



INSTITUTO FEDERAL

Sertão Pernambucano

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO SERTÃO
PERNAMBUCANO**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO (PROPIP)
CAMPUS SALGUEIRO**

PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM RECURSOS HÍDRICOS PARA O SEMIÁRIDO

AMANDA LIMA MORAES DOS SANTOS

**Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de
segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios
e oportunidades**

Salgueiro - PE

2023

AMANDA LIMA MORAES DOS SANTOS

Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios e oportunidades

Monografia apresentada ao curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Recursos Hídricos para o Semiárido, ofertado pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, como parte dos requisitos para obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos para o Semiárido.

Orientador: Francisco das Chagas de Sousa

Salgueiro - PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L732 Lima Moraes dos Santos, Amanda.

Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios e oportunidades / Amanda Lima Moraes dos Santos. - Salgueiro, 2023.
26 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Recursos Hídricos) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, 2023.

Orientação: Prof. Msc. Francisco das Chagas de Sousa.

1. Engenharia Sanitária. 2. Abastecimento de Água. 3. Escassez Hídrica. 4. Análise Bibliométrica. 5. VOSViewer. I. Título.

CDD 628



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios e oportunidades**, sob orientação de Francisco das Chagas de Sousa, apresentada pela aluna **Amanda Lima Moraes dos Santos (202127030032)** do Curso **Pós-Graduação em Especialização em Recursos Hídricos para o Semiárido (Salgueiro)**. Os trabalhos foram iniciados às 14:00 h pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Francisco das Chagas de Sousa** (Presidente)
- **Francisco Dirceu Duarte Arraes** (Examinador Interno)
- **Clovis Manoel Carvalho Ramos** (Examinador Externo)
- **Sandra Regina da Silva Galvao** (Examinadora Suplente Interna)
- **Álvaro Carlos Gonçalves Neto** (Examinador Suplente Externo)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pela aluna, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

Aprovado

Reprovado

Nota (quando exigido): 95

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Francisco das Chagas de Sousa** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Salgueiro / PE, 27/02/2023

Assinado de forma digital por Clóvis
Manoel Carvalho Ramos
Dados: 2023.03.07 08:56:34 -03'00'

Clovis Manoel Carvalho Ramos

Assinado de forma digital por Francisco das Chagas de Sousa:97100722349
DN: cn=Francisco das Chagas de Sousa:97100722349, ou=IFSERTA/PE - Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, o=ICPEdu, c=BR
Dados: 2023.03.02 10:07:47 -03'00'

Francisco das Chagas de Sousa

Assinado digitalmente por Francisco Dirceu Duarte Arraes:00145087379
DN: CN=Francisco Dirceu Duarte Arraes:00145087379, OU=IFSERTA/PE - Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, O=ICPEdu, C=BR
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2023.03.02 10:07:47 -03'00'
Foxit Reader Versão: 10.1.0

Francisco Dirceu Duarte Arraes

Álvaro Carlos Gonçalves Neto

Sandra Regina da Silva Galvao

RESUMO

As barragens subterrâneas integram um grupo de soluções sustentáveis utilizadas para aumentar a disponibilidade de água em áreas de escassez hídrica. O objetivo deste artigo foi analisar os principais desafios e perspectivas acerca da pesquisa científica sobre o uso desta tecnologia em regiões áridas e semiáridas. Para isso, realizou-se uma análise bibliométrica a partir de publicações hospedadas na base de dados Scopus no período de 1973 a 2022. Os resultados mostraram que o interesse pelo tema aumentou 300% na última década e atualmente está em amplo crescimento. A busca por estratégias para diminuir os impactos das mudanças climáticas têm norteado as discussões a nível global. As principais tendências do tema envolvem tópicos sobre gestão integrada de recursos hídricos, modelagem, qualidade da água e metodologias para tomada de decisão. No Brasil, as barragens subterrâneas têm sido usadas para garantir o acesso à água em regiões de escassez hídrica, mas ainda é necessário que a tecnologia seja aprimorada para que possa ser melhor utilizada frente às demandas impostas pelas mudanças do clima.

