

GESTÃO HÍDRICA ADAPTATIVA: ESTRATÉGIAS E TECNOLOGIAS PARA A RESILIÊNCIA CLIMÁTICA EM REGIÕES SEMIÁRIDAS**ADAPTIVE WATER MANAGEMENT: STRATEGIES AND TECHNOLOGIES FOR CLIMATE RESILIENCE IN SEMI-ARID REGIONS** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.065-009>**Heris Coutinho Vieira**Doutorando em Economia do Meio Ambiente e Agricultura
Universidade de BrasíliaORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7708-2547>**Juan Lucas Alves de Lima**Mestre em Economia Aplicada
Universidade Federal de Goiás
E-mail: juanlucas5022@gmail.com**Resumo**

As mudanças climáticas têm intensificado a escassez hídrica e ampliado as vulnerabilidades socioambientais, especialmente em regiões semiáridas, onde a variabilidade das precipitações e a degradação dos ecossistemas comprometem a segurança hídrica e o bem-estar das populações. Nesse contexto, a gestão hídrica adaptativa emerge como um paradigma inovador orientado à integração entre tecnologia, governança e sustentabilidade. Este artigo tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão bibliométrica e análise de clusters, o desenvolvimento da produção científica sobre gestão hídrica adaptativa e suas aplicações diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas. O estudo contempla publicações nacionais e internacionais indexadas na *Web of Science* entre 2014 e 2024, utilizando descritores relacionados à adaptação climática, inovação tecnológica e governança da água. Os resultados evidenciam três eixos centrais da pesquisa: (i) a governança adaptativa, fundamentada na participação social e na aprendizagem institucional; (ii) a inovação tecnológica, com destaque para soluções baseadas na natureza, irrigação inteligente e reúso de efluentes; e (iii) a justiça hídrica, que incorpora dimensões de equidade, inclusão e valorização dos conhecimentos locais. Conclui-se que a gestão hídrica adaptativa constitui uma abordagem estratégica para o fortalecimento da resiliência climática, contribuindo para a formulação de políticas públicas mais integradas e sustentáveis voltadas ao semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Gestão Hídrica Adaptativa; Governança da Água; Inovação Tecnológica; Resiliência Climática; Sustentabilidade.

Abstract

Climate change has intensified water scarcity and increased socio-environmental vulnerabilities, particularly in semi-arid regions, where rainfall variability and ecosystem degradation undermine water security and population well-being. Against this backdrop, adaptive water management has emerged as an innovative paradigm aimed at integrating technology, governance, and sustainability. This article aims to analyze, through a bibliometric review and cluster analysis, the development of scientific research on adaptive water management and its applications in addressing climate-related challenges. The study encompasses national and international publications indexed in the *Web of Science* between 2014 and 2024, using descriptors related to climate adaptation, technological innovation, and water governance. The results reveal three central research clusters: (i) adaptive governance, grounded in social participation and institutional learning; (ii) technological innovation, with emphasis on nature-based solutions, smart irrigation, and wastewater reuse; and (iii) water justice, encompassing equity, inclusion, and local knowledge. It is concluded that adaptive water management represents a strategic approach to strengthening climate resilience by promoting more integrated and sustainable public policies aimed at the Brazilian semi-arid region.

Keywords: Adaptive Water Management; Climate Resilience; Sustainability; Technological Innovation; Water Governance.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm reconfigurado as dinâmicas socioambientais e revelado, com maior nitidez, as vulnerabilidades dos sistemas hídricos, sobretudo em regiões áridas e semiáridas. A irregularidade das precipitações, aliada à elevada evapotranspiração e à degradação dos ecossistemas, tem intensificado a escassez de água, transformando-a em uma das dimensões mais críticas da crise climática contemporânea (IPCC, 2022). Tal fenômeno transcende o âmbito ambiental, afetando a segurança hídrica, alimentar e energética, e impondo desafios sociais e econômicos desproporcionalmente maiores às comunidades rurais e populações urbanas periféricas (Marengo et al., 2022; Soares; Marengo; Lemos, 2021). No contexto do semiárido brasileiro, que é reconhecido como o mais populoso do planeta, a vulnerabilidade climática é agravada por condicionantes históricos, institucionais e sociais que limitam a capacidade de adaptação das populações locais (IBGE, 2021). A convivência com secas recorrentes exige, portanto, a superação do paradigma tradicional de “combate à seca”, centrado em obras hidráulicas e políticas emergenciais, em favor de um modelo de gestão hídrica adaptativa pautado na aprendizagem contínua, na governança participativa e na incorporação de tecnologias inovadoras (Lemos; Peregrina, 2020; Albuquerque; Santos, 2021).

A gestão hídrica adaptativa, conforme proposto por Pahl-Wostl (2019), constitui uma abordagem integrada que reconhece a incerteza e a complexidade dos sistemas socioecológicos, articulando ciência, instituições e sociedade civil em processos decisórios flexíveis e responsáveis. Essa concepção dialoga com a noção de resiliência socioecológica, desenvolvida por Folke et al. (2016), segundo a qual os sistemas humanos e naturais são interdependentes e devem manter a capacidade de absorver perturbações, reorganizar-se e continuar a operar de maneira sustentável.

Sob essa perspectiva, a gestão da água deixa de se apoiar exclusivamente em infraestrutura cinza e regulação técnica, passando a integrar infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza (SbN), associadas a arranjos colaborativos de governança (UNEP, 2020). A restauração de matas ciliares, a recarga de aquíferos, o aproveitamento de águas pluviais e o controle natural da erosão têm se consolidado como alternativas de baixo carbono que conjugam eficiência hídrica e benefícios ecossistêmicos (Cousins, 2022). Essa integração entre ecologia e engenharia amplia a eficiência dos sistemas hídricos, reduz custos ambientais e fortalece a sustentabilidade territorial em contextos de escassez.

