bacias de captação (Decreto Municipal nº 18.537/2016).

Os indicadores sugeridos sobre a geração de esgoto e de utilização de água dentro de empresa podem ser úteis para avaliar a segurança hídrica, porém impor que as empresas forneçam estes dados ao município exige a criação de uma lei específica que regulamente esse ato. O PIB das bacias de captação e o valor acumulado das multas em bacia são bons indicadores para avaliar a dimensão econômica, sendo estes dois escolhidos para complementar os indicadores previamente definidos.

O PIB das bacias de captação é importante para medir o crescimento econômico de cada bacia de captação, a expansão das atividades econômicas para dentro das áreas de bacias de captação e pode ser utilizado como forma de avaliação do *trade-off* existente entre os objetivos de conservação ambiental e de crescimento econômico do município.

O valor acumulado das multas em bacia consegue indicar se a legislação está realmente sendo aplicada, se os infratores realmente estão pagando as multas referentes ao descumprimento da legislação referente a Zona das Águas e o valor monetário arrecadado dentro das bacias de captação e que pode ser utilizado para aprimorar os instrumentos de segurança hídrica local.

### 5.2.3.3 Dimensão Ecológica

Esta dimensão teve a maior porcentagem de participantes que escolheram os indicadores como muito importantes apresentando 77,3% das respostas, enquanto que 22,7% definiram como importante. Na avaliação individual dos indicadores, 86,4% dos entrevistados responderam que todos os indicadores são relevantes e foram sugeridos indicadores abaixo para ser adicionados na dimensão ecológica:

- Vazão Q7,10.
- Vazão Q95.
- Áreas contaminadas (solo e água).
- Qualidade das águas subterrâneas.

A avaliação da água subterrânea foi um assunto pouco abordado neste estudo, mas a aplicação de indicadores deste tema na análise de segurança hídrica é muito importante. Por este motivo a resposta dos profissionais que sugeriram indicadores referentes a qualidade e contaminação de água subterrânea foram consideradas relevantes para este estudo e serão adicionados aos indicadores previamente definidos. A qualidade da água subterrânea pode ser avaliada conforme os parâmetros exigidos na CONAMA 396/2008. As áreas contaminadas podem ser avaliadas através da abrangência da pluma de dispersão dos contaminantes quando identificados locais comprovadamente contaminados, podendo ser utilizada a Resolução CONAMA n.º 420/2009.

Os indicadores sugeridos de vazões Q7,10 e Q95 para cada bacia de captação são bons indicadores para avaliar a dimensão ecológica e também foram escolhidos para complementar os indicadores previamente definidos. Estas vazões podem ser utilizadas como vazões de referência para as bacias, avaliando os limites de utilização da água e garantindo com segurança que após os usos consuntivos os

corpos d'água irão apresentar vazões em quantidade suficiente para manter o funcionamento do ecossistema local.

#### 5.2.3.4 Dimensão resiliência

Os resultados para esta dimensão foram iguais aos da dimensão humana, apresentando 72,7% dos participantes respondendo que esta dimensão é muito importante e 27,3% considerando como importante. Na avaliação individual dos indicadores, 90,9% dos entrevistados responderam que todos os indicadores são relevantes e foram sugeridos indicadores abaixo para ser adicionados na dimensão resiliência:

- Existência de dispositivos de infraestrutura verde (SUDs - *Sustainable Urban Development*).
- Existência de Plano de Segurança da Água.
- Volume morto dos reservatórios.

A avaliação de SUDs é importante para o desenvolvimento sustentável do município e sua existência pode refletir em um aumento da segurança hídrica local, porém requer estudos aprofundados para definir como pode ser aplicado dentro do planejamento existente para o município. Como exemplo de SUDs podem ser implantados painéis solares para geração de energia e aquecedores solar de baixo custo no telhado das casas, utilização de fertilizante e também biogás do tratamento de esgoto doméstico, ambientes ao ar livre com espaços verdes integrados á vias e ciclovias e um planejamento para que os moradores tenham acesso a todas as suas necessidades diárias perto de suas residências e não precisar se deslocar com carros.

Planos de segurança de água são muito importantes para a segurança hídrica também, mas avaliando as dimensões estabelecidas neste estudo, este indicador se encaixaria na descrição estabelecida para a dimensão humana. Como o volume morto foi sugerido por mais de um dos entrevistados, foi considerado que essa medida é importante. Porém, somente o valor de volume morto, que não se altera ao longo do tempo, não iria representar um bom indicador para a segurança hídrica. Para contornar esse problema, o indicador de volume máximo dos reservatórios foi alterado para volume útil dos reservatórios. Esse novo indicador reflete o volume máximo que

pode ser utilizado em situações normais de abastecimento, relacionando os indicadores de volume morto e volume máximo dos reservatórios.

### 5.2.3.5 Indicadores Adicionais

Avaliando as sugestões descritas nos sub-itens acima, a Tabela 19 apresenta quais indicadores serão adicionados à lista da Tabela 18 para determinar o conjunto final de indicadores de segurança hídrica para Caxias do Sul.

Tabela 19: Indicadores de segurança hídrica adicionais.

<b>Dimensão</b>	<b>Indicador</b>	<b>Métrica</b>	<b>nº</b>
Resiliência	Volume útil dos reservatórios	V	35
Ecosistêmica	Q95 das bacias de captação	Q	59
	Q7,10 das bacias de captação	Q	60
	Áreas contaminadas (solo e água)	A	61
	Qualidade das águas subterrâneas	Adm	62
Econômica	PIB gerado nas bacias de captação	\$	63
	Valor acumulado das multas em bacia de captação	\$	64
Humana	Existência de Plano de Segurança da Água	Adm	65

Fonte: Autor (2021).