Palavras-chave: Abastecimento de Água; Escassez Hídrica; Soluções Sustentáveis; Análise Bibliométrica; VOSViewer.

ABSTRACT

Underground dams are part of a group of sustainable solutions used to increase the availability of water in areas of water scarcity. The objective of this article was to analyze the main challenges and perspectives regarding scientific research on the use of this technology in arid and semi-arid regions. For this, a bibliometric analysis was carried out based on publications hosted in the Scopus database in the period from 1973 to 2022. The results showed that interest in the subject has increased by 300% in the last decade and is currently experiencing rapid growth. The search for strategies to reduce the impacts of climate change has guided discussions at a global level. The main trends in the theme involve topics on integrated management of water resources, modeling, water quality and decision-making methodologies. In Brazil, underground dams have been used to guarantee access to water in regions of water scarcity, but technology still needs to be improved so that it can be better used in the face of the demands imposed by climate change.

Keywords: Water supply; Water Scarcity; Sustainable Solutions; Bibliometric Analysis; VOSViewer.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. METODOLOGIA	9
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1 Evolução das publicações e principais áreas de pesquisa.....	100
3.2 Países e Instituições	13
3.3 Palavras-chave	15
4. CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

A exploração inadequada dos recursos hídricos e as mudanças climáticas têm levado a desafios globais ligados ao atendimento da alta demanda por água em quantidade e qualidade adequadas para o consumo, especialmente em regiões de escassez hídrica (HANJRA E QURESHI, 2010; PRIYAN, 2021). Dentre as tecnologias adotadas para o abastecimento de água em áreas que convivem com o déficit hídrico destaca-se o uso de Barragens Subterrâneas (BS) (LIMA et al., 2013). As BS são construídas por paredes verticais na direção do leito dos aquíferos aluviais e possibilitam a interrupção do fluxo subsuperficial natural dos corpos d'água para viabilizar o armazenamento de água no subsolo (KHARAZI et al., 2019). Durante o período chuvoso, a água é acumulada no reservatório de drenagem subterrânea e durante a estiagem é possível captá-la por meio de poços rasos (RITCHIE; EISMA; PARKER, 2021).

Nas localidades onde são usadas as barragens subterrâneas contribuem para aumentar a disponibilidade de água para consumo humano e animal, especialmente em períodos em que os rios estão secos (FREITAS et al., 2011). O emprego desta tecnologia tem alta relevância em países como Índia, Irã e Marrocos e é uma alternativa com alto potencial para ser usada em áreas em que as altas taxas de evaporação diminuem a viabilidade do represamento de corpos d'água para formação de grandes reservatórios, por exemplo (KHARAZI et al., 2019; MOZZI et al., 2021; SEFIANI et al., 2019).

Neste contexto, vários grupos de pesquisa buscaram estudar a utilização das BS (ALVES et al., 2018; BHAGAT et al., 2021; DORTAJ et al., 2020; VASQUES et al., 2022). Embora tenha havido grande interesse em investigar a adequação do uso de barragens subterrâneas para diferentes localidades, nenhum trabalho buscou analisar os resultados publicados e sistematizá-los. Neste sentido, a análise bibliométrica é um instrumento que pode ser utilizado para reunir tais informações.

Esta análise consiste em um método sistemático de revisão de literatura por meio da avaliação de dados quantitativos e qualitativos coletados em uma base de dados a partir do uso de uma combinação de palavras-chave como entrada na busca (DOS SANTOS et al., 2021; HE et al., 2020; SILLERO et al., 2022). Os resultados obtidos possibilitam que os produtos mais relevantes acerca do tema sejam

conhecidos, bem como as características regionais das respostas encontradas por diversos autores. Além disso, a análise das palavras-chave utilizadas nos trabalhos permite realizar um mapeamento dos principais temas investigados e de insights para pesquisas futuras (DOS SANTOS et al., 2021; YEUNG et al., 2020).

