

Perdas hídricas em sistemas de distribuição de água: uma breve análise bibliométrica

Water losses in water distribution systems: a brief bibliometric analysis

Lucas Antônio Gomes do Carmo¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5797-3573>; Walef Pena Guedes², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0541-593X>; Denise Helena Lombardo Ferreira^{3*}, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3138-2406>; Cibele Roberta Sugahara⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3481-8914>.

1. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, PUC-Campinas, Escola Politécnica, Campinas, São Paulo, Brasil. E-mail: lucas.agcarmo@gmail.com

2. Universidade Estadual de Campinas, Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais, Campinas, São Paulo, Brasil. E-mail: w257375@dac.unicamp.br

3. Pontifícia Universidade Católica de Campinas – PUC-Campinas, Escola de Economia e Negócios, Escola Politécnica, Campinas, SP, Brasil. E-mail: lombardo@puc-campinas.edu.br

4. Pontifícia Universidade Católica de Campinas, PUC-Campinas, Escola de Economia e Negócios, Campinas, São Paulo, Brasil. E-mail: cibelesu@puc-campinas.edu.br

*Autor correspondente: lombardo@puc-campinas.edu.br; Campinas, Brasil.

Resumo

A aplicação da análise bibliométrica permite visualizar tendências em uma determinada área de estudo. Nesse sentido, a pesquisa visa analisar a evolução do conhecimento científico acerca da temática das perdas em sistemas de distribuição de água a partir da análise bibliométrica. A busca foi realizada na base Scopus no período de 1978 a 11 de março de 2024, totalizando 158 artigos. Os principais resultados indicam que os anos de 2022 e 2023 se destacaram em termos de quantidade de publicações. Dentre os resultados, China e Estados Unidos lideraram em número de publicações, com 66 e 55, respectivamente. Mais de 70 termos foram identificados com cinco ou mais ocorrências, com "water distribution systems", "water distribution networks", "leak detection" e "water supply" destacando-se como os termos mais estudados. Esses temas emergiram como os principais focos de interesse na amostra, caracterizando-se como os *Motor Themes*. Embora as soluções tecnológicas sejam amplamente estudadas, há pouca análise sobre sua viabilidade e implementação em contextos com infraestrutura precária ou recursos limitados.

Palavras-chave: abastecimento de água, vazamento, modelos, gestão de perdas, sistema de distribuição de água.

Abstract

The application of bibliometric analysis makes it possible to visualize trends in a given area of study. In this sense, the research aims to analyze the evolution of scientific knowledge on the topic of losses in water distribution systems based on bibliometric analysis. The search was carried out on the Scopus database from 1978 to March 11, 2024, totaling 158 articles. The main results indicate that the years 2022 and 2023 stood out in terms of the number of publications. Among the results, China and the United States led the way in terms of several publications, with 66 and 55, respectively. More than 70 terms were identified with five or more occurrences, with "water distribution systems", "water distribution networks", "leak detection" and "water supply" standing out as the most studied terms. These themes emerged as the main focuses of interest in the sample, characterizing them as *Motor Themes*. Although technological solutions are widely studied, there is little analysis of their feasibility and implementation in contexts with poor infrastructure or limited resources.

Keywords: water supply, leakage, models, loss management, water distribution system.

Referência: Carmo, L. A. G., Guedes, W. P., Ferreira, D. H. L., & Sugahara, C. R. (2026). Perdas hídricas em sistemas de distribuição de água: Uma breve análise bibliométrica. *Gestão & Regionalidade*, v. 42, e20269658. DOI <https://doi.org/10.13037/gr.vol42.e20269658>



1 Introdução

Os recursos hídricos têm enfrentado alterações significativas em sua composição e disponibilidade, atribuíveis predominantemente às atividades antrópicas, especialmente desde o advento da Primeira Revolução Industrial. Fatores como a industrialização acelerada, o aumento exponencial da população, a urbanização em larga escala, mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais, escassez de água e poluição ambiental (solo, água e ar) são elementos primordiais que impulsionam a consciência global acerca das questões ambientais (Hawken, Lovins & Lovins, 2007; Amaral et al., 2023).

Conforme Farouk, Rahman e Romali (2023), a maior parte do planeta é constituída de água, porém menos de 10% é de água doce. Diante desse panorama, torna-se imperativo reconhecer a água como um recurso natural limitado, vital para a existência e desenvolvimento humano (Tundisi, 2008, Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2020). Além dos elementos de pressão supracitados, é indispensável também abordar as questões relacionadas às perdas nos sistemas de distribuição de água, destacando a necessidade de uma gestão sustentável e eficaz desse recurso essencial (Kusterko *et al.*, 2018).

As perdas na distribuição de água são categorizadas pela discrepância entre a quantidade de água produzida e aquela efetivamente medida nos pontos de consumo. Para Farouk, Rahman e Romali (2023) a quantidade de água que é produzida e perdida antes de chegar ao consumidor final afeta sobremaneira a sustentabilidade da água. Essa diferença pode surgir em qualquer etapa desde a origem até a entrega ao consumidor final. Tais perdas dividem-se em dois grupos distintos: as perdas físicas, que ocorrem devido a vazamentos, e as perdas não físicas, que são resultado de falhas administrativas, irregularidades comerciais, furtos de água e imprecisões nas medições (Kusterko *et al.*, 2018).

O Relatório do Banco Mundial aponta que as perdas de água em escala global são significativas, com mais de 32 bilhões de m³ de água tratada perdidos devido a vazamentos nas redes de distribuição. Além disso, um adicional de 16 bilhões de m³ de água entregues à população não são faturados em razão de problemas de medição e furto. Uma estimativa do custo total dessas perdas na distribuição de água para as empresas de saneamento gira em torno de 14 bilhões de dólares por ano (Kingdom, Liemberger & Marin, 2006).

Adicionalmente aos efeitos das mudanças climáticas e à escassez dos recursos hídricos, o gerenciamento desses recursos tem sido prejudicado, muitas vezes devido aos elevados níveis de perda de água não faturada que ocorrem nas companhias de abastecimento de água (Liemberger & Wyatt, 2018).

O desafio já enfrentado na distribuição e conservação dos recursos hídricos se intensifica devido à falta de saneamento adequado, sendo que as perdas na distribuição de água são uns dos principais desafios. As perdas indicam um elemento crítico do saneamento, levando em conta a disponibilidade de água para consumo humano e a eficiência dos sistemas de abastecimento (Guedes *et al.*, 2023).

Em todo o mundo, observa-se uma significativa ineficiência na distribuição de água, com estimativas de especialistas apontando que entre 30% e 40% da água se perde na rede de distribuição. Essas perdas, atribuídas à infraestrutura obsoleta, vazamentos e uma variedade de outras causas, tendem a diferir conforme a região e o país (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2020).

O indicador que baliza, para efeitos de comparação da perda hídrica, é o Índice de Perdas no Faturamento Total (IPFT). No ano de 2021, o Brasil obteve 40,9% para IPFT, enquanto países como "Camarões (40,0%), Tanzânia (37,0%), Etiópia (29%), China (21%), Estados Unidos (14%), obtiveram valores menores comparados ao Brasil" (ITB, 2023, p. 4). Esses



dados destacam a urgência em diminuir as perdas nos sistemas de abastecimento de água no Brasil, especialmente levando em conta que é o país apresenta índices superiores aos de alguns países africanos. No entanto, é importante ressaltar que, em muitos desses países africanos, a cobertura da rede de abastecimento é menor, o que pode contribuir para níveis mais baixos de perda hídrica.

