

SEGURANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (*GROUNDWATER SECURITY*): UMA REVISÃO DOS ESTUDOS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

Sueli YOSHINAGA PEREIRA

Ana Elisa SILVA DE ABREU

Luís Fernando MURILLO-BERMUDEZ

RESUMO

A segurança das águas subterrâneas faz parte da segurança hídrica para manutenção do abastecimento e atividades humanas, vital para o desenvolvimento de uma região e da sociedade. O presente trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica de estudos relacionados à segurança hídrica subterrânea, por meio da busca de artigos com as palavras-chave “water security” (segurança hídrica), “groundwater” (água subterrânea) e “aquifer” (aquífero) nas bases Scopus, Compedex e Web of Science, no período entre 2019 e 2023. A busca resultou em 351 artigos que foram armazenados no gerenciador de referências Zotero e depois analisadas pelo software VOSViewer e planilhas eletrônicas. Há uma produção de cerca de 70 artigos por ano sobre o assunto, sendo os temas mais discutidos relativos a balanço hídrico, quantidade e qualidade das águas, e evolução do uso e ocupação da terra em regiões semiáridas e/ou populosas. Os países com número mais expressivo de trabalhos são a China, Índia, Estados Unidos e Brasil. A África do Sul e Irã apresentam artigos com maior número de citações, decorrente dos bem conhecidos casos de escassez aguda de recursos hídricos em clima semiárido a árido. Os métodos utilizados são os hidrológicos (séries temporais de chuva e vazão), com destaque para aqueles que analisam o escoamento básico combinado com técnicas de sensoriamento remoto. Foram analisados com maior detalhe os artigos que focam na disponibilidade hídrica subterrânea, associada ao aumento de demanda por causa do crescimento populacional, qualidade das águas subterrâneas e seus impactos. Como tendência mais recente, verifica-se o uso de modelos acoplados que visam estimar o balanço hídrico de uma área (bacia hidrográfica), simular a vazão de rios e elaborar cenários (tanto otimistas como pessimistas) para o gerenciamento dos recursos hídricos. Em relação à qualidade da água, destacam-se os índices de qualidade (diversos métodos) e sua cartografia, a partir da sobreposição das áreas de vulnerabilidade com o uso e ocupação da terra. Os estudos de governança consistem em análises socioeconômicas em áreas de conflitos de uso da água, além do desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade para subsidiar decisões de gerenciamento. A revisão sistemática da literatura revelou que os estudos em desenvolvimento no Brasil têm acompanhado as técnicas e abordagens mais modernas que vêm sendo empregadas em estudos internacionais.

Palavras-chave: Segurança hídrica; Aquífero; Balanço hídrico; Revisão bibliográfica sistemática; Crise de água.

ABSTRACT

GROUNDWATER SECURITY: A REVIEW OF NATIONAL AND INTERNATIONAL STUDIES. Groundwater Security is a crucial aspect of Water Security for sustaining the water supply and human activities, which is essential for the development of a region and society. This work presents a bibliographical review of studies related to groundwater security by searching for articles with the keywords

“water security”, “groundwater”, and “aquifer”, in the Scopus, Compedex, and Web of Science databases between 2019 and 2023. The study examined 351 articles stored in the Zotero reference manager and analyzed them using the VOSViewer software and electronic spreadsheets. Around 70 articles are produced per year on the subject. The most discussed topics in these articles are related to the water budget, water quantity and quality, and the evolution of land use and occupation in semi-arid and/or populated regions. The countries with a significant number of articles are China, India, the United States, and Brazil. South Africa and Iran are among the countries with the highest number of citations due to their well-known cases of acute water resource shortages in semi-arid to arid climates. Hydrological methods, which involve analyzing time series of rainfall and river flow, are used with a focus on basic runoff combined with remote sensing techniques. This study examined in greater detail the articles that focus on groundwater availability, associated with increased demand due to population growth, groundwater quality, and its impacts. A more recent trend is the use of coupled models aimed at estimating the water balance of an area (watershed), simulating the flow of rivers, and developing scenarios (both optimistic and pessimistic) for the management of water resources. Concerning water quality, quality indices (various methods) and their cartography stand out, based on the overlapping of vulnerability areas with land use and occupation. Governance studies consist of socio-economic evaluations in areas of water use conflicts, as well as the development of sustainability indicators to support management decisions. The systematic review of the literature revealed that studies being developed in Brazil have kept pace with the most modern techniques and approaches being used in international studies.

Keywords: Water Security; Aquifer; Water budget; Systematic bibliographic review; Water crisis.

1 INTRODUÇÃO

A segurança hídrica é entendida como a capacidade de uma população de assegurar acesso sustentável a quantidades adequadas de água com qualidade aceitável para prover comunidades, além de ser um bem comum e essencial para o desenvolvimento socioeconômico, colaborando para garantir proteção a desastres relacionados a água e para preservar ecossistemas em clima de paz e estabilidade política (GREY & SADOFF 2007, UNITED NATIONS 2013). Em outros termos, FOSTER & MACDONALD (2014) descrevem a segurança hídrica como uma questão social, onde há um equilíbrio entre o *stress* físico dos recursos hídricos e a capacidade de gestão da água.

Dentro deste contexto, a água deve ser gerenciada sustentavelmente por meio do entendimento do ciclo hidrológico, partindo de um foco interdisciplinar sem comprometer a saúde atual e futura das populações e ecossistemas (UNITED NATIONS 2013). Com base nesta abordagem sistêmica, as águas superficial e subterrânea devem ser entendidas e gerenciadas conjuntamente como

“um só tipo de água – uma água”, ou seja, a depleção da água subterrânea leva a depleção do escoamento superficial, e vice-versa (FAMIGLIETTI 2014, WHEATER & GOBER 2015).

Devido à característica de resiliência dos recursos hídricos subterrâneos aos extremos hidrológicos, as águas subterrâneas apresentam um papel estratégico na manutenção do fluxo superficial e no abastecimento de água potável no atual cenário de mudanças climáticas (TAYLOR *et al.* 2013). A água subterrânea é fonte primária para mais de dois bilhões de pessoas, e mais da metade da água utilizada para irrigação de alimentos provém de fontes subsuperficiais, além de ser uma reserva estratégica em períodos de seca e de prover sociedades que dispõem de pequena quantidade de água superficial (FAMIGLIETTI 2014). De acordo com UNESCO (2012), as taxas de extração de águas subterrâneas pelo menos triplicaram nos últimos 50 anos, assumindo cada vez mais um papel proeminente no abastecimento de água (GORELIK & ZHENG 2015).

Em muitos casos a disponibilidade deste recurso está ameaçada pela sobre-exploração, em

áreas onde os volumes retirados excedem os volumes de recarga do aquífero (UNESCO 2012), principalmente em regiões áridas e semiáridas (AMANAMBU *et al.* 2020). Por outro lado, a variabilidade e as alterações climáticas influenciam os sistemas de águas subterrâneas, tanto diretamente, a partir da recarga, como indiretamente, pelas alterações na utilização do recurso. Esses impactos podem ser intensificados pela atividade humana, como a mudança no uso e cobertura da terra (TAYLOR *et al.* 2013).

De acordo com MELO *et al.* (2023), a utilização sustentável dos aquíferos representa uma importante medida de segurança hídrica, devido ao papel de salvaguarda das águas subterrâneas no abastecimento das populações e da economia durante secas prolongadas. Eles destacam quatro linhas de ação para garantir a segurança ambiental dos aquíferos: (1) Caracterizar os aquíferos; (2) Proteger os aquíferos; (3) Restaurar o armazenamento; e (4) Gerir os recursos hídricos subterrâneos.

Os recentes estudos para avaliar a disponibilidade da água subterrânea objetivam identificar a sobre-exploração do aquífero e definir estratégias de proteção que satisfaçam as restrições regulatórias, ambientais, logísticas e econômicas. Estes estudos baseiam-se em modelos que podem ser utilizados para avaliar quantitativamente os impactos propostos nos instrumentos da política como impostos, cotas e direitos de outorga, além de mecanismos como relocação (ou até mercado das águas). O tempo de renovação das águas subterrâneas e seus estudos para determiná-lo em diversos aquíferos é uma variável importante para a gestão integrada dos recursos hídricos ou de bacias hidrográficas para gerenciá-las em função de sua renovação ou não na escala de tempo da existência humana (REBOUÇAS 1994).