As experiências internacionais recentes corroboram a relevância dessa abordagem. As pesquisas conduzidas em regiões semiáridas da Austrália, da Espanha e da Índia evidenciam o potencial das tecnologias híbridas, como a dessalinização solar descentralizada, o reúso de águas residuais e os sistemas inteligentes de irrigação, para promover resiliência hídrica e reduzir a dependência de grandes reservatórios (Sharma et al., 2023; Rodríguez-Labajos et al., 2020). No Brasil, as políticas públicas e programas comunitários, como o Programa Cisternas e as ações da Articulação Semiárido Brasileiro (ASA), traduzem essas estratégias em práticas locais, baseadas no uso racional da água e na autonomia social (Silva; Albuquerque, 2021; Gomes et al., 2023).

Essas iniciativas reforçam o princípio da convivência com o semiárido, difundido por movimentos sociais e consolidado por intelectuais como Celso Furtado e Maria Carmen Lemos, e demonstram que a inovação tecnológica, quando articulada à participação social, constitui vetor essencial da adaptação climática. Nesse sentido, Von Sperling (2018), Santos e Albuquerque (2021) destacam que a gestão descentralizada e o saneamento ecológico configuram caminhos estratégicos para o fortalecimento da resiliência hídrica em territórios vulneráveis. Tais abordagens consideram a água não apenas como recurso econômico, mas como bem comum e direito coletivo, perspectiva que converge com os estudos de Lemos (2014; 2020), ao enfatizar a integração entre conhecimento científico, política pública e saberes locais.

A literatura recente reforça ainda que a transformação política e epistemológica é indispensável para a consolidação de um regime de governança hídrica adaptativa. Essa transformação implica incorporar a justiça climática, a equidade territorial e os saberes tradicionais no processo decisório. Os estudos de Teixeira et al. (2025), Meira Neto et al. (2024) e Pineda-Morales et al. (2025) demonstram que a integração entre planejamento participativo, tecnologias sociais e monitoramento climático tem reduzido

vulnerabilidades e promovido inclusão em comunidades semiáridas brasileiras e latino-americanas. Esse conjunto de práticas conforma um novo paradigma de adaptação, caracterizado pela flexibilidade institucional, pelo aprendi-zado coletivo e pela inovação territorial.

Diante desse panorama, formula-se a seguinte questão de pesquisa: de que modo as es-tratégias e tecnologias associadas à gestão hídrica adaptativa fortalecem a resiliência climática em regiões semiáridas, considerando os desafios socioeconômicos, ecológicos e institucionais? O objetivo geral deste estudo consiste em analisar, a partir de uma revisão bibliográfica da literatura (2014–2024), as principais estratégias, tecnologias e modelos de governança voltados à gestão hídrica adaptativa em regiões semiáridas. Especificamente, busca-se: (i) identificar tecnologias e soluções inovadoras aplicadas à gestão da água; (ii) sistematizar experiências na-cionais e internacionais de resiliência hídrica; (iii) examinar o papel das políticas públicas e da participação social na governança hídrica.

A relevância desta pesquisa decorre do reconhecimento de que a água representa o elo mais vulnerável entre o sistema climático e as dinâmicas sociais. No Semiárido brasileiro, as crises hídricas são amplificadas por desigualdades estruturais, concentração fundiária e fragili-dade institucional. Assim, compreender e difundir práticas de gestão hídrica adaptativa é fun-damental para promover resiliência territorial, justiça climática e sustentabilidade hídrica. Este artigo, ao reunir evidências científicas e integrar perspectivas locais e globais, contribui para o debate sobre transições socioambientais e para o fortalecimento de políticas públicas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6, 11 e 13) da Agenda 2030.

Por fim, destaca-se a importância da análise bibliométrica por clusters como ferramenta metodológica capaz de revelar a estrutura cognitiva e a evolução dos estudos sobre gestão hídrica adaptativa. Ao mapear a coocorrência de palavras-chave, a bibliometria identifica núcleos de conhecimento, relações conceituais e áreas emergentes, oferecendo uma visão abrangente e integrada da produção científica. No campo da gestão da água, essa abordagem permite compreender como temas como governança, tecnologias de irrigação, infraestrutura verde e segurança alimentar se articulam no debate acadêmico contemporâneo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A emergência do conceito de gestão hídrica adaptativa reflete uma mudança paradigmá-tica nas políticas ambientais contemporâneas, especialmente diante do avanço das incertezas climáticas e da crescente complexidade dos sistemas naturais e sociais. Diferentemente dos modelos tradicionais de administração dos recursos hídricos, orientados pelo controle, previsi-bilidade e pela centralidade da infraestrutura cinza, a abordagem adaptativa parte do reconhe-cimento de que os sistemas hídricos são organismos vivos e interdependentes, sujeitos a pertur-bações e transformações constantes. Assim, exige-se

uma estrutura institucional capaz de aprender, ajustar-se e evoluir de maneira contínua. Pahl-Wostl (2019) concebe essa dinâmica como um processo de *learning by doing*, no qual ciência, sociedade e poder público interagem para formular respostas flexíveis e multiescalares aos desafios impostos pela variabilidade climática.