## 5.3 COMPARAÇÃO DOS INDICADORES COM O PNSH

Comparando os indicadores obtidos neste estudo com os aplicados no PNSH é possível notar uma grande diferença, principalmente na quantidade utilizada, mas também em alguns indicadores e métricas que refletem o objetivo das suas utilizações. Indicadores aplicados em um município com pequenos arroios e dependente do barramento artificial presentes neste estudo irão apresentar diferença quando comparados com um índice aplicável para todos os diferentes municípios do Brasil. Sendo este estudo focado apenas em Caxias do Sul, muitos dos indicadores refletem os problemas específicos conforme as características apresentadas neste estudo para a região.

A dimensão humana é a que apresenta maior diferença, sendo que o PNSH só utiliza um indicador. O abastecimento humano é um tópico complexo que, para ser avaliado em sua totalidade necessita de mais que um indicador para apresentar os resultados mais próximos da realidade encontrada. Foram utilizados 17 indicadores para esta dimensão neste estudo, adicionando indicadores de consumo *per capita*,

crescimento populacional, diferentes sistemas de abastecimento de água, gastos com o tratamento, perdas e legislações.

Já a dimensão econômica quando comparada com PNSH mantém mesma base, a avaliação do VAB dos setores produtivos. Porém enquanto que o PNSH utiliza apenas dois indicadores para os setores primário e secundário, este estudo estabelece 14 indicadores para esta dimensão. Neste estudo são exploradas as condições econômicas gerais do município e dos seus moradores e monitora os avanços das atividades para dentro das bacias de captação através da quantidade e da área ocupada por estabelecimentos de cada setor. Os indicadores adicionados a este estudo que diferem dos estabelecidos no PNSH foram escolhidos com o objetivo de avaliar o benefício econômico gerado pela expansão das atividades quando comparados com os riscos que estas impõem sobre o abastecimento de água atual e futuro.

A dimensão resiliência também não apresenta grandes mudanças entre os indicadores do PNSH e os deste estudo, sendo que o foco deste trabalho é na reservação artificial, principal método utilizado no município devido a impossibilidade de reservação natural graças a topografia local. Para este estudo foram definidos 14 indicadores, adicionando a quantidade de eventos extremos de falta ou excesso de água, população morando em áreas de risco, existência de planos de segurança de barragem e drenagem urbana, temperatura e evapotranspiração.

Outra dimensão que apresenta grandes diferenças nos indicadores é a ecossistêmica. Apenas 3 indicadores são utilizados no PNSH, enquanto este estudo apresenta 13. O PNSH opta por avaliar a razão entre a vazão remanescente após as retiradas de usos consuntivos e a vazão natural Q95 enquanto que este estudo avalia as vazões Q<sub>mlp</sub>, Q50, Q95 e Q7,10. O motivo desta diferença é o tamanho dos recursos hídricos avaliados no PNSH quando comparado a este estudo. Em Caxias do Sul, que possui barramento de pequenos arroios e as vazões encontradas na maioria do tempo são pequenas, foram selecionadas vazões que consigam caracterizar as bacias de captação, mantendo a ideia de monitorar a vulnerabilidade e mantimento da quantidade suficiente para os usos ecossistêmicos.

Para a qualidade da água, o PNSH utiliza como base a CONAMA 357/2005 enquanto que este estudo optou por aplicar o ICE. Este índice utiliza os parâmetros relevantes já aplicados para a situação em que se encontra as bacias do município. A segurança de barragem de rejeitos utilizada no PNSH foi retirada deste estudo pois

Caxias do Sul não possui este tipo de barramento. Em contrapartida foram adicionados vários indicadores para avaliar a qualidade da água para manutenção da vida humana, animal e vegetal, destacando os indicadores de tratamento de esgoto, destinação dos resíduos sólidos, doenças causadas por falta de saneamento e preservação das APP.

## 6. CONCLUSÃO

Existem vários conceitos para o termo segurança hídrica, variando conforme o local e época em que são aplicados. A definição mais completa encontrada é a utilizada pela ONU, que explica que para se alcançar segurança hídrica é preciso ter acesso a quantidade e qualidade adequadas de água, sustentando o desenvolvimento socioeconômico e proteção contra desastres.

Para avaliar a segurança hídrica planos podem ser criados, onde indicadores são definidos para avaliar situação hídrica de certo local. O Brasil possui um Plano Nacional de Segurança Hídrica, apresentando um Índice de Segurança para todo o território nacional dividido em quatro dimensões: humana, econômica, resiliência e ecossistêmica.

Buscando encontrar quais seriam os melhores indicadores para avaliar a segurança hídrica de Caxias do Sul/RS, o Método de Análise de Processo foi aplicado para definir os indicadores específicos com base nas características do município. A definição dos Gerador de Impacto foi realizada conforme a análise das bacias de captação, dos sistemas de abastecimento de água e de coleta e tratamento de esgoto, precipitação, população, economia, modelagem hidrológica e disponibilidade hídrica do município. Foram definidos o crescimento populacional, o crescimento econômico, as mudanças climáticas e as legislações e políticas como os principais Geradores de Impacto. Os Receptores de Impacto são os habitantes atuais e futuros do município e a empresa de saneamento responsável.

Inicialmente 58 indicadores foram definidos, mas após a avaliação e validação através de questionário enviado a profissionais da área, outros 7 indicadores foram adicionados à lista, totalizando 65. Dentre esses, 18 foram enquadrados na dimensão humana, 16 na dimensão econômica, 14 na dimensão de resiliência e 17 na dimensão ecossistêmica. O fato do conjunto de indicadores ter passado por uma verificação, mesmo que simplificada, por profissionais da área, estabelece uma segurança que o resultado deste trabalho encontrou um bom conjunto de indicadores para descrever estas quatro dimensões da segurança hídrica.