O uso da ferramenta pode, portanto, contribuir para direcionar a utilização adequada de determinada tecnologia. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica acerca do uso de barragens subterrâneas em regiões áridas e semiáridas utilizando a base de dados Scopus. O trabalho buscou evidenciar os principais desafios e tendências do tema, bem como traçar perspectivas para a pesquisa científica sobre a tecnologia, em especial no semiárido do Nordeste do Brasil. A proposta vai de encontro com os Objetivos para o Desenvolvimento do Milênio da Organização das Nações Unidas e está relacionada com os esforços globais para o enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

2. METODOLOGIA

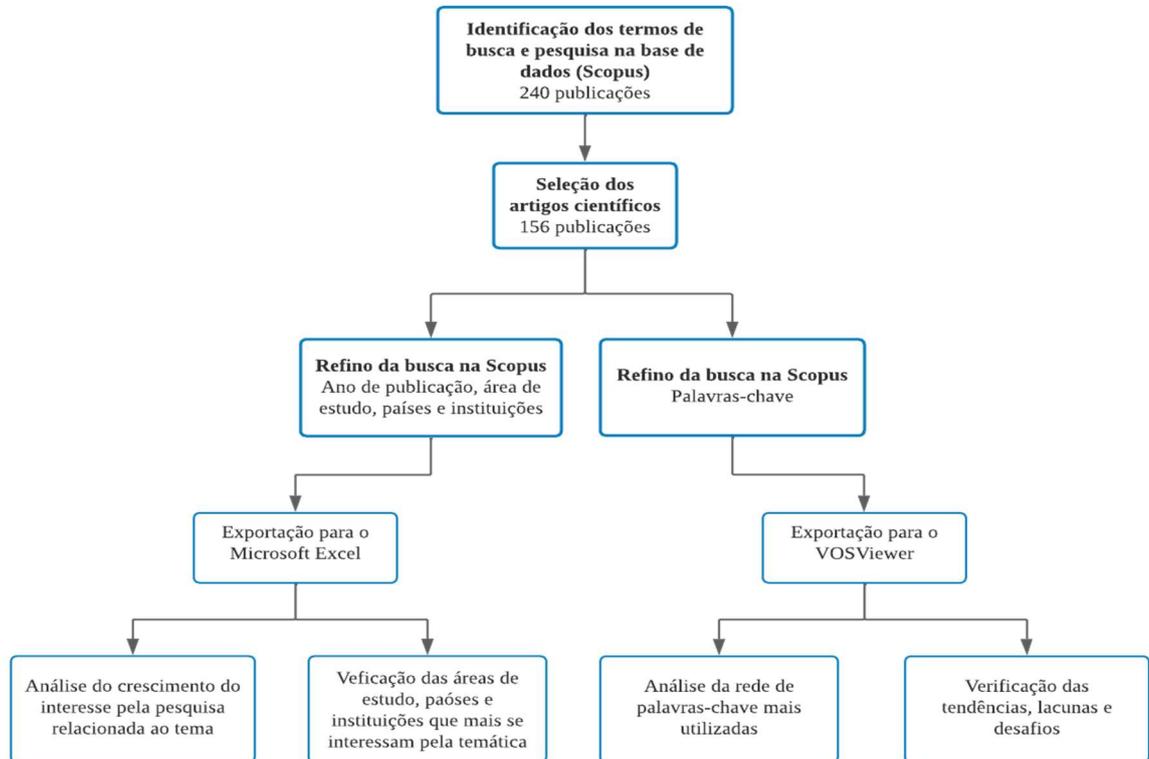
O estudo bibliométrico utilizou o banco de dados da Scopus e foi realizado como apresentado na Figura 1. A busca foi realizada em julho de 2022 usando os operadores lógicos: ALL = ("Groundwater dams" OR "Underground dams" " OR "Subsurface dams") AND ALL = ("Semiarid" OR "Semi-arid").

No primeiro momento realizou-se uma busca geral sem restrições para verificar o crescimento da pesquisa sobre o tema ao longo do tempo. O resultado geral retornou 240 publicações de 1973 a 2022. Na sequência, a busca foi refinada para selecionar apenas artigos científicos ou revisões de 2012 a 2022 (156 publicações) para focar no progresso recente dos trabalhos e observar as principais tendências acerca da temática.

