

Extração intensiva de águas subterrâneas frente à escassez hídrica: revisão dos impactos no abastecimento urbano

 <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2026.v10.2180>

Daniel Santos Costa¹
Giulliano Guimarães Silva²
Elaine da Cunha Silva Paz³
Cláudia da Silva Aguiar Rezende⁴

Data de submissão concluída: 4/5/2026. Data de aprovação: 11/9/2026. Data de publicação: 2/10/2026.

Resumo – Esta revisão sistemática da literatura examina os impactos da extração intensiva de água subterrânea em sistemas urbanos de abastecimento público de água, enfatizando as implicações para a gestão municipal. A estrutura Population, Interest, Context (PICO) orientou a questão de pesquisa, com buscas realizadas no *Scopus* e na *Web of Science* utilizando termos como ‘superexploração de água subterrânea’ e ‘abastecimento público de água’, resultando em 10 estudos selecionados por meio da triagem PRISMA (de 132 registros iniciais). Os resultados destacam impactos quantitativos (declínio piezométrico em 80% dos casos), efeitos qualitativos (mobilização de contaminantes e intrusão salina) e desafios sistêmicos (vulnerabilidade operacional e lacunas de governança), prevalentes em contextos urbanos da Ásia, EUA e Europa. Conclui-se que a sustentabilidade exige monitoramento integrado, diversificação de fontes e limites de extração, alinhados à Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil. A síntese qualitativa ressalta a necessidade de abordagens sistêmicas para mitigar os riscos em municípios dependentes de aquíferos.

Palavras-chave: Abastecimento público. Águas subterrâneas. Extração intensiva. Gestão municipal. Segurança hídrica.

Intensive groundwater extraction in the face of water scarcity: a review of the impacts on urban water supply

Abstract – This systematic literature review examines the impacts of intensive groundwater extraction on urban public water supply systems, emphasizing the implications for municipal management. The Population, Interest, Context (PICO)

¹ Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental do *Campus* Palmas, do Instituto Federal do Tocantins. Palmas, Tocantins, Brasil.  danielcostaengenheiro@gmail.com  <https://orcid.org/0009-0008-1943-8658>  <http://lattes.cnpq.br/1965698469815058>.

² Doutor em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Ribeirão Preto. Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico da área de Engenharia e Saneamento Ambiental do *Campus* Palmas, do Instituto Federal do Tocantins. Palmas, Tocantins, Brasil.  giullianogsilva@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-9606-3959>  <http://lattes.cnpq.br/0470770672839769>.

³ Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Ribeirão Preto. Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, atuando no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil e Ambiental, do *Campus* Palmas, do Instituto Federal do Tocantins. Palmas, Tocantins, Brasil.  elaine@ifto.edu.br  <https://orcid.org/0000-0001-9108-6249>  <http://lattes.cnpq.br/8015425935065463>.

⁴ Doutora em Biodiversidade e Biotecnologia pela Universidade Federal do Tocantins. Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico, atuando no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Civil e Ambiental, do *Campus* Palmas, do Instituto Federal do Tocantins. Professora do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental do *Campus* Palmas, da Universidade Federal do Tocantins. Palmas, Tocantins, Brasil.  claudia@ifto.edu.br  <https://orcid.org/0000-0001-5139-1601>  <http://lattes.cnpq.br/5710697952269743>.

framework guided the research question, with searches conducted in Scopus and Web of Science using terms such as "groundwater overexploitation" and "public water supply," resulting in 10 studies selected through PRISMA screening (from 132 initial records). The results highlight quantitative impacts (piezometric decline in 80% of cases), qualitative effects (contaminant mobilization and saline intrusion), and systemic challenges (operational vulnerability and governance gaps), prevalent in urban contexts in Asia, the USA, and Europe. It concludes that sustainability requires integrated monitoring, diversification of sources, and extraction limits, aligned with Brazil's National Water Resources Policy. The qualitative synthesis emphasizes the need for systemic approaches to mitigate risks in aquifer-dependent municipalities.

Keywords: Intensive extraction. Municipal management. Public water. Supply groundwater. Water security.

Extracción intensiva de aguas subterráneas ante la escasez hídrica: una revisión de los impactos en el suministro de agua urbana

Resumen – Esta revisión sistemática de la literatura examina los impactos de la extracción intensiva de agua subterránea en los sistemas de abastecimiento público de agua urbanos, haciendo hincapié en las implicaciones para la gestión municipal. El marco Población, Interés, Contexto (PICo) guió la pregunta de investigación, con búsquedas realizadas en Scopus y Web of Science utilizando términos como "sobree explotación de agua subterránea" y "abastecimiento público de agua", lo que resultó en 10 estudios seleccionados mediante el filtro PRISMA (de 132 registros iniciales). Los resultados resaltan impactos cuantitativos (disminución piezométrica en el 80% de los casos), efectos cualitativos (movilización de contaminantes e intrusión salina) y desafíos sistémicos (vulnerabilidad operativa y deficiencias en la gobernanza), prevalentes en contextos urbanos de Asia, Estados Unidos y Europa. Se concluye que la sostenibilidad requiere un monitoreo integrado, diversificación de fuentes y límites de extracción, en consonancia con la Política Nacional de Recursos Hídricos de Brasil. La síntesis cualitativa enfatiza la necesidad de enfoques sistémicos para mitigar los riesgos en los municipios que dependen de acuíferos.

Palabras clave: Aguas subterráneas. Extracción intensiva. Gestión municipal. Seguridad hídrica. Suministro público de agua.

Introdução

A água subterrânea constitui uma das principais fontes de abastecimento de água potável no mundo, desempenhando papel fundamental no atendimento às demandas urbanas e rurais. Em diferentes regiões, especialmente em contextos de variabilidade climática, do crescimento populacional e das limitações das fontes superficiais, os aquíferos assumem importância estratégica para a segurança hídrica e para a estabilidade dos sistemas de abastecimento. No Brasil, essa relevância é evidenciada pela ampla utilização das águas subterráneas no abastecimento urbano, particularmente em municípios do estado de São Paulo, onde parcela significativa das cidades é abastecida total ou parcialmente por esse recurso (Goodarzi *et al.*, 2024).

Estudos recentes indicam que a combinação entre urbanização acelerada e variabilidade climática tem intensificado a pressão sobre os aquíferos urbanos, ampliando os riscos de superexploração e de redução da disponibilidade hídrica (Riaz; Nijhuis; Bobbink, 2025). Tendências globais recentes confirmam aceleração do declínio de níveis piezométricos em 30% dos aquíferos regionais, especialmente em

áreas secas com agricultura intensiva, agravando a vulnerabilidade urbana (Jasechko *et al.*, 2024).

Entretanto, o aumento contínuo da demanda hídrica associado à urbanização, industrialização e intensificação das atividades econômicas tem ampliado a pressão sobre diversos sistemas aquíferos, especialmente em regiões onde as taxas de extração se aproximam ou superam a recarga natural. Estudos globais mostram que a exploração de águas subterrâneas ocorre frequentemente em níveis superiores às taxas naturais de recarga, resultando em processos de esgotamento, rebaixamento do nível freático e alterações nos fluxos hidrológicos regionais (Wada *et al.*, 2010; Taylor *et al.*, 2013; Rodell; Velicogna; Famiglietti, 2009). Esse fenômeno tem sido associado ao conceito de 'limite de extração aquífera', no qual a retirada de água atinge um ponto crítico seguido por declínio progressivo da disponibilidade (Bhalla *et al.*, 2025). No contexto brasileiro, evidências recentes apontam situação semelhante em aquíferos urbanos: em Sete Lagoas (MG), a extração de água subterrânea por poços tubulares superou a capacidade máxima estimada de recarga do sistema, caracterizando um cenário de sobre-exploração (Schuch *et al.*, 2023). Esses processos podem comprometer não apenas a disponibilidade futura do recurso, mas também o desempenho técnico e econômico dos sistemas de abastecimento que dele dependem.