Relacionado este estudo com o PNSH, é possível notar a adição de diversos indicadores, o que já era esperado quando comparado a diferença na escala entre os dois trabalhos. Não necessariamente a aplicação de um maior número de indicadores reflete em uma análise melhor da área de estudo. Cada indicador precisa ter um

propósito definido e retratar alguma característica importante da região a ser avaliada, além de necessitar de um banco de dados extenso para permitir a sua aplicação. Enquanto que os indicadores do PNSH são apropriados para analisar a segurança hídrica no país inteiro, os indicadores levantados neste estudo foram elaborados especialmente para as características específicas da região. Isto permite uma análise mais precisa do município, onde os resultados encontrados possam apontar as deficiências no município e quais ações seriam mais eficientes para alcançar a segurança hídrica a curto e longo prazo.

Uma das áreas que foi pouco comentada neste estudo e que é de grande importância na segurança hídrica é a água subterrânea. Outros estudos futuros podem se aprofundar nas características dos aquíferos de Caxias do Sul e encontrar indicadores de segurança hídrica que englobam os problemas enfrentados e as relações entre a água subterrânea e a segurança hídrica.

Este estudo fez uma análise qualitativa dos indicadores selecionados, sendo que posteriormente pode ser realizada uma análise quantitativa para sua aplicação. Uma das formas de avaliação quantitativa seria a criação de um índice, encontrando valores normalizados para cada indicador de forma semelhante ao PNSH e possibilitando responder qual o nível de segurança hídrica que o município se encontra. Outra sugestão é a aplicação dos resultados encontrados neste estudo por meio da utilização de *dashboards*, possibilitando o acompanhamento dos objetivos e metas estabelecidos para a segurança hídrica de forma visual através da comparação dos resultados observados ao longo do tempo. Essa análise numérica é importante pois facilita entendimento dos resultados encontrados para os tomadores de decisão que não possuem um conhecimento aprofundado do assunto.

## REFERÊNCIAS

ALAHUHTA, J.; JOENSUU, I.; MATERO, J.; VUORI, K.-M.; SAASTAMOINEN, O. Freshwater ecosystem services in Finland. **Finnish Environment Institute**, v. 16, p. 35, 2013.

ANA. **ODS 6 no Brasil: visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília, DF. Agência Nacional de Águas, 2019a.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. Brasília, DF. Agência Nacional de Águas, 2019b.

ANA. **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Brasília, DF. Agência Nacional de Águas, 2019c. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>>. Acesso em: 25 de mai. 2019.

ANA. **HIDROWEB v3.1.1**. 2020. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 02 de jun. 2020.

ARAUJO, E. P.; RODRIGUES, R. P.; NUNES, R. O gerenciamento da demanda de água é o caminho para propiciar a sua preservação. **Universitas: Arquitetura e Comunicação Social**, v. 5, n. 1, p. 1–10, 2008.

ASIAN DEVELOPMENT BANK. **Asian Water Development OUTLOOK 2016 Strengthening Water Security in Asia and the Pacific**. Mandaluyong City, Filipinas: Asian Development Bank, 2016. E-book. Disponível em: <<https://www.adb.org/publications/asian-water-development-outlook-2016>>. Acesso em: 15 de nov. 2020.

AUGUSTO, L. G. S.; GURGEL, I. G. D.; CÂMARA, H. F. N.; DE MELO, C. H.; COSTA, A. M. The global and national context regarding the challenges involved in ensuring adequate access to water for human consumption. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1511–22, 2012.

BELLADONA, R.; DE VARGAS, T. Space-time Precipitation Distribution and the Relevance of the Orography of Caxias do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69/3, p. 607–620, 2017.

BORGES, L. A. C.; DE REZENDE, J. L. P.; PEREIRA, J. A. A.; COELHO, L. M.; DE BARROS, D. A. Áreas de preservação permanente na legislação ambiental Brasileira. **Ciência Rural**, v. 41, n. 7, p. 1202–1210, 2011.

BRASIL. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos, Brasília, DF, jan 1997.

BRASIL. Lei Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Diretrizes nacionais para o saneamento básico, Brasília, DF, jan 2007.

BRASIL. Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Brasília, DF, set 2020.

BRASIL. Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Código Florestal Brasileiro, Brasília, DF, mai 2012.

BRASIL. Portaria nº 2.917, de 12 de dezembro de 2011. Procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF, dez 2011.

BRASIL. Resolução Nº 357, de 17 de março de 2005. Classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, Brasília, DF, mar 2005.

BRASIL. Resolução Nº 396, de 3 de abril de 2008. Classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas, Brasília, DF, abr 2008.

BREITBACH, A. C. M. Sobre o desenvolvimento da região de Caxias do Sul. **Ensaio FEE**, v. 23, n. Número Especial, p. 421–442, 2002.

BRITO, F. S. L.; PESSOA, F. C. L.; CRISPIM, D.; ROSÁRIO, K. K. L. Uso de indicador hídrico na Ilha de Cotijuba, município de Belém-PA. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, n. 1, p. 11–0, 2020.

CASTRO, C. M. S. N. Emprego de indicadores e índices de sustentabilidade na avaliação de medidas emergenciais de gestão da água: caso da bacia do rio descoberto, DF. 2019. Tese (Mestrado em gestão e regulação de recursos hídricos). Programa de Pós-Graduação PROFÁGUA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre - RS, 2019.