A redução de perdas nos sistemas de abastecimento de água é vista como uma estratégia fundamental no processo decisório das companhias, especialmente no cenário competitivo atual. Os investimentos no controle e diminuição dessas perdas apresentam vantagens em várias áreas, tais como: econômica, tecnológica, sociocultural e ambiental (Kusterko *et al.*, 2018).

Um estudo realizado por Santi, Cetrullo e Malheiros (2021) destaca 54 práticas direcionadas ao controle de perdas em 42 empresas de abastecimento de água dos municípios inseridos nas Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e mostra uma relação direta entre o desempenho das empresas e o número de práticas de perda de água adotadas, sendo que as divergências no número de práticas adotadas podem ser influenciadas por fatores técnicos-operacionais, de planejamento e fatores de gestão.

Ao buscar a compreensão sobre a temática em estudo, pode-se recorrer à investigação da produção científica pertinente, pois possibilita explicar as tendências e os domínios do conhecimento. Uma ferramenta para observar os focos e movimentos, quanto à produção científica de determinado assunto, ocorre com a análise bibliométrica que possui aspectos quantitativos e qualitativos. A análise bibliométrica é uma técnica importante para avaliar a extensão e a natureza do conhecimento gerado, independentemente de ser científico (Marques, Maculam & Souza, 2023). Essa análise permite o acompanhamento detalhado de uma área científica ao demarcar campos de pesquisa e sua evolução e mapear a estrutura cognitiva da área (Andrade & Queiroz, 2023)

Portanto, o objetivo principal desta pesquisa foi quantificar os trabalhos que estão sendo produzidos sobre a temática de perdas em sistemas de distribuição de água e analisar quais métodos estão sendo utilizados para mitigar essas perdas.

2 Procedimentos metodológicos

A presente pesquisa visa identificar o estado da arte sobre perdas em sistemas de distribuição de água no âmbito (inter)nacional. Nesse sentido, o presente estudo caracteriza-se como aplicado, descritivo e qualiquantitativo. Sua natureza aplicada reflete-se na busca por soluções práticas para problemas reais relacionados às perdas em sistemas de distribuição de água, visando contribuir efetivamente para a gestão e conservação desses recursos. Quanto à sua abordagem descritiva, para Gil (2019), o objetivo primordial é a descrição de características de determinado fenômeno ou população, ou estabelecer relações entre variáveis.

A base Scopus (Elsevier), foi escolhida devido ao seu reconhecimento internacional (Singh *et al.*, 2021). Inicialmente, foi realizada uma busca exploratória para identificar as palavras-chave mais adequadas. Em seguida, conduziu-se a busca principal utilizando os operadores booleanos "AND" e "AND NOT", da seguinte forma: "water management" (gestão de água) AND "water supply" (abastecimento de água) AND "loss" (perda) AND NOT "irrigation" (irrigação) a partir de artigos científicos no período de 1970 a 11/03/2024, resultando em 914 artigos. A busca foi realizada somente com documentos da língua inglesa e dentre a gama de documentos obtidos, foram selecionados apenas artigos científicos.

No entanto, verificou-se a necessidade de refinar a busca no sentido de alinhar com o objetivo desse estudo, isto é, perdas em sistemas de distribuição de água. Uma segunda busca foi conduzida utilizando a mesma base de dados no dia 11/03/2024 utilizando-se as seguintes

palavras-chave com os operadores booleanos: "water distribution systems" (sistemas de distribuição de água) AND "loss" (perda) AND "leak" (vazar) AND NOT "irrigation" (irrigação) AND NOT "agriculture" (agricultura). O operador "AND NOT" foi utilizado com a finalidade de excluir os documentos que contenham as palavras-chave irrigação e agricultura, pois as perdas de água na irrigação e na agricultura não serão consideradas nesta pesquisa. A partir desses descritores obteve-se 158 artigos. É importante salientar que não houve uma delimitação temporal na pesquisa dos artigos, possibilitando a inclusão de toda a produção científica indexada na base Scopus relacionada ao assunto.

Ao utilizar as palavras-chave e programas computacionais, torna-se possível quantificar e qualificar as produções acadêmicas sobre o assunto pesquisado e destacar as principais contribuições para a ciência e suas interconexões. As palavras-chave representam um dos focos da análise bibliométrica contemporânea (Urbizagástegui-Alvarado, 2022). Assim, é possível perceber os avanços da ciência e apontar periódicos, autores, regiões e instituições de ensino mais influentes sobre determinado assunto (Kaffash & Nguyen; Zhu, 2021).

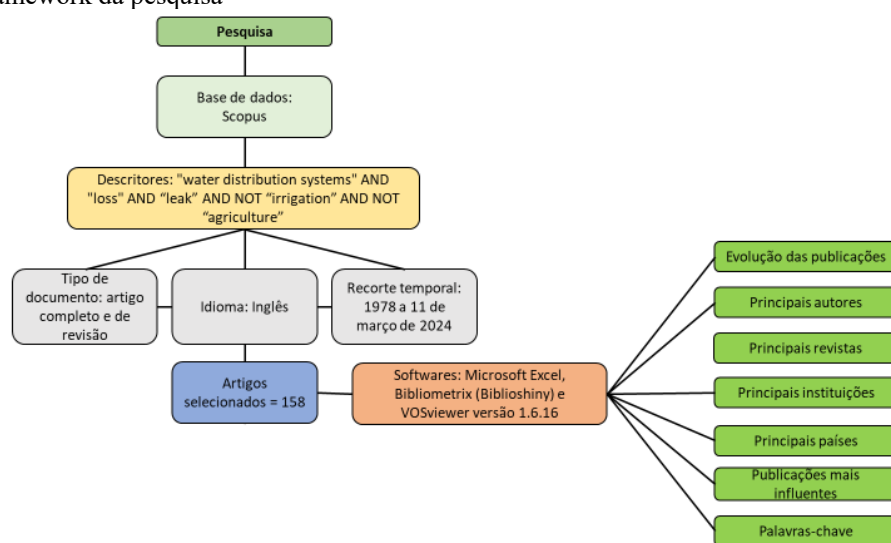
Após a definição da busca das palavras-chave com seus devidos operadores obteve-se todos os documentos da plataforma Scopus. Em seguida, por meio da ferramenta *Bibliometrix*, atingiram-se alguns resultados para os principais indicadores bibliométricos.

O *Bibliometrix*, como uma extensão do *software* R, e sua integração com o pacote *Biblioshiny*, fornecem uma ampla gama de funcionalidades específicas para análise bibliométrica. Essa ferramenta oferece uma abordagem apropriada para a investigação da produção científica e favorece análises detalhadas e abrangentes (Aria & Cuccurullo, 2017; Moreira, Guimarães & Tsunoda, 2020). Já, para confecção das redes de coocorrências das palavras-chave foi utilizado o *software* VOSviewer versão 1.6.20. Além dessas ferramentas, foram utilizados procedimentos como tabulação, conversão e compilação dos dados obtidos por meio do *software* Excel.

As pesquisas bibliométricas consistem em "examinar a produção de artigos em um determinado campo de saber, mapear as comunidades acadêmicas e identificar as redes de pesquisadores e suas motivações" (Chueke & Amatucci, 2015, p. 2). Para visualização mais clara do processo, o *framework* da pesquisa é apresentado na Figura 1.