Além dos impactos quantitativos, a literatura recente destaca a crescente interdependência entre quantidade e qualidade da água subterrânea. A intensificação do bombeamento pode alterar os gradientes hidráulicos, favorecendo processos de intrusão salina em aquíferos costeiros, a mobilização de contaminantes naturais e o aumento da vulnerabilidade à poluição antrópica. Esses processos podem elevar os custos de tratamento, restringir a utilização de determinadas captações e reduzir a confiabilidade dos sistemas de abastecimento (Custodio, 2002; Famiglietti, 2014). Estudos recentes no Brasil também apontam para a ocorrência de salinização em áreas sujeitas à exploração de águas subterrâneas, evidenciando a necessidade de monitoramento da qualidade da água em regiões costeiras e de maior pressão sobre os recursos hídricos (Araújo; Moraes, 2025). Dessa forma, a exploração intensiva de aquíferos representa não apenas um desafio hidrogeológico, mas também um problema operacional e institucional para os serviços de abastecimento urbano.

Nos últimos anos, observa-se uma mudança de paradigma na literatura científica, que passa a tratar a gestão das águas subterrâneas sob uma perspectiva integrada, considerando simultaneamente aspectos hidrológicos, socioeconômicos e de governança, com ênfase na governança municipal em cidades médias. A sustentabilidade do abastecimento urbano deixa de ser focada exclusivamente como função da disponibilidade física do recurso, passando a depender da capacidade institucional de planejamento, monitoramento e adaptação frente a cenários de incerteza climática e aumento da demanda (Gleeson *et al.*, 2020; Mukherjee; Famiglietti, 2021). No Brasil, iniciativas voltadas ao aprimoramento do monitoramento e da gestão dos recursos hídricos reforçam a importância de sistemas integrados de informações para subsidiar decisões e políticas públicas, como demonstrado pelo desenvolvimento do sistema de monitoramento e gestão dos recursos hídricos no estado do Tocantins (Batista; Silva; Martins, 2025). Assim, a gestão sustentável das águas subterrâneas requer não apenas o controle das taxas de extração, mas também mecanismos permanentes de monitoramento e planejamento capazes de relacionar a disponibilidade do recurso às demandas e aos riscos associados ao abastecimento urbano.

Apesar desses avanços, ainda se observa uma lacuna na sistematização das evidências que se relacionam diretamente com a exploração intensiva de águas subterrâneas aos impactos sobre o desempenho e a sustentabilidade dos sistemas públicos de abastecimento de água. Embora existam estudos voltados à depleção dos aquíferos, à alteração da qualidade da água, à subsidência do terreno e aos aspectos de governança, essas abordagens frequentemente são apresentadas de forma fragmentada, sem uma síntese abrangente de suas implicações para os sistemas de abastecimento urbano. Nesse contexto, esta revisão busca responder à seguinte questão, estruturada segundo a estratégia PICO: 'Quais são os impactos da exploração intensiva de águas subterrâneas sobre os sistemas públicos de abastecimento de água e quais são suas implicações para a gestão municipal?'. A sistematização dessas evidências pode contribuir para a compreensão dos principais riscos associados à dependência de águas subterrâneas e para o aprimoramento de estratégias de planejamento, monitoramento e gestão da segurança hídrica em ambientes urbanos.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, os impactos decorrentes da exploração de águas subterrâneas sobre o desempenho e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento de água, buscando identificar os principais impactos reportados na literatura e suas implicações para o planejamento, o monitoramento e a gestão da segurança hídrica em ambientes urbanos.

Materiais e métodos

Tipo de pesquisa

O presente estudo caracteriza-se como uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida com o objetivo de identificar, analisar e sintetizar evidências científicas relacionadas aos impactos da extração intensiva de águas subterrâneas sobre sistemas públicos de abastecimento de água. A revisão sistemática foi adotada por permitir um processo estruturado, transparente e reprodutível de identificação, seleção e análise de estudos relevantes, reduzindo vieses na interpretação dos resultados e possibilitando a consolidação do conhecimento disponível sobre o tema.

A condução da revisão seguiu etapas sistemáticas de definição da pergunta de pesquisa, estabelecimento da estratégia de busca, aplicação de critérios de inclusão e exclusão, seleção dos estudos e análise qualitativa dos resultados encontrados.

Definição da pergunta de pesquisa

A definição da pergunta de pesquisa foi realizada com base na estratégia PICO, amplamente utilizada em revisões sistemáticas voltadas às áreas ambientais e de gestão de recursos hídricos. A aplicação dessa estratégia permitiu delimitar o escopo da investigação e orientar a construção da estratégia de busca.

Neste estudo, os elementos do PICO foram definidos da seguinte forma:

Population (P): sistemas urbanos de abastecimento de água dependentes de recursos hídricos subterrâneos; Interest (I): extração intensiva ou exploração excessiva de águas subterrâneas; Context (Co): impactos sobre o abastecimento público e implicações para a gestão municipal dos recursos hídricos.

Tabela 1 – Estratégia PICO

Elemento	Definição no estudo	Termos associados utilizados na busca
P (População)	Sistemas públicos de abastecimento de água urbana dependentes de águas subterrâneas	public water supply; urban water supply; drinking water supply; water utility
I (Interesse)	Extração intensiva de águas subterrâneas e seus efeitos sobre a disponibilidade e qualidade da água	groundwater overexploitation; intensive groundwater abstraction; groundwater depletion
Co (Contexto)	Escassez hídrica e gestão municipal do abastecimento de água	water scarcity; drought; urban water management

Fonte: Elaborado pelos aurores (2026).

A partir dessa estrutura, estabeleceu-se a seguinte pergunta de pesquisa: ‘Quais são os impactos da extração intensiva de águas subterrâneas sobre os sistemas públicos de abastecimento de água e quais são suas implicações para a gestão municipal?’

Estratégia de busca e base de dados

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*, selecionadas por sua ampla cobertura de periódicos científicos revisados por pares nas áreas de engenharia ambiental, recursos hídricos e gestão do saneamento.

As buscas foram realizadas no mês de janeiro de 2026, sem restrição inicial de período de publicação, visando abranger a evolução histórica e os avanços recentes relacionados à exploração intensiva de águas subterrâneas e seus impactos sobre sistemas públicos de abastecimento.

A estratégia de busca foi construída a partir dos elementos definidos na estrutura PICO, combinando termos relacionados à extração de águas subterrâneas e ao abastecimento público. Foram utilizados operadores booleanos (AND, OR) para ampliar e refinar os resultados.

A *string* final utilizada foi: “(*“groundwater overexploitation”* OR *“groundwater depletion”* OR *“intensive groundwater abstraction”*) AND (*“public water supply”* OR *“urban water supply”* OR *“drinking water supply”* OR *“water utility”*)”.

Foram considerados elegíveis artigos publicados nos idiomas inglês e português. Após a realização das buscas, os resultados foram exportados para o gerenciador de referências Mendeley®, onde foi realizada a organização inicial dos registros e a remoção de documentos duplicados.

Crerérios de inclusão e exclusão

Após a consolidação dos resultados e remoção das duplicidades, os estudos foram submetidos a um processo de triagem em duas etapas: (i) análise de título e resumo e (ii) leitura do texto completo.