CAXIAS DO SUL. Lei Complementar nº 246, de 6 de dezembro de 2005. Zona das Águas (ZA), Caxias do Sul, RS, dez 2005.

CAXIAS DO SUL. Lei Complementar nº 376, de 21 de dezembro de 2010. Política Municipal do Meio Ambiente, Caxias do Sul, RS, dez 2010.

CAXIAS DO SUL. Lei Complementar nº 558, de 16 de maio de 2018. Plano Municipal de Saneamento, Caxias do Sul, RS, mai 2018.

CAXIAS DO SUL. Lei Complementar nº 589, de 19 de novembro de 2019. Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado, Caxias do Sul, RS, nov 2019.

CAXIAS DO SUL. **Perfil Socioeconômico - Caxias do Sul - RS**. p. 1–42, 2014. Disponível em: < <https://caxias.rs.gov.br/cidade/perfil-socioeconomico>>. Acesso em: 5 de fev. 2021.

CCME. Water Quality Index 1.0 User's Manual. **Canadian Council of Ministers of the Environment**, 2001.

CHEN, Z.; WEI, S. Application of System Dynamics to Water Security Research. **Water Resources Management**, v. 28, n. 2, p. 287–300, 2014.

COGERH. **Plano de Segurança Hídrica das Bacias Hidrográficas Metropolitanas**. 2018. Disponível em: <<http://portal.cogerh.com.br/plano-deseguranca-hidrica-2/>>. Acesso em: 19 out. 2020.

COGERH. **Plano de Segurança Hídrica da Bacia Hidrográfica do Acaraú**. 2018. Disponível em: <<http://portal.cogerh.com.br/plano-de-seguranca-hidrica-2/>>. Acesso em: 19 out. 2020.

COOK, C.; BAKKER, K. Water security: Debating an emerging paradigm. **Global Environmental Change**, v. 22, n. 1, p. 94–102, 2012.

COUTO, E. A., Aplicação dos Indicadores de Desenvolvimento Sustentável da Norma ABNT NBR ISO 37120:2017 Para a Cidade do Rio de Janeiro e Análise Comparativa com Cidades da América Latina. RJ, Brasil. 2018. Tese (Graduação em Engenharia Civil) Projeto de graduação Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2018.

CURTARELLI, M. P.; TUCCI, C. E. M.; RAGGHIANI, V.; GUIMARÃES, V. Sustentabilidade Hídrica Urbana: O Caso de Santa Catarina. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 15, n. 1, p. 14–14, 2018.

DICKSON, S. E.; SCHUSTER-WALLACE, C. J.; NEWTON, J. J. Water Security Assessment Indicators: The Rural Context. **Water Resources Management**, v. 30, n. 5, p. 1567–1604, 2016.

DUNN, G.; BAKKER, K. **Canadian Approaches to Assessing Water Security: An Inventory of Indicators: Policy Report**. Vancouver, Canadá. University of British Columbia, 2009.

EDITH, S.; ROB, W. **Environmental indicators: Typology and overview**. Copenhagen, Dinamarca: European Environment Agency, 1999.

EL-GAFY, I. K. E. D. The water poverty index as an assistant tool for drawing strategies of the Egyptian water sector. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 2, p. 173–186, 2018.

EMPINOTTI, V. L.; BUDDS, J.; AVERSA, M. Governance and water security: The role of the water institutional framework in the 2013–15 water crisis in São Paulo, Brazil. **Geoforum**, v. 98, n. May, p. 46–54, 2019.

ETMANSKI, T. R.; DARTON, R. C. A methodology for the sustainability assessment of arsenic mitigation technology for drinking water. **Science of the Total Environment**, v. 488–489, n. 1, p. 505–511, 2014.

FAO. **New Dimensions in Water Security**. Roma, Itália: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2000.

FELINTO, C. M. R.; RIBEIRO, M. M. R.; BRAGA, C. F. C. Aplicação do Modelo Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta (FPEIR) para Gestão dos Recursos Hídricos em João Pessoa-PB. **Revista DAE**, v. 67, n. 218, p. 118–136, 2019.

FILHO, J. L. A.; SAAD, A. R.; ALVARENGA, M. C. De. Considerações acerca dos impactos ambientais decorrentes da implantação de reservatórios hidrelétricos com ênfase nos efeitos ocorrentes em aquíferos livres e suas conseqüências. **Geociências**, v. 29, n. 3, p. 355–367, 2010.

GARCIA, Y. M. O Código florestal Brasileiro e as suas alterações no Congresso Nacional. **GeoAtos, Revista Geografia em Atos**, v. 12, n. 1, p. 54–74, 2012.

GARRIGA, R. G.; FOGUET, A. P. Unravelling the Linkages Between Water, Sanitation, Hygiene and Rural Poverty: The WASH Poverty Index. **Water Resources Management**, v. 27, n. 5, p. 1501–1515, 2013.

GEOCAXIAS. **Mapa Digital GeoCaxias**. Caxias do Sul, RS. 2020. Disponível em: <<https://geopublico.caxias.rs.gov.br/geocaxias/map?config=src/webgis/config/map/config-all.xml>>. Acesso em: 15 set. 2020.

GERLAK, A. K.; MUKHTAROV, F. ‘Ways of knowing’ water: integrated water resources management and water security as complementary discourses. **International Environmental Agreements**, v. 15, n. 3, p. 257–272, 2015.

GREY, D.; SADOFF, C. W. Sink or Swim? Water security for growth and development. **Water Policy**, v. 9, n. 6, p. 545–571, 2007.