Essa perspectiva fundamenta-se na teoria da resiliência socioecológica, segundo a qual as relações entre sociedade e natureza constituem sistemas integrados e evolutivos. Folke et al. (2016) afirmam que a resiliência de um sistema depende da sua capacidade de absorver impactos, reorganizar-se e manter a funcionalidade sem entrar em colapso. Nesse sentido, a gestão da água ultrapassa a lógica da previsibilidade hidráulica e passa a assumir uma função adaptativa e transformadora, ancorada na convivência com a mudança e não na tentativa de controle absoluto. Lemos (2014; 2020) aprofunda essa discussão ao destacar que, em regiões vulneráveis como o Semiárido brasileiro, fortalecer a capacidade institucional e social de adaptação é um imperativo. Tal processo requer a descentralização das decisões, a coprodução de conhecimento entre pesquisadores e comunidades locais e a incorporação de valores éticos, como a equidade e a justiça climática, às políticas públicas.

No Brasil, o debate sobre gestão hídrica adaptativa vem se consolidando à luz de experiências regionais de convivência com o Semiárido, as quais combinam inovação tecnológica, participação comunitária e reconfiguração institucional. Albuquerque e Santos (2021) ressaltam que a descentralização das decisões e o fortalecimento de redes locais de governança têm ampliado a autonomia das comunidades rurais diante das secas prolongadas. Essa visão é compartilhada por Lemos e Peregrina (2020), que observam que a integração entre diferentes escalas de decisão, seja local, estadual e nacional, potencializa a eficácia das estratégias adaptativas ao conectar a ciência climática às práticas cotidianas de manejo da água. Assim, a gestão hídrica adaptativa ultrapassa o campo técnico e emerge como um projeto político e cultural, orientado pela resiliência territorial e pela democratização do acesso à água.

O fortalecimento dessa abordagem está diretamente relacionado à difusão das Soluções Baseadas na Natureza (SbN), reconhecidas pelo *United Nations Environment Programme* (2020) como mecanismos eficazes de adaptação climática. As SbN utilizam processos ecológicos e serviços ambientais para enfrentar desafios como a escassez hídrica, a degradação do solo e a perda de biodiversidade. Em ambientes semiáridos, práticas como a restauração de matas ciliares, a captação de águas pluviais, a recarga de aquíferos e o manejo sustentável do solo tornam-se essenciais. Cousins (2022) demonstra que, ao integrar infraestrutura verde e cinza, amplia-se a capacidade de retenção hídrica, reduzindo a dependência de sistemas convencionais e elevando a sustentabilidade ambiental. Essas práticas representam um movimento de reconciliação entre engenharia e ecologia, redefinindo a forma como o ser humano se relaciona com os fluxos naturais da água.

No contexto brasileiro, a integração entre tecnologia, natureza e participação social tem gerado

resultados concretos e replicáveis. Experiências desenvolvidas por organizações como a Articulação Semiárido Brasileiro (ASA) e o Programa Cisternas revelam o potencial de soluções descentralizadas e de baixo custo para garantir segurança hídrica e autonomia comunitária (Silva; Albuquerque, 2021; Gomes; Silva; Albuquerque, 2023). Essas iniciativas materializam o princípio da convivência com o semiárido, ao substituir a lógica emergencial e cliente-lista de “combate à seca” por práticas sustentáveis de manejo da água adaptadas às realidades socioculturais locais. Meira Neto et al. (2024) e Sharma e Singh (2023) acrescentam que a inovação tecnológica, quando associada ao conhecimento tradicional, potencializa a resiliência hidrossocial, que fortalece simultaneamente os ecossistemas e o tecido comunitário.

Outro aspecto crucial do debate contemporâneo diz respeito ao papel das tecnologias descentralizadas de saneamento e reuso da água como componentes estruturantes da gestão adaptativa. Von Sperling (2018) observa que sistemas naturais de tratamento, como *wetlands* construídos e lagoas de estabilização, representam alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para o reaproveitamento de efluentes em regiões áridas. Quando integradas a políticas públicas de reuso e de proteção de mananciais, essas soluções reforçam o caráter preventivo e regenerativo da governança ambiental. Pesquisas de Marengo et al. (2022) e Teixeira et al. (2025) corroboram essa perspectiva ao demonstrar que tecnologias híbridas, como a dessalinização solar descentralizada, o monitoramento digital de bacias e a irrigação inteligente, vêm se consolidando como respostas eficazes à intensificação das secas e à necessidade de diversificação das fontes hídricas.

No entanto, os avanços técnicos não são suficientes sem a incorporação de um olhar crítico voltado à justiça hídrica. Conforme Rodríguez-Labajos et al. (2020) e Pineda-Morales et al. (2025), as mudanças climáticas acentuam as desigualdades no acesso à água, atingindo de forma desproporcional comunidades rurais, empobrecidas e racializadas. No Semiárido brasileiro, a escassez de água não é apenas um problema ambiental, mas um fenômeno político e estrutural, moldado pela concentração de poder e pela desigualdade na distribuição dos recursos (Soares; Marengo; Lemos, 2021). Assim, a resiliência hídrica depende tanto de inovações tecnológicas quanto de transformações sociais que promovam equidade, transparência e inclusão.

A construção de uma governança hídrica justa e participativa exige, portanto, mecanismos institucionais de inclusão social e reconhecimento dos saberes locais. Lemos (2020) e Albuquerque e Santos (2021) argumentam que a valorização dos conhecimentos empíricos de comunidades tradicionais e agricultores familiares confere legitimidade e sustentabilidade às políticas adaptativas. Essa interação entre ciência e prática social amplia o potencial de inovação e de aprendizado coletivo, transformando a gestão da água em um campo de reconfiguração institucional e cultural. Assim, a gestão hídrica adaptativa, quando fundamentada em princípios de justiça e participação, assume uma dimensão transformadora, capaz de redefinir as relações entre sociedade, tecnologia e natureza.