Figura 1

Framework da pesquisa



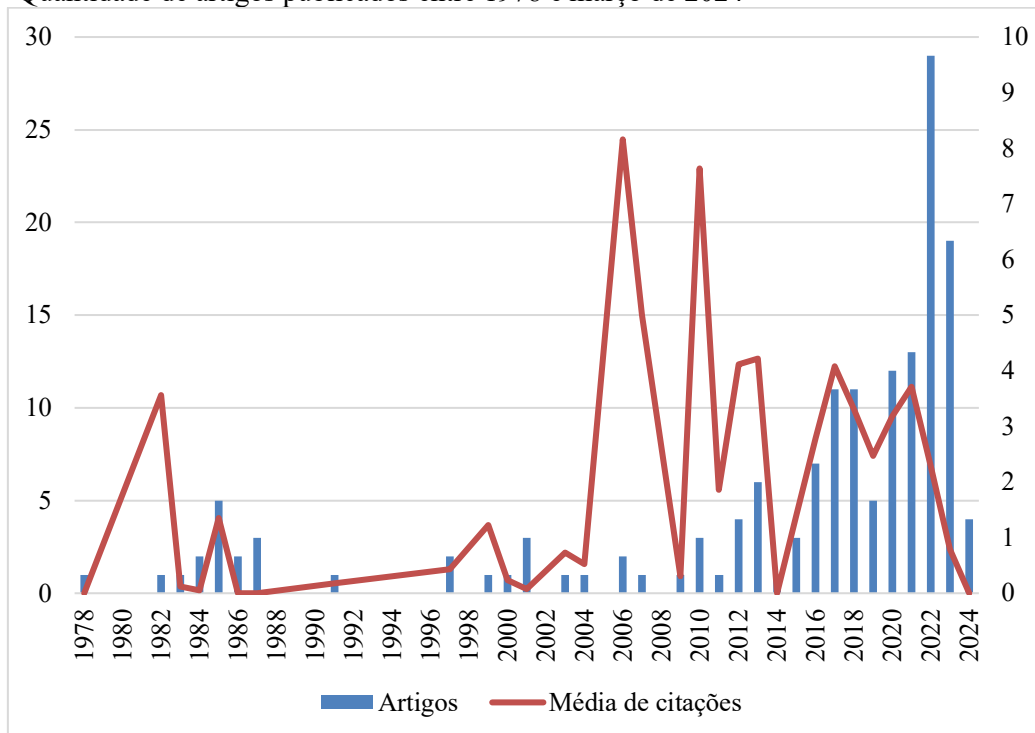
Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

3 Resultados

Na análise bibliométrica realizada no período de 1978 a 11 de março de 2024 resultaram os seguintes aspectos—quantidade de artigos publicados; países que mais publicaram; principais universidades que desenvolveram pesquisas; principais periódicos científicos dessas universidades; rede de coocorrência de palavras-chave e mapa temático. A Figura 2 ilustra o número de artigos publicados no período de 1978 a 11 de março de 2024 sobre a temática em estudo.

Figura 2

Quantidade de artigos publicados entre 1978 e março de 2024



Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

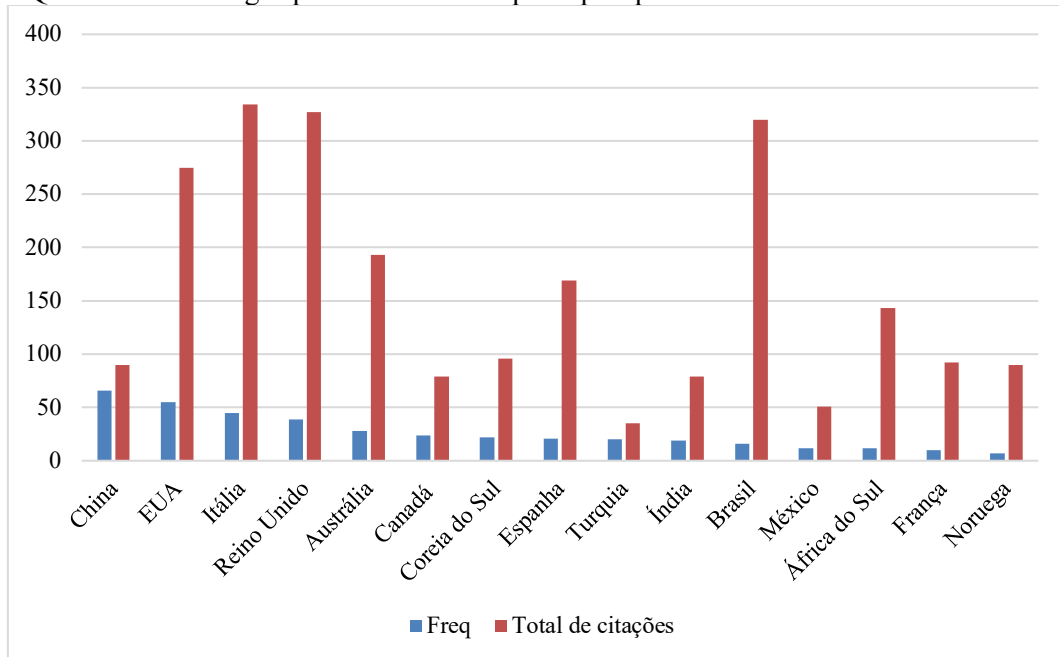
No período de 1978 a 2016 o número de artigos publicados variou de 0 a 7 artigos, já no período de 2017 a março de 2024, o número de artigos corresponde a 66,67% das publicações, o que mostra a notoriedade e interesse de pesquisas sobre o tema neste período. O pico de publicações ocorreu no ano de 2022 com 29 artigos. O primeiro artigo publicado corresponde ao autor Kurkjian (1978) e descreve como as válvulas borboletas podem ser utilizadas de diversas formas com o intuito de obter um sistema de tubulação que opere suavemente as perdas de pressão e sem vazamentos.

A média de citações por ano sobre essa temática ficou em sua maioria na faixa de 0 a 5 citações por ano, as maiores médias por ano ocorreram em 2006 com 8,16 e 2010 com 7,64. É importante considerar que artigos mais recentes tendem a apresentar menos citações, pois existe um tempo necessário para sua inserção e reconhecimento na literatura acadêmica.

Quanto à distribuição geográfica, 37 países publicaram artigos sobre esse tema. A Figura 3 apresenta os quinze países que mais produziram artigos sobre o tema e os respectivos números de citações.

Figura 3

Quantidade de artigos publicados nos 15 principais países



Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

Os seguintes países apresentam o maior número de publicações em ordem decrescente, China (66), Estados Unidos (55), Itália (45), Reino Unido (39) e Austrália (28). Já os países com maior número de citações foram Itália (334), Reino Unido (327), Brasil (320), Estados Unidos (275) e Austrália (193).

As dez universidades mais frequentes que desenvolveram pesquisas sobre o assunto e os seus respectivos países estão ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1

Quantidade de artigos publicados pelas das 10 principais universidades

País	Universidade	Artigos
Austrália	<i>University of Adelaide</i>	15
China	<i>Zhejiang University</i>	15
Reino Unido	<i>University of Sheffield</i>	12
Itália	<i>University of Perugia</i>	10
Espanha	<i>Universitat Politècnica de València</i>	9
Itália	<i>University of Brescia</i>	9
Estados Unidos	<i>Clemenson University</i>	8
China	<i>The Hong Kong Polytechnic University</i>	8
África do Sul	<i>Tshwane University of Technology</i>	8
Tailândia	<i>National Electronics and Computer Technology Center</i>	7