A avaliação da política e gestão pode apresentar simulações envolvendo a situação social e econômica para geração de potenciais cenários futuros favoráveis ou desfavoráveis para uma melhor decisão sobre o gerenciamento das águas subterrâneas e qualidade (GORELICK & ZHENG 2015).

A segurança hídrica é um tema recente e esta afirmação pode ser constatada pela primeira definição do termo há apenas duas décadas (WITTER & WHITEFORD 1999, GLOBAL WATER PARTNERSHIP 2000). Os trabalhos que realizam uma abordagem de revisão, mapeamento de estudos prévios e que sintetizam o estado da arte do tema são escassos e muito mais quando focados

na avaliação das águas subterrâneas. Entre estes trabalhos, COOK & BAKKER (2012) analisaram as distintas abordagens do conceito de segurança hídrica em diferentes áreas do conhecimento e AKBAR *et al.* (2022) descreveram distintos índices de avaliação de escassez, estresse e sustentabilidade para águas subterrâneas.

Dessa maneira, o objetivo do presente artigo é apresentar uma síntese de pesquisas que trabalham com o assunto de segurança hídrica, focado nas águas subterrâneas, avaliando e discutindo o estágio atual de conhecimento a nível mundial e no cenário local brasileiro. O entendimento dos caminhos e processos da água subterrânea dentro do conceito de bacia hidrográfica e do ciclo da água, o discernimento de quais são os cenários de impacto das mudanças climáticas, dos eventos extremos (seca e chuvas) nas águas subterrâneas de sistemas hidrogeológicos de fluxo local, intermediário e profundo, e a avaliação da disponibilidade, a partir da oferta e demanda de uso da água subterrânea, são os desafios-chave apresentados nos estudos da presente revisão bibliográfica.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A revisão sistemática da literatura foi realizada a partir dos critérios dispostos por LEVY & ELLIS (2006), começando pela definição específica da pergunta de pesquisa a ser respondida, no caso: “*Quais são as abordagens para a avaliação de segurança hídrica subterrânea?*”.

A partir desta questão foi criado a *string* de busca nas bases de dados da Scopus, Compedex e Web of Science, com as palavras-chave em inglês *Water Security* (Segurança Hídrica), *Groundwater* (Água Subterrânea) e *Aquifer* (Aquífero). Tais palavras foram selecionadas por abranger de forma clara e concisa o foco de pesquisa. O período compreendido de busca foi de cinco anos de 2019 a 2023 em revistas indexadas e limitado ao idioma inglês. A língua inglesa foi utilizada pela universalidade do idioma, pois há possibilidade de acesso a artigos de países de línguas e de culturas diferentes, seja na forma de resumo ou também trabalho completo. A tabela 1 apresenta os resultados da busca de cada base de dados e o total de artigos sobre cada tema.

Os artigos duplicados de cada base foram excluídos e o total foi reduzido a 351 referências. As análises com todos os resultados encontrados são apresentadas a seguir:

TABELA 1 – Palavras-chave de cada base de dados e total de resultados.

TABLE 1 – Keywords from each database and total results.

Base de dados	String de busca	Total de resultados
Scopus	TITLE-ABS-KEY (“water security” AND (groundwater OR aquifer)) AND PUBYEAR > 2018 AND PUBYEAR < 2024 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, “ar”)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, “English”))	321
Web of Science	“water security” AND (groundwater OR aquifer) (Title) OR “water security” AND (groundwater OR aquifer) (Abstract) OR “water security” AND (groundwater OR aquifer) (Author Keywords) and Article or Review Article (Document Types) and English (Languages) and Article or Review Article (Document Types) and English (Languages)	281
Compendex (engineering village)	(((((“water security” AND (groundwater OR aquifer)) WN KY)) AND (({english} WN LA) AND ((2023 OR 2022 OR 2021 OR 2020 OR 2019) WN YR))) AND ({ja} WN DT))	159
Total:		761

SCOPUS:

<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sort=plf-f&rc=s&sid=380f8be5deb2dee5c8cdce520b582070&sot=a&sdt=a&cluster=scosubtype%2c%22ar%22%2ct%2b%2c%22English%22%2ct&sl=98&s=TITLE-ABS-KEY%28%22water+security%22+AND+%28groundwater+OR+aquifer%29%29+AND+PUBYEAR+%3e+2018+AND+PUBYEAR+%3c+2024&origin=resultslist&count=10&analyzeResults=Analyze+results>

WEB OF SCIENCE:

<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/d202c3a8-a149-43d1-91c3-388804ef464e-9ff31c10/relevance/1>

<https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/d202c3a8-a149-43d1-91c3-388804ef464e-9ff31c10>

COMPENDEX:

<https://www.engineeringvillage.com/search/expert.url?SEARCHID=b5365347005742f2ae971893f50266e8&COUNT=1&usageOrigin=&usageZone=>

Os artigos foram armazenados no *software* livre Zotero, que é um gerenciador de referências e citações desenvolvido pela Digital Scholar com código aberto. Os arquivos armazenados foram então analisados pelo software VOSViewer 1.6.18 (VAN ECK & WALTMANN 2022). O *software* foi utilizado para criação de mapa baseado nos dados da rede de internet e referências armazenadas no Zotero. O arquivo dos artigos selecionados foi utilizado para construir um mapa baseado na matriz de co-ocorrências de itens (que no caso, são as palavras-chave) pelo VOSviewer.

No mapa, os maiores tamanhos do item possuem maior peso (ou relevância) e foram identificados. As cores representam o agrupamento de itens relacionados, e as ligações entre eles são as linhas conectadas. O programa mostra as ligações mais fortes entre os itens. A distância entre eles indica a proximidade da relação.

O arquivo de artigos também foi gerado em planilha Excel para tratamento dos dados, geração de gráficos, tabelas e mapa-múndi. Os artigos internacionais considerados representativos nesta amostragem, em número de 351, foram selecionados para análise e discussão. Os critérios utilizados para a seleção de artigos foram: tema (governança, disponibilidade hídrica e qualidade), metodologias, citação, títulos, palavras-chave e resumo. Deste conjunto de 351 referências, 18 são artigos brasileiros, referentes a regiões brasileiras analisadas no seu total e comentadas em item a parte.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos resultantes das bases de dados (Compendex, Web of Science e Scopus) compreendem um total de 351, no período de 2019 a setembro de 2023. O número de artigos publicados por ano possui uma média de 70, sendo que para o ano de 2023 foram contabilizados 72 até o mês de setembro.

O mapa dos resultados gerados pelo VOSViewer apresenta quatro agrupamentos (cores diferentes na figura 1) e itens (ou palavras-chaves) com tamanhos e distâncias variadas. A figura 1 apresenta o mapa das palavras-chave mais relevantes (as de maior tamanho e relações). Em

geral, as distâncias e ligações entre as palavras-chave de um mesmo grupo são curtas e fortes, de modo que os temas dos estudos apresentam esta gama de itens que se interagem fortemente. Os itens *groundwater*, *water supply*, *water management*, *water security* e *climate change* foram os mais expressivos na busca. As mais distantes foram as palavras *rural areas*, *Iran* e *resource scarcity*.

A tabela 2 apresenta as palavras-chave (aqui denominadas como itens) de cada grupo, reunidos nos seguintes temas: governança (em cores verde e amarelo, figura 1), disponibilidade (vermelho, figura 1) e qualidade das águas (azul, figura 1). O grupo 1 (Tabela 2) apresenta itens relativos a disponibilidade das águas subterrâneas, destacando as metodologias de quantificação do armazenamento, fluxo, reservatórios, bacias hidrográficas e modelos. Os itens destacados são: fluxo de água (*water flow*), recursos hídricos (*water resources*), rios (*rivers*) e armazenamento de água (*water storage*). China e Brasil são os países com participação neste grupo.

Os grupos 2 e 3 da tabela 2 (representado pelas cores verde e amarela) tem como itens principais as palavras: abastecimento de água (*water supply*), gerenciamento da água (*water management*), segurança hídrica (*water security*), e secundariamente as palavras aquíferos (*aquifers*), recarga de águas subsuperficiais (*recharging - underground waters*), sustentabilidade (*sustainability*) e conservação da água (*water conservation*), recarga gerenciada de

aquífero (*managed aquifer recharge*), estatísticas populacionais (*population statistics*) e tomada de decisão (*decision making*). Estes dois grupos foram considerados dentro da temática governança. Neste grupo destacam-se os trabalhos produzidos nos Estados Unidos e Irã.

