

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AMBIENTES LITORÂNEOS E INSULARES
Mestrado em Ciências Ambientais

ANDRE LINNEO TOCCHETTO

Gestão resiliente da água: revisão sistemática e proposição de diretrizes para operadoras nacionais

Programa de Pós-Graduação
em Ambientes Litorâneos
e Insulares - UNESPAR

Paranaguá

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO AMBIENTES LITORÂNEOS E INSULARES
Mestrado em Ciências Ambientais

ANDRE LINNEO TOCCHETTO

Gestão resiliente da água: revisão sistemática e proposição de diretrizes para operadoras nacionais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambientes Litorâneos e Insulares – PALI – da Universidade Estadual do Paraná campus de Paranaguá, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo de Souza Matias

Coorientador: Prof. Dr. Murillo Vetroni Barros

Paranaguá

2026

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNESPAR e
Núcleo de Tecnologia de Informação da UNESPAR, com Créditos para o ICMC/USP
e dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Linneo Tocchetto, André

Gestão resiliente da água: revisão sistemática e
proposição de diretrizes para operadoras nacionais /
André Linneo Tocchetto. -- Paranaguá-PR, 2026.
42 f.: il.

Orientador: Gustavo de Souza Matias.

Coorientador: Murillo Vetroni Barros.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
Mestrado Acadêmico em Ambientes Litorâneos e
Insulares) -- Universidade Estadual do Paraná, 2026.

1. Hidrologia. 2. Resiliência hídrica. 3. Captação
de água. I - de Souza Matias, Gustavo (orient). II -
Vetroni Barros, Murillo (coorient). III - Título.

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa da Dissertação intitulada **Revisão sistemática sobre abastecimento, tratamento e distribuição de água: superando desafios para uma gestão sustentável.**, sob orientação de GUSTAVO DE SOUZA MATIAS e coorientação de MURILLO VETRONI BARROS, apresentada pelo discente **Andre Linneo Tocchetto (20251PNG.PALI.20200029)** do Curso **MESTRADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - AMBIENTES LITORÂNEOS E INSULARES (Paranaguá)**. Os trabalhos foram iniciados às 14:00 pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Gustavo De Souza Matias** (Presidente)
- **Fernando Henrique Lermen** (Examinador Interno)
- **Valderice Herth Junkes** (Examinadora Externa)
- **Sandro Valdecir Deretti Lemes** (Examinador Suplente Interno)
- **Ana Carolina Raimundini Aranaha** (Examinador Suplente Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo da Dissertação, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo discente, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota (quando exigido): _____

Observação / Apreciações:

Aprovado com as condições de entregar o trabalho com as correções exigidas pela Banca

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **GUSTAVO DE SOUZA MATIAS** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Paranaguá / PR, 13/03/2026

Documento assinado digitalmente
SANDRO VALDECIR DERETTI LEMES
Data: 18/03/2026 15:00:51 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Sandro Valdecir Deretti Lemes

Documento assinado digitalmente
GUSTAVO DE SOUZA MATIAS
Data: 23/03/2026 17:05:20 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Gustavo De Souza Matias

Documento assinado digitalmente
VALDERICE HERTH JUNKES
Data: 18/03/2026 12:02:37 -0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Valderice Herth Junkes

Ana Carolina Raimundini Aranaha

Fernando Henrique Lermen

"A água é o princípio de todas as coisas"

Tales de Mileto

À Ana, meu amor, que foi luz e abrigo em cada instante desta caminhada. E às adversidades, que longe de me deter, tornaram-se alimento e força, lembrando-me sempre que cada obstáculo é também um degrau rumo à conquista.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pela presença constante, pela inspiração e pela força que sustentaram cada etapa desta jornada.

À Ana, meu amor, pela paciência, pelo apoio incondicional e pela dedicação que se tornaram fundamentais para que eu mantivesse equilíbrio e coragem ao longo deste percurso.

A Gustavo e Fernando, que foram mais do que professores e orientadores: foram amigos e referências de sabedoria, cujo exemplo e generosidade marcaram minha formação acadêmica e pessoal.

À Universidade Estadual do Paraná (Unespar), instituição que me acolheu e ofereceu o espaço necessário para o desenvolvimento científico e humano, tornando possível a concretização deste trabalho.

Aos meus familiares que estiveram próximos, oferecendo suporte, confiança e incentivo nos momentos mais desafiadores, e cuja presença foi essencial para que esta conquista se tornasse realidade.

RESUMO

A gestão hídrica enfrenta desafios crescentes impulsionados pelo aumento populacional, pela urbanização acelerada e pelas mudanças climáticas, demandando abordagens integradas e sustentáveis para assegurar a preservação dos recursos hídricos. Apesar dos avanços tecnológicos, há uma lacuna na literatura quanto à sua integração com políticas públicas eficazes, o que limita a implementação de estratégias de gestão hídrica adaptativa e sustentável. Nesse sentido, este estudo teve por objetivo desenvolver diretrizes para gestão resiliente da água, baseado em revisão sistemática da literatura e aplicável às operadoras brasileiras, identificando desafios e oportunidades para sua implementação. Para isso, utilizou-se uma revisão sistemática da literatura, complementada por análise qualitativa, com aplicação de técnicas bibliométricas e de análise de conteúdo para mapear tendências e identificar soluções relevantes. A análise revelou quatro clusters temáticos centrais: (i) governança e sustentabilidade, destacando o papel das instituições e da regulação; (ii) resiliência e inovação infraestrutural, com foco na adaptação a eventos extremos; (iii) integração tecnológica e segurança hídrica, associando tecnologia e aceitação social; e (iv) gestão integrada e eficiência hídrica, voltada à otimização do uso da água. O estudo propõe diretrizes integradas de práticas sustentáveis para a gestão da água, com potencial de aplicação por gestores e tomadores de decisão em instituições públicas e privadas. Conclui-se que a gestão hídrica eficaz depende da integração entre dimensões técnicas, institucionais e socioeconômicas, sendo a governança intersetorial e o uso estratégico de tecnologias fatores essenciais para a promoção da segurança hídrica e da sustentabilidade.

Palavras-chave: Gestão hídrica sustentável; Escassez de água; Governança dos recursos hídricos; Tecnologias de otimização hídrica; Resiliência climática.

ABSTRACT

Water management faces increasing challenges driven by population growth, rapid urbanization, and climate change, requiring integrated and sustainable approaches to ensure the preservation of water resources. Despite technological advances, there is a gap in the literature regarding their integration with effective public policies, which limits the implementation of adaptive and sustainable water management strategies. This study aimed to develop guidelines for resilient water management based on a systematic literature review, applicable to Brazilian water utilities, identifying challenges and opportunities for their implementation. To achieve this, a systematic literature review was conducted, complemented by a qualitative-quantitative analysis using bibliometric and content analysis techniques to map trends and identify relevant solutions. The analysis revealed four central thematic clusters: (i) governance and sustainability, highlighting the role of institutions and regulation; (ii) infrastructural resilience and innovation, focusing on adaptation to extreme events; (iii) technological integration and water security, associating technology with social acceptance; and (iv) integrated management and water efficiency, aimed at optimizing water use. The study proposes integrated guidelines of sustainable practices for water management, with potential application for managers and decision-makers in both public and private institutions. It is concluded that effective water management depends on the integration of technical, institutional, and socioeconomic dimensions, with intersectoral governance and the strategic use of technologies being essential factors for promoting water security and sustainability.

Keywords: Sustainable water management; Water scarcity; Water resources governance; Water optimization technologies; Climate resilience.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Agenda de pesquisa para o futuro do ESG	28
---	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Protocolo PRISMA.....	5
Figura 2: Produção científica anual	9
Figura 3: Fontes mais relevantes	10
Figura 4: Produção nacional por autores.....	11
Figura 5: Evolução temática das pesquisas sobre gestão hídrica.....	12
Figura 6: Análise de cluster.....	13
Figura 7: Estrutura das principais práticas de gestão da água	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização.....	1
1.2 Lacuna de pesquisa	3
1.3 Objetivos	3
1.4 Justificativa	4
1.5 Contribuições.....	4
2. METODOLOGIA	5
2.1 Revisão Sistemática de Literatura	5
2.1.1 Coleta de dados	5
2.1.2 Análise Bibliométrica	6
2.1.3 Análise Conteúdo	7
3. RESULTADOS	9
3.1 Revisão de Literatura.....	9
3.1.1 Panorama da produção científica - Análise Bibliométrica	9
3.1.2 Variáveis, barreiras e estratégias dos clusters na Gestão Hídrica	13
3.1.2.1 Cluster 1 - Inovação e resiliência na gestão de recursos hídricos	14
3.1.2.2 Cluster 4 - Gestão integrada e eficiência hídrica	16
3.1.2.3 Cluster 3 - Integração tecnológica e governança para segurança hídrica	19
3.1.2.4 Cluster 0, 5 e 2 - Governança e sustentabilidade em recursos hídricos.....	22
3.1.3 Discussão da Revisão	25
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	32
ANEXO I.....	41

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A gestão dos recursos hídricos tem enfrentado desafios de magnitude sem precedentes, impulsionados por fatores interligados como o crescimento populacional, a urbanização desordenada e as mudanças climáticas (Crioni, 2024). A cada ano, a pressão sobre as fontes de água doce aumenta de forma alarmante, exacerbando a vulnerabilidade de populações em diversas partes do mundo (Gao et al., 2024). De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU), cerca de 2 bilhões de pessoas já vivem em áreas afetadas pela escassez de água, e as projeções indicam que, até 2030, a demanda por água poderá ultrapassar em 40% a capacidade de oferta, intensificando a crise hídrica global. Além disso, o crescimento populacional acelerado, que pode levar a população mundial a atingir 9,7 bilhões de pessoas até 2050, sobrecarregará ainda mais os recursos hídricos, especialmente em regiões mais vulneráveis. Por isso, um dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) foi traçado especificamente para tratar de questões hídricas, saneamento e abastecimento de água potável, o ODS 6.

Esse cenário não é recente, pois desde a Conferência Internacional sobre Água e Meio Ambiente, a comunidade internacional vem alertando para a necessidade de uma gestão integrada e sustentável. A conferência consolidou os *Princípios de Dublin* que reconhecem a água como recurso finito, vulnerável, de valor econômico e cuja gestão deve ser participativa (ICWE, 1992). No Brasil, os desafios são mais intensos diante de desigualdades regionais, como os episódios recorrentes de crises hídricas registradas no Sudeste em 2014–2015, que deixaram em destaque a vulnerabilidade do sistema e a urgência de soluções resilientes (Ana, 2016; Trata Brasil, 2023).

As alterações climáticas, como as secas mais severas e as inundações intensas, conforme observado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), agravam ainda mais a situação, impactando diretamente a disponibilidade de água em diversas regiões. Essas questões reforçam a urgência de adotar uma abordagem integrada e eficiente de gestão hídrica, que considere a sustentabilidade a longo prazo dos recursos hídricos globais, garantindo tanto a qualidade quanto a quantidade da água disponível para as futuras gerações. Desde o início do século XX, o consumo de recursos hídricos aumentou exponencialmente, impulsionado pela intensificação da produção agrícola, pelo crescimento

industrial e pela expansão das áreas urbanas (Kumar, 2019; Nodehi et al., 2022; Rebolledo-Leiva et al., 2024).

Nesse sentido, a crise hídrica precisa ser entendida como um problema multidimensional e não somente como uma questão ambiental, pois, ela afeta a saúde pública, a segurança alimentar, a estabilidade econômica e a governança política (UN-Water, 2023; World Bank, 2020). O conceito de segurança hídrica, amplamente difundido em relatórios da UNESCO e do Banco Mundial, reafirmam a necessidade de ter o alinhamento entre políticas de gestão da água com estratégias de resiliência climática, planejamento urbano e desenvolvimento socioeconômico (UNESCO, 2019; World Bank, 2021).

O consumo excessivo, muitas vezes caracterizado pela utilização ineficiente dos recursos, tem levado ao esgotamento progressivo das fontes de água doce, colocando em risco tanto o abastecimento humano quanto o equilíbrio dos ecossistemas naturais (Al-Hazmi et al., 2023). No âmbito da gestão hídrica, três componentes principais se destacam: o abastecimento de água, o tratamento de água, e a distribuição de água. O abastecimento de água envolve a captação, armazenamento e fornecimento de água potável, geralmente obtida de mananciais naturais, como rios e aquíferos (Stevanović, 2019). O tratamento de água é um processo complexo, que combina métodos físicos, químicos e biológicos para remover contaminantes, garantindo que a água atenda aos padrões de qualidade exigidos para o consumo humano seguro (Ahmed et al., 2021). A distribuição de água envolve a infraestrutura necessária para transportar a água tratada até os pontos de uso, como residências, indústrias e propriedades agrícolas, por meio de uma rede de tubulações e estações de bombeamento (Lee; Schwab, 2005; Shammas; Wang, 2015).

Esses três componentes da gestão hídrica são interdependentes para garantir o acesso universal à água de qualidade, e ao mesmo tempo, crítico, pois dependem de gerenciamento, investimento, e políticas de controle. No Brasil, eles apresentam fragilidades significativas: estima-se que cerca de 40,1 % da água tratada se perde na distribuição, equivalente a 7,8 mil piscinas olímpicas por dia (Trata Brasil, 2023); o tratamento de esgoto ainda não atinge metade da população (SNIS, 2022); e a captação está cada vez mais vulnerável a eventos climáticos extremos (ANA, 2022). Esses números mostram que esses componentes, embora fundamentais, só alcançam efetividade quando integrados a políticas públicas consistentes, mecanismos regulatórios robustos e participação social ativa.