Em síntese, a literatura contemporânea, evidencia que o campo da gestão hídrica adaptativa se

estrutura em três dimensões interdependentes: (a) a governança adaptativa, baseada no aprendizado institucional e na flexibilidade normativa; (b) a inovação tecnológica e ecológica, ancorada em soluções baseadas na natureza e em tecnologias descentralizadas; e (c) a justiça hídrica e climática, orientada pela equidade e pela coprodução de conhecimento. A convergência dessas dimensões consolida a maturidade conceitual e política da gestão hídrica adaptativa, afirmando-a como um dos eixos centrais da resiliência climática e da sustentabilidade socio-ambiental em regiões semiáridas.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, esta pesquisa foi desenvolvida sob uma abordagem exploratória e qualitativa, fundamentada em uma revisão bibliométrica da literatura nacional e internacional sobre a temática da gestão hídrica adaptativa. Essa estratégia metodológica visa identificar lacunas teóricas, tendências emergentes e questões de investigação ainda não suficientemente exploradas na literatura científica recente.

Segundo Severino (2021), a pesquisa qualitativa busca compreender a complexidade dos fenômenos sociais, valorizando os significados, interações e contextos em que se manifestam. Nessa mesma direção, Galvão e Ricarte (2019) ressaltam que esse tipo de investigação exige rigor na descrição das fontes bibliográficas, na explicitação das estratégias de busca e na definição dos critérios de inclusão e exclusão adotados durante o processo de seleção dos estudos analisados.

Com base nesses princípios, a seleção dos artigos foi conduzida utilizando descritores específicos que refletissem os eixos conceituais centrais do tema. Para o caso desta pesquisa, foram empregados os seguintes termos de busca no Quadro 1. O período de análise delimitado compreendeu o intervalo entre 2014 e 2024, de modo a abranger as produções científicas mais recentes e alinhadas ao contexto das políticas globais de adaptação climática, especialmente após a Agenda 2030 e o Acordo de Paris.

Foram considerados elegíveis os artigos que apresentavam relação direta com os eixos da gestão adaptativa da água, resiliência socioecológica, governança ambiental e justiça climática. Excluíram-se trabalhos duplicados, documentos sem revisão por pares, relatórios técnicos e publicações com foco restrito a análises de engenharia hidráulica desvinculadas de abordagens sociais ou ambientais.

A triagem inicial resultou em um conjunto de 898 estudos, dos quais 287 foram selecionados para a análise de conteúdo. Posteriormente, foi realizada uma etapa de análise bibliométrica, com o auxílio do software *VOSviewer* (Van Eck; Waltman, 2010), visando à identificação dos clusters temáticos, das redes de coocorrência de palavras-chave e dos autores mais citados. Essa técnica permitiu compreender a estrutura cognitiva do campo científico, revelando as principais inter-relações entre governança hídrica, inovação tecnológica, soluções baseadas na natureza e justiça climática.

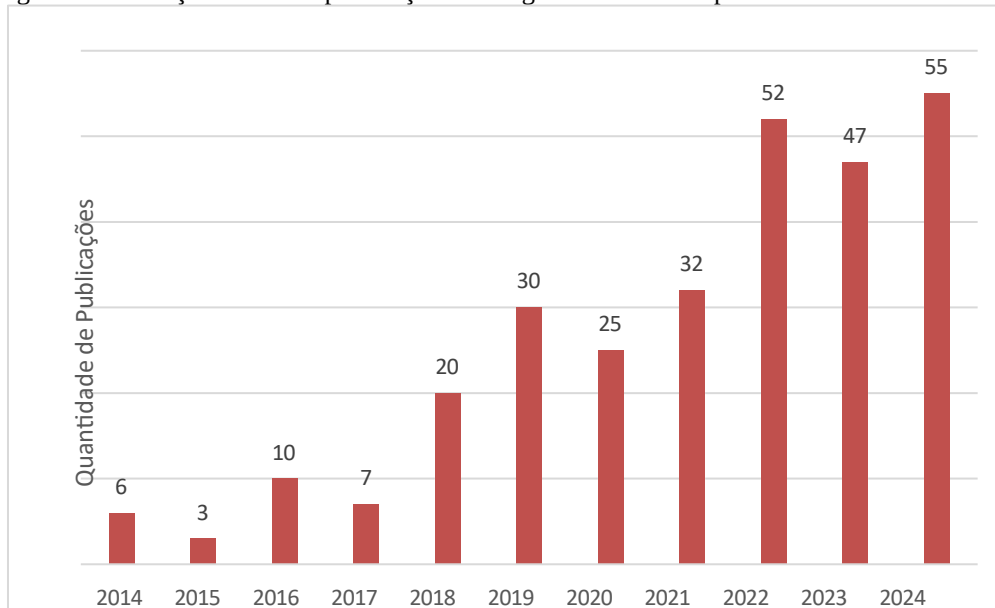
A combinação entre a análise qualitativa e a bibliometria de coocorrência possibilitou tanto a

interpretação crítica das evidências encontradas quanto a identificação de tendências emergentes na literatura. Assim, a metodologia adotada buscou assegurar transparência, repro-dutibilidade e relevância científica, conferindo solidez à análise e permitindo a construção de um panorama abrangente sobre a evolução do conhecimento relativo à gestão hídrica adaptativa em regiões semiáridas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A evolução das publicações científicas sobre gestão hídrica adaptativa e resiliência cli-mática entre 2014 e 2024, na Figura 1, revela um movimento ascendente e consolidado de in-teresse acadêmico e institucional pela temática. Até 2017, o número de estudos publicados era reduzido, inferior a dez por ano, o que indica uma fase inicial de maturação conceitual e de delimitação teórica do campo. Nesse período, as pesquisas concentravam-se sobretudo em aná-lises setoriais e estudos de caso isolados, ainda pouco integrados à agenda internacional de adaptação climática.