Foram considerados elegíveis artigos científicos completos, publicados em periódicos revisados por pares, nos idiomas inglês e português.

Critérios de inclusão

Foram incluídos na revisão sistemática os estudos que atenderam simultaneamente aos seguintes critérios:

- abordaram a extração ou a exploração intensiva de águas subterrâneas;
- analisaram impactos relacionados à quantidade e/ou à qualidade da água subterrânea;
- apresentaram relação direta com o abastecimento público, abastecimento urbano ou segurança hídrica;
- discutiram consequências operacionais, ambientais, econômicas ou institucionais associadas ao uso intensivo de aquíferos;
- consistiram em artigos científicos completos publicados em periódicos revisados por pares.

Critérios de exclusão

Foram excluídos da revisão os estudos que:

- abordaram exclusivamente irrigação agrícola ou uso industrial sem relação com o abastecimento público;
- trataram apenas de modelagem hidrogeológica teórica, sem discussão das implicações para sistemas de abastecimento;
- focaram exclusivamente em tecnologias de tratamento de água sem relação com a exploração do recurso subterrâneo;
- analisaram apenas técnicas de recarga artificial, governança ou políticas públicas sem conexão direta com impactos sobre o abastecimento.

Processo de seleção dos estudos

O processo de seleção dos estudos foi conduzido em etapas sucessivas, seguindo as recomendações metodológicas para revisões sistemáticas da literatura e as diretrizes *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA 2020).

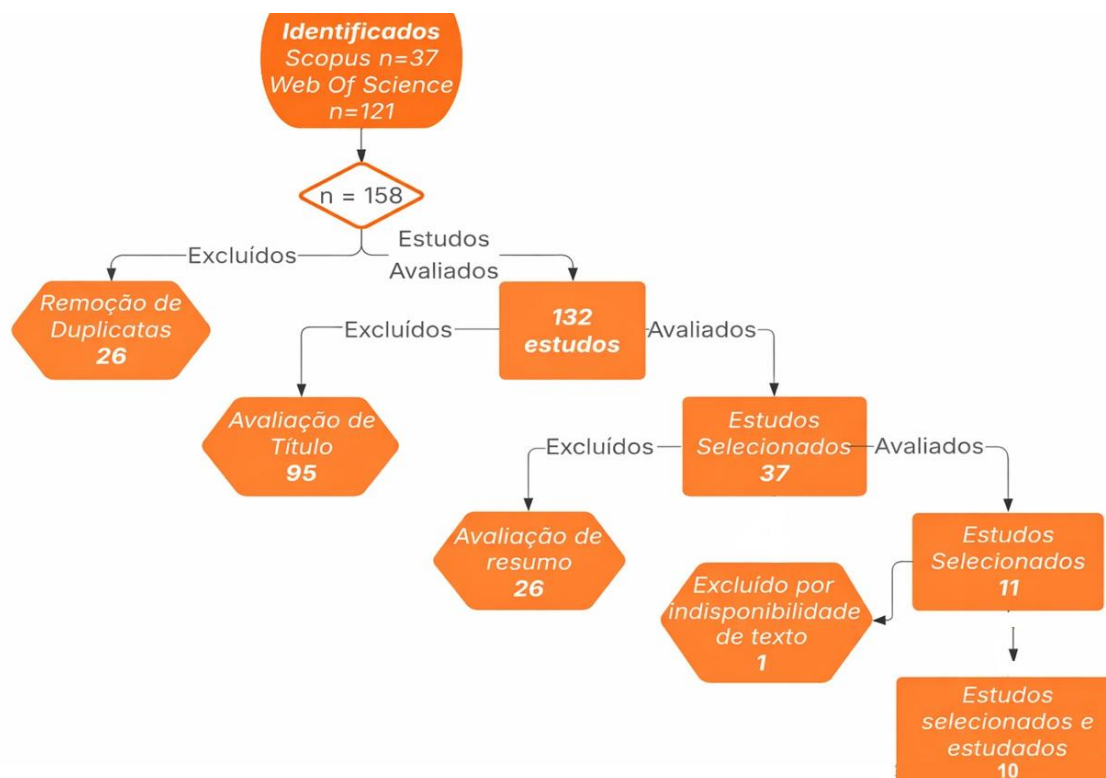
Inicialmente, os estudos identificados nas bases de dados foram exportados para o software de gerenciamento bibliográfico Mendeley®, onde foi realizada a organização das referências e a remoção automática e manual de registros duplicados. Ao final dessa etapa, permaneceram 132 estudos para análise.

Na etapa seguinte, procedeu-se à triagem dos estudos por meio da leitura dos títulos e resumos, com o objetivo de verificar a aderência ao tema da pesquisa e aos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Nessa fase, foram excluídos os trabalhos que não apresentavam relação direta com a exploração intensiva de águas subterrâneas ou que não abordavam impactos associados ao abastecimento público, resultando em 37 estudos potencialmente elegíveis.

Os estudos selecionados foram então submetidos à leitura integral, etapa na qual foi realizada a avaliação final quanto à pertinência metodológica e à contribuição para a análise proposta. Dos estudos avaliados em texto completo, 11 artigos atenderam aos critérios de inclusão definidos. Entretanto, um dos artigos não possuía acesso ao texto completo, sendo excluído da etapa de síntese qualitativa. Dessa forma, a revisão sistemática foi conduzida com base em 10 artigos analisados integralmente.

O processo completo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi sistematizado por meio de fluxograma, apresentado na Figura 1, conforme recomendado pelas diretrizes PRISMA.

Figura 1 – Fluxograma do processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, elaborado conforme diretrizes PRISMA.



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Destaca-se que a revisão foi limitada às bases *Scopus* e *Web of Science* e aos idiomas inglês e português, podendo haver estudos relevantes indexados em outras bases ou publicados em outros idiomas. Além disso, a síntese realizada possui caráter qualitativo, não envolvendo meta-análise quantitativa dos resultados.

Resultados e discussões

Após a aplicação das etapas de identificação, triagem e elegibilidade, conforme apresentado no fluxograma PRISMA, foram incluídos 10 estudos na síntese qualitativa desta revisão sistemática. Os artigos selecionados contemplam diferentes contextos geográficos, incluindo América do Norte, Europa e Ásia, com predominância de estudos aplicados a sistemas urbanos ou regionais de abastecimento público dependentes de águas subterrâneas.

O quadro 1 apresenta a caracterização dos estudos analisados, incluindo país de realização, abordagem metodológica, escala de análise, tipo de pressão exercida sobre o aquífero, impactos observados no sistema de abastecimento e principais mecanismos associados aos efeitos identificados. De modo geral, os resultados evidenciam que a exploração intensiva das águas subterrâneas gera impactos que se manifestam de forma integrada, envolvendo alterações quantitativas do recurso, deterioração da qualidade da água e efeitos relacionados à gestão e à operação dos sistemas de abastecimento.

Quadro 1 - Caracterização dos estudos incluídos na revisão sistemática.