1.2 Lacuna de pesquisa

Alguns estudos identificados na literatura indicam que avanços significativos foram alcançados nas últimas décadas nas áreas de tratamento e distribuição de água, particularmente no que se refere à eficiência tecnológica e ao uso de novas técnicas (Luukkonen; Pehkonen, 2017; Sahu; Chaudhari, 2013). No entanto, ainda há uma lacuna considerável no que diz respeito à integração desses avanços com políticas públicas eficazes e estratégias de gestão adaptativa. As mudanças climáticas e o crescimento demográfico global adicionam camadas de complexidade à gestão dos recursos hídricos, exigindo soluções que transcendam a eficiência operacional e abordem a necessidade de uma coordenação sistêmica entre diferentes setores que utilizam a água, como a agricultura, a indústria e o abastecimento urbano (Monteleone; Maia, 2019; Piao et al., 2010; Srivastav et al., 2021). A literatura existente, embora focada em melhorias técnicas, carece de análises profundas sobre como esses sistemas podem ser integrados de forma a maximizar a sustentabilidade (Price; Heberling, 2018). Além disso, há uma falta de estudos de caso que examinem a implementação de estratégias inovadoras em regiões que conseguiram mitigar a escassez de água por meio de práticas de gestão eficazes e sustentáveis (Yadav et al., 2018; Orlov; Caton, 2010).

No contexto brasileiro, essa lacuna se torna ainda mais evidente, pois apesar de avanços tecnológicos e marcos legais importantes, como a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997) e o novo Marco Legal do Saneamento Básico (Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020), ainda há falta de frameworks integrados que considerem simultaneamente aspectos técnicos, regulatórios, sociais e ambientais (Ana, 2020; Abers; Keck, 2017). Dessa forma, este estudo se torna uma oportunidade relevante ao propor um modelo que sintetize as melhores práticas internacionais, seja validado e adaptado às especificidades institucionais e operacionais das operadoras nacionais.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação foi desenvolver diretrizes para gestão resiliente da água, baseado em revisão sistemática da literatura e adaptado ao contexto das operadoras brasileiras de saneamento. Para isso, os seguintes objetivos específicos são definidos:

1. Realizar uma revisão sistemática da literatura para identificar as melhores práticas globais em gestão resiliente da água;

2. Mapear variáveis, barreiras e estratégias associadas à gestão hídrica sustentável;
3. Sistematizar diretrizes integradas de gestão hídrica aplicável ao setor de saneamento;
4. Discutir a aplicabilidade das diretrizes no contexto brasileiro, considerando as especificidades institucionais, operacionais e regulatórias do setor de saneamento.; e
5. Propor recomendações estratégicas para o fortalecimento da resiliência hídrica no setor.

1.4 Justificativa

Este estudo se torna uma oportunidade relevante ao propor diretrizes que sintetize as melhores práticas internacionais, adaptado às especificidades institucionais e operacionais das operadoras nacionais. A relevância da pesquisa também se justifica pela sua aderência ao Programa de Pós-Graduação em Ambientes Litorâneos e Insulares (PALI), ao abordar desafios relacionados à gestão sustentável dos recursos hídricos em contextos vulneráveis às mudanças climáticas, contribuindo para o desenvolvimento de soluções aplicadas voltadas à resiliência ambiental, planejamento territorial e sustentabilidade em regiões costeiras e insulares.

1.5 Contribuições

O estudo contribui ao propor diretrizes de gestão resiliente da água, baseadas em evidências da literatura internacional, que sistematizam variáveis, barreiras e estratégias relevantes para o setor hídrico. Além disso, oferece contribuições teóricas ao avançar na compreensão da integração entre tecnologia, governança e sustentabilidade, e contribuições práticas ao fornecer subsídios para gestores públicos e privados no planejamento e na tomada de decisão em contextos de escassez e variabilidade climática.

2. METODOLOGIA

2.1 Revisão Sistemática de Literatura

A metodologia utilizada para realizar a Revisão Sistemática de Literatura se classifica como método misto (Venkatesh et al., 2013), por utilizar métodos qualitativos (análise de conteúdo) e quantitativo (análise bibliométrica). Esta revisão foi empregada para identificar, avaliar e interpretar toda a pesquisas relevantes sobre a temática da gestão hídrica resiliente (Kitchenham, 2004; Tranfield et al., 2003). Durante a aplicação dessa metodologia, todas as etapas devem ser claras, e os documentos não devem omitir informação (Gough, 2012).

A metodologia seguiu três subseções seguindo os passos propostos por Denyer e Tranfield (2009), sendo: (i) Coleta de dados; (ii) Análise bibliométrica; e, (iii) Análise de conteúdo.

2.1.1 Coleta de dados

Para a seleção da amostra de artigos, foi utilizado o método PRISMA, proposto por Moher et al. (2009), com base em uma única string de pesquisa: (("water supply" OR "water distribution" OR "water treatment") AND (barrier* OR difficult* OR strateg* OR polic* OR regulation*) AND ("case study" OR empirical)). A base de dados utilizada foi a Web of Science, reconhecida pela sua alta qualidade científica (Mongeon; Paul-Hus, 2016). No total, foram identificados 1.854 documentos, que foram coletados para a amostra, conforme mostrado na Figura 1.

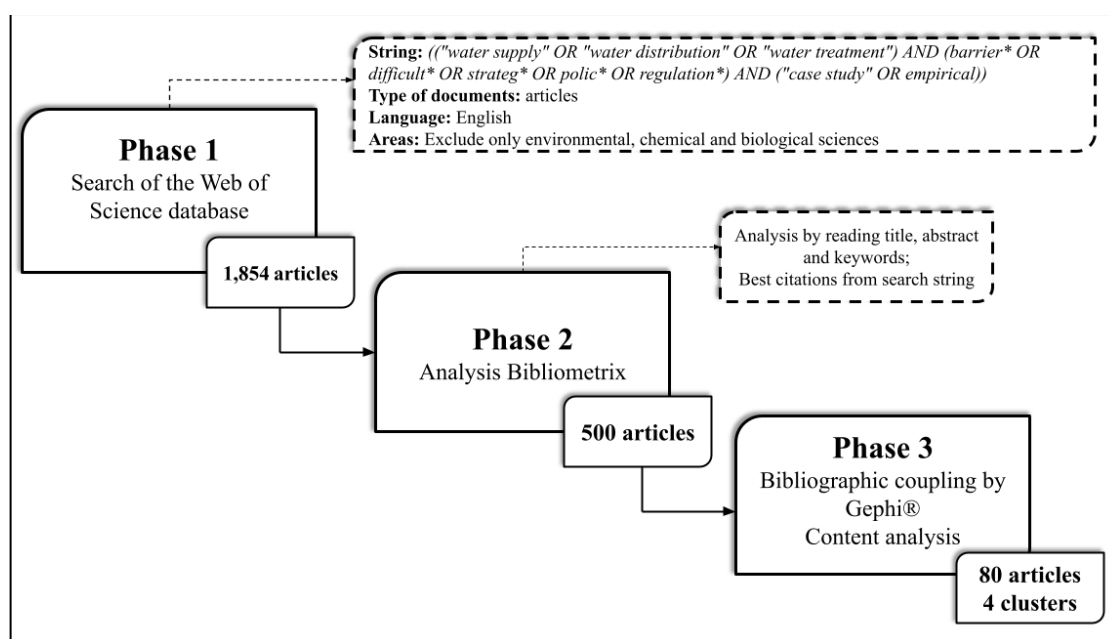


Figura 1: Protocolo PRISMA.

O primeiro critério estabelecido consistiu na busca realizada na base de dados *Web of Science*, utilizando uma *string* de pesquisa que abordava temas relacionados ao abastecimento, distribuição e tratamento de água, bem como barreiras, dificuldades, estratégias e regulamentações pertinentes. A filtragem inicial restringiu os resultados a artigos científicos internacionais, excluindo publicações de conferências, capítulos de livros e revisões sistemáticas, além de artigos de áreas como química e biologia, totalizando 1.854 documentos.

Na segunda fase, os títulos, resumos e palavras-chave foram minuciosamente analisados, priorizando artigos com estudos de caso robustos e alta relevância na literatura. Após essa triagem, 500 artigos foram selecionados para análise detalhada utilizando o software Bibliometrix®.

Na terceira fase, aplicou-se a análise de acoplamento bibliográfico com o Gephi®, utilizando o algoritmo PageRank para priorizar os melhores estudos. Esse processo resultou em 80 artigos distribuídos em 4 clusters. A sequência lógica de seleção da amostra final está apresentada na seção 3.2.

2.1.2 Análise Bibliométrica

Os 500 documentos foram submetidos a ferramenta *Bibliometrix R*, que oferece um conjunto robusto de recursos para a pesquisa bibliométrica quantitativa, além de ser uma ferramenta de código aberto amplamente empregada para realizar análises abrangentes de mapeamento científico (Rodríguez-Soler et al., 2020). Desenvolvido e programado no software RStudio® por Aria e Cuccurullo (2017), o pacote foi projetado para permitir integração rápida e flexível com outros pacotes estatísticos, sendo especialmente relevante em um campo de rápida evolução como a bibliometria.

Durante esta etapa, foi empregada a metodologia de extração de dados recomendada por Tranfield, Denyer e Smart (2003), o que envolveu a avaliação inicial dos resultados de forma independente, seguida de uma análise comparativa no contexto específico da gestão hídrica. A partir dos dados extraídos pelo *Bibliometrix*, foram geradas representações gráficas relacionadas à produção científica anual, à distribuição de autores por país e à evolução temática das publicações, permitindo uma visão clara das tendências e dos principais atores no campo.

2.1.3 Análise Conteúdo

Após a análise no Bibliometrix dos 500 artigos, aplicou-se os três passos propostos por Elo e Kyngäs (2008): i) codificação aberta; ii) categorização; e, iii) abstração. Na codificação aberta, o acoplamento bibliográfico foi realizado utilizando o software Gephi® para explorar a amostra estudada por meio de um processo de codificação dedutiva. Na categorização, foi realizada uma análise de cluster gerada pelo Modularity Class, com uma resolução de 1.0 e class starts at 0. Após as comunidades geradas, foi realizada uma análise de PageRank para priorizar os estudos mais influentes da amostra, permitindo a criação de um ranking de páginas para cada artigo e a extração das informações relevantes. Para isso, foi realizado um estudo dirigido com probabilidade de 85% e epsilon de 0.1. O PageRank é uma métrica que avalia o prestígio de artigos acadêmicos medindo a frequência com que são citados por outras obras influentes, sendo calculado a partir da Equação 1.

$$PR(A) = \frac{(1-d)}{N} + d \left(\frac{PR(T_1)}{C(T_1)} + \dots + \frac{PR(T_n)}{C(T_n)} \right) \quad (1)$$

Onde: $C(T_1)$ são as citações do artigo T_1 ; $PR(T_1)$ o seu *PageRank*; d o fator de ajuste (comumente 0,85); e, N o tamanho da rede.

A partir do cálculo de acoplamento bibliográfico, os 20 artigos mais relevantes de cada cluster foram selecionados, totalizando 80 artigos que foram considerados para a análise de conteúdo completa. Essa abordagem criteriosa garantiu que a amostra final fosse composta pelos estudos mais impactantes e influentes no campo da gestão hídrica. A categorização foi concluída com discussões aprofundadas, correlacionando os conteúdos dos artigos e organizando as informações em uma tabela estruturada. Isso facilitou a extração de dados essenciais sobre métodos de análise, principais stakeholders, práticas de gestão, barreiras identificadas, estratégias adotadas, tendências emergentes e questões para pesquisas futuras.

Na fase de abstração, os dados extraídos dos artigos possibilitaram discussões detalhadas sobre as práticas, barreiras e estratégias associadas a cada cluster. Esse processo também resultou na sistematização de práticas e diretrizes para gestão hídrica eficiente, que pode servir como uma ferramenta útil para empresas, gestores públicos e tomadores de decisão ao enfrentarem os desafios contemporâneos relacionados à escassez de água e à otimização do uso dos recursos hídricos. Além disso, foi desenvolvida uma *research agenda* com perguntas centrais e sugestões metodológicas, com o objetivo de

fomentar estudos futuros sobre as complexidades envolvidas na gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos.

Na etapa de abstração foi possível discutir detalhadamente sobre as práticas, barreiras e estratégias de cada cluster. Esse processo resultou na criação de práticas e diretrizes para gestão hídrica eficiente, oferecendo uma ferramenta útil para empresas, gestores públicos e tomadores de decisão no enfrentamento dos desafios atuais, como a escassez de água e a otimização dos recursos hídricos. Além disso, foi desenvolvida uma agenda de pesquisa com perguntas centrais e sugestões metodológicas, visando incentivar estudos futuros sobre as complexidades da gestão sustentável e integrada dos recursos hídricos.

3. RESULTADOS

3.1 Revisão de Literatura

A revisão teve como objetivo identificar as principais barreiras e variáveis que impactam o gerenciamento de recursos hídricos, explorando casos de sucesso em diferentes contextos regionais. Os principais resultados estão organizados em duas subseções. A primeira oferece uma visão geral da amostra, abordando a produção científica anual, a distribuição das publicações por revistas e países, e a evolução temática. A segunda subseção discute as variáveis, barreiras e estratégias no campo da gestão hídrica, com uma análise detalhada das dinâmicas de cada cluster identificado, incluindo as especificidades das variáveis investigadas, os principais obstáculos enfrentados e as estratégias implementadas.

3.1.1 Panorama da produção científica - Análise Bibliométrica

Para situar a evolução da literatura, apresenta-se um panorama bibliométrico da produção científica, identificando tendências temporais, distribuição por periódicos e países e eixos temáticos emergentes, que servirá de base empírica para as análises posteriores. Assim, a partir da análise de 500 documentos relacionados à gestão hídrica, foi gerada a Figura 2, que ilustra a produção científica anual ao longo dos anos.