Figura 1 – Evolução anual das publicações sobre gestão hídrica adaptativa e resiliência climática



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados da *Web of Science* (2024).

A partir de 2018, observa-se uma inflexão significativa na curva de crescimento, mar-cada pelo avanço das discussões globais sobre mudanças climáticas, governança ambiental e inovação tecnológica. Esse aumento coincide com o fortalecimento de marcos internacionais como o Acordo de Paris (2015) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que impulsionaram a integração entre políticas públicas, ciência e tecnologias digitais. O número de publicações sobe para 20 em 2018 e alcança 30 em 2019, evidencia um esforço coletivo da comunidade científica para compreender a complexidade da gestão hídrica sob condições de incerteza climática.

Entre 2020 e 2021, o ritmo de crescimento mantém-se estável, com média de 28 publicações anuais, refletindo um período de consolidação teórica e metodológica. Nesse intervalo, destacam-se estudos que exploram o uso de sensoriamento remoto, modelagem preditiva e inteligência artificial na gestão dos recursos hídricos (Silva; Moura, 2022), bem como pesquisas que associam políticas adaptativas, justiça climática e segurança hídrica (Lemos; Peregrina, 2020; Pereira et al., 2023).

A partir de 2022, o campo entra em franca expansão, com 52 publicações, atingindo seu ápice em 2024, com 55 trabalhos registrados. Essa intensificação está relacionada à consolidação da gestão hídrica adaptativa como uma área interdisciplinar emergente, capaz de articular contribuições da engenharia ambiental, ciências sociais, geotecnologias e estudos climáticos. Observa-se, ainda, o protagonismo crescente de instituições latino-americanas, especialmente brasileiras, que têm contribuído para ampliar o debate sobre inovação tecnológica, governança da água e resiliência territorial (Marengo et al., 2022; Albuquerque; Santos, 2021).

Em síntese, a tendência identificada demonstra não apenas o avanço quantitativo das produções, mas também uma mudança qualitativa no enfoque das pesquisas, que passam de análises descritivas para abordagens sistêmicas e preditivas. Esse amadurecimento teórico-metodológico reflete o esforço global por integrar conhecimento científico, tecnologias digitais e políticas públicas na busca por soluções sustentáveis diante das transformações climáticas. Assim, o crescimento da literatura no período analisado confirma a relevância estratégica do tema e evidencia o papel central da ciência na construção de uma governança hídrica inovadora, equitativa e orientada à resiliência climática.

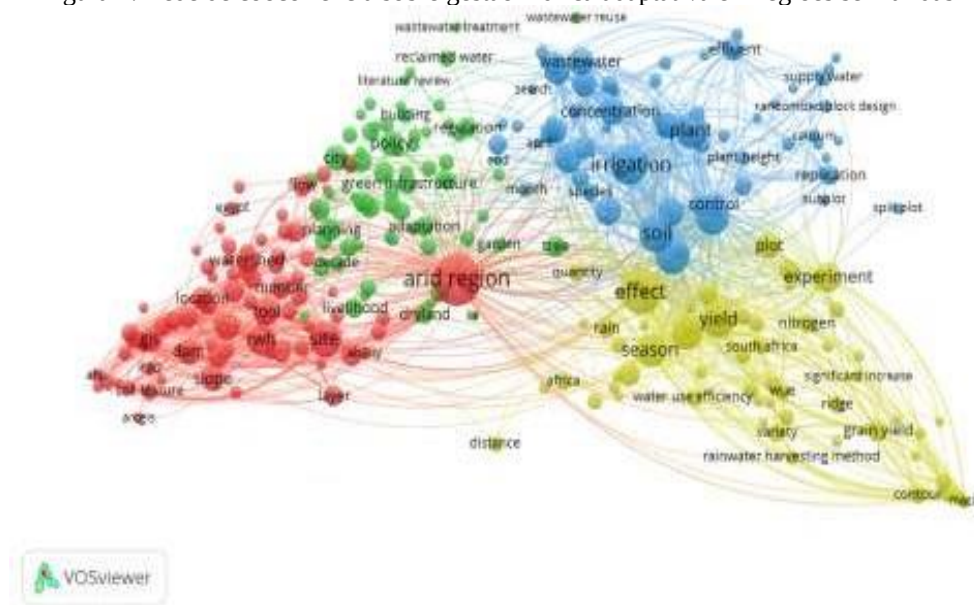
4.1 MAPEAMENTO TEMÁTICO DA LITERATURA SOBRE GESTÃO HÍDRICA ADAPTATIVA

A Figura 2 apresenta a estrutura de clusters temáticos obtida a partir da coocorrência de palavras-chave na produção científica sobre gestão hídrica adaptativa. O mapa revela quatro agrupamentos principais: o Cluster azul, que se concentra em irrigação, solo e eficiência hídrica, que representa a vertente tecnológica e agrônômica; o Cluster amarelo, que aborda produção agrícola, rendimento e variações sazonais, com foco em impactos sobre produtividade e manejo; o Cluster verde, relacionado à adaptação, infraestrutura verde e governança, que permite refletir a dimensão institucional e ecológica; e por fim, o Cluster vermelho, associado a planejamento territorial, gestão de bacias e ferramentas geoespaciais (como GIS e modelagem hidrológica).