GVces. **Estudo de Aplicação de Instrumentos Econômicos à Gestão dos Recursos Hídricos em Situações Críticas: Sumário Para Tomadores de Decisão**. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2017.

HATAMI, H. Importance of Water and Water Borne Diseases: On the Occasion of the World Water Day. **International Journal of Preventive Medicine**, v. 14, p. 246–245, 2013.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Caxias do Sul**. 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/caxias-do-sul/panorama>>. Acesso em: 13 de jan. 2021.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/15774-malhas.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 13 de out. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeto RADAMBRASIL: Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. IBGE, Vol. 33, Rio de Janeiro – RJ, 791 p., 1986.

JACOBI, P. R.; CIBIM, J.; LEÃO, R. de S. Crise hídrica na Macrometrópole Paulista e respostas da sociedade civil. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 27–42, 2015.

JENSEN, O.; WU, H. Urban water security indicators: Development and pilot. **Environmental Science and Policy**, v. 83, n. September, p. 33–45, 2018.

KIELING, S. S. S. A urbanização de Caxias do Sul como processo transformador dos patrimônios naturais da região. RS, Brasil. 2010. Tese (Graduação em Especialista em Educação Ambiental) Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2010.

KOSENIOUS, A.-K.; HALTIA, E.; HORNE, P.; KNIIVILÄ, M.; OSAASTAMOINEN, O. **Value of ecosystem services? Examples and experiences on forests, peatlands, agricultural lands, and freshwaters in Finland**. Helsinki, Finlândia. 2013. Disponível em: <<https://www.ptt.fi/julkaisut-ja-hankkeet/kaikki-julkaisut/value-of-ecosystem-services-examples-and-experiences-on-forests-peatlands-agricultural-lands-and-freshwaters-in-finland.html>>. Acesso em: 19 de out. 2020.

LAUTZE, J.; MANTHRITHILAKE, H. Water security: Old concepts, new package, what value? **Natural Resources Forum**, v. 36, n. 2, p. 76–87, 2012.

LOË, R.; VARGHESE, J.; FERREYRA, C.; KREUTZWISER, R. **Water Allocation and Water Security in Canada: Initiating a Policy Dialogue for the 21st Century**. Guelph, Canadá. Guelph Water Management Group, University of Guelph, 2007.

LOUCKS, D. P. Quantifying trends in system sustainability. **Hydrological Sciences Journal**, v. 42, n. 4, p. 513–530, 1997.

LOURENÇO, T.; PRADO, R. Índices De Saneamento Ambiental Em Regiões Hidrográficas Do Estado Do Rio De Janeiro. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 16, n. 1, p. 7–7, 2019.

, F. H. Proposição de indicadores de segurança hídrica: seleção, validação e aplicação na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim, Jundiá - SP, Brasil. 255 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Sorocaba, 2018.

MANKIWI, N. G. **Principles of Microeconomics**. 8. ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2018.

MARÇAL, D. A.; SILVA, C. E. Avaliação do impacto do efluente da estação de tratamento de esgoto ETE-Pirajá sobre o rio Parnaíba, Teresina (PI). **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 761–772, 2017.

MEHTA, L. Water and human development. **World Development**, v. 59, p. 59–69, 2014.

Melo, M. C.; Segurança Hídrica Para Abastecimento Urbano: Proposta de Modelo Analítico e Aplicação na Bacia do Rio das Velhas, Minas Gerais. Rio de Janeiro, 2016. Dissertação de Doutorado – UFRJ/COPPE, 2016.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para consumo Humano**. Brasília, DF. Ministério da Saúde, 2006.

MISSIAGGIA, F. B. Uso dos modelos hec-hms e hec-ras para quantificar o aumento do escoamento superficial pela urbanização em uma microbacia hidrográfica. 2018. TESE (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade de Caxias do Sul (UCS). Caxias do Sul, 2018.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Manual de Educação para o Consumo Sustentável**. Brasília, DF. Consumers International/ MMA/ MEC/ IDEC, 2005.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Serviços ecossistêmicos. 2020a. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/15320-servi%C3%A7os-ecossist%C3%AAmicos.html>>. Acesso em: 22 de jun. 2020.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Indicadores Ambientais. 2020b. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/informacoes-ambientais/indicadores-ambientais.html>>. Acesso em: 22 de jun. 2020.

MOURA, L. A. A. **Qualidade e Gestão Ambiental**. 4. ed. São Paulo: Editora Juarez de Oliveira, 2004.

NETO, F. O. L. Aplicação Do Modelo Dpsir Na Bacia Hidrográfica Do Rio Guaribas, Ceará, Brasil: Subsídios Para a Gestão Ambiental Local. 2013. Tese (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2018.

OBRACZKA, M.; Pinto, S. O. M.; Marques, C. F.; Júnior, A. A. O. Emprego de Indicadores na Avaliação do Saneamento - Região Hidrográfica Médio Paraíba do Sul. **Revista Internacional de Ciências**, v. 9, n. 1, p. 3–21, 2019.

OCDE. **OCDE Core Set Of Indicators For Environmental Performance Reviews**. Paris, França. Organisation for economic Co-Operation and Development, 1993.

OCDE. **Water Security for Better Lives**. Paris, França. OCDE Publishing, 2013.

OCDE. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. Paris, França. OCDE Publishing. 2015. Disponível em: <[https://read.oecd-ilibrary.org/governance/governanca-dos-recursos-hidricos-no-brasil\\_9789264238169-pt#page3](https://read.oecd-ilibrary.org/governance/governanca-dos-recursos-hidricos-no-brasil_9789264238169-pt#page3)>. Acesso em: 05 de dez. 2020.