Autor (Ano)	País	Tipo de estudo	Escala	Pressão principal	Impacto no abastecimento
Sun <i>et al.</i> (2025)	China	Modelagem e análise estatística	Nacional/Urbana	Extração intensiva associada à urbanização e degradação da qualidade da água	Redução da segurança hídrica e comprometimento do abastecimento urbano
Al-Amin <i>et al.</i> (2018)	Estados Unidos	Modelagem socio-hidrológica	Bacia/Urbana	Aumento da demanda hídrica e intensificação da extração subterrânea	Redução da resiliência do sistema de abastecimento
Miller; Burson; Kiparsky (2021)	Estados Unidos	Estudo de caso	Urbana/Municipal	Superexploração do aquífero e dependência da água subterrânea	Risco de insegurança hídrica e vulnerabilidade em períodos de seca
Larson & Dziuk (1995)	Estados Unidos	Estudo empírico comparativo	Regional/Urbana	Superexploração histórica e resposta regulatória	Mudança da fonte de abastecimento, aumento de custos e alterações na qualidade da água
Felisa <i>et al.</i> (2022)	Itália	Modelagem integrada	Bacia hidrográfica	Mudanças climáticas e aumento da demanda urbana	Redução da disponibilidade hídrica e aumento da vulnerabilidade futura do abastecimento
Smith <i>et al.</i> (2018)	Estados Unidos	Modelagem estatística observacional	Regional	Bombeamento excessivo (overpumping)	Degradação da qualidade da água subterrânea para consumo humano
Bostic <i>et al.</i> (2023)	Estados Unidos	Modelagem espacial e análise de política pública	Regional (bacia aquífera)	Rebaixamento do nível freático por extração excessiva	Falha de poços e comprometimento da segurança do abastecimento doméstico
Van Engelenburg <i>et al.</i> (2019)	Países Baixos	Desenvolvimento metodológico e estudo de caso	Local	Aumento da demanda e pressões sobre qualidade e disponibilidade da água subterrânea	Redução da segurança operacional e necessidade de adaptação do sistema
Akram; Kittipongviset (2024)	Bangladesh	Estudo de caso urbano	Cidade	Superexploração, urbanização e degradação da	Redução da disponibilidade e aumento da vulnerabilidade

				qualidade da água	do abastecimento urbano
Carrard; Foster; Willetts <i>et al.</i> (2019)	Sudeste Asiático e Ilhas do Pacífico	Revisão e análise regional	Regional (urbana e rural)	Alta dependência da água subterrânea e limitações de gestão	Risco à segurança do abastecimento e aumento da vulnerabilidade dos sistemas dependentes de poços

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Pressões quantitativas e segurança hídrica do abastecimento

As pressões quantitativas constituem o grupo mais recorrente entre os estudos analisados, estando associadas principalmente à extração intensiva de água subterrânea, ao crescimento da demanda urbana e à redução da capacidade de recuperação dos aquíferos. Entre os dez estudos incluídos na síntese qualitativa, oito apresentaram evidências relacionadas ao rebaixamento do nível freático ou à redução da disponibilidade subterrânea, indicando que esse constitui um dos principais mecanismos pelos quais a exploração intensiva pode comprometer a segurança do abastecimento urbano. Os efeitos identificados incluem redução da produtividade dos poços, aumento da profundidade de captação e maior vulnerabilidade dos sistemas durante períodos de estiagem (Sun *et al.*, 2025; Felisa *et al.*, 2022; Bostic *et al.*, 2023). Resultados semelhantes são apresentados por Bostic *et al.* (2023), que identificaram declínio dos níveis de água subterrânea em áreas do Vale Central da Califórnia, com reflexos sobre a produtividade e a permanência de poços destinados ao abastecimento. Em escala regional, Felisa *et al.* (2022) também destacam a necessidade de compatibilizar a exploração dos recursos subterrâneos com a demanda dos sistemas de abastecimento e com as condições de disponibilidade.

O rebaixamento do nível subterrâneo não representa apenas uma alteração no armazenamento do aquífero. À medida que os níveis diminuem, a operação dos poços pode se tornar mais complexa, com necessidade de maior profundidade de bombeamento e possibilidade de redução da vazão disponível. Em situações mais críticas, a diminuição dos níveis pode levar à perda de produtividade ou até ao abandono de poços, comprometendo a continuidade do abastecimento. Esse comportamento é observado nos estudos de Bostic *et al.* (2023) e Akram e Kittipongvises (2024), que relacionam as pressões sobre os recursos subterrâneos à maior vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento urbano. Van Engelenburg *et al.* (2019) também ressaltam que a segurança do abastecimento depende da manutenção de condições de exploração compatíveis com a disponibilidade do recurso e com a capacidade de resposta dos sistemas.

No contexto brasileiro, esse processo também pode ser observado em áreas urbanizadas. Schuch *et al.* (2023), ao analisarem o Sistema Aquífero Cárstico de Sete Lagoas (MG), verificaram que a extração de água subterrânea ultrapassou a recarga média do aquífero a partir do ano 2000. Na década de 2010, a vazão bombeada por poços tubulares foi estimada em $7,39 \times 10^7$ m³/ano, enquanto a capacidade máxima de recarga estimada foi de $7,33 \times 10^7$ m³/ano. Os autores identificaram ainda a formação de cones de depressão em escala quilométrica nas áreas urbana e industrial do município. O caso evidencia que o crescimento da demanda, quando acompanhado por aumento das captações sem controle compatível com a capacidade

de recarga, pode alterar significativamente as condições de funcionamento do aquífero e repercutir sobre a segurança do abastecimento (Schuch *et al.*, 2023).

A relação entre disponibilidade subterrânea e segurança do abastecimento também envolve aspectos operacionais. A redução dos níveis de água pode exigir maior esforço de bombeamento, aumentar o consumo de energia e antecipar a necessidade de manutenção, aprofundamento ou substituição de poços. Em sistemas que apresentam elevada dependência das águas subterrâneas, esses efeitos podem se acumular e reduzir a capacidade de resposta durante períodos de estiagem. Miller, Burson e Kiparsky, (2021), ao analisarem a utilização de reservas subterrâneas em contexto urbano, destacam a importância de mecanismos de recarga e de gestão capazes de preservar essa fonte para situações de maior demanda. Da mesma forma, Felisa *et al.* (2022) apontam que a gestão conjunta dos recursos subterrâneos e dos sistemas de abastecimento pode contribuir para reduzir a exposição a períodos de escassez.

Outro aspecto relevante é a influência das condições climáticas sobre esse equilíbrio. A diminuição da recarga, quando associada ao aumento da demanda e à manutenção de taxas elevadas de extração, tende a ampliar a diferença entre as entradas e as saídas de água do sistema subterrâneo.

A relação entre extração, recarga e disponibilidade hídrica é fundamental para compreender os riscos associados à exploração intensiva. Taylor *et al.* (2013) já apontavam que as mudanças climáticas podem alterar a recarga dos aquíferos e modificar a disponibilidade de água subterrânea. Evidências mais recentes mostram que os declínios dos níveis subterrâneos têm se intensificado em diversas regiões, ao mesmo tempo em que alguns aquíferos apresentam sinais de recuperação quando as condições de exploração são reduzidas (Jasechko *et al.*, 2024). Dessa forma, a segurança do abastecimento não depende apenas da quantidade de água armazenada no aquífero, mas também da relação entre extração, recarga e demanda ao longo do tempo.

Esses resultados reforçam a necessidade de acompanhar de forma sistemática os níveis de água subterrânea, as vazões captadas e as condições de recarga dos aquíferos utilizados para abastecimento. No Tocantins, iniciativas recentes têm buscado ampliar a integração de informações hidrológicas para apoiar o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos. Batista, Silva e Martins (2025), por exemplo, apresentam um sistema integrado desenvolvido para coleta, análise e disseminação de dados hídricos no estado, destacando o uso de informações sistematizadas como suporte à gestão. Na mesma direção, Teixeira *et al.* (2026) ressaltam, no contexto das redes de distribuição de água, a importância da definição de critérios técnicos, operacionais e econômicos para apoiar processos de tomada de decisão. Embora esses estudos não tratem especificamente da exploração intensiva de águas subterrâneas, seus resultados contribuem para a discussão sobre a necessidade de integrar dados de monitoramento e critérios técnicos ao planejamento dos sistemas de abastecimento.