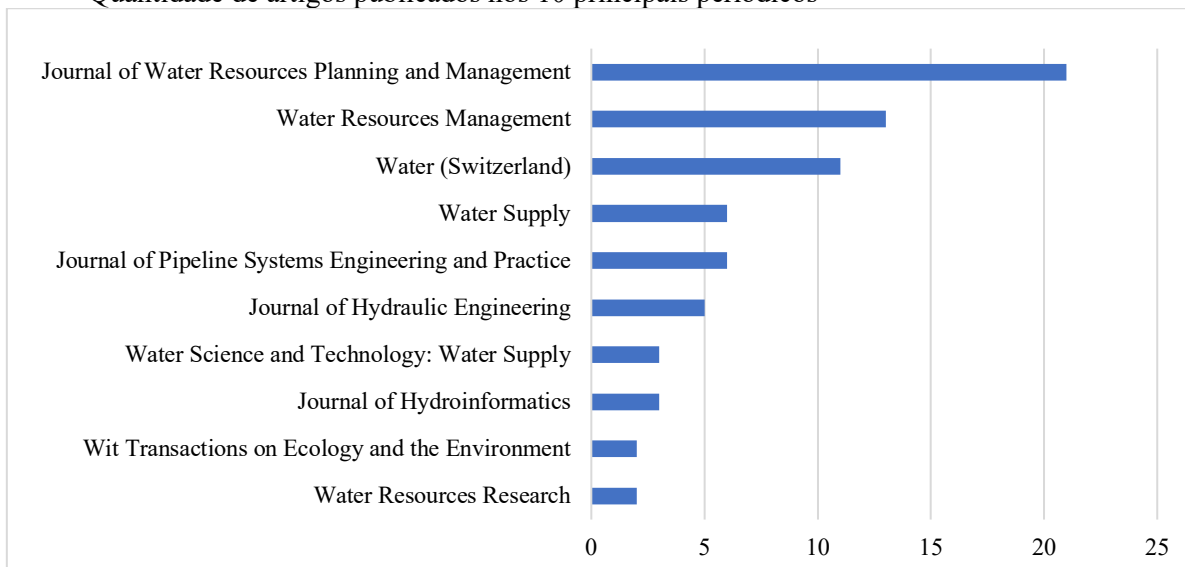
Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

As dez principais universidades que publicaram sobre o assunto representam 26% dos documentos, sendo a Universidade de Adelaide (15) na Austrália, a Universidade de Zhejiang (15) na China e a Universidade de Sheffield (12) no Reino Unido.

As publicações das dez principais universidades estão distribuídas em 80 periódicos, sendo os dez principais mostrados na Figura 4.

Figura 4

Quantidade de artigos publicados nos 10 principais periódicos



Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

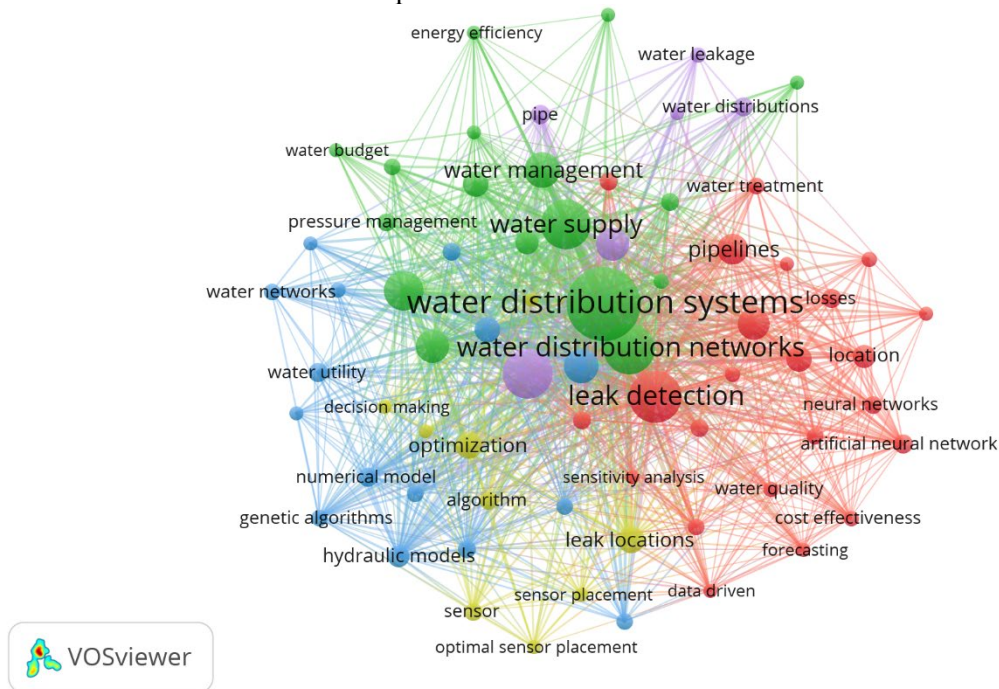
Observa-se na Figura 4 que dentre os dez periódicos selecionados, *Journal of Water Resources Planning and Management* apresentou 21 publicações, sendo o maior número de publicações no período considerado.

Neste estudo, optou-se pela utilização do software *VOSViewer*, conforme descrito por Van Eck e Waltman (2023), para criar uma rede de coocorrências. Essa técnica revelou a presença de 1.551 termos recorrentes. Uma análise mais detalhada foi realizada ajustando-se o critério para incluir apenas termos com pelo menos cinco ocorrências. Além disso, foi realizado a normalização do vocabulário (agrupando termos repetidos ou sinônimos e excluindo termos inadequados) levando à identificação de 70 termos.

A rede de coocorrências de termos resultou em 5 *clusters*, com 70 nós, conectados em 1.274 arestas, conforme demonstra a Figura 5.

Figura 5

Rede de coocorrências de palavras-chave



Nota: Foram consideradas as palavras-chave que ocorreram no mínimo cinco vezes.
Fonte: Elaborada pelos autores a partir do VOSviewer (2024).

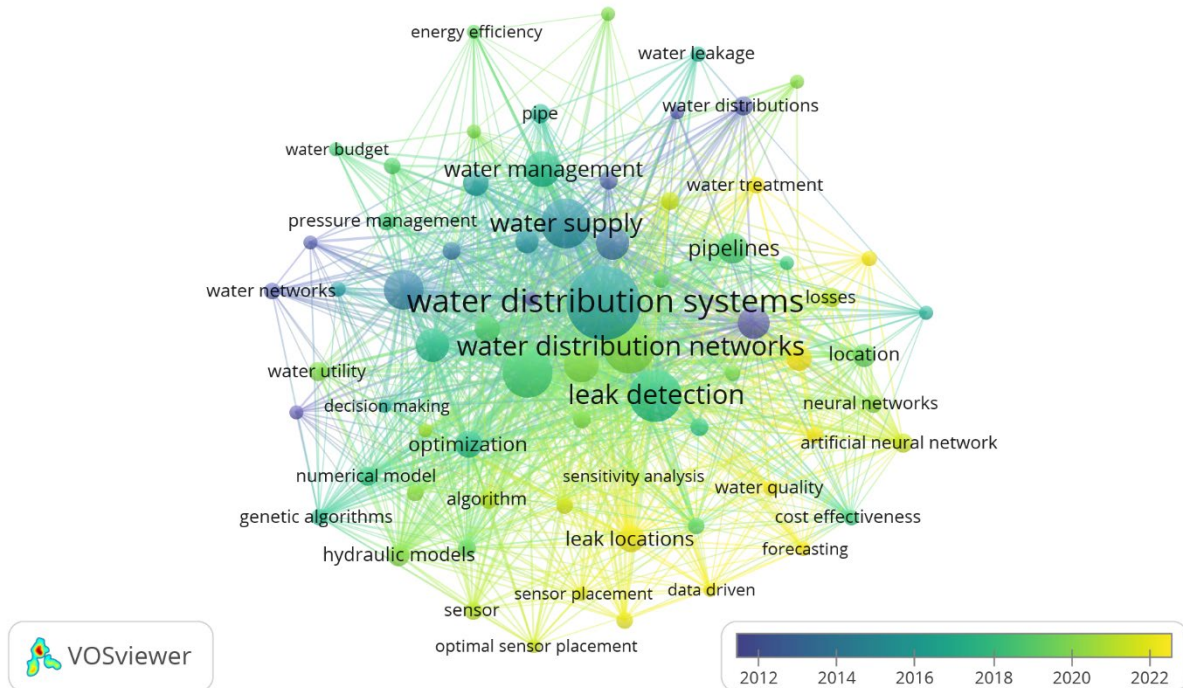
No *software VOSviewer*, a análise da rede de coocorrências de termos resultou em cinco *clusters* distintos, identificados pelas cores: vermelho (23 itens), verde (17 itens), azul (17 itens), amarelo (9 itens) e roxo (6 itens). O diâmetro das esferas na visualização é proporcional ao número de ocorrências do termo associado, indicando que esferas maiores representam termos com maior frequência de aparição. Além disso, a espessura das linhas que conectam essas esferas refletem a intensidade da relação entre os termos; linhas mais grossas denotam conexões mais fortes. Os termos mais frequentes em cada *cluster* são:

- O *cluster* vermelho corresponde aos termos: "leak detection", "water pipelines", "pipelines", "machine-learning" e "location".
- O *cluster* verde corresponde aos termos: "water distribution systems", "water distribution networks", "water supply", "water losses" e "water management".
- O *cluster* azul corresponde aos termos: "detection method", "water resources", "hydraulic models", "numerical model" e "water utility".
- O *cluster* amarelo corresponde aos termos: "leak locations" e "optimization".
- O *cluster* roxo corresponde aos termos: "leakage" e "leakage (fluid)".

Na Figura 6 é possível verificar a rede de incidência de palavras-chave no período de 1978 a março de 2024.

Figura 6

Rede de incidência de palavras-chave, período 1978 a março de 2024



Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *VOSviewer* (2024).

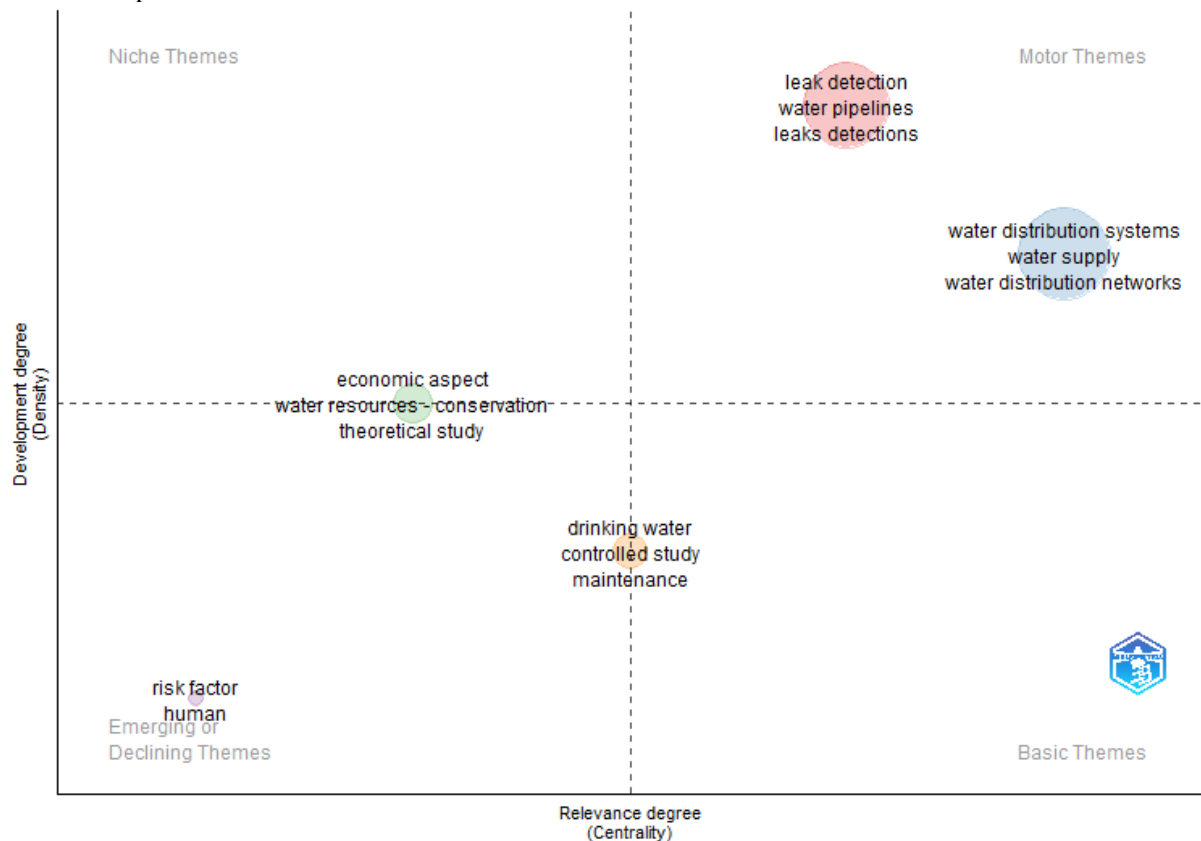
A partir da Figura 6 torna-se possível identificar em que momento a discussão sobre esse tema se inicia e quais foram os termos iniciais - abastecimento de água, perdas na distribuição na cor azul escuro. Essa análise é capaz de indicar para onde caminha a discussão desse tema —detecção de vazamentos, qualidade da água, tratamento de água (amarelo).

A temática das perdas em sistemas de distribuição de água se revela extremamente pertinente e necessária, fundamentando a relevância da pesquisa atual. Entre os anos de 2011 e 2012, a pesquisa estava fortemente vinculada ao abastecimento de água e à provisão desse recurso essencial à população. Na contemporaneidade, o foco do discurso se desloca para as perdas de água em sistemas de distribuição, refletindo a mudança de preocupações. Isso ocorre porque, com uma parcela cada vez maior da população mundial tendo acesso à água, os desafios passam a se concentrar na eficiência da distribuição, na redução das perdas e na otimização dos sistemas de abastecimento.

Além disso, a análise é reforçada pelo mapa temático. Esse mapa apresenta uma matriz de temas relacionados aos sistemas distribuidores de água, dispostos de acordo com dois eixos principais: o grau de desenvolvimento (densidade) e a importância relativa dos temas (centralidade). Os temas são classificados em quatro quadrantes, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7

Mapa temático



Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

- Temas de Nicho (*Niche Themes*): Nesse quadrante estão dispostos os temas menos desenvolvidos e menos centrais, que podem representar áreas emergentes ou altamente específicas. Observa-se que nesse quadrante os Temas de Nicho ("*economic aspect*", "*water resources conservation*" e "*theoretical study*") intersecta-se com os Temas Emergentes ou em Declínio.
- Temas Emergentes ou em Declínio (*Emerging or Declining Themes*): Nesse quadrante estão dispostos os temas com baixa densidade, mas alta centralidade, indicando que, embora não sejam amplamente desenvolvidos, são de importância crescente ou em processo de declínio no campo de estudo. Os temas como "*risk factor*" e "*human*", podem estar relacionados a novas pesquisas sobre os riscos humanos no contexto da gestão da água.
- Temas Básicos (*Basic Themes*): São temas altamente desenvolvidos, mas com menor centralidade. Eles formam a base do conhecimento do campo, mas podem não estar na vanguarda das pesquisas atuais. Nesse estudo em questão, os temas "*drinking water*", "*controlled study*" e "*maintenance*", são considerados fundamentais para a compreensão e gestão dos sistemas de distribuição de água.
- Temas Motor (*Motor Themes*): Nesse quadrante estão os temas que possuem tanto alta densidade quanto alta centralidade, representando as áreas-chave de pesquisa e desenvolvimento no campo. Pode se observar no mapa, que os temas "*leak detection*",

"*water pipelines*", "*leaks detections*"; "*water distribution systems*", "*water supply*" e "*water distribution networks*" são exemplos de temas motores, indicando que eles são centrais para o estudo e avanço na gestão eficiente dos recursos hídricos.