OLIVEIRA, W. K.; ROHLFS, D. B.; GARCIA, L. P. O desastre de Brumadinho e a atuação da Vigilância em Saúde. **Epidemiologia e Serviços de Saúde: Revista do Sistema Único de Saúde do Brasil**, v. 28, n. 1, p. 3, 2019.

OMS, ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. Safer water, better health Costs. Benefits and sustainability of interventions to protect and promote health. Genebra, Suíça: WHO Press, 2008.

ONU. **Resolution 64/292 - The human right to water and sanitation**. Sixty-fourth session, Agenda item 48. United Nations General Assembly, 2010.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 7 fev. 2020.

PATRÍCIO, J.; ELLIOTT, M.; MAZIK, K.; PAPADOPOULOU, K. N.; SMITH, C. J. DPSIR - Two decades of trying to develop a unifying framework for marine environmental management. **Frontiers in Marine Science**, v. 3, n. SEP, p. 1–14, 2016.

PEREIRA, J. C.; FREITAS, M. R. Cities and Water Security in the Anthropocene: Research Challenges and Opportunities for International Relations. **Contexto Internacional**, v. 39, n. 3, p. 521–544, 2017.

POLASI, L. T.; NAKIN, M. D. V.; MAGAYIYANA, Z.; MUSAMPA, C. M. Effects of location on the physico-chemical properties of water in the Matatiele Local Municipality, South Africa. **Sustainable Development and Planning VIII**, v. 1, n. December, p. 713–723, 2016.

POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 37–43, 2020.

RAPPORT, D.; FRIEND, A. Towards a comprehensive framework for environmental statistics : A stress- response approach. **Statistics Canada Catalogue**, p. 11–510, 1979.

RIO GRANDE DO SUL. Lei Nº 10.350 de 30 de dezembro de 1994. Sistema Estadual de Recursos Hídricos, Porto Alegre, RS, dez 1994.

RIO GRANDE DO SUL. Lei Nº 15.434 de 09 de janeiro de 2020. Código Estadual do Meio Ambiente do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, jan 2020.

RIO GRANDE DO SUL. Portaria Nº 110, de 31 de agosto de 2018. Institui a obrigatoriedade do Sistema de Outorga - SIOUT. Porto Alegre, RS, ago 2018.

RIO GRANDE DO SUL. Resolução CONSEMA Nº 355, de 13 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos em águas superficiais. Porto Alegre, RS, jul 2017.

ROMERO-LANKAO, P.; GNATZ, D. M. Conceptualizing urban water security in an urbanizing world. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 21, p. 45–51, 2016.

ROSSATO, M. S. Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia. Brasil. 2011. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011.

SADOFF, C.; MULLER, M. **Water Management, Water Security and Climate Change Adapttion**. Technical Committee (TEC). Global Water Partnership, 2009.

SAMAE. **Recursos Hídricos**. 2020. Disponível em: <<https://www.samaecaxias.com.br/Pagina/Index/10044>>. Acesso em: 23 de jan. 2020.

SANTOS, A. C.; REIS, A.; MENDIONDO, E. M. Segurança hídrica no Brasil: situação atual, principais desafios e perspectivas futuras. **Revista DAE**, v. 68, n. 225, p. 167–179, 2020.

SANTOS, B. B. M. Segurança Hídrica Da Região Metropolitana Do Rio De Janeiro: Contribuições Para O Debate. **Ambiente e Sociedade**, v. 19, n. 41, p. 103–120, 2016a.

SANTOS, C. A. S.; ALMEIDA, C.; RAMOS, T. B.; ROCHA, F; A.; OLIVEIRA, R.; NEVES, R. Using a hierarchical approach to calibrate SWAT and predict the semi-arid hydrologic regime of northeastern Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 9, 2018.

SANTOS, C. I. S. Uma abordagem de sistemas lineares no processo chuva-vazão de uma sub-bacia do Rio dos Bugres. 2016. Tese (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2016b.

SEBRAE/RS. **Perfil das Cidades Gaúchas - Caxias do Sul Apresentação**. Porto Alegre, RS: SEBRAE/RS – Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas do Rio Grande do Sul, 2019.

SEDU/PR. **Programa Nacional De Combate Ao Desperdício De Água**. Brasília, DF. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República, 1997.

SEMA/DF. **Plano Integrado de Enfrentamento à Crise Hídrica**. Brasília, DF. Secretaria do Meio Ambiente do Distrito Federal, 2016.

SEMA/RS. **G030 - Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. 2020a. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/g030-bh-cai>>. Acesso em: 15 de mai. 2021.

SEMA/RS. **G040 - Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas**. 2020b. Disponível em: <<https://sema.rs.gov.br/g040-bh-taquari-antas>>. Acesso em: 15 de mai. 2021.

SEMA/RS, PROFILL. **Plano de Bacia do Rio Caí: Relatório Síntese das Etapas A e B do Plano da Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Porto Alegre, RS Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do estado do Rio Grande do Sul, 2008.

SEMA/RS, STE. **Elaboração dos serviços de consultoria referente a fase a e b do plano de bacia do Rio Taquari-Antas - relatório técnico síntese**. Porto Alegre, RS. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do estado do Rio Grande do Sul, 2012.

SHAH, T. **Increasing water security: the key to implementing the Sustainable Development Goals**. Technical Committee (TEC). Global Water Partnership, 2016.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. 2018. Disponível em:

<<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>>. Acesso em: 13 de julho de 2021.

SOARES, D. V. A Responsabilidade civil e o Meio Ambiente. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v. 7, n. 1, p. 60, 2012.

SOUZA, E. G. de; STUDART, T. M. de C.; PINHEIRO, M. I. T.; CAMPOS, J. N. B. Segurança hídrica do reservatório Castanhão-CE: Aplicação da matriz de sistematização institucional. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 877–887, 2017.