Assim, os estudos analisados indicam que a exploração intensiva de águas subterrâneas pode comprometer a segurança do abastecimento quando a retirada de água supera, de forma persistente, a capacidade de reposição do sistema. O problema não se limita ao rebaixamento dos níveis subterrâneos, pois pode alcançar a produtividade dos poços, os custos de operação e a capacidade de atendimento dos sistemas urbanos. A experiência brasileira de Sete Lagoas demonstra que esse processo já ocorre em áreas urbanizadas do país, enquanto as evidências internacionais mostram que situações semelhantes têm sido registradas em diferentes

contextos. Nesse cenário, o acompanhamento dos níveis piezométricos, das taxas de extração e das condições de recarga constitui uma medida importante para identificar situações de pressão antes que seus efeitos comprometam de forma mais significativa o abastecimento urbano.

Pressões qualitativas e comprometimento do uso para abastecimento

Além dos impactos quantitativos, parte significativa dos estudos evidencia que a exploração intensiva das águas subterrâneas pode induzir alterações na qualidade da água, afetando diretamente os processos de tratamento e a segurança do abastecimento público. Entre os estudos analisados, foram identificados casos de deterioração da qualidade relacionados à intensificação das captações, à mobilização de contaminantes e às alterações nas condições hidrogeológicas dos aquíferos. Smith, Knight e Fendorf (2018) demonstraram, no Vale de San Joaquin, Califórnia, uma relação entre o bombeamento recente de águas subterrâneas e o aumento das concentrações de arsênio. Segundo os autores, o bombeamento intenso pode aumentar os gradientes hidráulicos e favorecer a entrada de água proveniente de camadas argilosas que armazenam arsênio, elevando sua concentração na água extraída. O estudo mostra, portanto, que os efeitos da exploração excessiva não se restringem à redução da quantidade de água disponível, podendo também comprometer sua qualidade.

A relação entre quantidade e qualidade também aparece em outros contextos analisados nesta revisão. Sun *et al.* (2025) identificam a ocorrência simultânea de pressões relacionadas à disponibilidade e à qualidade das águas subterrâneas em áreas urbanas, destacando que a intensificação da exploração pode ocorrer juntamente com processos de degradação da qualidade. Akram e Kittipongvises (2024), ao analisarem o abastecimento de água em Dhaka, também identificaram a associação entre a superexploração dos recursos subterrâneos, a urbanização e a degradação da qualidade da água, com reflexos sobre a disponibilidade e a vulnerabilidade do abastecimento urbano. Esses resultados indicam que a dependência crescente dos aquíferos pode ampliar a exposição dos sistemas urbanos a problemas de qualidade quando as condições de exploração e proteção dos recursos não são adequadamente acompanhadas.

Os efeitos sobre a qualidade da água apresentam consequências diretas para os sistemas públicos de abastecimento. Quando uma captação apresenta alterações significativas na qualidade da água, podem ser necessárias medidas adicionais de tratamento, redução da vazão captada, interrupção temporária da operação ou busca de fontes alternativas. A situação observada por Smith, Knight e Fendorf (2018) demonstra que a degradação da qualidade pode limitar a utilização de uma fonte que permanece fisicamente disponível. Assim, a manutenção de níveis adequados de água no aquífero não garante, isoladamente, a segurança do abastecimento.

No contexto brasileiro, a relação entre dinâmica das águas subterrâneas e ocupação urbana também merece atenção. Martins *et al.* (2024), ao avaliarem o nível freático em uma área de expansão imobiliária em Pelotas (RS), observaram variações do lençol freático associadas às precipitações e destacaram a importância desse tipo de monitoramento para o gerenciamento das águas subterrâneas e para o planejamento da expansão urbana. Embora o estudo não trate diretamente da exploração intensiva de aquíferos, seus resultados reforçam que o acompanhamento das variações do nível freático é relevante para compreender as condições de recarga e evitar que alterações decorrentes do uso e ocupação do solo comprometam a dinâmica dos recursos subterrâneos. Essa perspectiva é particularmente importante em áreas urbanas nas quais o aumento da demanda e das captações ocorre

simultaneamente à transformação das condições de infiltração e recarga dos aquíferos (Martins *et al.*, 2024).

Nesse sentido, a segurança hídrica associada às águas subterrâneas deve ser entendida a partir da interação entre quantidade e qualidade. A redução dos níveis de água, a alteração dos fluxos subterrâneos e a mobilização de contaminantes podem ocorrer de maneira associada, dependendo das características do aquífero e das condições de exploração. Os estudos analisados demonstram que a intensificação das captações pode, portanto, produzir efeitos que ultrapassam o simples rebaixamento do nível freático, alcançando a qualidade da água e, consequentemente, a capacidade dos sistemas públicos de utilizá-la de forma segura e contínua.

Pressões sistêmicas, governança e resiliência do abastecimento

Os estudos analisados também evidenciam a existência de pressões sistêmicas relacionadas à governança, ao planejamento hídrico e à dependência estrutural dos sistemas urbanos em relação às águas subterrâneas. Em diversos contextos, a elevada dependência do aquífero como fonte principal de abastecimento foi associada ao aumento da vulnerabilidade dos sistemas frente a eventos climáticos extremos, falhas operacionais e limitações institucionais de gestão (Carrard; Foster Willetts, 2019; Van Engelenburg *et al.*, 2019). A ausência de integração entre planejamento urbano, gestão de recursos hídricos e políticas de controle da extração pode ampliar os riscos associados à exploração intensiva, reforçando a necessidade de abordagens integradas de planejamento e gestão dos sistemas de abastecimento (Van Engelenburg *et al.*, 2019).

Alguns estudos destacam que estratégias como recarga gerenciada de aquíferos e diversificação das fontes de abastecimento podem reduzir a pressão sobre o sistema subterrâneo e aumentar a resiliência hídrica urbana (Miller, Burson; Kiparsky, 2021). Abordagens contemporâneas baseadas em recarga gerenciada de aquíferos (MAR) têm demonstrado potencial para mitigar simultaneamente escassez hídrica e eventos extremos urbanos, contribuindo para a resiliência dos sistemas de abastecimento (Riaz; Nijhuis; Bobbink, 2025). Entretanto, a implementação dessas medidas depende de arranjos institucionais adequados, monitoramento contínuo e planejamento de longo prazo.

De forma geral, os resultados indicam que os impactos da exploração intensiva das águas subterrâneas extrapolam a dimensão hidrológica, configurando um problema sistêmico que envolve aspectos técnicos, econômicos e institucionais da gestão do abastecimento público.

Os resultados da revisão sistemática indicam que a literatura recente sobre exploração intensiva de águas subterrâneas tem evoluído de abordagens predominantemente hidrogeológicas, centradas na quantificação da disponibilidade do recurso, para perspectivas integradas que incorporam segurança hídrica, governança e resiliência dos sistemas urbanos de abastecimento. Os estudos analisados demonstram que a exploração de aquíferos passou a ser discutida não apenas sob a ótica da disponibilidade física da água, mas também em função de seus efeitos sobre a confiabilidade dos sistemas de abastecimento, a sustentabilidade das captações e a necessidade de adaptação diante de diferentes pressões ambientais e socioeconômicas (Sun *et al.*, 2025; Van Engelenburg *et al.*, 2019).