As informações gerais sobre as publicações foram analisadas a partir da contagem de frequência da Scopus. Nesta etapa, os dados foram exportados para o Microsoft Excel e os atributos analisados foram: ano de publicação, área de estudo, países e instituições. Os dados bibliométricos foram exportados em formato CSV e utilizados como entrada no VOSViewer (versão 1.6.15), um software de acesso livre desenvolvido por Van Eck e Waltman (2010) para construção de mapas, redes e clusters que tem sido amplamente utilizado para levantamentos bibliométricos (MD KHUDZARI et al., 2018; TSAI et al., 2020; YEUNG et al., 2020). Para análise

elaborada no software foram selecionadas as informações de co-ocorrência (palavras-chave).

Figura 1 - Etapas metodológicas



Para verificar os resultados direcionados para a realidade do semiárido nordestino a busca foi refinada para incluir apenas os retornos do Brasil. Esta etapa teve como objetivo fazer um recorte dos resultados obtidos na região, para que estes sejam enfatizados e possam dialogar com os que estão sendo obtidos no mundo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Evolução das publicações e principais áreas de pesquisa

A segunda metade do século 20 foi caracterizada pelo desenvolvimento de sistemas para explorar águas subterrâneas e garantir o aporte adequado para fornecer alimentos e água potável, principalmente em regiões áridas e semiáridas (LLAMAS, 1999). O primeiro artigo sobre o tema foi publicado em 1973 e abordava as barragens subterrâneas como alternativa para lidar com a alta salinidade da água

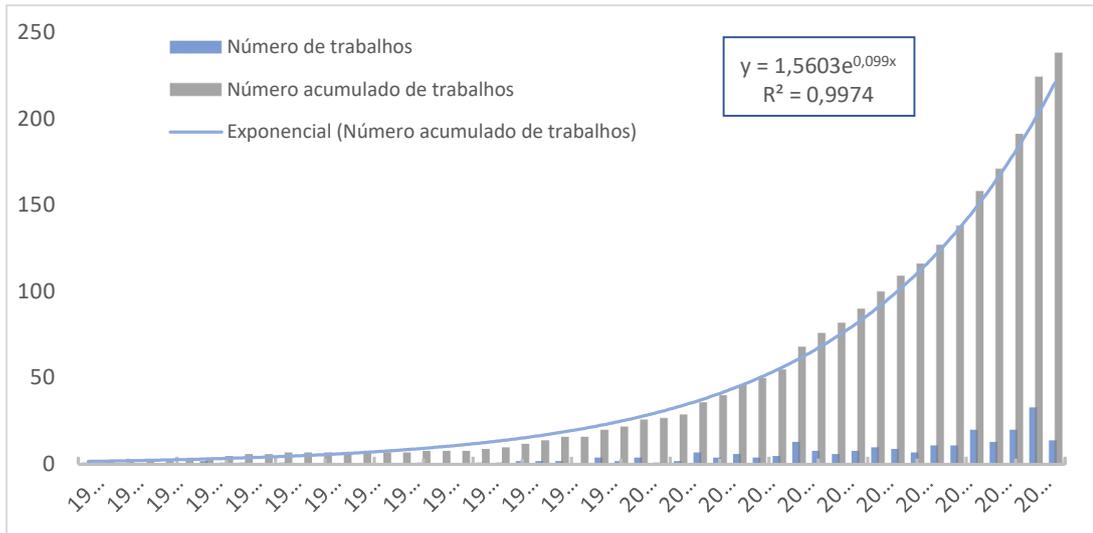
subterrânea captada por meio de poços para irrigar uma área de 720.000 HA na bacia do Rio Murray, Austrália. De 1973 a 1990 foram publicados 8 artigos na temática. Nestes primeiros relatos, além da irrigação de áreas agricultáveis, as avaliações buscaram verificar a viabilidade da utilização de barragens subterrâneas para aumentar o suprimento de água potável em comunidades na América do Norte, África e Europa.