SPGG/DEE. **Produto Interno Bruto dos Municípios do RS 2018**. Porto Alegre, RS. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão (SPGG) e Departamento de Economia e Estatística (DEE), 2020. Disponível em: <<https://dee.rs.gov.br/upload/arquivos/202012/15174130-pib-municipal-2018-nota-tecnica.pdf>>. Acesso em: 8 de jan. 2021.

SPGG. **Atlas socioeconômico Rio Grande do Sul - Clima, temperatura e precipitação**. 2020. Disponível em: <<https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>>. Acesso em: 8 de jan. 2021.

TAHIR, A. C.; DARTON, R. C. The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 16–17, p. 1598–1607, 2010.

THE NATURE CONSERVANCY. **What is Water Security**. Disponível em: <<https://waterfundstoolbox.org/getting-started/what-is-water-security>>. Acesso em: 1 de out. 2020.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. **BioMed Research International**, v. 2018, p. 49–65, 2018.

TUCCI, C. E. M. **Secas no Rio Grande do Sul**. 2012. Disponível em: <<http://rhama.com.br/blog/index.php/sem-categoria/secas-no-rio-grande-do-sul/>>. Acesso em: 5 de mar. 2021.

UN-WATER. **Coping with water scarcity: A strategic issue and priority for system-wide action**. UN-Water Thematic Initiatives, 2007.

UN-WATER. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018**. Perúgia, Itália. Programa Mundial das Nações Unidas para Avaliação dos Recursos Hídricos, 2018.

UN-WATER. **Water Scarcity**. 2020. Disponível em: <<https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/>>. Acesso em: 4 de ago. 2020.

UN-WATER. **Water Security and the Global Water Agenda**. Hamilton, Canadá. United Nations University, 2013.

UN WATER, UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2020**. Water and Climate Change. Perúgia, Itália. World Water Assessment Programme, 2020.

UNDRR. **Resilience**. 2020. Disponível em: <<https://www.undrr.org/terminology/resilience>>. Acesso em: 13 de nov. 2020.

UNEP. **Indicators of sustainable development: framework and methodologies**. Nova Iorque, Estados Unidos. Commission on Sustainable Development, Ninth Session, 2001.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource**. Paris, França: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2017.

UNESCO. **Water Scarcity**. 2020. Disponível em: <<https://www.unwater.org/water-facts/scarcity/>>. Acesso em: 13 de nov. 2020.

UNITED NATIONS. **Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies**. Nova Iorque, Estados Unidos: United Nations, 2007.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects 2019**. 2019. Disponível em: <<https://population.un.org/wpp/>>. Acesso em: 3 de mar. 2021.

VAN BEEK, E.; ARRIENS, W. L. **Water Security : Putting the Concept into Practice**. 20. Technical Committee (TEC). Global Water Partnership, 2014.

VAN GINKEL, K. C. H.; HOEKSTRA, A. Y.; BUURMAN, J.; HOGEBOM, R. J. Urban Water Security Dashboard: Systems Approach to Characterizing the Water Security of Cities. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 12, p. 04018075, 2018.

VEIGA, L. B. E.; MAGRINI, A. The Brazilian Water Resources Management Policy: Fifteen Years of Success and Challenges. **Water Resources Management**, v. 27, n. 7, p. 2287–2302, 2013.

WATERAID. **Water security framework**. Londres, Inglaterra. WaterAid, 2012. Disponível em: <<https://washmatters.wateraid.org/sites/g/files/jkxoof256/files/download-ourwater-security-framework.pdf>>. Acesso em: 19 de out. 2020.

WHITTINGTON, D.; SADOFF, C.; ALLAIRE, M. **The economic value of moving toward a more water secure world**. Technical Committee (TEC). Global Water Partnership, 2013.

WU, H.; DARTON, R.; BORTHWICK, A. Defining and measuring river basin sustainability: a case study of the Yellow River. **Sustainable Development**, v. 168, p. 383–394, 2015.

WWC. **Elevating Water Politics**. Marselha, França: World Water Council, 2020. Disponível em: <<https://www.worldwatercouncil.org/en/publications/annual-report-2019-elevating-water-politics>>. Acesso em: 19 de out. 2020.

## APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO ENVIADO PARA AVALIAÇÃO DOS INDICADORES

### Verificação Indicadores de Segurança Hídrica

\*Obrigatório

1. Qual a sua principal atividade profissional? \*

---

2. Qual a sua formação acadêmica? \*

---

A definição para segurança hídrica aplicada neste trabalho é a utilizado pela ONU: "A capacidade da população de garantir o acesso seguro e sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar os meios de subsistência, bem-estar humano e desenvolvimento socioeconômico, para assegurar a proteção contra a poluição transmitida pela água e os desastres a ela relacionados, e, para a preservação dos ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política." (UN-WATER, 2013)

#### Dimensão humana

A dimensão humana aborda a garantia da oferta de água para o abastecimento, atendendo de forma satisfatória as necessidades atuais e futuras de água potável e o acesso equitativo aos serviços e recursos hídricos.