De modo geral, os resultados evidenciam que a relação entre extração de água subterrânea e desempenho dos sistemas urbanos deve ser compreendida sob uma perspectiva sistêmica, na qual processos hidrológicos, demandas antrópicas e estruturas institucionais atuam de forma interdependente. Estudos conduzidos em

contextos urbanos e regionais indicam que a segurança do abastecimento depende não apenas da disponibilidade do recurso, mas da capacidade de gestão em equilibrar exploração, proteção da qualidade e adaptação às mudanças ambientais e socioeconômicas (Miller; Burson; Kiparsky, 2021; Carrard; Foster; Willetts, 2019).

Extração de água subterrânea e limites da sustentabilidade do abastecimento urbano

A literatura analisada evidencia que a intensificação da extração de águas subterrâneas tem sido amplamente adotada como estratégia para suprir déficits de abastecimento associados ao crescimento urbano, à variabilidade climática e à redução da confiabilidade das fontes superficiais. Entretanto, os estudos incluídos indicam que essa estratégia tende a produzir efeitos cumulativos que comprometem a sustentabilidade do sistema ao longo do tempo.

O rebaixamento dos níveis de água subterrânea representa um dos principais efeitos associados à intensificação das captações. A redução dos níveis pode diminuir a produtividade de poços, aumentar a profundidade necessária para o bombeamento e elevar o consumo de energia e os custos de operação dos sistemas de abastecimento. Bostic *et al.* (2023), por exemplo, demonstraram que o declínio dos níveis de água subterrânea no Vale Central da Califórnia pode levar à redução da disponibilidade de água em poços de abastecimento doméstico e público, aumentando o risco de falhas das captações. Em contexto de gestão integrada dos recursos hídricos, Felisa *et al.* (2022) também destacam a necessidade de considerar a interação entre disponibilidade subterrânea, demanda e operação dos sistemas de abastecimento. No Brasil, Rodrigues *et al.* (2024) observaram que a exploração de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Urucuaia contribuiu para a redução da disponibilidade hídrica e para o prolongamento de períodos de baixa vazão.

A relação entre extração e disponibilidade também é evidenciada em estudos que analisam situações de sobre-exploração. Schuch *et al.* (2023), ao avaliarem o aquífero cárstico urbano de Sete Lagoas (MG), verificaram que a extração de água subterrânea ultrapassou a capacidade estimada de recarga do sistema em determinados períodos, resultando na formação de cones de depressão em escala quilométrica. Esse resultado demonstra que a exploração intensiva não constitui apenas uma questão de disponibilidade futura do recurso, mas pode produzir alterações hidrogeológicas capazes de afetar diretamente as condições de operação das captações urbanas.

Os resultados da revisão também indicam que a sustentabilidade da extração não pode ser definida apenas pela existência de água armazenada no aquífero. A manutenção de níveis elevados de bombeamento pode reduzir progressivamente a margem de segurança do sistema, tornando o abastecimento mais sensível a períodos de estiagem, variações na recarga e aumentos da demanda. Jasechko *et al.* (2024) identificaram aceleração do declínio dos níveis de água subterrânea em diferentes aquíferos ao redor do mundo, enquanto Sun *et al.* (2025) destacam que sistemas urbanos submetidos simultaneamente a pressões de demanda, disponibilidade e qualidade podem apresentar maior vulnerabilidade quando dependem intensivamente dos recursos subterrâneos. Nesse sentido, os resultados reforçam a necessidade de considerar os aquíferos não apenas como fontes permanentes de abastecimento, mas também como reservatórios naturais estratégicos, cuja utilização deve estar associada a limites de extração compatíveis com as condições de recarga e com as necessidades de longo prazo dos sistemas urbanos. Essa perspectiva exige o acompanhamento contínuo dos níveis de água, das taxas de extração e das condições de operação dos poços, permitindo identificar

antecipadamente situações de sobre-exploração e reduzir os riscos para a continuidade do abastecimento (Bhalla *et al.*, 2025; Mukherjee; Famiglietti, 2021).

No contexto brasileiro, essa abordagem é particularmente relevante diante da utilização das águas subterrâneas como componente dos sistemas públicos de abastecimento. A necessidade de monitoramento sistemático e integração de informações reforça o papel da gestão dos recursos hídricos na prevenção de situações de comprometimento da disponibilidade. Nesse sentido, Batista, Silva e Martins (2025) evidenciam, no contexto do Tocantins, a importância da organização e disponibilização de dados para subsidiar processos de gestão e tomada de decisão, por meio de um sistema integrado de monitoramento dos recursos hídricos. Embora o estudo não trate especificamente da exploração intensiva de águas subterrâneas, sua contribuição reforça a importância da integração de dados para o planejamento e a gestão dos sistemas de abastecimento.

Interdependência entre quantidade e qualidade da água subterrânea

Um dos principais achados da revisão refere-se à interdependência entre pressões quantitativas e qualitativas sobre os sistemas aquíferos. Embora tradicionalmente tratadas de forma independente, a literatura analisada demonstra que a intensificação da extração pode estar associada a processos de deterioração da qualidade da água subterrânea (Smith *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2025).

Estudos que analisam a segurança do abastecimento urbano evidenciam que alterações nos gradientes hidráulicos decorrentes do bombeamento intensivo podem favorecer a mobilização geoquímica de contaminantes naturais, o avanço de plumas contaminantes ou o aumento da vulnerabilidade à contaminação antrópica, comprometendo a qualidade da água destinada ao consumo humano (Smith *et al.*, 2018; Akram; Kittipongvises, 2024). Nessas condições, a degradação qualitativa passa a representar não apenas um problema ambiental, mas também um fator de impacto sobre o desempenho operacional do sistema, uma vez que pode impor custos adicionais associados ao tratamento, à substituição de fontes ou ao abandono de poços.

Os resultados indicam, portanto, que a sustentabilidade do abastecimento urbano depende simultaneamente do controle das taxas de extração e da proteção preventiva das áreas de recarga e captação, reforçando a necessidade de abordagens integradas de gestão dos recursos subterrâneos. No contexto brasileiro, o monitoramento sistemático de parâmetros de qualidade da água também se mostra relevante para a avaliação da segurança do abastecimento, como evidenciado por Araújo e Almeida (2025) em estudo realizado na rede de abastecimento de Paraíso do Tocantins.

Governança e resiliência dos sistemas de abastecimento

Os estudos incluídos na revisão demonstram que a capacidade de adaptação dos sistemas de abastecimento frente à intensificação das pressões sobre os aquíferos está diretamente relacionada à estrutura de governança e ao grau de integração entre planejamento hídrico e planejamento urbano. Sistemas que apresentam diversificação de fontes hídricas, monitoramento contínuo dos aquíferos e instrumentos institucionais de controle da extração tendem a apresentar maior resiliência frente a cenários de aumento da demanda e mudanças climáticas (Al-Amin *et al.*, 2018; Van Engelenburg *et al.*, 2019).

Nesse contexto, estratégias como recarga gerenciada de aquíferos, uso conjugado de águas superficiais e subterrâneas e integração entre modelos hidrogeológicos e modelos de gestão do abastecimento são frequentemente apontadas na literatura

como mecanismos eficazes para reduzir a vulnerabilidade dos sistemas urbanos. Essas abordagens permitem ampliar a capacidade de armazenamento e utilização estratégica das águas subterrâneas em períodos de escassez, em vez de depender exclusivamente da exploração contínua dos aquíferos como fonte primária de abastecimento (Miller; Burson; Kiparsky, 2021; Riaz; Nijhuis; Bobbink, 2025).