Com a finalidade de verificar os autores que mais publicaram sobre o tema construiu-se a Tabela 2.

Tabela 2

Distribuição dos 10 principais autores

Autor	País	Artigos	Citações
Narasimhan, S.	Estados Unidos	6	43
Firat, M.	Turquia	5	21
Boxall, J.	Reino Unido	4	50
Abid, M.	Tunísia	3	3
Beck, S. B. M.	Reino Unido	3	59
Brunone, B.	Itália	3	35
Butterfield, J. D.	Reino Unido	3	59
Collins, R. P.	Reino Unido	3	59
Lambert, M. F.	Austrália	3	39
Li, J.	China	3	3

Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

No total, foram identificados 466 autores na produção científica analisada. Entre os dez principais autores, 16,67% dos artigos estão vinculados aos Estados Unidos, 13,88% à Turquia e 36,11% ao Reino Unido, já os números de artigos da Itália e Austrália representam 8,33% para cada país. Os autores Narasimhan, S. (6), Firat, M. (5) e Boxall, J. (4) foram os que mais publicaram. Vale ressaltar que os autores Beck, S. B. M. (3), Butterfield, J. D. (3) e Collins, R. P. (3) publicaram juntos os mesmos três artigos. Porém, os artigos mais citados não pertencem a nenhum dos autores que mais publicaram sobre esse assunto (Tabela 3).

Tabela 3

Artigos mais citados

Autor/Ano	Título	Periódico	Citações
Araujo, Ramos e Coelho (2006)	<i>Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management</i>	<i>Water Resources Management</i>	281
Germanopoulos (1985)	<i>A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models</i>	<i>Civil Engineering Systems</i>	244
Mounce, Boxall e Machell (2010)	<i>Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows</i>	<i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	191
Clark Stafford e Goodrich (1982)	<i>Water distribution systems: a spatial and cost evaluation.</i>	<i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	153
Wu Sage e Turtle (2010)	<i>Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system</i>	<i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	153
Britton, O'halloran e Stewart (2013)	<i>Smart metering: Enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management</i>	<i>Journal of Cleaner Production</i>	150
Fontana, Giugni e Portolano (2012)	<i>Losses Reduction and Energy Production in Water Distribution Networks</i>	<i>Journal of Water Resources Planning and Management</i>	140

Adedeji <i>et al.</i> (2017)	<i>Towards Achieving a Reliable Leakage Detection and Localization Algorithm for Application in Water Piping Networks: An Overview</i>	<i>Ieee Access</i>	126
Nygård <i>et al.</i> (2007)	<i>Breaks and maintenance work in the water distribution systems and gastrointestinal illness: A cohort study</i>	<i>International Journal of Epidemiology</i>	90
Farah e Shahrour (2017)	<i>Leakage Detection Using Smart Water System: Combination of Water Balance and Automated Minimum Night Flow</i>	<i>Water Resources Management</i>	66

Fonte: Elaborada pelos autores a partir do *Biblioshiny* (2024).

4 Discussão

Como observado anteriormente, o estudo abrangeu o período de 1978 a março de 2024, destacando um aumento significativo no número de publicações a partir de 2016 (Figura 2). Esse incremento pode ser atribuído, em parte, à implementação da Agenda 2030 em 2015, refletindo a crescente importância das preocupações ambientais globais. O ápice das publicações científicas sobre o tema foi registrado em 2022.

A pesquisa resultou em 4.625 referências e identificou 466 autores envolvidos. A taxa de crescimento anual foi calculada em 3,06%. Ademais, a colaboração internacional foi significativa, representando 17,72% das coautorias identificadas. O periódico *Journal of Water Resources Planning and Management* destacou como sendo o periódico que mais produz sobre a temática, com as principais contribuições de Clark, Stafford e Goodrich (1982), Mounce, Boxall e Machell (2010), Wu, Sage e Turtle (2010) e Fontana, Giugni e Portolano (2012).

Uma das primeiras abordagens identificadas para lidar com o problema das perdas hídricas foi a modelagem matemática. Um exemplo é o estudo realizado por Germanopoulos (1985), que empregou um modelo de simulação de rede para analisar a relação entre pressão e fluxo de vazamento. Esse estudo possibilitou a obtenção de resultados mais realistas, assumindo consumos nodais fixos e independentes das pressões da rede. No entanto, o autor concluiu que esses consumos nodais fixos não são válidos em situações em que o sistema de distribuição opera com falhas ou pressões abaixo do normal.

As perdas nos sistemas de distribuição de água representam um grave problema mundial, pois acarretam problemas econômicos, ambientais, sociais e também pode trazer riscos à saúde. Nygård *et al.* (2007) ao avaliarem as interrupções nos trabalhos de manutenção no sistema de distribuição de água da Noruega observaram que as interrupções estavam associadas a um aumento no risco de doenças gastrointestinais. A rápida detecção e localização dos vazamentos nos sistemas de distribuição de água é de suma importância, pois além de evitar perdas econômicas, podem mitigar problemas ambientais (Benítez *et al.*, 2012; Shiddiqi, Cardell-Oliver; Datta, 2020; Kafle; Fong; Narasimham, 2022; Blázquez-García *et al.*, 2021; Li, Zheng; Lu, 2022; Basnet *et al.* 2023) e preservar graves riscos à saúde (Avila *et al.*, 2021; Kafle, Fong e Narasimham, 2022).

A aplicação da Inteligência Artificial (IA) e uso de modelos matemáticos para definir a posição ideal de sensores nas tubulações dos sistemas de distribuição de água pode auxiliar a detectar vazamentos de água e a consequente perda de água não faturada. Yu *et al.* (2023) esclarecem que a coleta de dados por meio de sensores é relevante devido ao seu potencial de aplicação em sistemas de monitoramento em tempo real para detecção de vazamentos.

O desenvolvimento e a implementação de sistemas baseados em IA e Redes Neurais têm desempenhado um papel crucial na detecção e localização de vazamentos em sistemas de distribuição de água. Mounce, Boxall e Machell (2010) são pioneiros nesse campo, tendo utilizado redes neurais e IA para criar um sistema *online* capaz de identificar vazamentos e fluxos anormais. Esse avanço na gestão de perdas hídricas não apenas demonstrou a eficácia



dessas tecnologias na detecção de vazamentos, mas também melhorou significativamente a eficiência operacional das redes de distribuição de água.

Além disso, pesquisas recentes, como as de Pérez *et al.* (2021), Bohorquez *et al.* (2022), Vanijirattikhan *et al.* (2022), Basnet *et al.* (2023) e Yu *et al.* (2023), têm reforçado a importância da IA e das Redes Neurais nesse contexto. Yu *et al.* (2023), por exemplo, destacam a aplicação de modelos matemáticos para determinar a posição ideal de sensores nas tubulações dos sistemas de distribuição de água, complementando assim a abordagem de Mounce, Boxall e Machell (2010). A coleta de dados por meio de sensores tem se mostrado crucial para o monitoramento em tempo real e a detecção eficiente de vazamentos, contribuindo para uma gestão mais eficaz e ágil das redes de distribuição de água.

Araujo, Ramos e Coelho (2006) e Fontana, Giugni e Portolano (2012), com a aplicação de Algoritmos Genéticos, buscaram uma solução otimizada para o controle de pressão e gerenciamento de válvulas no sistema de distribuição de água e, por consequência, a redução das perdas. A aplicação de Algoritmos Genéticos para a detecção de vazamentos foi realizada por Ayad *et al.* (2021), Wu, Sage e Turtle (2010), Farley, Mounce e Boxall (2013) e Steffelbauer e Fuchs-Hanusch (2016).