O primeiro cluster, na cor vermelha, está associado ao planejamento territorial e ao uso de ferramentas geoespaciais, reunindo termos como *watershed*, *gis*, *dam*, *slope* e *rainwater harvesting (rwh)*. Esses elementos destacam a centralidade das abordagens de geoprocessamento, modelagem espacial e sensoriamento remoto na análise de bacias hidrográficas e na avaliação da viabilidade de técnicas de colheita de água da chuva. Ao articular tecnologia digital com manejo territorial, esse núcleo reforça que a gestão

adaptativa da água requer não apenas instrumentos normativos e sociais, mas também o domínio de ferramentas quantitativas capazes de orientar políticas públicas e decisões de engenharia em contextos semiáridos.

Figura 2: Rede de coocorrência sobre gestão hídrica adaptativa em regiões semiáridas



Fonte: Elaboração própria.

O segundo cluster, na cor verde, enfatiza o papel da governança e das políticas públicas, incluindo termos como *policy*, *regulation*, *adaptation*, *green infrastructure* e *city*. Essa dimensão indica que a resiliência hídrica não pode ser compreendida apenas como resultado de soluções técnicas, mas deve ser analisada à luz dos arranjos institucionais e regulatórios que viabilizam a implementação de estratégias de adaptação. A presença de termos ligados à infraestrutura verde e às soluções baseadas na natureza (SbN) evidencia a incorporação de paradigmas sustentáveis às agendas urbanas e rurais, ressaltando que a adaptação climática depende tanto de participação comunitária e engajamento social quanto de mecanismos normativos eficazes.

O cluster azul reúne palavras-chave como *irrigation*, *soil*, *plant*, *wastewater* e *reuse*, associadas a práticas de manejo agrícola e tecnologias experimentais. Este núcleo aponta para a crescente relevância de pesquisas aplicadas que tratam da eficiência do uso da água, da irrigação de precisão e do reuso de águas residuais tratadas como estratégias para mitigar os efeitos da variabilidade climática sobre a agricultura em regiões semiáridas. Ao integrar ciência do solo, agronomia e engenharia hídrica, esses estudos revelam o papel das inovações tecnológicas no fortalecimento da segurança hídrica e alimentar.

Por sua vez, o cluster amarelo, composto por termos como *yield*, *grain yield*, *water use efficiency* e *rainwater harvesting method*, conecta-se diretamente à dimensão da produtividade agrícola e da segurança alimentar. Esse grupo de estudos enfatiza a relação entre disponibilidade hídrica, uso eficiente da água,

manejo de nutrientes (como o nitrogênio) e rendimento das culturas, reforçando que a gestão adaptativa não se limita à proteção ambiental, mas está pro-fundamente vinculada à sustentabilidade econômica e à resiliência das cadeias produtivas agrí-colas.

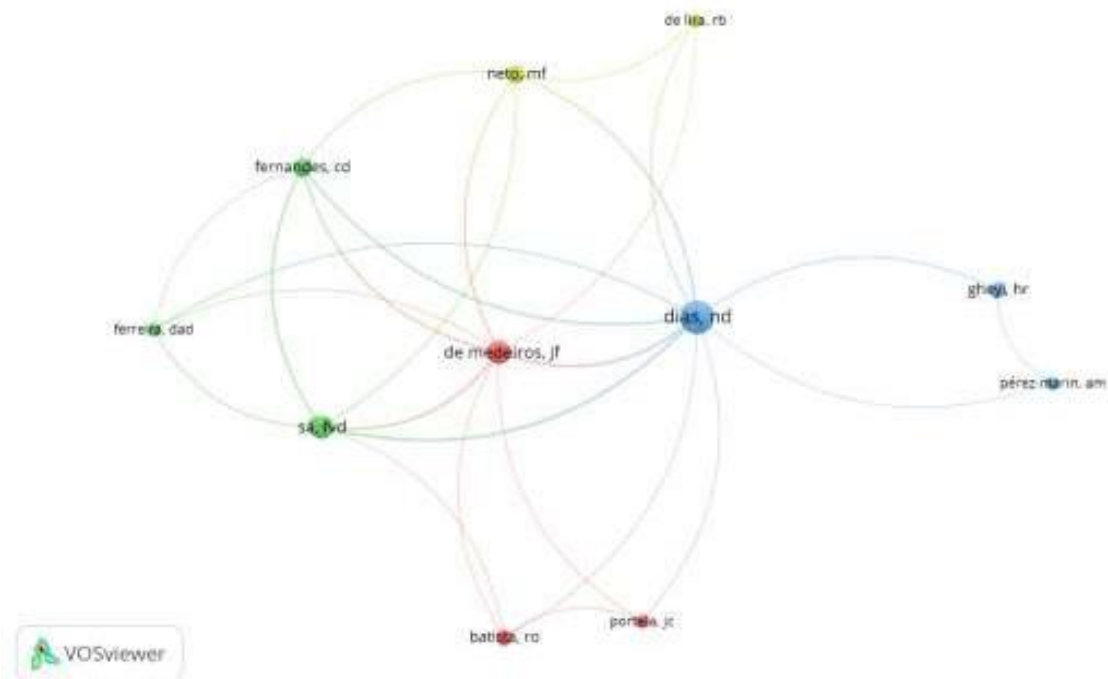
Ao integrar esses quatro núcleos, observa-se que a literatura internacional e brasileira sobre gestão hídrica adaptativa articula-se em torno de três grandes dimensões complementares: (i) espacial-tecnológica, voltada ao planejamento territorial e ao uso de ferramentas digitais; (ii) institucional-sociopolítica, centrada na governança, nas políticas públicas e na adoção de solu-ções baseadas na natureza; e (iii) agroprodutiva e tecnológica, ligada à irrigação eficiente, ao reuso de águas e à segurança alimentar. A interconexão entre esses clusters revela que a resili-ência hídrica em regiões semiáridas é resultado de processos que envolvem simultaneamente ciência, tecnologia, políticas públicas e participação social.