Neste período, Guiraud (1990) apontou que o uso de pequenas barragens nas regiões do Saara e Sahel poderiam permitir o acúmulo de reservas subterrâneas e contribuir para manter um assentamento rural, por exemplo. Dado o papel relevante que os recursos hídricos subterrâneos passaram a assumir a partir dos anos 90, houve uma movimentação para que as águas subterrâneas passassem a ser incluídas nas políticas de recursos hídricos de diversos países. Além deste enfoque, os 14 artigos publicados entre 1991 e 2000 também abordaram temas como: caracterização hidrológica, hidrogeológica e geoquímica de novas áreas; e fatores socioeconômicos que podem afetar a sustentabilidade do suprimento de água a partir das BS (BOUWER, 1994; LADO, 1997; LLAMAS, 1999).

No período entre 2001 e 2010, houve um interesse maior em torno da modelagem de uma série de sistemas de engenharia construídos para o barramento e acúmulo de água subterrâneas em diversas regiões. Estes estudos deram uma contribuição importante em relação a modelagem da capacidade de recarga de água nestas estruturas, identificação de limitações para o atendimento a demanda e avaliação do impacto da presença de contaminantes (MARTÍN-ROSALES et al., 2007; ROBLES-ARENAS et al., 2006; VON DER HEYDEN E NEW, 2004). Entre 2011 e 2022, houve um crescimento de 300% em relação ao número de publicações do período anterior. O interesse pela pesquisa relacionada ao tema começou a crescer exponencialmente a partir de 2009 ($R^2 = 0,9974$) (Gráfico 1).

Os efeitos da crise climática passaram a nortear a busca por soluções eficazes para garantir segurança hídrica em regiões de escassez, especialmente em países em desenvolvimento. Neste contexto, nota-se que a busca pelo uso de barragens subterrâneas como alternativa para a garantia de segurança hídrica nestas regiões está em amplo crescimento. Notadamente, este é um tema interdisciplinar que também promove o interesse de linhas de pesquisa ligadas ao meio ambiente, ciências sociais, engenharia, ciências dos materiais e energia.

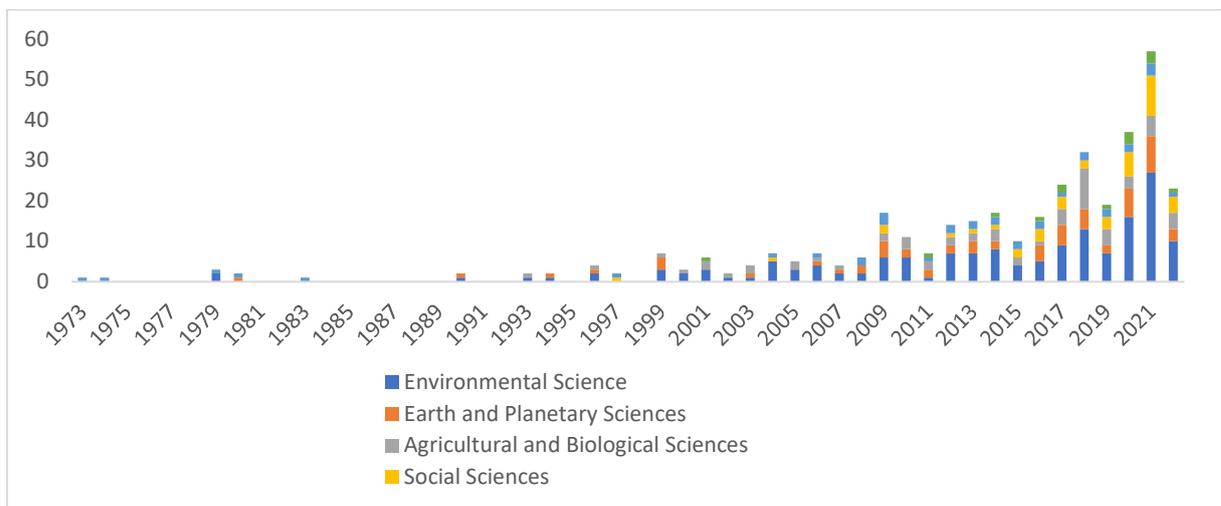
Gráfico 1 – Crescimento das publicações sobre barragens subterrâneas em regiões áridas e semiáridas no período de 1973 – 2022



Fonte: Pesquisa direta – Base de dados Scopus (2022).