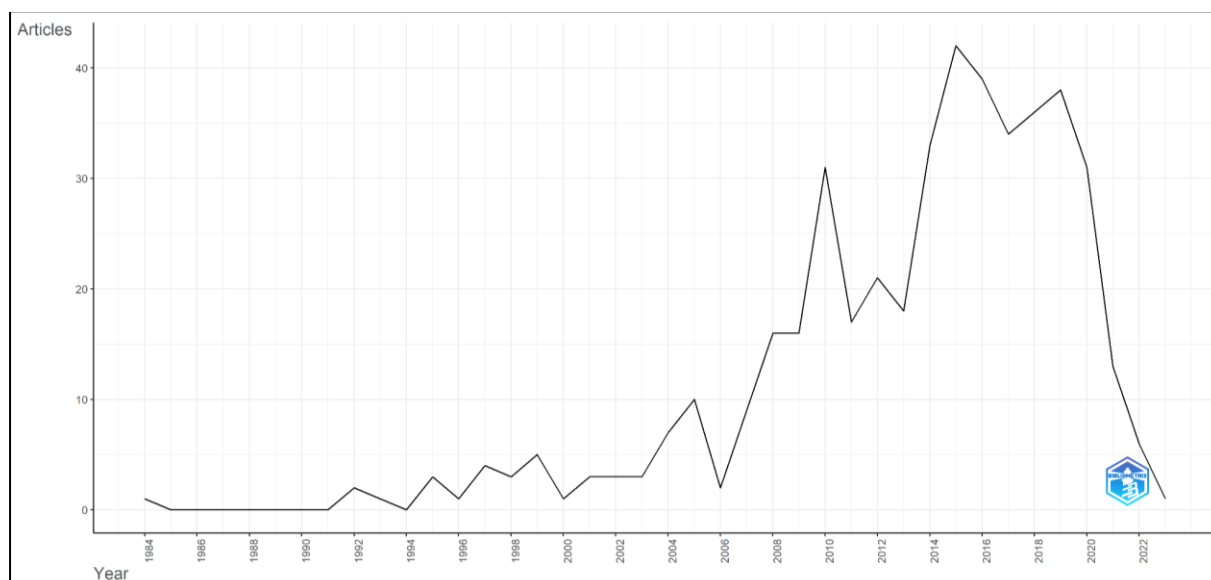


Figura 2: Produção científica anual.

A análise revela que o pico de maior produtividade ocorreu em 2015, com a publicação de 42 artigos sobre gestão hídrica, seguido de 2019, com 38 publicações. Esses anos representaram os períodos mais produtivos em termos de contribuição científica para a área. Esse salto de publicações pode ser justificado devido à crise hídrica em Cape Town, o aumento de eventos climáticos extremos globalmente e a perda de quase 40% de água potável captada no Brasil (Trata Brasil, 2023; Koncagül; Tran; Connor, 2021; WRI Brasil, 2019).

Já a baixa representatividade observada para o ano de 2024 se deve ao fato de que a coleta de dados foi encerrada em julho de 2024, o que explica o número reduzido de publicações neste ano. Apesar do aumento na produtividade em 2015 e 2019, os artigos mais citados pertencem ao ano de 2009, sendo os estudos de Bel et al. (2010), com 327 citações, e Li et al. (2018), com 303 citações, os mais influentes. A Figura 3 ressalta ainda os principais periódicos que tratam sobre o tema da pesquisa.

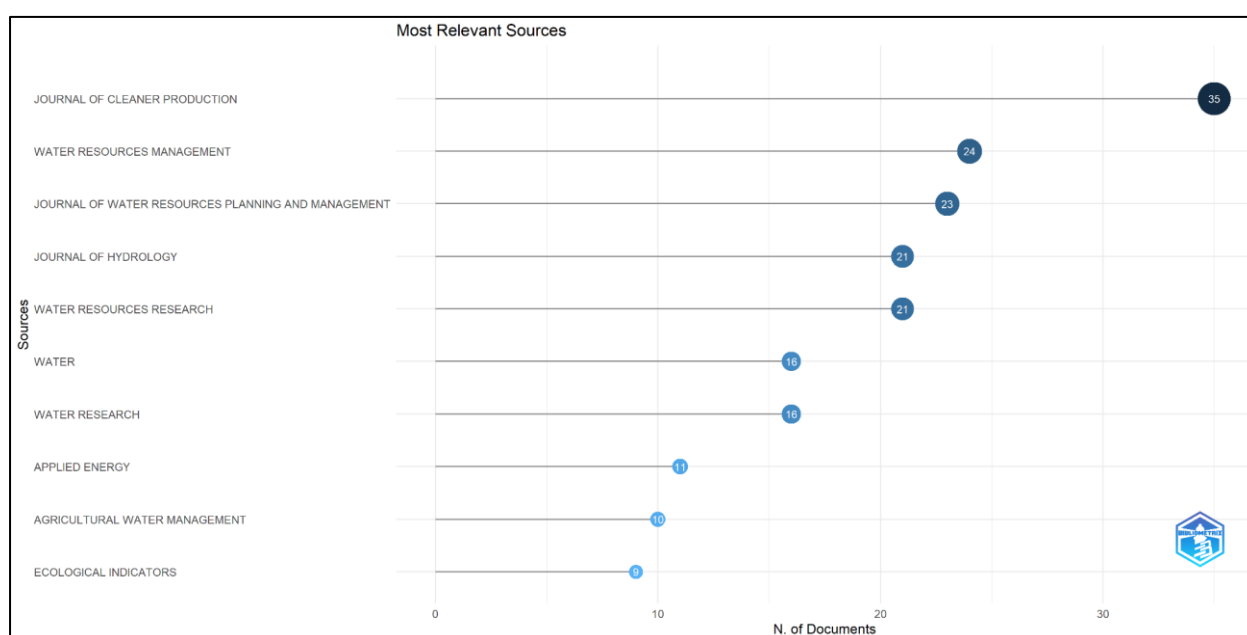


Figura 3: Fontes mais relevantes.

Os principais periódicos que se destacaram como fontes de publicações sobre gestão hídrica foram o *Journal of Cleaner Production*, com 35 documentos, seguido pelo *Water Resources Management*, que contribuiu com 24 documentos. Esses periódicos se consolidam como veículos relevantes para pesquisadores que investigam as dinâmicas e os desafios da gestão sustentável dos recursos hídricos. Para complementar a análise, a Figura 4 apresenta o mapa dos países onde se concentram o maior número de publicações analisadas (tom azul mais escuro).

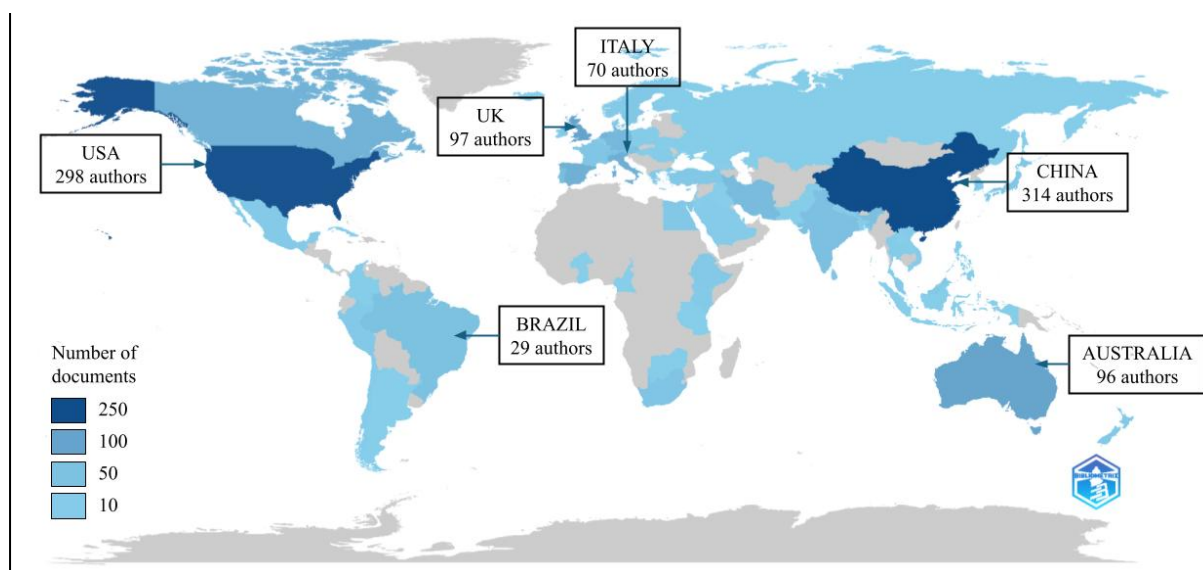


Figura 4: Produção nacional por autores.

Analisando por continentes, a Ásia se destaca com a maior contribuição, seguida pela Europa, Oceania e América respectivamente, e com baixas publicações vindas do continente Africano. Entre os países, a China se sobressai como o principal polo de pesquisa no tema, com 314 autores envolvidos na produção científica, sendo o país com maior frequência de publicações. Em sequência, destacam-se os Estados Unidos, com 298 autores. Essa alta prevalência de publicações, são justificadas por serem países que dispõem de maiores de sistemas de P&D, ou seja, mais financiamentos e pesquisadores, além de maior presença nas bases internacionais. Dados globais mostram EUA e China entre os países com maior produção científica em subáreas de água (qualidade, rios, IoT aplicado à água), liderando os rankings de publicações (UNESCO, 2025; Addow; Jimale, 2024; Shahri; Ali, 2024).

Além desses países, Reino Unido apresentou 97 autores, seguido por Itália com 70 autores. Outros países que também apresentam uma contribuição significativa, ainda que em menor escala, incluem a Austrália e o Brasil, com 96 e 29 autores, respectivamente. Esses dados demonstram a concentração de esforços científicos em algumas regiões, especialmente na Ásia e na Europa, evidenciando a necessidade de ampliar a discussão sobre gestão hídrica em outras partes do mundo.

Já em relação a países com menos publicações como exemplo a África, pode ser justificada devido a restrições estruturais de pesquisa e por sub-representação de periódicos africanos nas bases de dados da Scopus e Web of Science. Autores como Asubiaro,

Onaolapo e Mills (2024), descrevem, que periódicos africanos são 4× menos propensos a serem indexados do que os europeus, o que reduz a visibilidade de pesquisas locais.

Assim, nota-se que a promoção de estudos em países com menor incidência de publicações, como na África e em parte da América Latina, pode contribuir para uma visão mais global e inclusiva sobre as melhores práticas e os desafios da gestão sustentável dos recursos hídricos, porém necessitam ganhar espaço nas bases de dados e necessitando de mais investimentos estruturais em pesquisas e desenvolvimento. Em seguida, foi observado por meio da Figura 5 a evolução temática dos 500 documentos estudados, possuindo quatro recortes temporais.

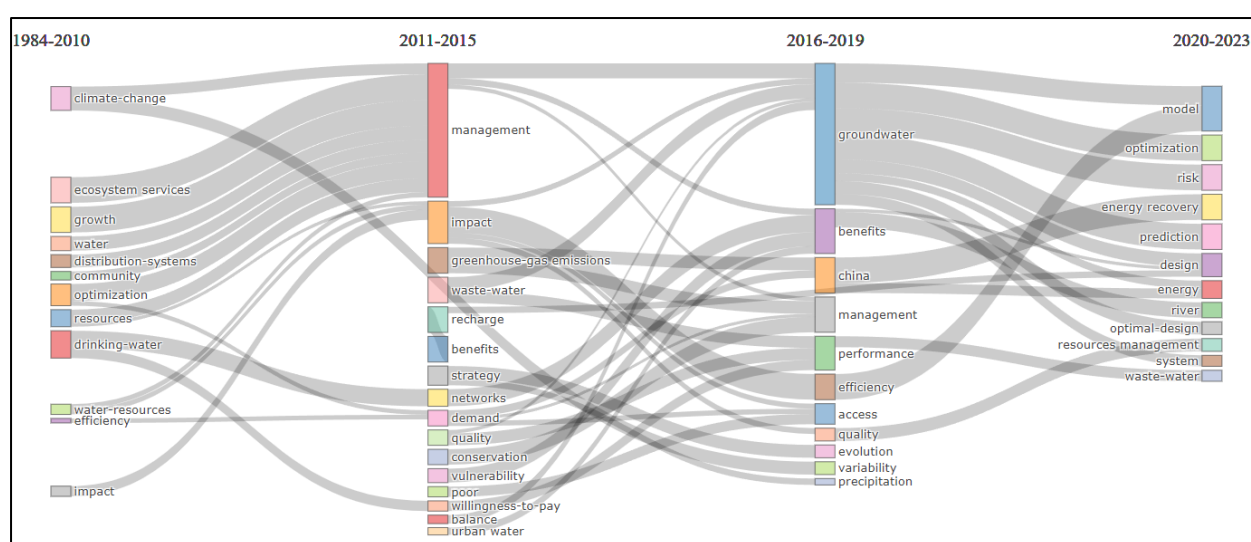


Figura 5: Evolução temática das pesquisas sobre gestão hídrica

A análise da Figura 5 revela a evolução temática das pesquisas sobre gestão hídrica ao longo de quatro recortes temporais distintos: 1984-2010, 2011-2015, 2016-2019, e 2020-2023. Durante o período inicial de 1984 a 2010, os estudos focaram em tópicos como mudanças climáticas, serviços ecossistêmicos e sistemas de distribuição de água, refletindo preocupações com a sustentabilidade e o abastecimento de água potável. Entre 2011 e 2015, o termo gestão tornou-se central, junto com questões como emissões de gases de efeito estufa e águas residuais, sugerindo um foco mais amplo na governança dos recursos hídricos e na mitigação dos impactos ambientais causados pelas atividades humanas. De 2016 a 2019, o destaque foi para águas subterrâneas, além de termos como eficiência e desempenho, indicando um interesse crescente na otimização dos sistemas hídricos, especialmente em regiões com escassez de água superficial. Por fim, de 2020 a 2023, a

ênfase deslocou-se para modelagem, otimização e risco, com o uso de tecnologias preditivas para gerenciar os recursos hídricos e mitigar os efeitos das mudanças climáticas.