O grupo 4, de cor azul (onde se encontra a palavra *groundwater*), representam estudos sobre a qualidade das águas. As palavras-chave *Bangladesh*, qualidade da água (*water quality*), poluição (*pollution*), riscos à saúde (*healthy risks*), nitrato (*nitrate*), controle da qualidade (*quality control*) e monitoramento ambiental (*environmental monitoring*) são as que se destacam.

A complexidade de estudos sobre a Segurança Hídrica é demonstrada pela sua diversificação. O esforço de manter a água disponível para as próximas gerações passa, por exemplo, pelo entendimento do ciclo hidrológico, das condições climáticas e sua variabilidade, a dinâmica das águas, o crescimento demográfico e social, a contaminação das águas disponíveis, as tecnologias para armazenamento ou descontaminação, a evolução do uso e ocupação da terra, o monitoramento quantitativo e qualitativo, dentre outras variáveis que possam impactar as águas e assim comprometer seu acesso. Esta complexidade foi identificada por COOK & BAKKER (2012), que analisaram o uso do termo *Water Security* (Segurança Hídrica) por meio de revisão da literatura científica, e identificaram diferenças

TABELA 2 – Grupos e palavras – chave do modelo VOSViewer.

TABLE 2 – Groups and keywords of the VOSViewer model.

Grupo/ Tema	Cores	Palavras-chaves
1 Disponibilidade	Vermelho (43 itens)	Basin, Brazil, catchment(s), China, climate, digital storage, evapotranspiration, flow, fresh water, groundwater flow groundwater storage, groundwater-surface water interaction, human activity, hydrological modeling, hydrology, land use, landforms, model, models, precipitation, rainfall, reservoirs (water), river, river basin, river water, rivers, runoff, seasonal variation, simulation, soil, spatiotemporal analysis, stable isotope, streamflow, surface water, urbanization, water, water budget, water flow, water resources, water storage, watersheds.
2 Governança	Verde (39 itens)	Adaptation, agricultural robots, agriculture, climate change climate-change, crops, desalination, drought, economics, ecosystems, food security, governance, groundwater depletion, groundwater management, groundwater resource, impacts, Iran, irrigation, management, resilience, resource scarcity, resources, security, surface waters, sustainability, sustainable development, systems, United States, vulnerability, water conservation, water demand, water levels, water management, water planning, water resource, water scarcity, water security, water supply.
3 Governança	Amarelo (21 itens)	Aquifer, aquifers, area, arid region, arid regions, climate models, decision making, GIS, ground water recharge, groundwater recharge, groundwater resources, hydrogeology, managed aquifer recharge, managed aquifer recharges, population statistics, rain, recharge, recharging (underground waters), remote sensing, semiarid region, wastewater treatment.
4 Qualidade	Azul (38 itens)	Bangladesh, chemistry, concentration (composition), contamination, controlled study, drinking water, environmental monitoring, groundwater, ground water, groundwater pollution, groundwater quality, healthy risks, human (s), hydrochemistry, hydrogeochemistry, impact, India, nitrate, pollution, potable water, priority journal, quality, quality control, risk assessment, river basin, rural area(s), salinity, salinization, surface water, system, urban area, water pollutant, water pollutants, chemical, water pollution, water quality, water treatment.

e com histórico de declínio da disponibilidade hídrica subterrânea. Envolvem principalmente áreas povoadas ou com agricultura intensiva, muitas vezes em locais semi-áridos a áridos, ou já conhecidas pela escassez de água, secas prolongadas ou pelo declínio contínuo do volume dos recursos hídricos no sistema hidrológico. Um dos casos mais citados é a bacia do rio Cauvery na Índia (GOWRI *et al.* 2021), Maldivas (DENG & BAYLEY 2019) e Irã (TABARMAYEH *et al.* 2022). Nos casos mencionados, os autores utilizam modelos numéricos como ModelMuse, SUTRA, dentre outros, para determinação do *stress* hídrico e elaboração de cenários de gerenciamento do recurso, com vários tipos de demanda. A Cidade do Cabo (África do Sul) sofreu graves problemas com as secas. MAUCK & WINTER (2021) relataram o histórico da crise de escassez de água na região. As autoridades da cidade definiram o Dia Zero (*Day Zero*) para marcar o momento exato do desligamento da rede de água potável devido aos níveis críticos dos reservatórios, com o estabelecimento de 25 litros de água *per capita* e pontos de retirada de água para abastecimento da população (LaVANCHY *et al.* 2019). ZHANG *et al.* (2019) e OLIVIER & XU (2019) avaliaram a viabilidade de aplicação da recarga gerenciada do aquífero (Managed Aquifer Recharge - MAR) para a Cidade do Cabo.

Com relação aos estudos de disponibilidade e declínio dos volumes armazenados de água subterrânea nos aquíferos, principalmente em regiões ermas, os satélites GRACE, que medem o campo gravitacional da Terra e sua variabilidade, são utilizados para qualquer região da Terra. O sistema GRACE consiste em dois satélites, lançados ao espaço em 2002 na mesma órbita a uma distância de 220 km entre si. Os resultados do monitoramento do GRACE são aplicados para avaliar a dinâmica e declínio das águas subterrâneas, derretimento de geleiras e variação dos níveis dos mares (<https://grace.jpl.nasa.gov/>, acesso em 28/09/2023). Dessa forma, SHAMSUDDRSHA & PANDA (2019) utilizaram os dados do satélite e estudaram as tendências de declínio no armazenamento de água subterrânea nas bacias dos rios do Himalaia, decorrente de sobre-exploração por irrigação em períodos de estiagem. AHMED *et al.* (2019) trabalharam os dados do período de 2002 a 2016 do GRACE para avaliar a sobre-exploração dos aquíferos em áreas com agricultura intensiva no Paquistão. Também por meio dos dados de série histórica do GRACE, associado a modelos hidrológicos, CHENG *et al.* (2023) estudaram o declínio do armazena-

mento das águas subterrâneas em bacias interiores da China causadas pelo consumo excessivo. BOLAÑOS *et al.* (2021) avaliaram a dinâmica da bacia de Magdalena – Cauca (Colômbia), nordeste da América do Sul, e concluíram que a taxa de depleção apresentada é mais pronunciada nas porções mais baixas da bacia, coincidindo com fases extremas dos fenômenos La Niña e El Niño. LIU *et al.* (2022) calcularam o declínio do armazenamento de água subterrânea (-21,82 mm/ano) entre 2003 e 2016 na região da Montanha Taihang, China, cujos mecanismos ainda continuam pouco compreendidos. ZHOU *et al.* (2023) avaliaram o declínio da quantidade dos recursos hídricos por consumo da agricultura no norte da China e calcularam o declínio de Armazenamento Total de Água (Total Water Storage – TWS, soma de armazenamento de todas as águas subterrâneas e superficiais, águas de dossel, rios e lagos, umidade do solo) de -8,9 mm/ano, que representa uma *proxy* sintética de resposta do sistema hidrológico.

A utilização dos dados dos satélites GRACE é uma ferramenta de relevância, pois permite avaliar o comportamento dinâmico de grandes massas de água, principalmente aquíferos, além dos impactos ante a variabilidade climática e o consumo humano. No entanto, devido à baixa resolução dos dados (cerca de 170 km), esta ferramenta ainda está restrita aos estudos de grandes regiões, apenas fornecendo informações para aquíferos com abrangência regional.