As principais áreas de pesquisa sobre o tema são Ciências Ambientais (157; 66%); Ciências da Terra e Planetárias (62; 26,1%); Ciências Biológicas e Agrárias (60; 25,2%); Ciências Sociais (40; 16,8%); Engenharia (35; 14,7%); e Bioquímica, Genética e Biologia Molecular (14; 5,9%) (Gráfico 2). Os *hot topics* de pesquisa para todas as áreas são: gestão de recursos hídricos, abastecimento de água, hidrogeologia, qualidade da água, irrigação, aplicação de sistemas de informação geográfica, modelagem e sensoriamento remoto.

Gráfico 2 – Áreas de pesquisa envolvidas nas publicações sobre barragens subterrâneas em regiões áridas e semiáridas no período de 1973 – 2022



Fonte: Pesquisa direta – Base de dados Scopus (2022).

3.2 Países e Instituições

Os 14 países que mais publicaram sobre o tema mostram que o interesse pela pesquisa está presente em todos os continentes, com destaque para Europa e Ásia (Figura 2). O número de publicações dos 14 países que mais publicaram sobre o assunto relaciona-se com o interesse pela busca de tecnologias adequadas para áreas com altas médias de temperatura, baixos índices pluviométricos e alta salinidade, com ênfase para o Sudoeste dos Estados Unidos; Europa; Norte da África e África do Sul; Sul da Austrália; Sul da Índia; e Nordeste do Brasil. O país com maior número de publicações é o Estados Unidos (32), seguido da Índia (29), Irã (19), China (14), França (13) e Tunísia (13).

Nos Estados Unidos há um interesse emergente em temas como monitoramento da qualidade da água e modelagem, principalmente na bacia hidrográfica do Rio Grande, que divide os país com o México (SHENG, 2013; VINSON et al., 2007). Na Ásia e na Europa, as barragens subterrâneas são soluções construtivas difundidas, especialmente para irrigação de áreas agricultáveis. Após a ratificação do Acordo de Paris, em 2016, os países destes continentes têm se destacado pelo alto investimento em medidas com o objetivo de garantir segurança hídrica e alimentar em áreas de vulnerabilidade climática. Os pesquisadores de países do continente europeu, como França e Países Baixos, têm contribuído para a disseminação da tecnologia por meio da colaboração internacional.

Nos países asiáticos, a evolução rápida do uso de BS está ligada a uma série de critérios utilizados para a escolha de locais precisos para instalação das estruturas com o objetivo de garantir que o retorno dos investimentos seja o maior possível (JAMALI et al., 2013). No Irã, a agricultura irrigada é um dos pilares da economia. Como a irrigação de áreas agricultáveis pode consumir até 85% da água disponível, as águas subterrâneas utilizadas para esse fim têm estado sob pressão nestas áreas (SEFIANI et al., 2019). Portanto, o desenvolvimento de estratégias para maximizar o potencial das BS tem contribuído significativamente para que a tecnologia se dissemine como alternativa para o suprimento de água para a irrigação no país.

Em países da África e da América do Sul nota-se um outro padrão de publicação, pois os estudos têm como objetivo avaliar ou propor o uso de barragens subterrâneas como solução para o atendimento à demanda por água em comunidades rurais, áreas de vulnerabilidade socioeconômica ou áreas agricultáveis.

Atualmente, as regiões áridas e semiáridas ocupam uma área de aproximadamente 66,7 milhões de km² e abrigam aproximadamente 2 bilhões de habitantes em todo o mundo, 90% destes em países em desenvolvimento (PINHEIRO JUNIOR et al., 2019; SANTOS et al., 2018).

O Brasil abriga a maior região semiárida contínua do mundo e está entre as mais densamente povoadas (SOARES et al., 2021). O clima no semiárido brasileiro é fortemente influenciado pela posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCI), o que leva a mudanças significativas no regime de chuvas a depender da migração da ZCI (PEREIRA et al., 2022; SOARES et al., 2021). A alta variação espacial e temporal em relação a eventos climáticos extremos nesta região tem resultado em longos períodos de seca e, conseqüentemente, levado a uma série de problemas socioeconômicos para a população (FILHO et al., 2020). Neste contexto, as barragens subterrâneas têm sido consideradas como uma das soluções para convivência com a seca cada vez mais severa, mas a capacidade de utilização das BS ainda não foi largamente explorada no Brasil como tem sido nos países asiáticos, por exemplo (FILHO et al., 2020; FOSTER et al., 2004).