Em síntese, os resultados bibliométricos confirmam que a gestão hídrica adaptativa é um campo de caráter interdisciplinar e multiescalar, no qual as soluções efetivas emergem da interação entre inovação tecnológica, planejamento territorial e justiça hídrica. Essa constatação reforça a necessidade de políticas integradas que conciliem infraestrutura verde, governança participativa e eficiência agrícola, consolidando a gestão adaptativa como pilar fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas no semiárido.

4.2 REDE DE COAUTORIA E PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A análise de coautoria apresentada na Figura 3 permite compreender a estrutura de co-laboração entre os principais pesquisadores que atuam no campo da gestão hídrica adaptativa e resiliência climática no contexto do Semiárido brasileiro. O mapeamento, elaborado a partir dos dados extraídos da base *Web of Science*, evidencia a existência de núcleos interconectados de produção científica, nos quais se destacam pesquisadores com ampla influência acadêmica e forte atuação colaborativa.

Figura 3: Rede de coautoria entre pesquisadores sobre gestão hídrica adaptativa



Fonte: Elaboração própria com base em dados da Web of Science e VOSviewer.

O nó central, representado por N. D. Dias, ocupa posição de destaque na rede, evidenciando sua relevância na articulação de parcerias e na difusão do conhecimento sobre gestão de recursos hídricos e tecnologias adaptativas. Sua atuação conecta diferentes subgrupos temáticos e estabelece uma ponte entre pesquisadores nacionais e internacionais. Essa centralidade revela não apenas a liderança científica do autor, mas também sua capacidade de promover o intercâmbio interdisciplinar entre engenheiros ambientais, agrônomos e especialistas em políticas públicas voltadas à segurança hídrica.

Entre os principais colaboradores associados a esse núcleo, destacam-se H. R. Ghayi, A. M. Pérez-Marín, J. F. de Medeiros, F. V. S. Sá, M. F. Neto, C. D. Fernandes e D. A. D. Ferreira. Esses pesquisadores integram grupos de elevada produtividade científica vinculados a universidades e instituições de pesquisa, contribuindo para o fortalecimento das redes de cooperação e para a ampliação da produção científica relacionada à gestão hídrica e às estratégias de adaptação às condições ambientais federais do Nordeste, como a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), instituições que têm se consolidado como polos de excelência na pesquisa aplicada ao uso eficiente da água e inovação em irrigação sustentável (Medeiros; Ghayi; Albuquerque, 2021).

A rede também revela a formação de clusters temáticos regionais, que refletem diferentes abordagens metodológicas e áreas de especialização. O grupo liderado por De Medeiros, J. F., por exemplo, concentra-se na gestão hídrica e manejo agrícola inteligente, abordando tecnologias de irrigação, sensores de umidade e eficiência no uso da água. Já o cluster associado a Sá, F. V. D. e Fernandes, C. D. enfatiza a dimensão ecológica da resiliência, explorando estratégias de mitigação da salinidade e conservação do

solo em ambientes semiáridos.

Além disso, a presença de autores estrangeiros como Gheyi, H. R. e Pérez-Marín, A. M. reforça a internacionalização da produção científica brasileira, evidenciando o fortalecimento das redes de pesquisa em cooperação Sul-Sul e Norte-Sul. Essa integração amplia o alcance dos estudos desenvolvidos no Brasil e promove o intercâmbio de metodologias inovadoras, especialmente na aplicação de modelos climáticos, agricultura de precisão e governança participativa (Soares; Marengo; Lemos, 2021).

De forma geral, a configuração da rede demonstra uma estrutura colaborativa relativamente densa, com interações consistentes entre os autores mais produtivos, embora ainda concentrada em poucos centros de pesquisa. Tal concentração evidencia tanto a especialização temática quanto a necessidade de ampliar a descentralização das investigações, envolvendo novos grupos e instituições emergentes. Essa ampliação é essencial para fortalecer o campo da gestão hídrica adaptativa como área interdisciplinar, capaz de articular tecnologia, governança e justiça climática (Albuquerque; Santos, 2021; Marengo et al., 2022).

Em síntese, a análise da rede de coautoria revela que o avanço da pesquisa sobre resiliência hídrica e adaptação climática no Semiárido brasileiro resulta de um esforço coletivo, sustentado por parcerias acadêmicas sólidas e por uma crescente articulação institucional. A predominância de conexões entre universidades nordestinas e centros internacionais de pesquisa indica uma maturidade científica crescente, que contribui para consolidar o Brasil como referência na produção de conhecimento sobre gestão hídrica sustentável e inovação tecnológica em contextos de vulnerabilidade climática.

5 CONCLUSÃO

A análise desenvolvida neste estudo evidencia que a gestão hídrica adaptativa se consolidou como uma abordagem estratégica diante da intensificação dos impactos das mudanças climáticas nas regiões semiáridas. Entre os anos de 2014 e 2024, observa-se um crescimento expressivo da produção científica sobre o tema, refletindo o amadurecimento de um campo interdisciplinar que integra ciência, tecnologia e sociedade na busca por soluções sustentáveis e inclusivas para a escassez hídrica.