3.2 Qualidade das águas subterrâneas

A qualidade das águas subterrâneas está relacionada aos impactos das atividades humanas, como agricultura, áreas urbanas (efluentes domésticos) e industriais. Geralmente, os estudos avaliam primeiramente as características hidrogeoquímicas dos aquíferos, em seguida, a qualidade da água, baseada nos padrões de qualidade vigentes no país, para posteriormente utilizar índices de qualidade de água para avaliação do grau de deterioração, e por conseguinte, aplicar metodologias de risco a saúde à população (adultos e jovens). XIAO *et al.* (2021) avaliaram a hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas em *loess* na bacia do rio Fen, centro norte da China, trabalhando com *Self Organizing Maps* (SOM) de elementos de maiores concentrações da água e de hidroquímica. SOM é uma rede neural competitiva utilizada para realizar agrupamentos por meio de aprendizagem não-supervisionada (WANG *et al.* 2020). A variação da concentração ocorreu para

os elementos Ag, Cd, Ni, Pb e Tl e permitiu identificar as entradas de poluentes antropogênicos industriais (metais pesados) e efluentes domésticos (nitrito). Os autores também aplicaram índices de qualidade (WQIs – *Water Quality Indexes*) que mostram tal deterioração. JENIFER & JHA (2023) integraram os índices de qualidade (GWQI – *Groundwater Quality Index*) com o mapa de vulnerabilidade (pelo método AVI – *Aquifer Vulnerability Index*) e produziram Índices de Susceptibilidade de aquíferos não-confinados, na porção média do rio Cauvery (Índia). Os índices “severo” a “muito severo” correspondem a mais de 80% da área. KUMAR *et al.* (2023) avaliaram a qualidade das águas de aquíferos enriquecidos com gipso (*Gypsum-enriched aquifers*) em regiões de agricultura intensiva na região central da Índia, além dos fatores controladores das concentrações de sulfato e nitrito, produtos da dissolução do gipso e de efluentes da agricultura e domésticos. CHOUDHURY *et al.* (2023) avaliaram a qualidade da água subterrânea no litoral de Bangladesh, bem como o risco à saúde humana, baseada nos íons de maiores concentrações, alguns metais pesados e salinidade. Todos os elementos analisados no estudo apresentaram concentrações acima dos limites permissíveis vigentes no país. O risco à saúde humana foi classificado como moderado em relação a elementos não-cancerígenos em adultos e alto para as crianças. O risco de câncer por arsênio foi considerado alto para consumo por longo tempo de água subterrânea.

3.3 Governança

Os estudos de governança visam avaliar a insustentabilidade do uso da água subterrânea em três pilares da Segurança Hídrica definida pela UNDP (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME 1994) que são os meios de subsistência humanos, saúde e segurança alimentar, que podem ser diretos ou indiretos, como doenças provocadas pela água contaminada e impactos em ecossistemas. Os indicadores de segurança hídrica ligados à água subterrânea são sugeridos pelo projeto *Groundwater and Human Security – Case Studies* (GWAHS-CS) (UNITED NATIONS UNIVERSITY 2017) para avaliação da vulnerabilidade de sistemas social e ecológico e da relação água subterrânea e bem-estar humano. Dessa forma, a avaliação dessa vulnerabilidade visa “enfrentar as ameaças à segurança e ao bem-estar humano, pela escassez e pela degradação da qualidade da água”. UNITED NATIONS UNIVERSITY

(2017) apresentam três abordagens de avaliação desta vulnerabilidade, que podem ser consideradas uma lista de indicadores para avaliar o quão insustentável é o ambiente em relação à escassez e qualidade da água em uma comunidade, para servirem de diretrizes para ações de gestão do recurso hídrico subterrâneo. SALEM *et al.* (2017) aplicaram estas metodologias de avaliação nas regiões de Wadi Natrun e vila de Beni Salama, Egito, com alta dependência de água subterrânea e baixa taxa de recarga. Nestas regiões eles definiram que as maiores ameaças são: salinização da água subterrânea (associado à exploração), aporte de agroquímicos de produtos para exportação, disposição do esgoto e lixo. No Irã, a área do Condado de Shikbouth apresenta um ambiente hiper árido, com depleção de água subterrânea em quantidade e qualidade, que leva a perfuração ilegal de poços e o uso indiscriminado de fertilizantes (MOHAMMADNIA *et al.* 2017). Esta situação de crise levou à proposição de políticas para prevenir ou reduzir a taxa de impactos destrutivos da seca e degradação da água subterrânea. No Vietnã, a área do delta do rio Mekong, importante área de produção de arroz com 20 milhões de habitantes, possui grande dependência de água subterrânea para uso doméstico e agricultura (SANH *et al.* 2017). Sobre-exploração dos aquíferos e conflitos entre os usuários são reportados, levando à redução da quantidade e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Políticas de curto (levantamento da situação dos recursos hídricos e de sua exploração), médio (cálculo de recarga e de taxas de rebaixamento do nível de água em diferentes escalas) e longo (redução da exploração por meio de alternativas como armazenamento da chuva, recarga artificial e filtração lenta por areia) prazos são necessários, uma vez que apesar da elevada disponibilidade hídrica, há uma crescente deterioração da qualidade. Em Bangladesh, a contaminação da água subterrânea por arsênio em aquíferos aluviais rasos é o caso mais emblemático, como apresentado por TSUJI & MURAKAMI (2017). Este estudo visou esclarecer a causa da contaminação do arsênio nas planícies do delta do rio Ganges e delinear medidas efetivas, incluindo perfurações profundas ou distribuição de sistemas de purificação em escalas menores. Um ótimo de extração de água subterrânea deve ser calculado para evitar a contaminação e o mapa de contaminação por arsênio nas águas subterrâneas deve ser entendido como um mapa de risco pelos especialistas que trabalham em segurança humana.

Os artigos mais citados nesta temática referem-se a estudos da Segurança Hídrica focando o Nexus Água-Alimento-Energia, utilizando modelos matemáticos para criação de cenários mais desfavoráveis e favoráveis, de modo a elaborar políticas para ações mais efetivas. A situação agrícola e a disponibilidade de água, os direitos humanos e o acesso à água potável, e o autoabastecimento são apresentados nos artigos de MIRZAEI *et al.* (2019), RAVAR *et al.* (2020) e GRÖNWALL & DANERT (2020).

O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo hidrológico semi-distribuído que simula cenários de várias ações de gerenciamento. Esta ferramenta é geralmente empregada para calcular vazões de rios e o balanço hídrico sob cenários de mudanças do uso e ocupação da terra, para que possam ser elaboradas ações de gerenciamento do recurso hídrico (ARNOLD *et al.* 2012).

WEI & BAILEY (2019) utilizaram o modelo SWAT, acoplado ao modelo MODFLOW (modelo de fluxo de águas subterrâneas), para simulação de um sistema de gerenciamento de irrigação-drenagem-aquífero, com o objetivo de quantificar os efeitos do decréscimo da irrigação nas respostas hidrológicas em plantações com 100 anos de irrigação no vale do rio Arkansas, Colorado, EUA. NADERI (2020) utilizou o modelo SWAT para quantificar os componentes da “água azul” (encontradas em rios, lagos e reservatórios e corpos de água) e “água verde” (armazenada no solo e vegetação) no sul do Irã (região do reservatório Dorudzam). O autor concluiu após elaboração de três cenários, que com as mudanças climáticas (diminuição das precipitações em 13 a 17% e aumento da temperatura em 1,7 a 3,3° C), haverá redução de vazões de entrada no reservatório, aumento da evapotranspiração e decréscimo do teor de umidade do solo; com relação aos aquíferos, que já são insustentáveis, aumentará ainda mais a exploração, levando a crises de água. LIU *et al.* (2023) utilizaram o SWAT para simulação de incertezas e padrões espaciais e temporais das águas “azuis e verdes” na bacia do lago Poyang (China). O estudo mostrou que 58,1% da vazão anual possui contribuição do escoamento superficial e 38,8% do fluxo da água subterrânea. A média anual do recurso de água azul é maior que 65,1% do total dos recursos hídricos; a variação espacial deste recurso foi desigual para a bacia e homogênea para as águas verdes. Os autores também observaram o decréscimo do recurso de água azul em uma sub-bacia (Raohe) entre 1992 e 2010. Por sua vez, o

recurso de água verde cresceu devido ao aumento do fluxo deste tipo de água em muitas sub-bacias do lago.

4 ESTUDOS BRASILEIROS

Dentre os 351 artigos recuperados nesta revisão bibliográfica, 18 foram desenvolvidos com enfoque em casos brasileiros. Dentre estes, 8 ocuparam-se da avaliação da disponibilidade hídrica do ponto de vista quantitativo (CAVAZZANA *et al.* 2019, SIMEDO *et al.* 2020, SANTOS *et al.* 2020, CONICELLI *et al.* 2021, SANTAROSA *et al.* 2022, ROSA *et al.* 2023, PACHECO & PISSARRA 2023, BAPTISTA *et al.* 2023). Outros 5 artigos enfocaram aspectos de qualidade da água dos aquíferos (VIEIRA *et al.* 2020, SILVA & MATTOS 2020, SILVA *et al.* 2021, FRANCELINO *et al.* 2022, SILVA *et al.* 2023). Finalmente, SHUBO *et al.* (2020), SOARES *et al.* (2021), COOPERMAN *et al.* (2022), TINOCO *et al.* (2022) e ACOSTA *et al.* (2023) avaliaram questões relacionadas à governança.