As perdas em sistemas de distribuição podem ser ocasionadas pelo excesso de pressão (Freitas *et al.*, 2022). Nesse sentido, Araujo, Ramos e Coelho (2006) e Fontana, Giugni e Portolano (2012) recomendam a minimização da pressão no sistema de distribuição de água após a seleção das válvulas. Entretanto, a redução da pressão torna mais difícil detectar os vazamentos em sistema de distribuição de água (Al-Washali *et al.*, 2019).

Britton, O'halloran e Stewart (2013) fizeram uma pesquisa sobre a implementação de uma tecnologia de medição inteligente em Hervey Bay, Austrália. Essa tecnologia automatizada permitiu identificar e gerenciar eficientemente vazamentos pós-medidor, destacando sua eficácia na redução de perdas de água, melhoria da eficiência operacional e promoção da sustentabilidade no setor de abastecimento de água. Paralelamente, Farah e Shahrour (2017) realizaram um estudo complementar na Universidade de Lille, França, onde aplicaram sistemas inteligentes de água para mitigar perdas não faturadas e detectar vazamentos não reportados. Ao utilizarem uma metodologia avançada de balanço hídrico e sensores hidráulicos, conseguiram reduzir as perdas em 36%, ilustrando claramente os benefícios desses sistemas na gestão eficaz de recursos hídricos e na minimização de desperdícios.

Clark, Stafford e Goodrich (1982) realizaram uma análise abrangente sobre os desafios enfrentados na manutenção e substituição de sistemas de distribuição de água, considerando os impactos da qualidade da água nos custos do sistema. Eles destacaram a importância de estabelecer programas eficazes para garantir a confiabilidade e minimizar custos, utilizando modelos estatísticos e análises para examinar a relação entre infraestrutura e crescimento populacional. Concluíram que um planejamento cuidadoso é essencial para garantir a eficiência econômica e a confiabilidade do sistema.

Por outro lado, Adedeji *et al.* (2017) concentraram-se no desenvolvimento de um algoritmo para detecção precisa de vazamentos em redes de tubulação de água. Ao implementar sensores de pressão e comunicação sem fio, eles demonstraram a viabilidade da detecção de vazamentos, contribuindo significativamente para a eficiência das redes de tubulação de água. Esses esforços visavam reduzir as perdas de água e melhorar a eficiência geral da distribuição de água.

Diversos autores utilizam da modelagem matemática como ferramenta para interpretar e simular um sistema de distribuição de água, o desenvolvimento de novos modelos e o uso adequado da tecnologia favorecem a construção de modelos mais eficientes e replicáveis em diversas partes do mundo.

Como *gap* de pesquisa, destaca-se que a maioria dos estudos se concentra em soluções tecnológicas, como modelagem matemática, IA e sensores para detecção de vazamentos. No entanto, há poucas pesquisas que investigam barreiras institucionais, políticas e econômicas que dificultam a implementação dessas tecnologias e a efetiva redução das perdas hídricas.

Embora diversos estudos explorem soluções tecnológicas para otimizar sistemas de distribuição, há uma lacuna na análise da viabilidade e implementação dessas soluções em diferentes contextos, especialmente em países com infraestrutura precária ou restrições financeiras.

5 Considerações finais

Esta investigação aponta alguns diagnósticos de como a pesquisa sobre perdas hídricas nos sistemas de distribuição de água evoluiu ao longo de aproximadamente 46 anos. Entre 1978 e 2015 o número de publicações sobre a temática foi bastante modesto, com ausência de publicações em diversos períodos. A partir de 2016 houve um acréscimo no número de publicações em periódicos científicos, culminando com o pico em 2022. A China liderou com a quantidade de trabalhos e a Itália o país com o maior número de citações.

Ao analisar os resultados fica evidente que certos temas emergem como centrais e fundamentais para o avanço da gestão eficiente dos recursos hídricos. Os temas identificados como "Temas Motor" — "*leak detection*", "*water pipelines*", "*leaks detections*", "*water distribution systems*", "*water supply*" e "*water distribution networks*" destacam-se não apenas pela frequência, mas também pela importância estratégica para gestão da distribuição da água.

Tendo em vista a problemática dos sistemas de distribuição de água em relação às tubulações de água, que em geral sofrem com a ação do tempo, acrescido das dificuldades operacionais, pois muitas vezes as tubulações que transportam água são subterrâneas, é esperado que muitas pesquisas versem sobre o uso de modelos matemáticos e/ou estatísticos apoiados com as técnicas de IA para detectar vazamentos de água e, como consequência, reduzir as perdas de água.

Dessa forma, torna-se imprescindível fazer uso de sensores, IA, modelos para controlar as pressões nos sistemas de distribuição de água, a fim de trabalhar na prevenção de possíveis vazamentos do recurso água, mitigando as perdas desse recurso tão valioso para o bem-estar da população.

Além disso, é crucial destacar que o contexto das mudanças climáticas exerce uma pressão adicional sobre a gestão dos recursos hídricos. Com o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (secas, chuvas intensas, estresse hídrico, dentre outros), a necessidade de preservar e gerenciar eficientemente a água torna-se ainda mais premente.

As tubulações de água, já suscetíveis à deterioração, estão sujeitas a um estresse adicional devido às mudanças nas condições ambientais. Portanto, é imperativo que as pesquisas continuem a explorar abordagens inovadoras, como modelos matemáticos, técnicas de IA e sensores avançados, para detectar e mitigar vazamentos em sistemas de distribuição de água.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil, processo n. 2024/18584-3.



Referências

- Adedeji, K. B., Abe, B. T., Hamam, Y., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access*, 5, 20272-20285. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2752802>
- AL-Washali, T., Sharma, S., AL-Nozaily, F., Haidera, M., & Kennedy, M. (2019). Modelling the Leakage Rate and Reduction Using Minimum Night Flow Analysis in an Intermittent Supply System. *Water*, 11(48). <https://doi.org/10.3390/w11010048>
- Amaral, P. S., Zanatta, F., Meireles, G. B., Mendes, J. P., Meireles, S. P. A., & Mariosa, D. F. (2023). Fundamentos e consequências éticas da aplicação dos princípios de universalização, sustentabilidade e segurança hídrica contidos no marco regulatório do saneamento no Brasil. *Gestão & Regionalidade*, 39, e20237565. <https://doi.org/10.13037/gr.vol39.e20237565>
- Andrade, F. M., & Queiroz, A. P. de. (2023). Publicações de autoria feminina no boletim paulista de geografia (1949-2018): análise da participação e das palavras-chave. *RA'EGA - O Espaço Geográfico em Análise*, 56, 121-139. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v56i0.84267>
- Araujo, L. S., Ramos, H., & Coelho, S. T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*, 20, 133-149. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-4635-3>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Ávila, C. A. M., Sánchez-Romero, F. J., López-Jiménez, P. A., & Sánchez, M. P. (2021). Leakage Management and Pipe System Efficiency. Its Influence in the Improvement of the Efficiency Indexes. *Water*, 13(14), e1909. <https://doi.org/10.3390/w13141909>
- Ayad, A., Khalifa, A., Fawy, M., & Moawad, A. (2021). An integrated approach for non-revenue water reduction in water distribution networks based on field activities, optimisation, and GIS applications. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3509-3520. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.007>
- Basnet, L., Brill, D., Ranjithan, R., & Mahinthakumar, K. (2023). Supervised Machine Learning Approaches for Leak Localization in Water Distribution Systems: Impact of Complexities of Leak Characteristics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(8). <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6047>
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2012). Improving consistency in AHP decision-making processes. *Applied Mathematics and Computation*, 219 (5), 2432-2441. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2012.08.079>