Os resultados demonstram que o conceito de gestão adaptativa ultrapassa a dimensão técnica da administração de recursos hídricos, assumindo um caráter sistêmico, participativo e transformador. Essa mudança de paradigma reflete uma evolução da lógica de controle e infra-estrutura cinza para um modelo baseado na resiliência socioecológica, que reconhece a interdependência entre sistemas naturais e humanos. A literatura analisada reforça que a capacidade adaptativa depende da articulação entre inovação tecnológica, governança colaborativa e justiça hídrica, pilares essenciais para enfrentar os desafios climáticos contemporâneos.

As evidências apontam que experiências brasileiras, como o Programa Cisternas e as iniciativas da Articulação Semiárido Brasileiro (ASA), representam avanços significativos na integração entre

tecnologias sociais e políticas públicas. Essas ações reforçam a importância da autonomia comunitária e da valorização dos saberes locais, elementos centrais para a consolidação de práticas de convivência com o semiárido que superam a lógica assistencialista e se baseiam na sustentabilidade e na equidade.

A análise das redes de coautoria e dos clusters temáticos revelou um panorama científico cada vez mais articulado e colaborativo, com destaque para a atuação de instituições brasileiras em cooperação com centros internacionais. Essa rede de pesquisadores tem contribuído para o desenvolvimento de novas metodologias, como a irrigação inteligente, o reúso de águas residuais e o uso de soluções baseadas na natureza (SbN), consolidando o Brasil como um importante polo de inovação aplicada à gestão hídrica.

Entretanto, a concentração geográfica das pesquisas e a predominância de abordagens tecnológicas indicam a necessidade de ampliar os esforços para incluir dimensões sociais, culturais e institucionais no debate científico. O fortalecimento de políticas públicas integradas, voltadas à descentralização da gestão e ao fortalecimento das capacidades locais, constitui um desafio e, ao mesmo tempo, uma oportunidade para aprimorar a governança hídrica adaptativa.

Em síntese, este estudo conclui que a gestão hídrica adaptativa deve ser compreendida como uma estratégia de transição socioambiental, capaz de articular inovação tecnológica, ciência participativa e justiça climática. Ao promover a integração entre conhecimento técnico e práticas comunitárias, essa abordagem reforça o papel do Brasil como referência em políticas de resiliência hídrica e sustentabilidade climática. Recomenda-se, portanto, o aprofundamento de pesquisas que explorem a interface entre inteligência climática, tecnologias emergentes e governança participativa, de modo a orientar políticas públicas e fortalecer a cooperação científica internacional em torno da segurança hídrica e da adaptação climática.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos que viabilizou esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023**: Regiões hidrográficas e Semiárido. Brasília: ANA, 2023.

ALBUQUERQUE, S. M. A.; SANTOS, C. A. M. dos. Governança participativa e segurança hídrica no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, n. 3, 2021.

COUSINS, J. J. Infrastructure and the Anthropocene: adaptive water governance in a changing climate. **Water Research**, v. 219, p. 118–149, 2022.

FOLKE, C. et al. Social-ecological resilience and biosphere-based sustainability science. **Ecology and Society**, v. 21, n. 3, 2016.

GOMES, L. R.; SILVA, R. F.; ALBUQUERQUE, M. P. Tecnologias sociais e segurança hídrica no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 10, n. 4, 2023.

GRAFTON, R. Q. et al. Adaptive water governance under uncertainty. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 52, p. 68–75, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Semiárido brasileiro: quadro geográfico. Rio de Janeiro: **IBGE**, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/quadrogeografico/pdf/21_Semiarido.pdf.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LEMOS, M. C.; PEREGRINA, C. H. Building adaptive capacity to extreme events in Brazil: participation, climate information and water reform. **WIREs Water**, v. 7, e1477, 2020.

MARENGO, J. A. et al. Extreme drought in Northeast Brazil and associated impacts on water resources and livelihoods. **Climate Risk Management**, v. 36, p. 100–412, 2022

MEIRA NETO, R. A. et al. Evolution of drought mitigation and water security through 100 years of reservoir expansion in semi-arid Brazil. **Water Resources Research**, v. 60, 2024.

PAHL-WOSTL, C. Adaptive and integrated water management: coping with complexity and uncertainty. 2. ed. Heidelberg: **Springer**, 2019.

PEREIRA, G. D. et al. Digital transformation and water security: integrating smart data and governance. **Environmental Science & Policy**, v. 154, p. 95–108, 2023.

PINEDA-MORALES, A. et al. Water governance and household adaptation in Latin America. **Sustainability Science**, v. 20, 2025.

RODRÍGUEZ-LABAJOS, B.; PASCUAL, U.; MURADIAN, R. Social dimensions of water management under climate stress. **Environmental Science & Policy**, v. 108, p. 15–27, 2020.

SHARMA, A.; SINGH, R. Solar desalination technologies for arid regions. **Renewable Energy**, v. 210, p. 945–962, 2023.

SILVA, J. P.; MOURA, A. R. Transformação digital e sustentabilidade: a inteligência artificial no enfrentamento das mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Políticas Públicas e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 1, p. 89–107, 2022.

SILVA, R. F.; ALBUQUERQUE, M. P. Cisternas e gestão comunitária da água: um modelo de adaptação no semiárido brasileiro. **Ambiente & Sociedade**, v. 24, e02641, 2021.

SOARES, W. A.; MARENGO, J. A.; LEMOS, M. C. Climate change and water security challenges in the Brazilian semi-arid. **Journal of Environmental Management**, v. 290, 2021.

TEIXEIRA, M. F. et al. Integrating resilience and socioeconomic demands through adaptive water governance. **Environmental Science & Policy**, v. 160, 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Nature-based solutions for water**. Nairobi: UNEP, 2020.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 5. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2018.