3.1.2 Variáveis, barreiras e estratégias dos clusters na Gestão Hídrica

Inicialmente, foram definidos quatro clusters que orientam a análise de conteúdo deste estudo, com percentuais de distribuição semelhantes entre si (Figura 6). Para identificar os estudos mais relevantes, aplicou-se o algoritmo PageRank, selecionando os 20 estudos com maior pontuação em cada cluster, resultando em uma amostra total de 80 artigos. O Apêndice A fornece as informações gerais da amostra, organizadas por cluster, PageRank, stakeholders, política empregada e escopo de pesquisa.

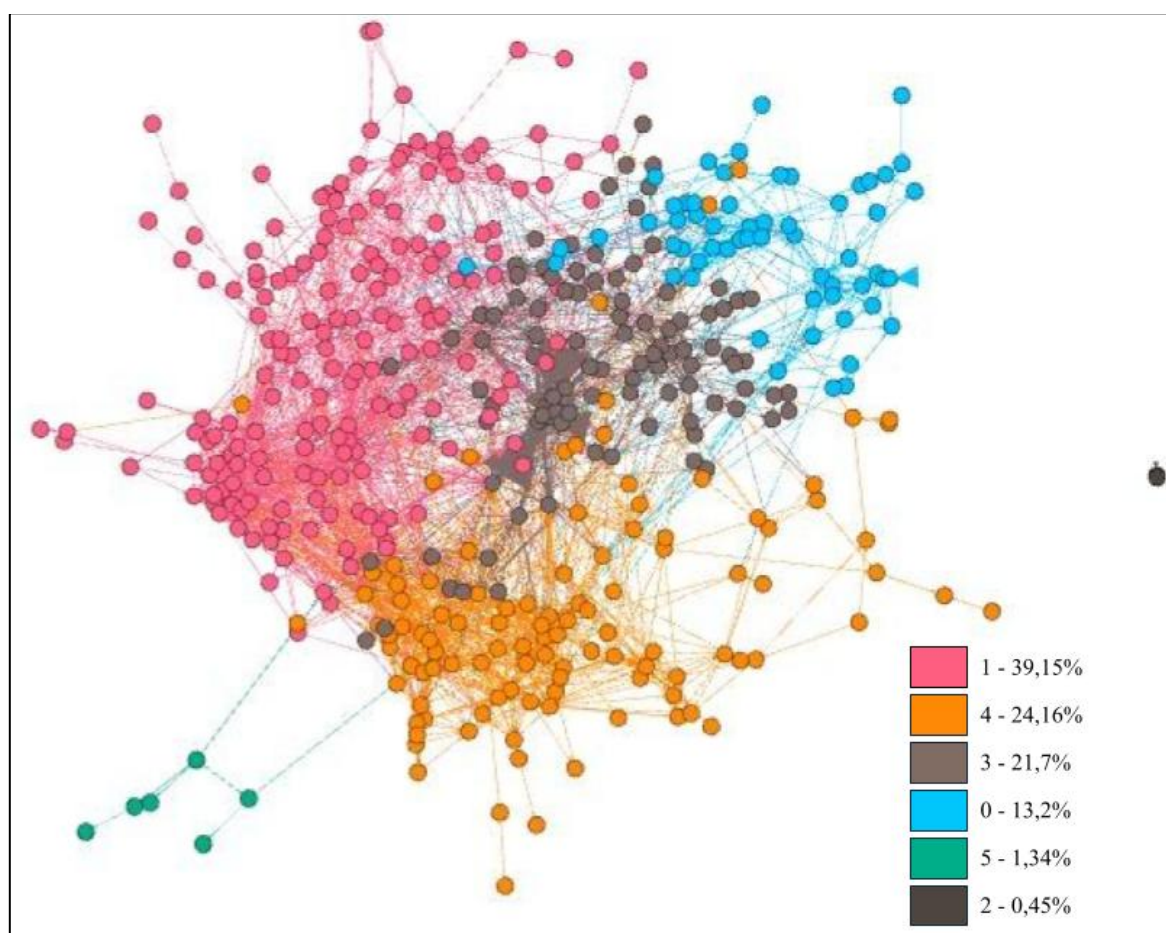


Figura 6: Análise de cluster

Note: Cluster 1 (Inovação e resiliência na gestão de recursos hídricos); Cluster 4 (Gestão integrada e eficiência hídrica); Cluster 3 (Integração tecnológica e governança para segurança hídrica); Cluster 0, 5 e 2 (Governança e sustentabilidade em recursos hídricos).

3.1.2.1 Cluster 1 - Inovação e resiliência na gestão de recursos hídricos

O Cluster 1 analisa diferentes variáveis-chave, essenciais para otimizar o uso e a distribuição de recursos hídricos em diversos cenários ambientais e socioeconômicos. Entre as variáveis principais, a eficiência no uso da água em setores agrícolas e urbanos desponta como um elemento central, considerando a interação entre fontes de água doce e salina, especialmente em redes de irrigação mistas que visam maximizar o rendimento hídrico sem comprometer a qualidade do solo e a produtividade agrícola (Kan; Raapaport-Rom, 2012; Gaydon et al., 2012). A integração de *Machine Learning* na gestão de reservatórios também desempenha um papel significativo, aprimorando o controle e a previsão de demanda e oferta hídrica, o que é vital para regiões que enfrentam flutuações frequentes nos recursos hídricos disponíveis (Brodeur et al., 2020; Guo et al., 2019).

Além disso, a capacidade de resposta a eventos climáticos extremos, como secas e inundações, é abordada por meio de variáveis de resiliência e recuperação da infraestrutura de transporte de água e portos fluviais, que garantem a continuidade dos fluxos hídricos em situações de desastres naturais (Hosseini; Barker, 2016; Kong et al., 2019). Paralelamente, a Cluster destaca estratégias de adaptação e aproveitamento de fontes alternativas, como a captação de água da chuva e a reutilização de águas residuais, que se mostram vitais para o provimento sustentável de água em regiões vulneráveis (Lee et al., 2016; Arnold et al., 2015). A governança hídrica, que inclui participação cívica e políticas de precificação, também é uma variável crítica ao promover o uso racional e sustentável dos recursos, especialmente em áreas urbanas com alta demanda e desafios de infraestrutura (Enqvist et al., 2016; Correia de Araujo et al., 2019).

O estudo ainda investiga o impacto do uso do solo nos serviços ecossistêmicos, incluindo a recarga de águas subterrâneas e o controle de fluxos inter-regionais, que contribuem para um sistema hídrico equilibrado e resiliente em contextos de variabilidade climática (Guo et al., 2012; Cao et al., 2015). Dessa forma, é integrada variáveis que abrangem desde a inovação tecnológica até a adaptação ecológica e as políticas de governança, oferecendo uma visão abrangente para uma gestão hídrica eficiente e resiliente.

Além das variáveis analisadas na gestão hídrica, é revelado barreiras estruturais e contextuais que impactam negativamente a eficiência e sustentabilidade do uso dos recursos hídricos. A infraestrutura limitada e os altos custos associados à distribuição e ao controle de salinidade destacam-se como um dos principais entraves, sobretudo em redes de

irrigação que demandam controle rigoroso de qualidade e economia de água doce (Kan; Raapaport-Rom, 2012). Adicionalmente, o super ajuste das políticas de controle de reservatórios baseadas em dados históricos restringe a aplicabilidade dessas políticas em novos cenários climáticos, o que limita o potencial de adaptação às variações ambientais (Brodeur et al., 2020).

A variabilidade climática, agravada por regulamentações rígidas, impõe desafios adicionais para a gestão agrícola, dificultando o ajuste das práticas de irrigação em períodos de baixa disponibilidade hídrica, especialmente em regiões dependentes de fontes limitadas (Gaydon et al., 2012). Por outro lado, barreiras ambientais e técnicas, como as relacionadas ao aproveitamento de água da chuva, são exacerbadas por políticas públicas insuficientes e pelo alto custo de instalação, desincentivando sua adoção em larga escala (Lee et al., 2016). Outro desafio crítico é a complexidade de coordenação entre múltiplos gestores e sistemas hídricos interligados, especialmente na gestão de recursos compartilhados, como a transferência interbacias, onde as limitações logísticas e hierárquicas impactam a eficiência na distribuição de água entre regiões com disponibilidade variável (Guo et al., 2012).

Além disso, a interdependência de sistemas e o risco de falhas em cascata, onde a falha de um sistema como energia afeta diretamente o fornecimento de água, sublinham a importância de estratégias robustas de recuperação e resiliência, necessárias para mitigar impactos durante períodos críticos (Kong et al., 2019). Assim, as barreiras identificadas apontam para a necessidade de um enfoque multidisciplinar, combinando inovação tecnológica, políticas integradas e adaptação às condições climáticas, para superar os desafios atuais e garantir uma gestão hídrica sustentável e resiliente.

O Cluster 1 ainda explora estratégias diversas que buscam maximizar a eficiência e adaptabilidade dos recursos hídricos frente a cenários climáticos desafiadores. Um dos enfoques centrais é o uso de métodos estatísticos avançados, como *Bootstrap Aggregation* e validação cruzada, para melhorar o desempenho dos modelos de controle de reservatórios, permitindo que políticas de gestão hídrica sejam aplicadas de forma robusta mesmo em condições que extrapolam o histórico disponível (Brodeur et al., 2020). Em paralelo, estratégias de irrigação são testadas com base em alocações adaptativas que respondem às mudanças sazonais na oferta de água, otimizando o uso hídrico em culturas específicas para promover a sustentabilidade agrícola durante períodos de escassez (Gaydon et al., 2012).

Para reforçar a resiliência infraestrutural, capacidades de absorção e adaptação são implementadas, priorizando proteções físicas, modos de transporte flexíveis e reparação rápida em resposta a interrupções por desastres naturais, o que fortalece a continuidade operacional dos sistemas hídricos (Hosseini; Barker, 2016). Outro avanço significativo é o desenvolvimento de políticas para uso de água da chuva, que envolvem incentivos econômicos e regulamentos para integrar essa captação em grandes edificações, promovendo o abastecimento urbano para fins não potáveis, como jardinagem e lavagem, e aliviando a pressão sobre a água potável em áreas urbanas (Lee et al., 2016).

Para promover uma gestão eficaz e hierárquica dos recursos interbacias, os artigos apresentaram o uso de um modelo bilevel, no qual gestores superiores otimizam a alocação de água entre regiões com diferentes demandas hídricas, enquanto operadores de reservatórios locais aplicam estratégias de Hedge para minimizar a escassez durante transferências (Guo et al., 2012). A implementação de telhados verdes, projetados para cobrir áreas comerciais e residenciais, é uma estratégia que visa aumentar a regulação climática e hídrica urbana, reduzindo o escoamento e as temperaturas locais (Foundi et al., 2017).

Além disso, comunidades urbanas são incentivadas a participar na preservação de recursos hídricos locais, organizando grupos de preservação que trabalham junto a autoridades locais para restaurar e reabastecer corpos d'água urbanos, como lagos, e apoiar a recarga de águas subterrâneas (Enqvist et al., 2016). Em ambientes onde o uso do solo impacta diretamente os recursos hídricos, uma metodologia que converte indicadores de função ecológica do solo em valores econômicos possibilita uma avaliação integrada e direcionada da sustentabilidade no uso do solo, contribuindo para a proteção de serviços ecossistêmicos e facilitando a tomada de decisão sobre a conservação hídrica (Cao et al., 2015). Essas estratégias, integradas e adaptativas, respondem às complexas necessidades da gestão hídrica, fortalecendo a resiliência e promovendo uma utilização sustentável dos recursos em múltiplos níveis de operação e governança.

3.1.2.2 Cluster 4 - Gestão integrada e eficiência hídrica

Neste cluster, as variáveis analisadas abordam os recursos hídricos com uma visão sistêmica, equilibrando aspectos de demanda e oferta em contextos que exigem uma gestão integrada e resiliente. Inicialmente, a variável de disponibilidade hídrica (Mendoza et al., 2017) representa a capacidade dos corpos d'água em prover recursos suficientes para

atender às necessidades de diversos setores, e está diretamente vinculada à eficiência no uso da água (Creaco; Franchini, 2013), que avalia a capacidade de sistemas e políticas de minimizar perdas e otimizar o consumo. A qualidade da água (Galvis et al., 2014) também desempenha papel fundamental, expressando a adequação dos recursos em relação a parâmetros físico-químicos e biológicos, fatores essenciais para usos como abastecimento urbano, agricultura e indústria. Adicionalmente, as flutuações climáticas (Gunnarsdottir et al., 2015) influenciam diretamente as variáveis de disponibilidade e qualidade, aumentando a necessidade de adaptação e ajustes nos modelos de gestão em cenários de estresse hídrico.

O Cluster 4 também explora variáveis relacionadas à governança e políticas hídricas, enfatizando a importância de uma estrutura regulatória robusta (Christodoulou et al., 2010) e de uma abordagem de gestão integrada de recursos hídricos (Cembrano et al., 2011), que fomente uma alocação justa e sustentável entre os diferentes setores consumidores. A alocação eficiente dos recursos (Creaco et al., 2020) se destaca como um aspecto estratégico, especialmente em regiões que enfrentam escassez de água, facilitando a distribuição entre setores agrícolas, industriais e urbanos para maximizar a sustentabilidade no uso dos recursos. Por fim, a resiliência hídrica (Campisano et al., 2010) sintetiza os esforços em implementar estratégias que minimizem a vulnerabilidade dos sistemas a eventos climáticos extremos, como secas ou enchentes, promovendo um abastecimento contínuo e seguro de água.

Estudos complementares apontam para a importância de variáveis como investimento em infraestrutura verde e técnicas de monitoramento e controle em tempo real (citados em artigos sobre controle preditivo e sistemas de sensoriamento remoto), que se alinham com as práticas de inovação e sustentabilidade essenciais para a gestão hídrica avançada.