Implicações para o planejamento e gestão do abastecimento urbano

A síntese dos estudos analisados demonstra que a gestão sustentável da água subterrânea exige a superação de abordagens setoriais, incorporando princípios de gestão integrada de recursos hídricos. A consideração conjunta de fatores hidrológicos, socioeconômicos e institucionais permite compreender que decisões relacionadas à extração de águas subterrâneas possuem implicações sobre a sustentabilidade das captações, a confiabilidade dos sistemas de abastecimento e a gestão dos recursos disponíveis (Carrard; Foster Willetts, 2019; Sun *et al.*, 2025).

Nesse sentido, os resultados da revisão reforçam a necessidade de políticas públicas orientadas à definição de limites sustentáveis de extração, ao fortalecimento dos sistemas de monitoramento e à incorporação de critérios de risco hídrico no planejamento urbano. A adoção dessas medidas contribui para reduzir a dependência excessiva de aquíferos e aumentar a segurança hídrica em cenários futuros marcados por maior incerteza climática e crescimento populacional.

No contexto brasileiro, tais resultados convergem com os princípios estabelecidos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), que reconhece a água como recurso limitado e estabelece a gestão integrada e descentralizada como fundamento para a sustentabilidade dos usos múltiplos. De forma complementar, a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), nº 396/2008, estabelece diretrizes para a classificação e proteção das águas subterrâneas, reforçando a necessidade de controle das pressões antrópicas que possam comprometer a qualidade e a disponibilidade do recurso destinado ao abastecimento humano. Assim, a literatura analisada evidencia que a integração entre planejamento urbano, gestão de recursos hídricos e operação dos sistemas de abastecimento é importante para reduzir os riscos associados à exploração intensiva de aquíferos, especialmente em municípios com elevada dependência de fontes subterrâneas.

Do ponto de vista operacional, os resultados reforçam a importância de municípios altamente dependentes de águas subterrâneas acompanharem indicadores como nível piezométrico, qualidade da água bruta e custo energético do bombeamento como variáveis estratégicas no planejamento do abastecimento. O acompanhamento desses indicadores pode contribuir para a identificação precoce de cenários de risco e para a adoção de medidas preventivas, subsidiando processos de tomada de decisão no planejamento e na gestão dos sistemas de abastecimento (Teixeira *et al.*, 2026).

Considerações finais

Esta revisão sistemática analisou como diferentes pressões associadas à extração de águas subterrâneas influenciam o desempenho e a sustentabilidade dos sistemas de abastecimento urbano. Os resultados demonstram que, embora a água subterrânea desempenhe papel fundamental na segurança hídrica, a intensificação da exploração, quando dissociada de estratégias integradas de gestão e monitoramento, tende a reduzir a confiabilidade do abastecimento ao longo do tempo.

A literatura evidencia que pressões relacionadas ao aumento da demanda urbana, superexploração, as alterações nas condições de recarga e as limitações

institucionais podem afetar simultaneamente a quantidade e a qualidade da água subterrânea, com repercussões sobre a disponibilidade e a confiabilidade dos sistemas de abastecimento. Os resultados também indicam que estratégias de monitoramento contínuo, controle da extração, recarga gerenciada e integração entre diferentes fontes e instrumentos de gestão podem ampliar a capacidade de resposta dos sistemas diante de períodos de escassez e outras situações de estresse hídrico.

Como contribuição, este estudo reforça a necessidade de abordagens sistêmicas para avaliação da sustentabilidade da extração de águas subterrâneas, integrando dimensões hidrológicas, operacionais e institucionais ao planejamento do abastecimento urbano. No contexto brasileiro, os resultados reforçam a importância do monitoramento e da integração de informações para subsidiar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos, especialmente em municípios com elevada dependência de fontes subterrâneas.

Como limitação, destaca-se a predominância de estudos de caso regionais e a utilização de apenas duas bases de dados, *Scopus* e *Web of Science*, além da inclusão de estudos publicados nos idiomas português e inglês. A síntese qualitativa dos estudos, sem realização de meta-análise, também limita a possibilidade de quantificar a magnitude dos impactos identificados. Pesquisas futuras podem avançar na quantificação dos efeitos da exploração intensiva sobre indicadores operacionais dos sistemas de abastecimento e na avaliação comparativa de estratégias de gestão aplicadas a diferentes contextos urbanos.

Referências

AL-AMIN, Shams *et. al.* Assessing the effects of water restrictions on socio-hydrologic resilience for shared groundwater systems. **Journal of Hydrology**, v. 566, p. 872–885, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.045>. Acesso em: 15 jan. 2026.

AKRAM, Wasim; KITTIPONGVISES, Suthirat. Vulnerability of drinking water supply and respondent's perception on the quality of water supply in Dhaka City, Bangladesh. **Environment, Development and Sustainability**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05189-x>. Acesso em: 16 jan. 2026.

ARAÚJO, Thainara Lima; ALMEIDA, Rejane Freitas Benevides. Quantificação do cloro residual livre no abastecimento de água do município de Paraíso do Tocantins e avaliação da sua eficiência no controle de microrganismos. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 9, p. e1716, 2025. Disponível em: <https://sitionovo.iftto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1716>. Acesso em: 7 set. 2026.

ARAÚJO, Inessa Racine Gomes de; MORAIS, Reurysson Chagas de Sousa. Análise espacial da concentração de sólidos totais dissolvidos (std) em águas subterrâneas da região norte do piauí. **Revista Equador**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 67-80, 11 dez. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26694/reppggeo.v4i4.7955>. Acesso em: 16 jan. 2026.

BATISTA, Josiley Dantas; SILVA, Judson Franciel Barros; MARTINS, Albert Lennon Lima. Desenvolvimento do sistema integrado de monitoramento e gestão dos recursos hídricos no estado do Tocantins. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 9, p. e1671, 2025. Disponível em:

<https://sitionovo.iftto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1671>. Acesso em: 7 set. 2026.

BHALLA, S. *et al.* Peak Groundwater: Aquifer-Scale Limits to Groundwater Withdrawals. **Earth's Future**, v. 13, n. 9, 1 set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2025EF006221>. Acesso em: 7 set. 2026.

BOSTIC, Darcy *et al.* Thousands of domestic and public supply wells face failure despite groundwater sustainability reform in California's Central Valley. **Scientific Reports**, v. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41379-9>. Acesso em: 16 jan. 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2008. Disponível em: <https://sudema.pb.gov.br/servicos/servicos-ao-publico/legislacao-ambienta/cma/resolucao-conama-no-396.pdf/view>. Acesso em: 16 jan. 2026.

CARRARD, Naomi; FOSTER, Tim; WILLETTS, Juliet. Groundwater as a source of drinking water in Southeast Asia and the Pacific. **Water**, v. 11, n. 8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11081605>. Acesso em: 16 jan. 2026.

CUSTODIO, Emilio. **Impact of pumping wells on groundwater systems**. Madrid: IGME, 2002.

FAMIGLIETTI, James S. The global groundwater crisis. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 945–948, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>. Acesso em: 20 jan. 2026.

FELISA, Giada *et al.* Combined Management of Groundwater Resources and Water Supply Systems at Basin Scale Under Climate Change. **Water Resources Management**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 915-930, 25 jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://doi.org/10.1007/s11269-022-03059-7>. Acesso em: 10 jan. 2026.