Os estudos brasileiros que se concentraram nos aspectos de quantidade de água para segurança hídrica utilizaram métodos integrados de entendimento do ciclo hidrológico para avaliar a disponibilidade de água subterrânea, considerando que o armazenamento dos aquíferos sustenta a vazão dos rios pelo escoamento básico. Os estudos envolvem a análise de séries históricas dos postos fluviométricos, pluviométricos, estações climáticas e níveis piezométricos. CAVAZZANA *et al.* (2019) utilizaram a metodologia de separação de hidrógrafas do fluxo de base, curva de permanência de vazões e curva principal de recessão para avaliar a interação entre as águas superficial e subterrânea de um aquífero sedimentar não confinado, em região que inclui a Área de Proteção Ambiental de Guabiroba, Campo Grande, MS. O estudo revelou que o escoamento básico é sustentado pela descarga de água subterrânea em 89% do fluxo total. PACHECO & PISSARRA (2023) propuseram uma metodologia para cálculo de um índice de segurança hídrica, tendo como área de estudo a bacia do rio Paraopebas em Minas Gerais. Os autores concluíram que a bacia está sujeita à escassez hídrica em caso de secas prolongadas, pois os rios são abastecidos principalmente pelo armazenamento do aquífero freático, situado no manto de alteração, e o tempo de retorno da água nestes aquíferos é de 1,3 a 23,7 anos.

SANTAROSA *et al.* (2022) desenvolveram um estudo diferente dos demais, pois utilizaram também isótopos estáveis (^2H e ^{18}O) para análise da contribuição da água subterrânea para o fluxo de base nas unidades de gerenciamento Piracicaba-Capivari-Jundiá e Tietê-Jacaré, no estado de São Paulo. Os resultados da modelagem indicaram que no aquífero cristalino a capacidade de armazenamento é menor, sendo assim, a região da unidade de gerenciamento do Piracicaba-Capivari-Jundiá é mais suscetível a secas prolongadas. Nos aquíferos sedimentares, a descarga de água subterrânea responde por 80% do fluxo das drenagens superficiais, com boa capacidade de armazenamento nos períodos chuvosos o que proporciona menor suscetibilidade a secas na região.

Por vezes, estes estudos acoplam a interpretação de imagens coletadas por sensores remotos para entender a dinâmica florestal e do uso e ocupação da terra, a fim de incorporá-la à avaliação da disponibilidade hídrica local. ROSA *et al.* (2023) estudaram a interferência humana na recarga do aquífero Guarani durante o período de 2012 a 2018 por meio de métodos integrados (sensoriamento remoto de uso do solo, evapotranspiração real, precipitação e séries temporais de nível piezométrico). Os resultados de estimativa de recarga dos municípios indicaram menor recarga potencial em áreas de solo exposto como em Boa Esperança do Sul – SP, com recarga potencial de 338 mm/ano e área de solo exposto de 2936 ha. Em Bofete – SP há maior recarga potencial, de 502 mm/ano, e baixo valor de área de solo exposto, de 516 ha. Brotas – SP apresenta menor evapotranspiração (639 mm/ano), com recarga potencial de 470 e 468 mm/ano (em 2013 e 2014, respectivamente) e São Simão - SP, a maior área florestada de 18.009 ha, com recarga potencial de 487 e 485mm/ano (2016 e 2017, respectivamente).

SANTOS *et al.* (2020) utilizaram sensoriamento remoto (séries temporais de NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) para espacializar as informações de evapotranspiração calibradas em campo em 69 pivôs centrais utilizados para irrigação em três bacias hidrográficas na área do aquífero Urucuia, oeste da Bahia. Estes dados serviram como base para estimativa do consumo de água pela agricultura irrigada e foram confrontados com as séries históricas de vazão dos rios, permitindo a identificação de *stress* hídrico e de situações de conflito na região, que apresenta um crescimento contínuo da irrigação.

ACOSTA *et al.* (2023) procuraram entender os impactos hidrológicos de soluções baseadas na natureza (SbN), em especial, recuperação da vegetação em áreas de proteção permanente, nas bacias de contribuição do Sistema Cantareira (SP), com elaboração de diferentes cenários hipotéticos de uso e ocupação da terra e avaliação da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea por meio dos modelos hidrológicos HEC-HMS e SWAT. Nos cenários em que a área revegetada das bacias aumentou significativamente em relação aos usos do solo atuais, houve redução do escoamento superficial e aumento do armazenamento no período chuvoso. Há um aumento de 33% (206 hm³/ano) na produção total de água e aumento de água nas sub-bacias vizinhas. Os autores concluem que a SbN é ferramenta eficaz para reduzir os impactos de estiagem extrema e dar continuidade à segurança hídrica a longo prazo.

A estimativa da recarga é um tema recorrente nos trabalhos que exploram os aspectos quantitativos da segurança hídrica e possui uma relação forte com o declínio dos níveis piezométricos associados às mudanças climáticas. CONICELLI *et al.* (2021) estimaram a recarga em áreas urbanas e rurais na bacia do Alto Tietê com base no balanço hídrico climatológico e em resultados anteriores obtidos pelo grupo de pesquisa. Os autores determinaram recarga urbana (somando perdas na rede de água e esgoto) de 437 mm/ano e na área rural de 106 a 407 mm/ano, e enfatizaram o papel das perdas do sistema de abastecimento de água e coleta de esgotos em área urbana para recarga (artificial) dos aquíferos sedimentar (Fm São Paulo e Fm. Resende) e fraturado, existentes na área de estudo.

SHUBO *et al.* (2020) efetuaram uma revisão bibliográfica sobre o MAR (*Managed Aquifer Recharge*), muito utilizado em países como EUA e Austrália, e teceram comparações com o estágio de conhecimento e implantação deste gerenciamento no Brasil. Exemplificaram com o Projeto Barraginhas, que foi responsável por mais de 500.000 barragens de infiltração até 2013, além de iniciativas em áreas urbanas para redução de pico de cheias. Concluem, entretanto, que o Brasil ainda se encontra em estado inicial de implementação do MAR, necessitando superar desafios tecnológicos, legais e socioculturais.

BAPTISTA *et al.* (2023) realizaram ensaios de infiltração em escala real, buscando dimensionar um sistema de MAR composto por poços tubulares com 42 m de profundidade e que utiliza água captada em telhados de edificações em área urba-

na para infiltração no aquífero. Os resultados deste estudo confirmaram a grande capacidade de absorção do aquífero Barreiras e a possibilidade de se realizar um gerenciamento integrado de ações de controle de inundações urbanas e aumento da recarga dos aquíferos por meio da combinação de *rooftop rainwater harvesting (RWH)* e MAR.

Os índices de qualidade de água aplicados por SILVA *et al.* (2021) avaliaram a qualidade da água de poços da Bacia Sedimentar do Araripe, na região do semiárido nordestino, utilizando métodos estatísticos para identificar variáveis críticas e o Índice de Qualidade da Água (*Water Quality Index - WQIR*), com apoio de Sistema de Informações Geográficas (SIG) para criação de mapas. Os parâmetros fósforo, nitrogênio, nitrato, coliformes termotolerantes, pH e turbidez estavam acima dos limites legais, estando associados a efluentes domésticos. Pelo WQIR as águas foram classificadas como Regular (18,2%) ou Boa (82,8%).

SILVA *et al.* (2023) trabalharam com Índices de Qualidade de Água (GQIR) em uma microbacia do semiárido nordestino. O aquífero não confinado da área de estudo é a principal fonte de água para a população, cujo parâmetro fósforo apresentou-se acima do limite em 75% dos casos. Os mapas de distribuição identificaram áreas afetadas por efluentes domésticos, agricultura e áreas agriculturáveis, com índices considerados “Bons”.