A análise das barreiras destaca a interdependência de fatores que dificultam a gestão hídrica integrada e exigem abordagens colaborativas e intersetoriais. A previsão precisa das condições hidrológicas iniciais enfrenta desafios consideráveis devido à variabilidade climática e à limitação de dados históricos, ambos impactando negativamente a calibração e a confiabilidade dos modelos de gestão (Mendoza et al., 2017, Creaco; Franchini, 2013). Esse cenário é ainda mais complexo nos sistemas de distribuição urbana, onde oscilações na pressão e na demanda ao longo do tempo exigem ajustes contínuos nos parâmetros de controle para acompanhar as variações em tempo real (Creaco; Franchini, 2013, Christodoulou et al., 2010).

Esses problemas são agravados pela dependência de soluções tradicionais de tratamento centralizado, que além de caras e de acesso limitado, apresentam barreiras para implementar tecnologias alternativas de controle e reutilização em larga escala (Galvis et al., 2014; Campisano et al., 2010). A coordenação das atividades de gestão também encontra entraves devido à fragmentação administrativa, distribuindo responsabilidades entre diferentes órgãos sem uma estrutura formal de cooperação e capacitação para autoridades locais, comprometendo a supervisão e a efetividade das políticas públicas (Gunnarsdottir et al., 2015; Cembrano et al., 2011).

As limitações estruturais e operacionais emergem como barreiras críticas no monitoramento e manutenção das redes hídricas. A degradação da infraestrutura e a dificuldade em prever a vida útil dos componentes (Christodoulou et al., 2010; Creaco et al., 2020) aumentam os riscos de falhas e sublinham a necessidade de estratégias de manutenção adaptativa. Além disso, a complexidade em definir políticas operacionais para redes interconectadas exige modelos dinâmicos sujeitos a calibrações constantes, devido à incerteza hidráulica e demandas variáveis (Cembrano et al., 2011; Blinco et al., 2016). Nos sistemas que utilizam bombas que operam como turbinas (PATs), a ausência de padrões de desempenho e a variabilidade nas condições de operação aumentam a dependência de experimentos e modelos customizados, limitando a aplicabilidade das tecnologias de maneira uniforme (Creaco et al., 2020; Bi; Dandy, 2014).

A regulação de pressão em redes urbanas também se torna desafiadora, pois exige configurações de válvulas adaptáveis às variações temporais e espaciais das demandas, contribuindo para o aumento das perdas (Campisano et al., 2010, Berardi et al., 2008). Tais barreiras, ao serem discutidas em conjunto, destacam a urgência de uma abordagem integrativa e adaptativa na gestão hídrica, que não apenas responda aos desafios técnicos e operacionais, mas também considere as limitações administrativas e econômicas para garantir a resiliência e a sustentabilidade dos sistemas hídricos.

Diante das barreiras identificadas, o Cluster 4 adota uma abordagem diversificada de estratégias para mitigar os desafios na gestão hídrica e promover a eficiência e a resiliência dos sistemas. A integração de métodos híbridos que combinam previsões climáticas com modelos hidrológicos aparece como uma estratégia essencial para otimizar a precisão e reduzir erros nas previsões de escoamento (Mendoza et al., 2017). Para garantir o controle adequado em redes de distribuição urbana, a implementação de algoritmos de controle em tempo real (RTC), que ajustam a configuração de válvulas com base em medições dinâmicas

de pressão e vazão, representa uma abordagem robusta para reduzir desvios e responder às flutuações diárias de demanda (Creaco; Franchini, 2013, Campisano et al., 2010).

Paralelamente, a estratégia *Three Steps Strategic Approach (3-SSA)* promove uma abordagem progressiva, priorizando a minimização e prevenção de poluição, o tratamento para reuso e o estímulo à autopurificação natural dos corpos d'água, o que demonstra uma solução integrada para enfrentar as limitações de soluções tradicionais de tratamento centralizado (Galvis et al., 2014). Nos sistemas que envolvem múltiplas autoridades, a implementação de Planos de Segurança da Água (PSA), associados ao treinamento contínuo para autoridades locais e auditoria externa dos PSA, fortalece a governança e proporciona uma resposta coordenada aos problemas de qualidade e segurança dos recursos (Gunnarsdottir et al., 2015).

As estratégias para fortalecer a infraestrutura e a operação em redes de abastecimento são igualmente inovadoras e abrangentes. A utilização de modelos de redes neurais artificiais para avaliar o risco de falhas, combinada com sistemas de suporte à decisão (DSS), permite priorizar reparos e substituições com base na análise de fatores de risco, otimizando a alocação de recursos (Christodoulou et al., 2010). Para enfrentar a complexidade operacional em grandes redes interconectadas, o controle preditivo modelado em tempo real (MPC) ajusta fluxos e pressão de acordo com previsões de demanda, utilizando simulações offline e monitoramento em tempo real para garantir estabilidade e eficiência (Cembrano et al., 2011).

Em sistemas que buscam a geração de energia a partir de adutoras, algoritmos genéticos multiobjetivo ajustam as configurações das PATs para maximizar a produção de energia enquanto otimizam os custos (Creaco et al., 2020). Por fim, técnicas de monitoramento avançadas, como índices de vegetação NDVI e dados GIS, possibilitam a detecção precisa de vazamentos, mitigando perdas e melhorando a resiliência das redes (Agapiou et al., 2016). Essas estratégias, interligadas e sustentadas por tecnologias avançadas e modelos de otimização, representam uma resposta proativa e eficaz aos complexos desafios da gestão hídrica contemporânea.

3.1.2.3 Cluster 3 - Integração tecnológica e governança para segurança hídrica

No contexto do Cluster 3, as variáveis observadas destacam as complexas relações entre percepções de risco, práticas de gestão sustentável e a confiança dos usuários nos sistemas de abastecimento de água. Estudos que analisam a percepção de risco em

sistemas de gestão hídrica revelam como valores culturais, sociais e identitários impactam a aceitação e o uso de tecnologias descentralizadas (Dobbie; Brown, 2014), além de enfatizarem a importância da confiança institucional e do controle percebido nas decisões de consumo e reuso de água (de Gois et al., 2015).

Essas variáveis são ainda mais significativas em cenários onde se implementam sistemas de captação e reutilização de águas pluviais, proporcionando uma alternativa eficiente em locais de escassez hídrica e contribuindo para a resiliência urbana por meio de redes de fornecimento de água adaptativas e robustas (Gomes et al., 2013). O fortalecimento da confiança nas instituições que administram esses sistemas é essencial, pois, como demonstram as análises sobre práticas de gestão integrada, o sucesso de redes centralizadas e descentralizadas depende da coesão entre valores locais e práticas de preservação e uso racional da água (Dobbie; Brown, 2014; de Gois et al., 2015).

Outro aspecto crucial envolve os fatores socioeconômicos e as barreiras que influenciam a adoção de soluções hídricas sustentáveis. Variáveis como incentivo econômico e apoio governamental impactam diretamente a disposição de agricultores e residentes urbanos para adotar práticas inovadoras de gestão, especialmente em regiões com recursos limitados (Aznar-Sánchez et al., 2017). Nesse sentido, as interações entre percepções de risco e fatores econômicos demonstram a relevância de políticas públicas focadas na dessalinização e no reuso de água para mitigar a vulnerabilidade hídrica (de Gois et al., 2015).

Esse panorama aponta para uma sinergia necessária entre incentivos institucionais e a aceitação pública de novas tecnologias de tratamento e distribuição, promovendo uma rede hídrica sustentável que integra dimensões sociais, econômicas e ambientais. Dessa forma, o avanço da gestão hídrica eficaz depende de estratégias que combinem a segurança e eficiência operacional com a adaptação aos valores locais e as condições socioeconômicas prevalentes (Dobbie; Brown, 2014; Gomes et al., 2013).

As barreiras para a gestão hídrica refletem desafios multifacetados que englobam infraestrutura, custos operacionais e percepções sociopolíticas. As limitações associadas ao uso de água cinza, que é restrita pela baixa disponibilidade e pelo alto custo de coleta e armazenamento, ilustram as dificuldades de implementar sistemas de reaproveitamento em larga escala (de Gois et al., 2015). Essa problemática é ampliada pela degradação da infraestrutura, com tubulações envelhecidas exigindo altos custos de manutenção e substituição, dificultando o gerenciamento de perdas em redes extensas e, em muitos casos,

exigindo criação de Áreas de Medição Distrital (DMAs) para controle de distribuição e pressão (Gomes et al., 2013).

Em adição, a complexidade do agendamento de bombas em redes de distribuição, especialmente quando sujeitos a tarifas dinâmicas de eletricidade, representa uma barreira técnica significativa, reforçando a necessidade de desenvolvimento de algoritmos avançados para garantir eficiência energética em grandes sistemas (Bonvin et al., 2017). A interdependência entre as demandas de refrigeração e as altas temperaturas em locais como minas profundas exige a coordenação de múltiplos componentes, um processo que frequentemente enfrenta elevadas demandas energéticas e custos operacionais (Vosloo et al., 2012).

Por outro lado, questões como a complexidade das reações bioquímicas em sistemas de tratamento de lodo ativado e as limitações empíricas dos modelos convencionais trazem dificuldades consideráveis para o controle e otimização de processos, especialmente em locais onde a eficiência de remoção de nutrientes é essencial para o tratamento adequado de efluentes (Rigopoulos; Linke, 2002). A necessidade de adsorventes específicos para a remoção de contaminantes, como o flúor, acentua a dependência de tecnologias adaptadas às condições locais e, ao mesmo tempo, destaca a dificuldade de aceitação de métodos não convencionais, especialmente quando faltam dados empíricos confiáveis para apoiar sua implementação (Ndé-Tchoupé et al., 2015).

Ainda, a complexa interdependência dos recursos água-energia-alimento demanda ferramentas de avaliação mais sofisticadas para compreender e mitigar os impactos ambientais, uma tarefa que se torna particularmente desafiadora diante das vulnerabilidades climáticas e da crescente demanda por recursos (Chen et al., 2020). Essas barreiras são agravadas pela necessidade de monitoramento contínuo e integração de tecnologias para superar as limitações dos sistemas hídricos tradicionais, além de garantir uma resposta resiliente frente às demandas socioeconômicas e ecológicas emergentes (Fuentes-Cortés; Flores-Tlacuahuac, 2018). As estratégias voltadas para a gestão hídrica avançam na promoção de abordagens inovadoras que enfrentam desafios estruturais e operacionais. A implementação de campanhas informativas, aliada a subsídios diretos e descontos progressivos para grandes consumidores, surge como uma estratégia para aumentar a aceitação de tecnologias sustentáveis entre os agricultores e assegurar um uso mais eficiente dos recursos hídricos (Aznar-Sánchez et al., 2017).

Ademais, para fortalecer a governança de riscos na gestão urbana da água, é proposta uma estrutura que permite aos profissionais e equipes multidisciplinares

compreender e controlar as percepções de risco, utilizando teorias relacionais para promover uma gestão compartilhada e diversificada, especialmente no contexto urbano (Dobbie; Brown, 2014). A aplicação de um sistema de controle em tempo real, como o REMS™, aliado ao uso de armazenamento de água, oferece uma solução eficiente para gerenciar demandas energéticas durante períodos de pico, garantindo o fornecimento contínuo de água em sistemas integrados e reduzindo desperdícios energéticos e hídricos (Bonvin et al., 2017; Vosloo et al., 2012).

Outras estratégias avançam na integração de tecnologias e otimização de recursos. O uso de superestruturas para analisar a configuração ideal de reatores em processos de tratamento de águas residuais demonstra um esforço técnico em maximizar a eficiência de remoção de contaminantes críticos, como o nitrogênio e a demanda química de oxigênio (DQO), enquanto possibilita o ajuste dinâmico de parâmetros para melhor desempenho do sistema (Rigopoulos; Linke, 2002). A combinação de tecnologias de dessalinização com fontes renováveis, como energia solar e eólica, e a introdução de reservatórios subterrâneos em áreas agrícolas ilustram o esforço em reduzir a dependência de combustíveis fósseis, promovendo um ciclo sustentável de recursos entre água e energia (Abdelzaher et al., 2023).

Além disso, a cooperação regional para o uso de tecnologias dessalinizadoras, incluindo acordos comerciais e o modelo TWINS para monitorar interações transfronteiriças, contribui para a segurança hídrica e fortalece a resiliência dos sistemas diante de eventos críticos, promovendo estabilidade nas relações entre países que compartilham recursos hídricos (Aviram et al., 2014). Essas estratégias demonstram um compromisso em otimizar a eficiência e a sustentabilidade da gestão hídrica, integrando soluções tecnológicas robustas com uma governança adaptativa que responde tanto aos desafios locais quanto às demandas regionais.

3.1.2.4 Cluster 0, 5 e 2 - Governança e sustentabilidade em recursos hídricos

O último Cluster, que reúne os 3 menores índices, foram acoplados em um único grupo, permitindo examinar variáveis relacionadas aos desafios e estratégias de abastecimento e tratamento da água em contextos de escassez e urbanização crescente. Estudos abordam a intermitência e as adaptações necessárias no fornecimento, onde a precariedade no abastecimento exige práticas como armazenamento doméstico e precificação diferenciada (Klassert et al., 2015), enquanto a urbanização e o uso do solo

impactam diretamente a disponibilidade e a qualidade das fontes hídricas (Giacomoni et al., 2013).

Essas questões são intensificadas por fatores socioeconômicos, como a disposição a pagar por melhorias no serviço e a adaptação de práticas de consumo familiar, que, por sua vez, influenciam tanto a sustentabilidade da demanda quanto as políticas tarifárias voltadas para a eficiência (Chu et al., 2009; Chen; Yang, 2009). A eficiência técnica também é um fator central, com a necessidade de modernizar a infraestrutura e corrigir a precificação inadequada, que resulta em um fornecimento ineficiente e inconstante (Kessides, 2005), afetando, portanto, o atendimento das crescentes necessidades urbanas de água potável e esgotamento.