3. Os indicadores escolhidos para a dimensão humana são importantes para retratar o estado da segurança hídrica? \*

*Marcar apenas uma oval.*

- Sem importância
- Pouca importância
- Importante
- Muito importante

4. Qual dos indicadores escolhidos para dimensão humana que, na sua opinião, não são relevantes para descrever a segurança hídrica? \*

*Marque todas que se aplicam.*

- Volume captado
- Capacidade das estações de tratamento de água
- Perdas reais
- Perdas aparentes
- Área do município com redes de distribuição de água
- População abastecida total
- População abastecida por poços
- População abastecida por ETAs
- Gastos com tratamento
- Existência de planejamento estratégico de expansão dos sistemas para atender demandas futuras
- Taxa de crescimento populacional
- Densidade populacional
- Consumo per capita de água
- Existência de políticas para incentivar a redução do consumo
- Existência de legislação que assegure a preservação dos recursos hídricos atuais e futuros
- Existência de fiscalização nas bacias/recursos hídricos pelo órgão responsável
- Quantidade de autos de infração gerados
- Todos os indicadores são relevantes

5. Na sua opinião, teria algum indicador não apresentado na lista acima que seria indispensável para avaliar a dimensão humana da segurança hídrica? \*

---

---

#### Dimensão econômica

A dimensão econômica aborda o uso da água para sustentar o crescimento econômico nos setores de produção, avaliando o impacto econômico de se garantir ou falhar em alcançar um estado de segurança hídrica.

6. Os indicadores escolhidos para a dimensão econômica são importantes para retratar o estado da segurança hídrica? \*

*Marcar apenas uma oval.*

- Sem importância
- Pouca importância
- Importante
- Muito importante

7. Qual dos indicadores escolhidos para dimensão econômica que, na sua opinião, não são relevantes para descrever a segurança hídrica? \*

*Marque todas que se aplicam.*

- PIB per capita
- PIB municipal
- Produção industrial em relação à água utilizada no setor
- Área ocupada por indústrias dentro de bacias de captação
- Quantidade de indústrias no município
- Produção de estabelecimentos de comércio e serviços em relação à água utilizada no setor
- Área ocupada por estabelecimentos de comércio e serviços dentro de bacias de captação
- Quantidade de estabelecimentos de comércio e serviços dentro do município
- Produção agropecuária em relação à água utilizada no setor
- Área ocupada para produção agropecuária dentro de bacias de captação
- Quantidade de estabelecimentos agropecuários no município
- Área anual ocupada por novos empreendimentos em bacia de captação
- Quantidade de empreendimentos dentro de bacia de captação
- Relação entre o valor arrecadado e valor necessário para recuperar a poluição gerada
- Todos os indicadores são relevantes

8. Na sua opinião, teria algum indicador não apresentado na lista acima que seria indispensável para avaliar a dimensão econômica da segurança hídrica? \*

---

#### Dimensão ecossistêmica

A dimensão ecossistêmica avalia a qualidade da água e a sua disponibilidade ao meio ambiente, buscando manter ou restaurar os corpos d'água, aquíferos e ecossistemas regionais.

9. Os indicadores escolhidos para a dimensão ecossistêmica são importantes para retratar o estado da segurança hídrica?

\* *Marcar apenas uma oval.*

- Sem importância
- Pouca importância
- Importante
- Muito importante

10. Qual dos indicadores escolhidos para dimensão ecossistêmica que, na sua opinião, não são relevantes para descrever a segurança hídrica? \*

*Marque todas que se aplicam.*

- Vazão média de longo período das bacias de captação
- Vazão Q50 das bacias de captação
- Esgoto total gerado
- Percentual da população com rede de coleta e tratamento de esgoto
- Capacidade das estações de tratamento de esgoto
- Taxa de internações por DRSAI
- Índice de Conformidade ao Enquadramento
- Quantidade e diversidade da população animal
- Quantidade e diversidade da população vegetal
- Percentual do município com vegetação preservada
- Relação entre a área total das bacias de captação e APP de recursos hídricos
- Percentual de impermeabilização do solo no município
- Existem políticas para incentivar a preservação dos recursos hídricos
- Percentual dos resíduos sólidos gerados no município que possuem destinação correta
- Taxa de cobertura do serviço de coleta de resíduos sólidos
- Todos os indicadores são relevantes

11. Na sua opinião, teria algum indicador não apresentado na lista acima que seria indispensável para avaliar a dimensão ecossistêmica da segurança hídrica? \*

---

#### Dimensão resiliência

A dimensão resiliência mede a capacidade do sistema de se adaptar às mudanças, reduzir os riscos de desastres naturais relacionados à água e minimizar os impactos de eventos climáticos extremos. Mede também a capacidade de reservação de água.

12. Os indicadores escolhidos para a dimensão resiliência são importantes para retratar o estado da segurança hídrica? \*

*Marcar apenas uma oval.*

- Sem importância
- Pouca importância
- Importante
- Muito importante

13. Qual dos indicadores escolhidos para dimensão resiliência que, na sua opinião, não são relevantes para descrever a segurança hídrica? \*

*Marque todas que se aplicam.*

- Precipitação média do município
  - Reservas explotáveis de águas subterrânea
  - Volume máximo dos reservatórios
  - Volume atual dos reservatórios
  - Tempo que o reservatório mantém o abastecimento em condições de seca
  - Temperatura média do município
  - Evapotranspiração dos reservatórios
  - Quantidade de eventos extremos relacionados ao excesso de água (cheias, deslizamentos)
  - Quantidade de eventos extremos relacionados a falta de água (secas ou estiagens)
  - Existe plano de drenagem urbana municipal
  - Existe plano de segurança das barragens
  - Existe estudos de fontes alternativas para abastecimento do município
  - Percentual da população que vive em áreas de risco
  - Todos os indicadores são relevantes
- 
-

14. Na sua opinião, teria algum indicador não apresentado na lista acima que seria indispensável para avaliar a dimensão resiliência da segurança hídrica? \*

---

15. Gostaria de fazer algum comentário e/ou sugestão sobre os indicadores de segurança hídrica?

---