- Blázquez-García, A., Conde, A., Mori, U., & Lozano, J. A. (2021). Water leak detection using self-supervised time series classification. *Information Sciences*, 574, 528-541. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.06.015>
- Bohorquez, J., Lambert, M. F., Alexander, B., Simpson, A. R., & Abbott, D. (2022). Stochastic Resonance Enhancement for Leak Detection in Pipelines Using Fluid Transients and Convolutional Neural Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001504](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001504)
- Britton, T., O'halloran, K., & Stewart, R. A. (2013). Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. *Journal of Cleaner Production*, 54, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.018>
- Chueke, G. V., & Amatucci, M. (2015). O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum. *InternexT*, 10(2), 1-5. <https://doi.org/10.18568/1980-4865.1021-5>
- Clark, R. M., Stafford, C. L., & Goodrich, J. A. (1982). Water distribution systems: A spatial and cost evaluation. *Journal of the Water Resources Planning and Management Division*, v. 108(3), 243-256. <https://doi.org/10.1061/JWRDDC.0000257>
- Farah, E., & Shahrour, I. (2017). Leakage detection using smart water system: Combination of water balance and automated minimum night flow. *Water Resources Management*, 31, 4821-4833. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1780-9>
- Farley, B., Mounce, S. R., & Boxall, J. B. (2013). Development and Field Validation of a Burst Localization Methodology. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(6), 706-733. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000290](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000290)
- Farouk, A. M., Rahman, R. A., & Romali, N. S. (2023). Non-revenue water reduction strategies: systematic review. *Smart and Sustainable Built Environment*, 12(1), 181-199. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2021-0071>
- Fontana, N., Giugni, M., & Portolano, D. (2012). Losses reduction and energy production in water-distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(3), 237-244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000179](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000179)
- Freitas, C. L. de, Silva, F. G. B. da, Silva, A. T. Y. L., & Barbedo, M.D.G. (2022). Analysis of a real water distribution system in Southern Minas Gerais using geographical information system. *Engenharia Sanitária Ambiental*, 27(1), 31-39. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200380>
- Germanopoulos, G. (1985). A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models, *Civil Engineering Systems*, 2(3), 171-179. <https://doi.org/10.1080/02630258508970401>
- Gil, A. C. (2019). *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 7. ed. São Paulo: Atlas.



- Guedes, W. P., Sugahara, C. R., Ferreira, D. H. L., & Branchi, B. A. (2023). Indicadores de saneamento básico: uma aplicação da Análise Fatorial para os municípios das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. *Interações*, 24(1), 261–179. <https://doi.org/10.20435/inter.v24i1.3722>
- Hawken, P., Lovins, A., & Lovins, H. (2007). *Capitalismo Natural: criando a próxima revolução industrial*. São Paulo: Cultrix.
- ITB. Instituto Trata Brasil (2023). *Água perdida no país poderia abastecer todas as 17,9 milhões de pessoas que residem nas favelas do Brasil por cerca de um ano e meio*. GO Associados. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Press-Release-Estudo-de-Perdas-2023.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2024.
- Kaffash, S., Nguyen, A. T., & Zhu, J. (2021). Big data algorithms and applications in intelligent transportation system: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 231, e107868. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107868>
- Kafle, M.D., Fong, S., & Narasimham, S. (2022). Active acoustic leak detection and localization in a plastic pipe using time delay estimation. *Applied Acoustics*, 187, e108482. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108482>
- Kingdom, B., Liemberger, R., & Marin, P. (2006). *The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries*. How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based Service Contracting. World Bank Discussion Paper Number 8. Washington D.C.
- Kurkjian, G. (1978). Proper butterfly valve application avoids costly repairs. *Water Sewage Works*, 125(6), 84-89.
- Kusterko, S., Ensslin, S. R., Ensslin, L., & Chaves, L. C. (2018). Gestão de perdas em sistemas de abastecimento de água: uma abordagem construtivista. *Eng Sanit Ambient*, 23(3), 615-626. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522018156436>.
- Li, J., Zheng, W., & Lu, C. (2022). An Accurate Leakage Localization Method for Water Supply Network Based on Deep Learning Network. *Water Resources Management: An International Journal*, 36 (7), 2309-2325. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03144-x>.
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2018). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Science & Technology Water Supply*. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>.
- Marques, F. B., Maculan, B. C. M. S., & Souza, R. R. (2023). A bibliometria na pós-graduação brasileira: uma revisão interativa da literatura. *Transinformação*, 35, e227089. <https://doi.org/10.1590/2318-0889202335e227089>.
- Moreira, P. S. C., Guimarães, A. J. R., & Tsunoda, D. F. (2020). Qual ferramenta bibliométrica escolher? um estudo comparativo entre softwares. *P2P & Inovação*, 6(2), Ed. Especial, 140-158. <https://doi.org/10.21721/p2p.2020v6n2.p140-158>.



- Mounce, S. R., Boxall, J. B., & Machell, J. (2010). Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(3), 309-318. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000030).
- Nygård, K., Teverdal, A., Wahl, E., & Aavitsland, P. (2007). Breaks and maintenance work in the water distribution systems and gastrointestinal illness: a cohort study. *International journal of epidemiology*, 36 (4), 873-880. <https://doi.org/10.1093/ije/dym029>
- Pérez-Pérez, E. J., López-Estrada, F. R., Valencia-Palomo, G., Torres, L.; Puig, V., & Mina-Antonio, J. D. (2021). Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. *Control Engineering Practice*, 107, e104677. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104677>
- Santi, A. D. de, Cetrullo, T. B., & Malheiros, T. F. (2021). Water loss control practices in developing countries: a case study of a Brazilian region. *Water Supply*, 212. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.351>
- Singh, V. K., Singh, P., Karmakar, M., Leta, J., & Mayr, P. (2021). The journal coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A comparative analysis. *Scientometrics*, 126(6), 5113–5142.
- Shiddiqi, A. M., Cardell-Oliver, R., & Datta, A., (2020). An Advanced Sensor Placement Strategy for Small Leaks Quantification Using Lean Graphs. *Water*, 12(12), e3439. <https://doi.org/10.3390/w12123439>.
- Steffelbauer, D. B., & Fuchs-Hanusch, D. (2016). Efficient Sensor Placement for Leak Localization Considering Uncertainties. *Water Resour Manage*, 30, 5517–5533. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1504-6>
- Tundisi, J. G. (2008). Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos Avançados*, 22(63), 7-16. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>.
- Tundisi, J. G., & Matsumura-Tundisi, T. (2020). *A água*. Scienza: São Carlos.
- Urbizagástegui-Alvarado, R. (2022). *Bibliometria brasileira: análise de copalavras*. *Transinformação*, 34, e220004. <https://doi.org/10.1590/2318-0889202234e220004>.
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2023). *VOSviewer Manual*. Manual for VOSviewer version 1.6.20. Universiteit Leiden.
- Vanijjirattikhan, R., Khomsay, S., Kitbutrawat, N., Khomsay, K., Supakchukul, U.; Udomsuk, S., Suwatthikul, J., Oumtrakul, N., & Anusart, K. (2022). AI-based acoustic leak detection in water distribution systems. *Results in Engineering*, 15, e100557. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.10055>
- Wu, Z.Y., Sage, P., & Turtle, D. (2010). Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system. *Journal of Water Resources Planning and*



Management, 136(1), 116-128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:1\(116\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:1(116)).

Yu, T., Chen, X., Yan, W., Xu, Z., & Ye, M. (2023). Leak detection in water distribution system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 185(15), e109810. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109810>.