Além dos aspectos de fornecimento, as variáveis ligadas à qualidade e ao tratamento da água também são cruciais para a gestão hídrica eficiente. Em áreas urbanas onde há sobreposição de águas subterrâneas e superficiais, a poluição e os custos de tratamento são exacerbados pela expansão das áreas urbanizadas e pela pressão sobre os recursos naturais, exigindo o controle rigoroso de parâmetros de qualidade como coliformes e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (Costa et al., 2016). A produção de biogás em estações de tratamento é mencionada como uma estratégia inovadora para gerar energia sustentável e reduzir o impacto ambiental do tratamento de esgoto (Arcos-Vargas et al., 2019), alinhando-se à necessidade de redução de emissões no setor hídrico (Ananda, 2018).

Ainda, a descentralização dos serviços e o combate à corrupção são desafios no aprimoramento das governanças locais, essenciais para garantir a provisão equitativa e melhorar a transparência no setor (Asthana, 2008). Assim, essas variáveis interligadas evidenciam as complexidades da gestão hídrica, destacando a relevância de estratégias integradas que englobem tanto a melhoria da infraestrutura quanto a gestão sustentável da demanda e da qualidade da água.

A gestão hídrica, os artigos apresentam barreiras multifacetadas que comprometem a sustentabilidade e a eficiência no fornecimento e tratamento de água em áreas de crescente urbanização e variabilidade de recursos. O fraco desempenho de monopólios estatais e a ineficácia regulatória criam um cenário onde a qualidade do serviço permanece baixa, e as tarifas não refletem os custos reais, especialmente em economias inflacionárias (Kessides, 2005). Além disso, a complexidade de reunir dados padronizados para uma análise abrangente e as limitações em medir a eficiência no setor público dificultam a implementação de políticas bem informadas (Benito et al., 2010; Lokshin; Yemtsov, 2005). Essas dificuldades são intensificadas pela escassez de recursos hídricos e pela intermitência

do fornecimento, o que leva a desigualdades socioeconômicas e reforça a dependência de fontes alternativas, como caminhões-tanque, afetando de maneira desproporcional as populações de baixa renda (Klassert et al., 2015; Amit; Sasidharan, 2019).

Outro fator crucial é a degradação da qualidade da água devido à rápida urbanização e à infraestrutura inadequada para tratamento de águas residuais, resultando em poluição e intensificação das inundações (Costa et al., 2016). Em adição, o alto custo operacional, especialmente em áreas dependentes de fontes de energia de alta emissão de carbono, limita o alcance de metas de redução de emissões, criando desafios significativos para os sistemas de abastecimento e tratamento (Ananda, 2018). No nível local, a corrupção em agências de água e a falta de sistemas robustos de auditoria e monitoramento são barreiras adicionais que comprometem a transparência e a equidade no acesso à água potável (Asthana, 2008).

A estrutura tarifária em blocos, embora seja uma política promissora para promover a conservação, ainda apresenta desafios para sua implementação, devido à falta de dados empíricos que ajudem a definir blocos e tarifas que atendam tanto à necessidade de conservação quanto ao atendimento das demandas básicas da população (Chen; Yang, 2009). Essas barreiras interconectadas destacam a necessidade urgente de soluções integradas que abordem não apenas as limitações físicas e financeiras, mas também os desafios institucionais e de governança na gestão hídrica.

As estratégias propostas para a gestão hídrica focam na eficiência, inovação e adaptabilidade dos sistemas de fornecimento e tratamento, abordando simultaneamente os desafios operacionais e sociais. A reestruturação e privatização das operações de água emergem como soluções para incrementar a qualidade dos serviços e reduzir a ineficiência que monopoliza o setor público em diversas regiões (Kessides, 2005). Para medir e assegurar essa eficiência, métodos como a Análise de Envoltória de Dados (DEA) permitem comparações robustas entre sistemas geridos publicamente e privatizados, fornecendo uma visão abrangente sobre o impacto da governança no desempenho e na satisfação dos consumidores (Benito et al., 2010).

Em paralelo, a aplicação de modelos baseados em agentes para simular o comportamento de consumo de água, considerando ajustes tarifários e incentivos para armazenamento, se mostra eficaz em contextos de escassez, incentivando o uso racional e a gestão de demanda (Klassert et al., 2015). Esses modelos complexos, aliados a uma abordagem de Sistemas Adaptativos Complexos (CAS), ampliam as possibilidades de

políticas adaptativas, ajustando o uso de água e solo com base nas previsões de disponibilidade hídrica e pressão demográfica (Giacomoni et al., 2013).

A promoção de soluções energéticas sustentáveis, como a utilização de painéis solares e armazenamento de energia, é fundamental para enfrentar os altos custos e as emissões associadas ao tratamento de água, contribuindo para a autossuficiência energética dos sistemas de abastecimento (Arcos-Vargas et al., 2019, Ananda, 2018). A implementação de políticas tarifárias em blocos também é destacada como uma abordagem promissora para incentivar a conservação e equidade, equilibrando as necessidades de consumo básico com a demanda por sustentabilidade financeira (Chen; Yang, 2009).

Nos cenários urbanos, onde a poluição e o escoamento superficial são problemas críticos, o desenvolvimento de espaços verdes e infraestruturas de retenção têm se mostrado eficazes para reduzir a carga poluente, melhorar a infiltração de água e mitigar inundações (Costa et al., 2016). Essas estratégias integradas, que consideram desde aspectos tecnológicos até políticas tarifárias e governança, evidenciam um caminho sólido para uma gestão hídrica resiliente e sustentável, adaptável a diversas realidades ambientais e socioeconômicas.

3.1.3 Discussão da Revisão

A análise comparativa dos clusters identificados revela abordagens complementares, mas distintas, para a gestão hídrica em contextos de variabilidade climática, escassez e urbanização. O Cluster 1 foca principalmente na inovação tecnológica e na resiliência das infraestruturas, destacando a importância da integração de tecnologias avançadas, como machine learning e modelos de alocação adaptativa, para garantir a eficiência no uso da água e a recuperação de infraestruturas após eventos climáticos extremos (Brodeur et al., 2020; Hosseini; Barker, 2016). Em contrapartida, o Cluster 4 adota uma visão sistêmica, buscando uma gestão integrada e colaborativa que considere a interdependência entre fatores como disponibilidade hídrica, governança e alocação eficiente dos recursos (Mendoza et al., 2017; Cembrano et al., 2011).

Dessa forma, enquanto o Cluster 1 propõe respostas técnicas e operacionais para reforçar a resiliência e adaptar-se a cenários desafiadores, o Cluster 4 prioriza estruturas regulatórias e práticas colaborativas para assegurar um uso sustentável e equitativo da água em diferentes setores. Por outro lado, o Cluster 3 aprofunda-se nas dimensões sociopolíticas e culturais da gestão hídrica, explorando variáveis que envolvem a percepção de risco, a

aceitação pública de novas tecnologias e a confiança nas instituições responsáveis pelo fornecimento e tratamento da água (Dobbie; Brown, 2014; de Gois et al., 2015).

Em comparação aos Clusters 1 e 4, que se concentram em abordagens técnico-operacionais e regulatórias, respectivamente, o Cluster 3 enfatiza a governança participativa e a necessidade de estratégias que considerem os valores sociais e identitários das comunidades locais, essenciais para a adoção de práticas hídricas descentralizadas e sustentáveis. Esta abordagem reflete uma perspectiva holística, onde as variáveis socioeconômicas e a adaptação cultural desempenham papéis cruciais na eficácia das políticas de gestão hídrica, complementando as propostas tecnológicas e regulatórias dos outros clusters.

Finalmente, o Cluster 0, 5 e 2 focam nos desafios e nas estratégias de governança em contextos de escassez e expansão urbana, evidenciando a importância de práticas de precificação, descentralização e adaptação da infraestrutura para lidar com as pressões crescentes sobre os recursos hídricos (Klassert et al., 2015; Giacomoni et al., 2013). Diferentemente dos demais clusters, que enfatizam inovação tecnológica (Cluster 1), governança regulatória (Cluster 4) e engajamento social (Cluster 3), este último grupo de clusters trata predominantemente das limitações práticas e operacionais da gestão hídrica, abordando temas como a eficiência tarifária e a correlação entre expansão urbana e degradação da qualidade da água. Essa comparação revela uma complementaridade entre os clusters, na qual a eficiência, inovação e governança se integram em um framework abrangente, capaz de responder às demandas complexas e interconectadas da gestão hídrica sustentável.

Com base nos clusters identificados por meio da análise de conteúdo de 80 documentos, foi sistematizada práticas com os principais estudos de caso de Gestão Hídrica, como pode ser visto na Figura 7.

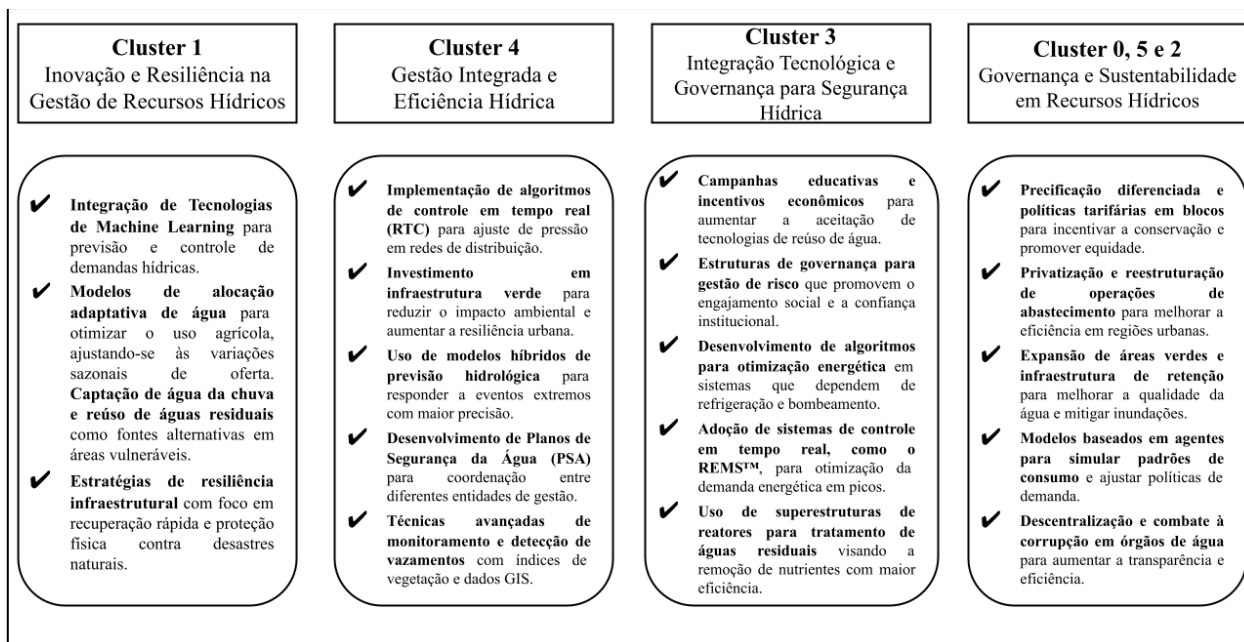


Figura 7: Estrutura das diretrizes práticas de gestão da água

A Figura 7 apresenta a sistematização das diretrizes de gestão hídrica resiliente, organizadas a partir dos clusters identificados na revisão sistemática da literatura, reunindo estratégias, práticas e abordagens aplicáveis ao contexto da gestão dos recursos hídricos.

De maneira geral, as práticas de gestão hídrica sustentável estão relacionadas à responsabilidade ambiental e social no uso dos recursos hídricos (Kan; Raapaport-Rom, 2012; Gaydon et al., 2012), à governança eficiente das infraestruturas e redes de abastecimento (Brodeur et al., 2020; Enqvist et al., 2016), e à adaptação das operações para reduzir impactos ambientais e atender às regulamentações de sustentabilidade (Guo et al., 2012; Hosseini; Barker, 2016). Essas práticas permitem que as organizações criem as condições necessárias para identificar oportunidades de inovação e desenvolver resiliência no uso dos recursos hídricos, integrando tecnologias avançadas e estratégias de governança robustas. O Quadro 1 apresenta uma lista de questões para futuras pesquisas e sugestões metodológicas para que pesquisadores avancem na temática de gestão hídrica sustentável com o foco em questões ambientais, sociais e governança (ESG).