Figura 2 – Áreas de pesquisa envolvidas nas publicações sobre barragens subterrâneas em regiões áridas e semiáridas no período de 1973 – 2022



Fonte: Pesquisa direta – Base de dados Scopus (2022). *TP: Total de Publicações; TC: Total de Citações.

Em relação às instituições ligadas às publicações, o “United States Geological Survey” detém o maior número de artigos sobre o tema (32), seguido do “Arabian Journal Of Geosciences” (29), da Índia. A última instituição citada lidera ainda o número de citações da lista (106). O Brasil é o 13º do ranking e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte é a instituição com maior número de publicações sobre o tema no país (7).

3.3 Palavras-chave

A análise de palavras-chave tem sido utilizada com frequência em revisões sistemáticas pois permite evidenciar lacunas de pesquisa, desafios e perspectivas de crescimento dos estudos (DOS SANTOS et al., 2021; MAO et al., 2018; SILLERO et al., 2022). Ao longo dos 49 anos de publicações sobre a temática, a pesquisa científica sobre barragens subterrâneas resultou em 240 publicações e 755 palavras-chave foram utilizadas pelos autores. As Figuras 3a e 3b mostram as 327 palavras-chave usadas pelo menos cinco vezes nas publicações.

As barragens subterrâneas fazem parte de um grupo de soluções estruturais que vêm sendo fomentadas para o atendimento à demanda por água, tais como: instalação de cisternas, barragens, poços, dessalinizadores e sistemas para captação de água da chuva (FOSTER et al. 2004; PRIYAN, 2021; SOARES et al., 2021). Dentre este hall de tecnologias, os estudos mostram que as BS se destacam pelo baixo custo, facilidade de construção e alto potencial para o abastecimento de água em regiões com altos índices de evaporação (2.000 mm/ano) e recursos naturais limitados para permitir o acúmulo de águas subterrâneas (SILVA FILHO, 2022).

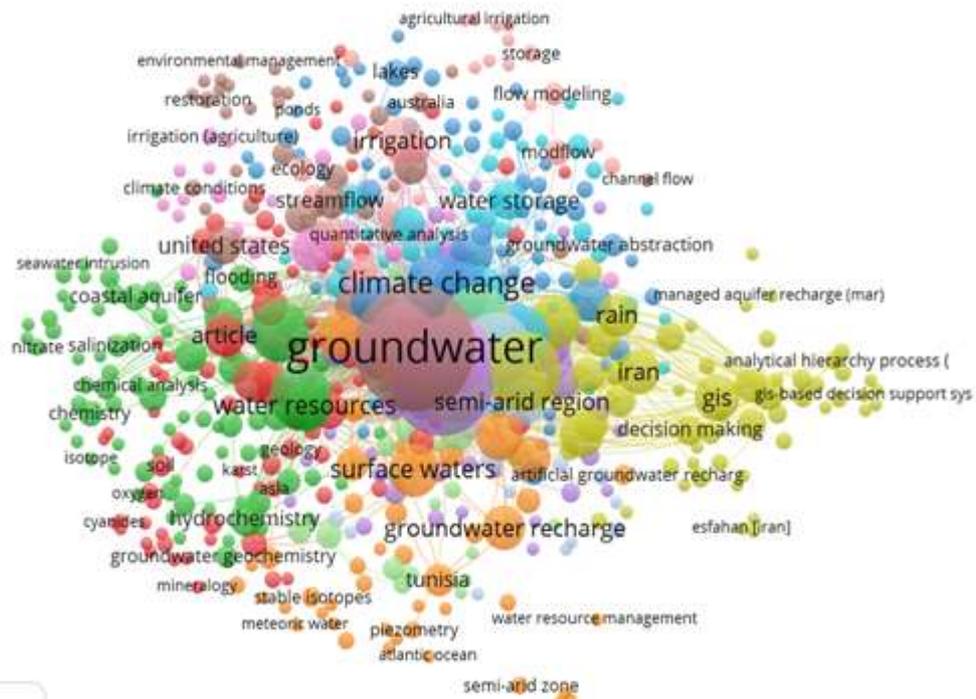
Atualmente, existem dois modelos principais de BS. Na i) Barragem Subterrânea Submersa, a parede para o barramento do fluxo de água está localizada dentro do perfil do solo, interrompendo apenas o fluxo subsuperficial (ONDER E YILMAZ, 2005). Este tipo de estrutura é recomendado para áreas onde há a presença de cursos d’água intermitentes e com maior vazão (LOPES et al., 2003). Já a ii) Barragem Subterrânea Submersível é formada por uma parede construída da camada impermeável até a superfície do terreno, permitindo a interrupção dos fluxos subsuperficial e superficial (LOPES et al., 2003; ONDER E YILMAZ, 2005). Esta estrutura é recomendada para áreas próximas a leitos de corpos d’água temporários de baixa/média vazão ou linhas de drenagem pluvial, pois a formação de um pequeno