VIEIRA *et al.* (2020) analisaram águas de poços profundos e escavados em áreas rurais do município de Igarassu, Pernambuco, e concluíram estar em desconformidade com a portaria de potabilidade, principalmente em relação aos parâmetros microbiológicos. Os autores identificaram a necessidade de ações descentralizadas de tratamento de água para garantir segurança hídrica às populações rurais da área de estudo.

SILVA & MATTOS (2020) estudaram a qualidade da água subterrânea na cidade de Lençóis, Bahia, concluindo que as atividades econômicas relacionadas ao turismo não constituem a fonte principal de contaminação.

FRANCELINO *et al.* (2022) realizaram um inventário de dados secundários sobre os compostos ativos dos pesticidas comercializados na Bacia do Rio Salgado no Ceará e aplicaram índices propostos na literatura para avaliação do potencial poluidor destes compostos, avaliando os riscos à poluição das águas superficiais e subterrâneas na bacia.

TINOCO *et al.* (2022) compararam os sistemas de gerenciamento de recursos hídricos existentes no México, Brasil e Chile, avaliando até que ponto a governança destes países era capaz de atingir o que se espera de um SGRHI, definido como sendo “um processo que promove o gerenciamento e o desenvolvimento da água, das terras e de recursos relacionados de forma coordenada de forma a maximizar o bem estar econômico e social de forma equitativa e sem comprometer a sustentabilidade de ecossistemas vitais (GLOBAL WATER PARTNERSHIP 2000). Na realidade, o grau de implementação de um SGRHI é um dos indicadores previstos na Agenda da ONU para o Desenvolvimento Sustentável. Os autores concluíram que a implementação do SGRHI ainda é incipiente na América Latina no geral, havendo a necessidade de financiamento para tal. Dentre os três países analisados, o Brasil foi o que realizou maiores progressos em direção a um modelo de governança descentralizado e é onde se promove a maior coordenação entre os diferentes setores e organizações ligadas à água em nível nacional. Há ainda a necessidade de fortalecer os organismos de gestão de bacias hidrográficas e os mecanismos de participação dos diversos atores, assim como melhorar as fontes de financiamento das ações do sistema.

Finalmente, o estudo de COOPERMAN *et al.* (2022), com características completamente diferentes dos demais, avalia a percepção da população rural de alguns municípios do semiárido do Ceará sobre a eficácia de diferentes instrumentos de gestão das águas em caso de implementação na região. Foram avaliadas cinco possíveis implementações: (1) discussões sobre a gestão das águas, (2) leis e sanções, (3) sanções, no caso de uso excessivo, (4) monitoramento e divulgação das condições aos usuários, e (5) pagamento pelo consumo dos recursos hídricos. O artigo aplica metodologia típica da área das ciências políticas e sociais a um caso de gestão ambiental de um bem comum – as águas, e indica a importância e as dificuldades de se realizar este tipo de estudo, que, por outro lado, é essencial para que as ações de gestão dos recursos hídricos contemplem os anseios das comunidades rurais.

5 CONCLUSÕES

Os trabalhos sobre Segurança das Águas Subterrâneas abrangem o entendimento da participação da água subterrânea no ciclo hidrológico em

diferentes regiões e as transformações que ocorrem em função das modificações no uso e ocupação da terra. Tais estudos fornecem subsídios à gestão sustentável dos recursos hídricos sob o ponto de vista de um sistema integrado hidrológico-ecológico-socioeconômico na escala de bacia hidrográfica e em constante transformação, sobretudo em função das mudanças climáticas, crescimento populacional e avanços tecnológicos.

Os estudos com a temática de segurança hídrica subterrânea geralmente avaliam áreas com problemas de disponibilidade quantitativa e/ou qualitativa de recurso hídrico. Estas áreas podem ser tanto urbanas e densamente populosas, como também rurais (áreas de irrigação), localizadas em climas semiáridos em sua maior parte. No entanto, há situações em regiões de maior oferta hídrica, porém com muitos conflitos de uso.

As ferramentas que têm sido mais utilizadas para o desenvolvimento destes estudos são: sensoriamento remoto integrado a séries de dados históricos de precipitação, utilização de satélites específicos de recursos hídricos (GRACE, por exemplo), modelagem por programas específicos de hidrologia e hidrogeologia (SWAT e Modflow), modelos de simulação numérica e por algoritmos de aprendizado de linguagem de máquina (por exemplo SOM), além de diversos métodos de cálculo de índices de qualidade da água. Ainda em desenvolvimento, os índices de sustentabilidade e de segurança hídrica subterrânea baseados nas propostas da *Groundwater and Human Security* (GWAHS) são tendências que poderão evoluir nas pesquisas, principalmente no Brasil. A evolução de estudos mais abrangentes que podem envolver o Nexus Alimento-Água-Energia de uma região, ou resolver problemas por meio das Soluções Baseadas na Natureza (SbN), também são temas que complementam os temas de segurança hídrica desenvolvidos até agora. Cada artigo selecionado para análise consistiu em estudo complexo e requer uma leitura completa; o presente trabalho mostra uma síntese de cada pesquisa. O estudo não pretendeu esgotar a temática, e sim mostrar a extensa variedade de artigos que abordam o tema de Segurança das Águas Subterrâneas, além dos diversos métodos aplicados que são plausíveis de utilização no contexto brasileiro.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos revisores pela contribuição valiosa ao artigo, e ao CNPq (bolsa PQ 2 309017/2021-1).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACOSTA, E.A.; CHO, S.J.; KLEMMZ, C.; REAPPLE, J.; BARRETO, S.; CIASCA, B.S.; LEON, J.; ROGELIZ-PRADA, C.A.; BRACALE, H. 2023. Biophysical Benefits Simulation Modeling Framework for Investments in Nature-Based Solutions in São Paulo, Brazil Water Supply System. *Water*, 15(4): 681. <http://dx.doi.org/10.3390/w15040681>
- AHMED, K.; SHAID, S.; DEMIREL, M.C.; NAWAZ, N.; KHAN, N. 2019. The changing characteristics of groundwater sustainability in Pakistan from 2002 to 2016. *Hydrogeology Journal*, 27: 2485–2496. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-019-02023-x>
- AKBAR, H.; PARIYAPAT, N.; SILALERTRUKSA, T.; GHEEWALA, S. 2022. Comprehensive review of groundwater scarcity, stress and sustainability index-based assessment. *Groundwater for Sustainable Development*, 18: 100782. <http://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100782>
- AMANAMBU, A.C.; OBAREIN, O.A.; MOSSA, J.; LI, L.; AYENI, S.; BALOGUN, O.; OYEBAMIJI, A.; OCHEGE, F.U. 2020. Groundwater System and Climate Change: Present Status and Future Considerations. *Journal of Hydrology*, 589: 125163. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>
- ARNOLD, J.G.; MORIASI, D.N.; GASSMAN, P.W.; ABBASPOUR, K.C.; WHITE, M.J.; SRINIVASAN, R.; SANTHI, C.; HARMEL, R.D. GRIENVEN, A. 2012. SWAT: model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4): 1491–1508. <http://doi.org/10.13031/2013.42256>
- BAPTISTA, V.S.G.; COELHO, V.H.R.; BERTRAND, G.F.; DA SILVA, G.B.L.; CAICEDO, N.O.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; STEFAN, C.; GLASS, J.; HEIM, R.; CONRAD, A.; ALMEIDA, C.D.N. 2023. Rooftop water harvesting for managed aquifer