Quadro 1: Agenda de pesquisa para o futuro do ESG

Cluster	Autores	Questão de pesquisa	Sugestão metodológica
1	Brodeur et al., 2020; Guo et al., 2019;	Quais são os efeitos de longo prazo do uso de redes de distribuição de salinidade controlada em diferentes culturas e tipos de solo na sustentabilidade agrícola?	Estudos longitudinais com experimentação em campo e análise comparativa de tipos de solo e culturas
	Hosseini e Barker, 2016; Kong et al., 2019;	Como cenários climáticos extremos e variações no uso do solo afetam o equilíbrio de oferta e demanda de água em bacias hidrográficas urbanizadas?	Simulação de cenários de uso da terra e mudanças climáticas, com modelagem hidrológica e análise de balanço hídrico
	Cao et al., 2015; Kong et al., 2019;	Como políticas de incentivos e avanços tecnológicos podem melhorar a eficácia e a aceitação social do sistema de captação de água da chuva como uma alternativa sustentável para o abastecimento urbano de água?	Entrevistas, surveys e modelagem de aceitação social com análise de políticas públicas e viabilidade econômica
4	Mendoza et al., 2017; Creaco; Franchini, 2013;	Como o uso de modelos de previsão híbridos pode ser aprimorado para melhor responder a eventos hidrológicos extremos em regiões não conectadas teleconectadas?	Modelos híbridos combinando aprendizado de máquina e análise de séries temporais hidrológicas
	Christodoulou et al., 2010; Creaco et al., 2020;	Como a implementação de sensores de fluxo adicionais poderia aprimorar o controle de pressão em tempo real e a eficiência de redes de distribuição de água em áreas com demandas variáveis?	Estudos experimentais com redes de sensores e análise em tempo real com tecnologia IoT
	Creaco et al., 2020; Gunnarsdottir et al., 2015;	Como a integração de sistemas neurofuzzy e GIS pode melhorar a precisão e eficácia das estratégias de substituição proativa em redes de distribuição de água?	Aplicação de sistemas neurofuzzy e GIS em simulação de redes e estratégias de manutenção preditiva
3	Dobbie e Brown, 2014; de Gois et al., 2015;	Como a aceitação dos agricultores pela água dessalinizada pode ser aumentada em diferentes contextos regionais e culturais?	Estudos de percepção com surveys e análise qualitativa, considerando fatores socioeconômicos e culturais
	Aznar-Sánchez et al., 2017;	Como a variabilidade de contaminantes afeta a eficiência e o custo de redes de reutilização de água em parques industriais com tratamento centralizado e descentralizado?	Estudos de caso em parques industriais com análise de custo-benefício e simulação de variabilidade de contaminantes
	Bonvin et al., 2017; Vosloo et al., 2012;	Como a incorporação de tecnologias de dessalinização emergentes impactaria a eficiência de armazenamento de longo prazo e a sustentabilidade dos recursos hídricos em regiões áridas?	Modelagem e simulação de tecnologias de dessalinização com análise de sustentabilidade de longo prazo em contextos áridos

Cluster	Autores	Questão de pesquisa	Sugestão metodológica
0, 5 e 2	Arcos-Vargas et al., 2019; Ananda, 2018;	Como a regulação pode ser projetada para equilibrar a necessidade de flexibilidade em setores em rápida mudança com o compromisso de estabilidade para atrair investimentos privados?	Análise de políticas regulatórias e estudo de impacto com entrevistas com stakeholders e modelagem de cenários
	Asthana, 2008;	Como políticas de tarifa progressiva podem ser implementadas para equilibrar a sustentabilidade do consumo de água com a proteção das populações mais vulneráveis em cenários de escassez hídrica?	Estudo de viabilidade econômica e social com modelagem de tarifa progressiva e análise de acessibilidade
	Chen e Yang, 2009; Costa et al., 2016;	Como a estrutura de preços em blocos pode ser ajustada para maximizar a conservação de água enquanto minimiza o impacto financeiro para famílias de baixa renda?	Modelagem de políticas de preço em blocos e simulação de impacto econômico em diferentes faixas de renda

A lista de questões de pesquisa fornece uma estrutura para pesquisadores e partes interessadas ao identificar lacunas no conhecimento sobre práticas de gestão hídrica e direcionar a investigação para novas áreas de interesse. Ao estabelecer prioridades de pesquisa focadas em desafios emergentes, como escassez hídrica, adaptação climática e práticas de governança eficazes, essa agenda permite direcionar esforços e recursos de maneira estratégica. Além disso, essa agenda incentiva a colaboração entre pesquisadores, instituições e agentes governamentais, promovendo uma abordagem mais integrada e coordenada para lidar com a complexidade da gestão sustentável dos recursos hídricos. Isso contribui para o avanço acadêmico e a geração de conhecimento aplicável, além de fortalecer a capacidade dos gestores e tomadores de decisão em implementar práticas de gestão hídrica que sejam eficazes, resilientes e com impacto positivo duradouro.

Em síntese, a revisão sistemática da literatura permitiu mapear diferentes perspectivas da gestão hídrica, organizadas em clusters que abrangem desde a inovação tecnológica e a resiliência infraestrutural (Cluster 1), passando pela governança integrada e eficiência operacional (Cluster 4), até as dimensões sociais, culturais e institucionais que condicionam a aceitação e a eficácia das práticas (Cluster 3 e Clusters 0, 5 e 2). No contexto brasileiro, nota-se que os clusters relacionados à governança e à eficiência operacional assumem maior relevância, uma vez que refletem desafios estruturais do setor, como perdas na distribuição, limitações regulatórias e desigualdades no acesso aos serviços. Embora

haja avanços significativos em termos de estratégias e ferramentas, persistem lacunas relacionadas à integração entre inovação tecnológica, governança adaptativa e participação social.

Esses achados evidenciam a complexidade multifatorial da gestão hídrica e oferecem insumos essenciais para a proposição de diretrizes voltadas à gestão resiliente da água, as quais articulam as melhores práticas internacionais com as particularidades do contexto brasileiro. Nesse sentido, as diretrizes são estruturadas como uma síntese integradora, orientada à aplicação prática em operadoras nacionais, com foco no fortalecimento da governança, na otimização da infraestrutura existente e na incorporação gradual de soluções tecnológicas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo tem como objetivo desenvolver diretrizes para a gestão resiliente da água, com base em uma revisão sistemática da literatura, aplicáveis ao contexto das operadoras brasileiras de saneamento. Tal propósito surge de uma lacuna identificada na literatura quanto à limitada integração entre avanços técnico-operacionais e sua incorporação em políticas públicas, arranjos institucionais e práticas de governança capazes de sustentar a resiliência hídrica no longo prazo, especialmente em contextos marcados por desigualdades estruturais e vulnerabilidade climática, como o brasileiro.

A análise da literatura, permitiu identificar quatro clusters temáticos complementares: (i) inovação e resiliência na gestão de recursos hídricos; (ii) gestão integrada e eficiência hídrica; (iii) integração tecnológica e governança para segurança hídrica; e (iv) governança e sustentabilidade em recursos hídricos. Eles evidenciam que a gestão hídrica eficaz depende da articulação entre soluções técnico-operacionais e mecanismos institucionais, regulatórios e sociais que garantam sua implementação e continuidade.

A partir desses achados, foram propostas diretrizes estruturadas com foco na aplicabilidade prática, destacando-se: (i) fortalecimento da governança e da coordenação interinstitucional; (ii) priorização da eficiência operacional, especialmente na redução de perdas e otimização da infraestrutura existente; (iii) incorporação gradual de tecnologias de monitoramento, controle e previsão; e (iv) promoção de estratégias adaptativas frente às mudanças climáticas. Essas diretrizes podem ser aplicadas por operadoras brasileiras por meio da revisão de práticas operacionais, integração de sistemas de monitoramento, adoção de instrumentos regulatórios mais eficientes e fortalecimento da capacidade institucional.

O estudo contribui ao sistematizar e integrar diferentes abordagens da literatura em uma perspectiva multidimensional da gestão hídrica, evidenciando a interdependência entre tecnologia, governança e sustentabilidade. Além disso, a pesquisa contribui para reduzir a fragmentação teórica do campo e oferece uma base estruturada para o desenvolvimento de estudos futuros. No entanto, o estudo apresenta limitações, como o uso exclusivo de dados secundários provenientes da literatura científica, o que restringe a validação empírica das diretrizes propostas. Nesse contexto, recomenda-se que pesquisas futuras avancem na validação empírica das diretrizes por meio de estudos de caso, análises documentais e entrevistas com gestores do setor. Adicionalmente, sugere-se a aplicação dessas diretrizes em contextos reais de operadoras, com o objetivo de avaliar sua efetividade, adaptabilidade e impacto na melhoria da resiliência hídrica.

REFERÊNCIAS

ABDELZAHER, M. A. et al. Environmental policy to develop a conceptual design for the water–energy–food Nexus: A case study in Wadi-Dara on the Red Sea Coast, Egypt. **Water**, v.15,n. 4, p. 780, 2023.

ABERS, R. N.; KECK, M. E. **Practical Authority: Agency and Institutional Change in Brazilian Water Politics**. Oxford: Oxford University Press, 2017.

ACOSTA, P. **Desafios para a universalização do acesso à água e saneamento no Brasil**. Brasil da ONU, 30 maio 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/185089-artigo-desafios-para-universalizacao-do-acesso-agua-e-saneamento>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ADDOW, M. A.; JIMALE, A. D. Integrating IoT and Water Quality: A Bibliometric Analysis. SSRG International **Journal of Electronics and Communication Engineering**, v. 11, n. 10, p. 149–160, 2024.

AGAPIOU, A. et al. Water leakage detection using remote sensing, field spectroscopy and GIS in semiarid areas of Cyprus. **Urban Water Journal**, v. 13, n.3, p. 221-231, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2020**. Brasília: ANA, 2020. 118 p., il. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura-2020>. Acesso em: 26 ago. 2025.

AHMED, S. F. et al. Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. **Journal of hazardous materials**, v. 416, p. 125912, 2021.

AL-HAZMI, H. E. et al. Wastewater treatment for reuse in agriculture: Prospects and challenges. **Environmental Research**, v. 236. p. 116711, 2023.

AMIT, R. K.; SASIDHARAN, S. Measuring affordability of access to clean water: A coping cost approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 410-417, 2019.

AMPOLINI, G.; WINCKLER, S.; RENK, A. Gestão de recursos hídricos no Brasil: desafios e oportunidades na implementação da Agenda 2030 da ONU. **Desenvolvimento em Questão**, v. 22, n. 60, e15995, 2024.

ANANDA, J. Productivity implications of the water-energy-emissions nexus: An empirical analysis of the drinking water and wastewater sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 1097–1105, 2018.

ANCHETA, M. A. et al. Resilience assessment of urban water supply and sanitation systems: a critical review. **AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, v. 74, n. 5, p. 389–404, 2025.

ARCOS-VARGAS, A.; GOMEZ-EXPOSITO, A.; GUTIERREZ-GARCIA, F. Self-sufficient renewable energy supply in urban areas: Application to the city of Seville. **Sustainable Cities and Society**, v. 46, p. 101450, 2019.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of Informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

ARNOLD, R. T.; TROOST, C.; BERGER, T. Quantifying the economic importance of irrigation water reuse in a Chilean watershed using an integrated agent-based model. *Water Resources Research*, v. 51, n. 1, p. 648–668, 2015.

ASTHANA, A. N. Decentralisation and corruption: evidence from drinking water sector. **Public Administration and Development: The International Journal of Management Research and Practice**, v. 28, n. 3, p. 181–189, 2008.

ASUBIARO, T.; ONAOLAPO, S.; MILLS, D. Regional disparities in Web of Science and Scopus journal coverage. **Scientometrics**, v. 129, n. 3, p. 1469–1491, 2024.

AVIRAM, R.; KATZ, D.; SHMUELI, D. Desalination as a game-changer in transboundary hydro-politics. **Water Policy**, v. 16, n. 4, p. 609–624, 2014.

AZNAR-SÁNCHEZ, J. A.; BELMONTE-UREÑA, L. J.; VALERA, D. L. Perceptions and acceptance of desalinated seawater for irrigation: A case study in the Níjar district (Southeast Spain). **Water**, v. 9, n. 6, art. 408, 2017.

BEL, G.; FAGEDA, X.; WARNER, M. E. Is private production of public services cheaper than public production? A meta-regression analysis of solid waste and water services. **Journal of Policy Analysis and Management**, v. 29, n. 3, p. 553–577, 2010.

BENITO, B.; BASTIDA, F.; GARCÍA, J. A. Explaining differences in efficiency: an application to Spanish municipalities. **Applied Economics**, v. 42, n. 4, p. 515–528, 2010.

BERARDI, L.; GIUSTOLISI, O.; KAPELAN, Z. et al. Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR. **Journal of Hydroinformatics**, v. 10, n. 2, p. 113–126, 2008.

BI, W.; DANDY, G. C. Optimization of water distribution systems using online retrained metamodels. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 140, n. 11, p. 04014032, 2014.

BLINCO, L. J.; SIMPSON, A. R.; LAMBERT, M. F. et al. Comparison of pumping regimes for water distribution systems to minimize cost and greenhouse gases. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 142, n. 6, p. 04016010, 2016.

BONVIN, G.; DEMASSEY, S.; LE PAPE, C. et al. A convex mathematical program for pump scheduling in a class of branched water networks. **Applied Energy**, v. 185, p. 1702–1711, 2017.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o Marco Legal do Saneamento Básico. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 16 jul. 2020.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRODEUR, Z. P.; HERMAN, J. D.; STEINSCHNEIDER, S. Bootstrap aggregation and cross-validation methods to reduce overfitting in reservoir control policy search. **Water Resources Research**, v. 56, n. 8, e2020WR027184, 2020.

CAMPISANO, A.; CREACO, E.; MODICA, C. RTC of valves for leakage reduction in water supply networks. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 1, p. 138–141, 2010.

CAO, V. et al. Aggregated indicator to assess land use impacts in life cycle assessment (LCA) based on the economic value of ecosystem services. **Journal of Cleaner Production**, v. 94, p. 56–66, 2015.

CEMBRANO, G. et al. PLIO: a generic tool for real-time operational predictive optimal control of water networks. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 2, p. 448–459, 2011.

CHEN, C. F.; FENG, K. L.; MA, H. W. Uncover the interdependent environmental impacts associated with the water-energy-food nexus under resource management strategies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, p. 104909, 2020.

CHEN, H.; YANG, Z. F. Residential water demand model under block rate pricing: a case study of Beijing, China. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 14, n. 5, p. 2462–2468, 2009.

CHRISTODOULOU, S.; et al. Proactive risk-based integrity assessment of water distribution networks. **Water Resources Management**, v. 24, p. 3715–3730, 2010.

CHU, J.; WANG, C.; CHEN, J. et al. Agent-based residential water use behavior simulation and policy implications: a case-study in Beijing City. **Water Resources Management**, v. 23, p. 3267–3295, 2009.

CORREIA DE ARAUJO, W.; OLIVEIRA ESQUERRE, K. P.; SAHIN, O. Building a system dynamics model to support water management: a case study of the semiarid region in the Brazilian Northeast. **Water**, v. 11, n. 12, art. 2513, 2019.

COSTA, D.; BURLANDO, P.; PRIADI, C. The importance of integrated solutions to flooding and water quality problems in the tropical megacity of Jakarta. **Sustainable Cities and Society**, v. 20, p. 199–209, 2016.

CREACO, E. et al. A bi-objective approach for optimizing the installation of PATs in systems of transmission mains. **Water**, v. 12, n. 2, art. 330, 2020.