GLEESON, Tom; CUTHBERT, Mark; FERGUSON, Grant; PERRONE, Debra. Global Groundwater Sustainability, Resources, and Systems in the Anthropocene. **Annual Review Of Earth And Planetary Sciences**, [S.L.], v. 48, n. 1, p. 431-463, 30 maio 2020. Annual Reviews. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055251>. Acesso em: 12 jan. 2026.

GOODARZI, Leila; HIRATA, Ricardo; ANDRADE, Leonardo Capeleto de; SUHOGUSOFF, Alexandra. Managed aquifer recharge in São Paulo state, Brazil: opportunities for facing global climate change issues. **Environmental Earth Sciences**, [S.L.], v. 83, n. 24, p. 666, 28 nov. 2024. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-024-11937-z>. Acesso em: 12 jan. 2026.

JASECHKO, S. *et al.* Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. **Nature**, v. 625, n. 7996, p. 715–721, 1 jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8>. Acesso em: 16 jan. 2026.

LARSON, John R.; DZIUK, Larry J. Groundwater to surface water conversion. **Risk Analysis**, v. 15, n. 5, p. 545–554, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1995.tb00751.x>. Acesso em: 16 jan. 2026.

MARTINS, Márcio da Fonseca *et al.* Nível freático e caracterização do solo em área de expansão imobiliária no município de Pelotas-RS. **Revista Sítio Novo**, [S.L.], v. 8, n. 3, p. 86, 20 dez. 2024. Instituto Federal de Educacao Ciencia e Tecnologia do Tocantins. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.47236/2594-7036.2024.v8.i3.86-106p>. Acesso em: 18 jan. 2026.

MILLER, Kathleen; BURSON, Madison; KIPARSKY, Michael. An urban drought reserve enabled by state groundwater recharge legislation. **Case Studies in the Environment**, v. 5, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1525/cse.2021.1231702>. Acesso em: 17 jan. 2026.

MUKHERJEE, Abhijit; FAMIGLIETTI, James S. Groundwater governance and sustainability. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120200444>. Acesso em: 17 jan. 2026.

RIAZ, Amna; NIJHUIS, Steffen; BOBBINK, Inge. Toward Landscape-Based Groundwater Recharge in Arid Regions: a case study of karachi, Pakistan. **Sustainability**, [S.L.], v. 17, n. 11, p. 4931, 27 maio 2025. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su17114931>. Acesso em: 22 jan. 2026.

RODELL, Matthew; VELICOGNA, Isabella; FAMIGLIETTI, James S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. **Nature**, v. 460, p. 999–1002, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nature08238>. Acesso em: 22 jan. 2026.

RODRIGUES, André F. *et al.* Has unsustainable groundwater use induced low flow regimes in the Urucuia Aquifer System? An urgent call for integrated water management. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 370, p. 122979, nov. 2024. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122979>. Acesso em: 13 jan. 2026.

SCHUCH, Camila S. *et al.* Overexploitation assessment in an urban karst aquifer: the case of Sete Lagoas (mg), Brazil. **Environmental Research**, [S.L.], v. 236, p. 116820, nov. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2023.116820>. Acesso em: 05 fev. 2026.

SMITH, Ryan; KNIGHT, Rosemary; FENDORF, Scott. Overpumping leads to California groundwater arsenic threat. **Nat Commun** 9, 2089 (2018). Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04475-3>. Acesso em: 20 fev. 2026.

SUN, Siao *et al.* Urban groundwater supplies facing dual pressures of depletion and contamination in China. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [S.L.], v. 122, n. 8, p. 1-10, 20 fev. 2025. National Academy of Sciences. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11874330/>. Acesso em: 16 jan. 2026.

TAYLOR, Richard G. *et al.* Groundwater and climate change. **Nature Climate Change**, v. 3, p. 322–329, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>. Acesso em: 18 jan. 2026.

TEIXEIRA, Júlia Meireles *et al.* Aplicações de métodos multicritério no apoio à tomada de decisão em redes de distribuição de água: uma revisão sistemática. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 10, p. e2095, 2026. Disponível em: [10.47236/2594-7036.2026.v10.2095](https://doi.org/10.47236/2594-7036.2026.v10.2095). Acesso em: 12 mar. 2026.

VAN ENGELBURG, Jolijn *et al.* Sustainable drinking water abstraction. **Journal of Integrative Environmental Sciences**, v. 16, n. 1, p. 89–122, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2019.1636284>. Acesso em: 12 jan. 2026.

WADA, Yoshihide *et al.* Global groundwater depletion. **Geophysical Research Letters**, v. 37, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2010GL044571>. Acesso em: 12 jan. 2026.

Informações complementares

Descrição	Declaração
Financiamento	Não se aplica.
Aprovação ética	Não se aplica.
Conflito de interesses	Não há.
Disponibilidade dos dados de pesquisa subjacentes	Este trabalho não é um <i>preprint</i> e os conteúdos subjacentes ao texto da pesquisa estão disponíveis neste artigo.
Uso de Inteligência Artificial	Sim. Sim. Foram utilizadas ferramentas de Inteligência Artificial generativa como apoio ao desenvolvimento do presente estudo, de forma complementar e sob supervisão integral do autor. A Inteligência Artificial foi empregada em três etapas específicas: (i) Apoio à triagem inicial dos estudos: a partir de metadados (título, resumo e palavras-chave), a IA foi utilizada para gerar sínteses descritivas preliminares de artigos recuperados nas bases de dados, com o objetivo de auxiliar na identificação de aderência temática à pergunta de pesquisa. A decisão final de inclusão ou exclusão dos estudos foi realizada exclusivamente pelo autor, mediante leitura crítica dos textos completos. (ii) Apoio à organização e clareza da análise crítica: ferramentas de IA foram utilizadas de forma auxiliar para apoiar a organização textual, estruturação de argumentos e aprimoramento da clareza da redação acadêmica, sem elaboração de interpretações científicas, resultados ou conclusões. (iii) Revisão linguística e de estilo: a IA foi empregada para revisão gramatical, adequação lexical e fluidez do texto, mantendo-se integralmente a autoria intelectual humana. Ressalta-se que a Inteligência Artificial não foi utilizada para geração de dados, análises, resultados, interpretações científicas, seleção final dos estudos, nem elaboração das conclusões. Todo o conteúdo científico, decisões metodológicas, análises críticas e conclusões

		apresentadas são de responsabilidade exclusiva do autor.
CrediT	Daniel Santos Costa	Funções: conceitualização, investigação, metodologia;, análise formal, validação, escrita – rascunho original, escrita – revisão e edição.
	Giulliano Guimarães Silva	Funções: supervisão, validação, escrita – revisão e edição.
	Elaine da Cunha Silva Paz	Funções: supervisão, escrita – revisão e edição.
	Cláudia da Silva Aguiar Rezende	Funções: supervisão, escrita – revisão e edição.

Avaliadores: Os avaliadores optaram pela avaliação fechada e pelo anonimato.

Revisora do texto em português: Thamyris Pinheiro Maciel*.

Revisora do texto em inglês: Thamyris Pinheiro Maciel*.

Revisora do texto em espanhol: Thamyris Pinheiro Maciel*.

Como citar (ABNT):

COSTA, Daniel Santos *et al.* Extração intensiva de águas subterrâneas frente à escassez hídrica: revisão dos impactos no abastecimento urbano. **Revista Sítio Novo**, Palmas, v. 10, p. e2180, 2026. DOI: 10.47236/2594-7036.2026.v10.2180. Disponível em: <https://sitionovo.ifto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/2180>.

* Conforme informado pelos autores e comprovado pelo documento anexado ao sistema.