- recharge and flood mitigation in tropical cities: Towards a strategy of co-benefit evaluations in João Pessoa, northeast Brazil. *Journal of Environmental Management*, 342: 118034. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118034>
- BOLAÑOS, S.; SALAZAR, J.F.; BETANCUR, T.; WERNER, M. 2021. GRACE reveals depletion of water storage in northwestern South America between ENSO extremes. *Journal of Hydrology*, 596: 125687. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125687>
- CAVAZZANA, G.H.; LASTORIA, G.; GABAS, S.G. 2019. Surface-groundwater interaction in unconfined sedimentary aquifer system in the Brazil's tropical wet region. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 24: e8. <http://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180136>
- CHENG, W.; FENG, Q.; XI, H.; SINDIKUBWABO, C.; CHEN, Y.; ZHAO, X. 2023. Spatio-temporal dynamics of water storage across Northwest China over the past four decades. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 49: 101488. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101488>
- CHOUDHURY, M.; ALOMGIR, M.; RAHMAN, M.A.; MONIR, M.U.; BISWAS, B.K.; KHAN, A.B. 2023. Appraisal of groundwater quality and human health risk for water security and health safety assurance in southwest coastal zone of Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 21: 100919. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100919>
- CONICELLI, B.; HIRATA, R.; GALVÃO, P.; BERNARDINO, M.; SIMONATO, M.; ABREU, M.C.; ARANDA, N.; TERADA, R. 2021. Determining groundwater availability and aquifer recharge using GIS in a highly urbanized watershed. *Journal of South American Earth Sciences*, 106: 103093. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103093>
- COOK, C.; BAKKER, K. 2012. Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 22: 94–102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.011>
- COOPERMAN, A.; MCLARTY, A.R.; SEIM, B. 2022. Drivers of successful common-pool resource management: A conjoint experiment on groundwater management in Brazil. *Global Environmental Change*, 74: 102512. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102512>
- DENG, C.; BAILEY, R. 2019. A modeling approach for assessing groundwater resources of a large coral island under future climate and population conditions: Gan Island, Maldives. *Water*, 11(10): 1963. <http://dx.doi.org/10.3390/w11101963>
- FAMIGLIETTI, J.S. 2014. The global groundwater crisis: Groundwater depletion the world over poses a far greater threat to global water security than is currently acknowledged. *Nature Climate Change*, 4(11): 945–948. <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE2425>
- FOSTER, S.; MACDONALD, A. 2014. The ‘water security’ dialogue: why it needs to be better informed about groundwater. *Hydrogeology Journal*, 22: 1489–1492. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1157-6>
- FRANCELINO, J.W.C.; AZEVEDO, F.R.; OLIVEIRA, A.H.B.; MENESES, J.M.C.; PAULA FILHO, F.J. 2022. Water vulnerability to pesticide contamination in a Brazilian semiarid watershed. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 19(3): 804–816. <https://doi.org/10.1002/icam.4703>
- GLOBAL WATER PARTNERSHIP. 2000. *Towards Water Security: A Framework for Action*. GWP Secretariat, Stockholm, Sweden, 18 p.
- GORELICK, S.M.; ZHENG, C. 2015. Global change and the groundwater management challenge, *Water Resources Research*, 51(5): 3031–3051. <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR016825>
- GOWRI, R.; DEY, P.; MUJUMDAR, P.P. 2021. A hydro-climatological outlook on the long-term availability of water resources in Cauvery river basin. *Water Security*, 14: 100102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100102>
- GREY, D.; SADOFF, C.W. 2007. Sink or Swim? Water Security for Growth and Development. *Water Policy*, 9: 545–571. <https://doi.org/10.2166/wp.2007.021>

- GRÖNWALL & DANERT. 2020. Regarding Groundwater and Drinking Water Access through a Human Rights Lens: Self-Supply as a Norm. *Water*, 12(2): 419. <https://doi.org/10.3390/w12020419>
- JENNIFER, M.A.; JHA, M.K. 2023. A Novel GIS-Based Modeling Approach for Evaluating Aquifer Susceptibility to Anthropogenic Contamination. *Sustainability*, 14(8): 4538. <http://dx.doi.org/10.3390/su14084538>
- KUMAR, M.; SHARMA, M.K.; MALIK, D.S. 2023. An appraisal to hydrochemical characterization, source identification, and potential health risks of sulfate and nitrate in groundwater of Bemetara district, Central India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195: 1046. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-023-11642-7>
- LaVANCHY, G.T.; KERWIN, M.W.; ADAMSON, J.K. 2019. Beyond ‘Day Zero’: insights and lessons from Cape Town (South Africa). *Hydrogeology Journal*, 27(5): 1537–1540. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-019-01979-0>
- LEVY, Y.; ELLIS, T.J. 2006. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. *Informing Science Journal*, 9: 181–212. <https://doi.org/10.28945/479>
- LIU, M.; PEI, H.; SHEN, Y. 2022. Evaluating dynamics of GRACE groundwater and its drought potential in Taihang Mountain Region, China. *Journal of Hydrology*, 612: 128156. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128156>
- LIU, M.; ZHANG, P.; CAI, Y.; CHU, J.; LI, Y.; WANG, X.; LI, C.; LIU, O. 2023. Spatial-temporal heterogeneity analysis of blue and green water resources for Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology*, 617(A): 128983. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128983>
- MAUCK, B.; WINTER, K. 2021. Assessing the potential for managed aquifer recharge (Mar) of the cape flats Aquifer. *Water SA*, 47(4). <https://doi.org/10.17159/WSA/2021.V47.I4.3801>
- MELO, M.; FERNANDES, L.; PISSARRA, T.; VALERA, C.; DA COSTA, A.; PACHECO, F. 2023. The COP27 screened through the lens of global water security. *Science of the Total Environment*, 873: 162303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162303>
- MIRZAEI, A.; SAGHAFIAN, B.; MURCHI, A. 2019. The groundwater-energy-food nexus in Iran’s agricultural sector: Implications for water security. *Water (Switzerland)*, 11(9): 1835. <http://dx.doi.org/10.3390/w11091835>
- MOHAMMADNIA, M.; CHABOBROW, G.; RAVANBAKHS, M.H. 2017. Chapter 3 - The effects of groundwater artificial recharge on human security Iran Case study. In: F. Renaud, C. Schuster-Wallace (Eds.) *Groundwater and Human Security*. Hamilton, Canada, United Nations University, p. 97–152.
- NADERI, M. 2020. Assessment of water security under climate change for the large watershed of Dorudzan Dam in southern Iran. *Hydrogeology Journal*, 28: 1553–1574. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-020-02159-1>
- OLIVIER, D.W.; XU, Y. 2019. Making effective use of groundwater to avoid another water supply crisis in Cape Town, South Africa. *Hydrogeology Journal*, 27: 823-826. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-018-1893-0>
- PACHECO, F.A.L.; PISSARRA, T.C.T. 2023. Groundwater security indicators and their drivers: An assessment made in a region of tropical climate (Paraopeba River basin, Brazil). *Science of the Total Environment*, 901: 165919. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165919>
- RAVAR, Z.; ZAHRAIE, B.; SHARIFINEJAD, A.; GOZINI, H.; JAFARI, S. 2020. System dynamics modeling for assessment of water–food–energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran. *Ecological Indicators*, 108: 105682. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105682>
- REBOUÇAS, A.C. 1994. Gestão sustentável dos grandes aquíferos. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, Recife, *Anais*. p. 130–138.