CREACO, E.; FRANCHINI, M. A new algorithm for real-time pressure control in water distribution networks. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 13, n. 4, p. 875–882, 2013.

CRIONI, P. L. B. **Aplicação do sensoriamento remoto com imagens do satélite Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil**. 2024. 147 f. Dissertação (Mestre Geociências e Ciências Exatas), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2024.

CROZIER, A.; LENZE, B. J.; WEIJS, S. V. Resilience framework for urban water supply systems planning. **Sustainable and Resilient Infrastructure**, v. 9, n. 4, p. 386–406, 2024.

DE GOIS, E. H.; RIOS, C. A.; COSTANZI, R. N. Evaluation of water conservation and reuse: a case study of a shopping mall in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 263–271, 2015.

DENYER, D.; TRANFIELD, D. Producing a systematic review. In: BUCHANAN, D. A.; BRYMAN, A. (ed.). **The SAGE Handbook of Organizational Research Methods**. London: SAGE, 2009. p. 671–689.

DOBBIE, M. F.; BROWN, R. R. A framework for understanding risk perception, explored from the perspective of the water practitioner. **Risk Analysis**, v. 34, n. 2, p. 294–308, 2014.

ENQVIST, J.; TENGÖ, M.; BOONSTRA, W. J. Against the current: rewiring rigidity trap dynamics in urban water governance through civic engagement. **Sustainability Science**, v. 11, p. 919–933, 2016.

FOUDI, S. et al. The climatic dependencies of urban ecosystem services from green roofs: Threshold effects and non-linearity. **Ecosystem Services**, v. 24, p. 223–233, 2017.

FRIEDMAN, M. B. et al. Broadening resilience: An evaluation of policy and planning for drinking water resilience in 100 US cities. **Global Environmental Change**, v. 84, art. 102798, 2024.

FUENTES-CORTÉS, L. F.; FLORES-TLACUAHUAC, A. Integration of distributed generation technologies on sustainable buildings. **Applied Energy**, v. 224, p. 582–601, 2018.

GALVIS, A.; ZAMBRANO, D. A.; VAN DER STEEN, N. P.; GIJZEN, H. J. Evaluation of pollution prevention options in the municipal water cycle. *Journal of Cleaner Production*, v. 66, p. 599–609, 2014.

GAO, X.; YANG, Z.; ZHANG, W.; PAN, B. Carbon redirection via tunable Fenton-like reactions under nanoconfinement toward sustainable water treatment. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, art. 2808, 2024.

GAYDON, D. S.; MEINKE, H.; RODRIGUEZ, D. The best farm-level irrigation strategy changes seasonally with fluctuating water availability. **Agricultural Water Management**, v. 103, p. 33–42, 2012.

GIACOMONI, M. H.; KANTA, L.; ZECHMAN, E. M. Complex adaptive systems approach to simulate the sustainability of water resources and urbanization. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 139, n. 5, p. 554–564, 2013.

GOMES, R.; MARQUES, A. S.; SOUSA, J. District metered areas design under different decision makers' options: cost analysis. **Water Resources Management**, v. 27, p. 4527–4543, 2013.

GOUGH, D.; THOMAS, J.; OLIVER, S. Clarifying differences between review designs and methods. **Systematic Reviews**, v. 1, p. 1–9, 2012.

GUNNARSDOTTIR, M. J.; GARDARSSON, S. M.; BARTRAM, J. Developing a national framework for safe drinking water—Case study from Iceland. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 218, n. 2, p. 196–202, 2015.

GUO, X. et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project. **Journal of Hydrology**, v. 424, p. 252–263, 2012.

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

HELLER, L.; CASTRO, J. E. **Políticas públicas de saneamento: um estudo de caso sobre o Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 12, n. 3, p. 284–295, 2007.

HOSSEINI, S.; BARKER, K. Modeling infrastructure resilience using Bayesian networks: A case study of inland waterway ports. **Computers & Industrial Engineering**, v. 93, p. 252–266, 2016.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Geneva: IPCC, 2021. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>. Acesso em: 29 ago. 2025.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER AND THE ENVIRONMENT (ICWE). **The Dublin Statement on Water and Sustainable Development**. Dublin: ICWE, 1992. Disponível em: <https://www.ielrc.org/content/e9209.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2025.

KAN, I.; RAPAPORT-ROM, M. Regional blending of fresh and saline irrigation water: Is it efficient? **Water Resources Research**, v. 48, n. 7, 2012.

KESSIDES, I. N. Infrastructure privatization and regulation: Promises and perils. **The World Bank Research Observer**, v. 20, n. 1, p. 81–108, 2005.

KITCHENHAM, B. **Procedures for performing systematic reviews**. Keele: Keele University, 2004. (Relatório técnico).

KLASSERT, C. et al. Modeling residential water consumption in Amman: The role of intermittency, storage, and pricing for piped and tanker water. **Water**, v. 7, n. 7, p. 3643–3670, 2015.

KONCAGÜL, E.; TRAN, M.; CONNOR, R. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2021: O valor da água: fatos e dados**. Paris: UNESCO, 2021

KONG, J.; SIMONOVIC, S. P.; ZHANG, C. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: a case study based on different response strategies. **Sustainability**, v. 11, n. 23, art. 6552, 2019.

KUAKOSKI, H. S. et al. Marketing, entrepreneurship, and innovation in port management: trends, barriers, and research agenda. **Maritime Policy & Management**, v. 51, p. 1–18, 2023.

KUMAR, B. The impact of international remittances on education and health in Bangladesh. **International Journal of Science and Qualitative Analysis**, v. 5, n. 1, p. 6–14, 2019.

LEE, E. J.; SCHWAB, K. J. Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. **Journal of Water and Health**, v. 3, n. 2, p. 109–127, 2005.

LEE, K. E. et al. Rainwater harvesting as an alternative water resource in Malaysia: potential, policies and development. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 218–222, 2016.

LI, K. et al. Two-archive evolutionary algorithm for constrained multiobjective optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 23, n. 2, p. 303–315, 2018.

LOKSHIN, M.; YEMTSOV, R. Has rural infrastructure rehabilitation in Georgia helped the poor? **The World Bank Economic Review**, v. 19, n. 2, p. 311–333, 2005.

LUUKKONEN, T.; PEHKONEN, S. O. Peracids in water treatment: A critical review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 1, p. 1–39, 2017.

MENDOZA, P. A. et al. An intercomparison of approaches for improving operational seasonal streamflow forecasts. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 7, p. 3915–3935, 2017.

MOHER, D. et al. PRISMA GROUP. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Annals of Internal Medicine**, v. 151, n. 4, p. 264–269, 2009.

- MOLLE, F.; MOLLINGA, P.; WESTER, P. Hydraulic bureaucracies and the hydraulic mission: Flows of water, flows of power. **Water Alternatives**, v. 2, n. 3, p. 328–349, 2009.
- MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, v. 106, p. 213–228, 2016.
- MONTELEONE, S.; DE MORAES, E. A.; MAIA, R. F. Analysis of the variables that affect the intention to adopt Precision Agriculture for smart water management in Agriculture 4.0 context. In: **GLOBAL IOT SUMMIT (GloTS)**, 2019, [s.l.]. *Proceedings....* [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- NDÉ-TCHOUPÉ, A. I. et al. Technologies for decentralized fluoride removal: Testing metallic iron-based filters. **Water**, v. 7, n. 12, p. 6750–6774, 2015.
- NODEHI, M.; BAGHAYERI, M.; KAFFASH, A. Application of BiNPs/MWCNTs-PDA/GC sensor to measurement of Tl(I) and Pb(II) using stripping voltammetry. **Chemosphere**, v. 301, art. 134701, 2022.
- ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE (OPAS). **Quase 2 bilhões de pessoas dependem de unidades de saúde sem serviços básicos de água, revela novo relatório da OMS e UNICEF**. 2020. Disponível em: <https://www.paho.org/pt/noticias/14-12-2020-quase-2-bilhoes-pessoas-dependem-unidades-saude-sem-servicos-basicos-agua>. Acesso em: 29 ago. 2025.
- ORLOVE, B.; CATON, S. C. Water sustainability: Anthropological approaches and prospects. **Annual Review of Anthropology**, v. 39, n. 1, p. 401–415, 2010.
- PIAO, S. et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. **Nature**, v. 467, n. 7311, p. 43–51, 2010.
- PRICE, J. I.; HEBERLING, M. T. The effects of source water quality on drinking water treatment costs: a review and synthesis of empirical literature. **Ecological Economics**, v. 151, p. 195–209, 2018.
- REBOLLEDO-LEIVA, R. et al. Embedding Water-Energy-Food nexus and circularity assessment for organization benchmarking: A case study for dairy farms. **Waste Management**, v. 189, p. 410–420, 2024.
- RIGOPOULOS, S.; LINKE, P. Systematic development of optimal activated sludge process designs. **Computers & Chemical Engineering**, v. 26, n. 4–5, p. 585–597, 2002.
- RODRÍGUEZ-SOLER, R.; URIBE-TORIL, J.; VALENCIANO, J. D. P. Worldwide trends in the scientific production on rural depopulation, a bibliometric analysis using bibliometrix R-tool. **Land Use Policy**, v. 97, art. 104787, 2020.
- SAHU, O. P.; CHAUDHARI, P. K. Review on chemical treatment of industrial waste water. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 17, n. 2, p. 241–257, 2013.

SHAHRI, N. H. N.; ALI, Z. M. Bibliometric perspectives in mapping the progress of river water quality index studies. **Water Quality Research Journal**, v. 59, n. 4, p. 232–267, 2024.

SHAMMAS, N. K.; WANG, L. K. **Water engineering: hydraulics, distribution and treatment**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico temático – serviços de água e esgoto: visão geral 2022**. Brasília: Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, dez. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2023.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

SOOSAY, C. A.; HYLAND, P. A decade of supply chain collaboration and directions for future research. **Supply Chain Management: An International Journal**, v. 20, n. 6, p. 613–630, 2015.

SRIVASTAV, A. L. et al. Climate-resilient strategies for sustainable management of water resources and agriculture. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 31, p. 41576–41595, 2021.

STEVANOVIĆ, Z. Karst waters in potable water supply: a global scale overview. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 23, art. 662, 2019.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

TRATA BRASIL. **Estudo de perdas de água do Instituto Trata Brasil: SNIS (2021) – desafios para disponibilidade hídrica e avanço da eficiência do saneamento básico no Brasil**. São Paulo, 25 maio 2023. Disponível em: https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Estudo-de-Perdas-de-Agua_2023.pdf. Acesso em: 26 ago. 2025.

TRATA BRASIL. **Perdas de água crescem nas 100 maiores cidades do país, aponta Ranking do Saneamento 2025**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/perdas-de-agua-crescem-100-maiores-cidades-pais/>. Acesso em: 29 ago. 2025.

UNESCO INSTITUTE FOR STATISTICS (UIS). **February 2025 UIS Data Release: Explore the latest progress on SDG 9.5 Research and Development through key indicators**. Montreal: UIS, 7 mar. 2025. Disponível em: <https://uis.unesco.org/en/news/Explore-latest-progress-on-SDG9.5-Research-Development-through-key-indicators-February2025>. Acesso em: 26 ago. 2025.

UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION (UNESCO). **The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind**. Paris: UNESCO, 2019.

UN-WATER. **Water and Climate Change**. 2023. Disponível em: <https://www.unwater.org/water-facts/water-and-climate-change>. Acesso em: 29 ago. 2025.

UN-WATER. **Water Security and the Global Water Agenda**. Hamilton, Canadá: UNU-INWEH, 2013. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda>. Acesso em: 26 ago. 2025.

VENKATESH, V.; BROWN, S. A.; BALA, H. Bridging the qualitative-quantitative divide: Guidelines for conducting mixed methods research in information systems. **MIS Quarterly**, p. 21–54, 2013.

VOSLOO, J.; LIEBENBERG, L.; VELLEMAN, D. Case study: Energy savings for a deep-mine water reticulation system. **Applied Energy**, v. 92, p. 328–335, 2012.

WORLD BANK. **Ebb and Flow: Water, Migration, and Development**. Washington, DC: World Bank, 2021. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/ebb-and-flow-water-migration-and-development>. Acesso em: 26 ago. 2025.

WORLD BANK. **Global Water Security & Sanitation Partnership – Annual Report 2020**. Washington, DC: World Bank, 2020. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/969081605133747136/pdf/Global-Water-Security-and-Sanitation-Partnership-Annual-Report-2020.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

WRI BRASIL. **Ranking mostra onde há maior risco de faltar água no Brasil e no mundo**. WRI Brasil, 6 ago. 2019. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/ranking-mostra-onde-ha-maior-risco-de-faltar-agua-no-brasil-e-no-mundo>. Acesso em: 29 ago. 2025.

YADAV, K. K. et al. A review of emerging adsorbents and current demand for defluoridation of water: Bright future in water sustainability. **Environment International**, v. 111, p. 80–108, 2018.

ANEXO I

Publicação científica

Recentemente, foi publicado um artigo que discute os desafios da gestão dos recursos hídricos diante do crescimento populacional, da urbanização e das mudanças climáticas. O estudo analisa aspectos relacionados à governança, à resiliência da infraestrutura, à adaptação climática e ao uso de tecnologias voltadas à eficiência no uso da água, além de propor um modelo de gestão que integra inovação tecnológica e políticas públicas, contribuindo para estratégias mais sustentáveis de gestão hídrica. O artigo intitulado "Review of Water Supply, Treatment and Distribution: Overcoming Challenges for Sustainable Management", de autoria André Linneo Tocchetto, Heloisa Serafim Kuakoski, Fernando Henrique Lermen, Sandro Deretti, Murillo Vetroni Barros, Gustavo de Souza Matias, publicado em 18 December 2025, na revista Water and Environment Journal, disponível em <https://doi.org/10.1111/wej.70038> contribuindo para o debate científico sobre práticas e modelos de gestão sustentável da água.