- ROSA, F.M.D.; SILVA JR, C.A.D.; DEGALDO, R.C.; TEODORO, P.E.; TEODORO, L.P.R.; IOCCA, F.A.D.S.; DELLA-SILVA, J.L.; ANDRADE, S.M.; LIMA, M.; FACCO, C.U. 2023. Spectro-temporal analysis of anthropic interference in water production in the Guarani Aquifer. *Journal of South American Earth Sciences*, 121: 104139. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104139>
- SANH, N.V.; DUNG, L.C.; TUAN, V.V. 2017. Chapter 4 – Tra Vinh Case Study – Vietnam: vulnerability of coastal communities to groundwater depletion. In: F. Renaud, C. Schuster-Wallace (Eds.) *Groundwater and Human Security*. Hamilton, Canada, United Nations University, p.159-205.
- SALEM, B.; HAK, M.G.E.; KHALIFA, S.; KING-OKUMU, C. 2017. Chapter 2 – Egypt Case study: Beyond DRASTIC in Wadi Natrun. In: F. Renaud, C. Schuster-Wallace (Eds.) *Groundwater and Human Security*. Hamilton, Canada, United Nations University, p. 25–96.
- SANTAROSA, L.V.; GASTMANS, D.; QUAGGIO, C.S. 2022. Stable isotope modeling of the groundwater discharge in complex watersheds of the state of São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 120: 104063. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104063>
- SANTOS, A.B.; COSTA, M.H.; MANTOVANI, E.C.; BONISENHA, I.; CASTRO, M. 2020. A remote sensing diagnosis of water use and water stress in a region with intense irrigation growth in Brazil. *Remote Sensing*, 12(22): 3725. <http://doi.org/10.3390/rs12223725>
- SHAMSUDDUHA, M.; PANDA, D.K. 2019. Spatio-temporal changes in terrestrial water storage in the Himalayan river basins and risks to water security in the region: A review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35: 101068. <http://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101068>
- SHUBO, T.; FERNANDES, L.; MONTENEGRO, S.G. 2020. An overview of managed aquifer recharge in Brazil. *Water*, 12(4): 1072. <http://dx.doi.org/10.3390/W12041072>
- SILVA, K.B.; MATTOS, J.B. 2020. A spatial approach for the management of groundwater quality in tourist destinations. *Tourism Management*, 79: 104079. <http://doi.org/10.1016/j.tourman.2020.104079>
- SILVA, M.I.; GONÇALVES, A.M.L.; LOPES, W.A.; LIMA, M.T.V.; COSTA, C.T.F.; PARIS, M.; FIRMINO, P.R.A.; PAULA FILHO, F.J. 2021. Assessment of groundwater quality in a Brazilian semiarid basin using an integration of GIS, water quality index and multivariate statistical techniques. *Journal of Hydrology*, 598: 126346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126346>
- SILVA, M.I.; LIMA, M.T.V.; COSTA, C.T.F.; FIRMINO, P.R.A.; MENEZES, J.M.C.; PARIS, M.D.C.; PAULA FILHO, F.J. 2023. Groundwater quality assessment in a peri-urban Brazilian semi-arid microbasin. *Environmental Earth Sciences*, 82: 73. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-023-10752-2>
- SIMEDO, M.B.L.; PISSARA, T.C.T.; MARTINS, A.L.M.; LOPES, M.C.; COSTA, R.C.A.; ZANATA, M.; PACHECO, F.A.L.; FERNANDES, L.F.S. 2020. The assessment of hydrological availability and the payment for ecosystem services: A pilot study in a Brazilian headwater catchment. *Water (Switzerland)*, 12(10): 2726. <http://dx.doi.org/10.3390/w12102726>
- SOARES, M.O.; CAMPOS, C.C.; CARNEIRO, P.B.M.; BARROSO, H.S.; MARINS, R.V.; TEIXEIRA, C.E.P.; MENEZES, M.O.B.; PINHEIRO, L.S.; VIANA, M.B.; FEITOSA, C.V.; SANCHEZ-BOTERO, J.I.; BEZERRA, L.E.A.; ROCHA-BARREIRA, C.A.; MATTHEWS-CASCON, H.; MATOS, F.F.; GORAYEB, A.; CAVALCANTE, M.F.; MORO, M.F.; ROSSI, S.; BELMONTE, G.; MELO, V.M.M.; ROSADO, A.S.; RAMIRES, R.; TAVARES, T.C.L.; GARCIA, T.M. 2021. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19(3): 267278. <https://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.001>
- TABARMAYEH, M.; ZAREI, M.; BATELAAN, O. 2022. A new approach to quantification of groundwater resource stress. *Journal of*

- Hydrology: Regional Studies*, 42: 101161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101161>
- TAYLOR, R.G.; SCANLON, B.; DÖLL, P.; RODELL, M.; VAN BEEK, R.; WADA, Y.; LONGUEVERGNE, L.; LEBLANC, M.; FAMIGLIETTI, J.S.; EDMUNDS, M.; KONIKOW, L.; GREEN, T.R.; CHEN, J.; TANIGUCHI, M.; BIERKENS, M.F.P.; MACDONALD, A.; FAN, Y.; MAXWELL, R.M.; YECHIELI, Y.; GURDAK, J.J.; ALLEN, D.M.; SHAMSUDDUHA, M.; HISCOCK, K.; YEH, P. J.-F.; HOLMAN, I.; TREIDEL, H. 2013. Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3: 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- TINOCO, C.; JULIO, N.; MEIRELLES, B.; PINEDA, R.; FIGUEROA, R.; URRUTIA, R.; PARRA, O. 2022. Water Resources Management in Mexico, Chile, and Brazil: Comparative Analysis of their Progress on SDG 6.5.1 and the Role of Governance. *Sustainability*, 14(10): 5814. <http://dx.doi.org/10.3390/su14105814>
- TSUJI, K.; MURAKAMI, M. 2017. Chapter 6 – Bangladesh Case Study: Arsenic contamination of Groundwater for domestic use. In: F. Renaud, C. Schuster-Wallace (Eds.) *Groundwater and Human Security*. Hamilton, Canada, United Nations University, p. 259–287.
- UNESCO. 2012. *The United Nations World Water Development Report 4: Managing water under uncertainty and risk*. UNESCO, Paris, vol. 1. Disponível em <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002156/215644e.pdf>.
- UNITED NATIONS (UN Water). 2013. *Water Security & the Global Water Agenda. An UN-water Analytical Brief*. Hamilton, United Nations University, Institute for Water, Environment & Health (UNU-INWEH), 47 p. Disponível em <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda>
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). 1994. *Human Development Report 1994*. UNDP, Oxford University Press, New York, 226 p.
- UNITED NATIONS UNIVERSITY. 2017. *Groundwater and human security*. United Nations University, Institute for Water, Environment and Health (UNU-INWEH), Hamilton, 301 p. Disponível em <https://inweh.unu.edu/groundwater-and-human-security>
- VAN ECK, N.J.; WALTMANN, L. 2022. *VOSVIEWER Manual, version 1.6.18*. Universiteit Leiden, CWTS meaningful metrics, 54 p. Disponível em https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.18.pdf
- VIEIRA, I.F.B.; ROLIM NETO, F.C.; CARVALHO, M.N.; CALDAS, A.M.; COSTA, R.C.A.; SILVA, K.S.; PARAHYBA, R.B.V.; PACHECO, F.A.L.; FERNANDES, L.F.S.; PISSARRA, T.C.T. 2020. Water security assessment of groundwater quality in an anthropized rural area from the Atlantic forest biome in Brazil. *Water* (Switzerland), 12(3): 623. <http://dx.doi.org/10.3390/w12030623>
- WANG, Z.; XIAO, J.; WANG, L.; LIANG, T.; GUO, Q.; GUAN, Y.; RINKLEBE, J. 2020. Elucidating the differentiation of soil heavy metals under different land uses with geographically weighted regression and self-organizing map. *Environmental Pollution*, 260: 114065. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114065>
- WHEATER, H.S.; GOBER, P. 2015. Water security and the science agenda. *Water Resources Research*, 51: 5406–5424. <https://doi.org/10.1002/2015WR016892>
- WITTER, S.G., WHITEFORD, S. 1999. Water security: the issues and policy challenges. *International Review of Comparative Public Policy*, 11: 1–25.
- XIAO, J.; WANG, L.; CHAI, N.; LIU, T.; JIN, Z.; RINKLEBE, J. 2021. Groundwater hydrochemistry, source identification and pollution assessment in intensive industrial areas, eastern Chinese loess plateau. *Environmental Pollution*, 278: 116930. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116930>
- WEI, X.; BAILEY, R.T. 2019. Assessment of system responses in intensively irrigated stream-aquifer systems using SWAT-MODFLOW.

Water, 11(8): 1576. <http://dx.doi.org/10.3390/w11081576>

ZHANG, H.; XU, Y.; KANYERERE, T. 2019. Site assessment for MAR through GIS and modeling in West Coast, South Africa. *Water* (Switzerland), 11(8): 1646. <http://dx.doi.org/10.3390/w11081646>

ZHOU, Y.; DONG, J.; CUI, Y.; ZHAO, M.; WANG, X.; TANG, Q.; ZHANG, Y.; ZHOU, S.; METTERNICHT, G.; ZOU, Z.; ZHANG, G.; XIAO, X. 2023. Ecological restoration exacerbates the agriculture-induced water crisis in North China Region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 331: 109341. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109341>

Endereço dos autores:

Sueli Yoshinaga Pereira* ( 0000-0003-3019-4697) e Ana Elisa Silva de Abreu ( 0000-0003-2498-2187) – Instituto de Geociências, UNICAMP, Rua Carlos Gomes, 250, CEP 13083-855, Campinas, SP, Brasil. *E-mails*: sueliyos@unicamp.br; aebreu@unicamp.br

Luís Fernando MURILLO-BERMEDEZ ( 0000-0001-7564-487X) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária, CEP 13083-889, Campinas, SP, Brasil. *E-mail*: luismurillo@fec.unicamp.br

*Autor correspondente

Artigo submetido em 6 de outubro de 2023, aceito em 2 de fevereiro de 2024.