lago na camada superficial possibilita o acúmulo gradativo de água (LOPES et al., 2003).

Para a escolha da estrutura hidráulica adequada é primordial que o projeto siga um método sistemático para maximizar o seu desempenho. Logo, a modelagem matemática de parâmetros que influenciam no desempenho das BS é um dos tópicos mais difundidos na pesquisa científica sobre o tema. Neste sentido, Mozzi et al. (2021) desenvolveram uma ferramenta em ambiente R capaz de auxiliar no planejamento da instalação de barragens subterrâneas em regiões semiáridas a partir de dados do balanço hídrico diário de uma BS em Gujarat, Índia.

Figura 3 – (a) Mapa com clusters das palavras-chave mais utilizadas na pesquisa científica sobre barragens subterrâneas em regiões áridas e semiáridas. Cada círculo representa uma palavra-chave utilizada pelos autores, o tamanho do círculo representa o número de publicações e a espessura das linhas mostra o grau de co-ocorrência entre os termos. As cores dos *clusters* indicam grupos de palavras-chave que se relacionam de forma mais próxima. (b) Distribuição temporal dos clusters.

a)



lacunas que vão além da caracterização detalhada da qualidade da água em microbacias, apresentando resultados que podem auxiliar também na implementação de ferramentas para minimização dos impactos previstos. Neste contexto, Bhagat, Mohapatra e Kumar (2021) recomendaram a construção de barragens subterrâneas submersas como medida de controle para a salinização de aquíferos costeiros. Já Abd-Elaty, Straface e Kuriqi, (2021) observaram que a combinação de barreiras físicas na estação seca e poços de descarga na estação chuvosa é uma alternativa para minimizar a intrusão salina em regiões semiáridas. Enquanto Ghazavi, Vali e Eslamian (2012) modelaram a dinâmica de recarga e descarga de águas subterrâneas da planície de Sirjan, Irã, e observaram que para reduzir o risco de salinização da água a descarga de água subterrânea deve diminuir cerca de 30% em relação ao período analisado (1999-2008) ou deve ser incrementada em 30% por meio da infiltração de águas superficiais através do amortecimento de cheias.

O desenvolvimento destas ferramentas ao longo dos anos mostra como a gestão integrada de águas superficiais e subterrâneas é tópico muito relevante na literatura sobre o tema. Ambos os recursos se interligam pois há uma conexão entre o aluvião localizado na seção subsuperficial e o curso d'água superficial, que é essencial para o processo de recarga dos aquíferos subterrâneos (ALVES et al., 2018). Em muitas das regiões estudadas esta sinergia tem sido afetada negativamente devido ao crescimento populacional acelerado, impermeabilização de grandes áreas, industrialização e irrigação agrícola intensiva (MOIWO et al., 2010). A vazão de água superficial tem sido impactada pela ocorrência de eventos extremos que geram picos de vazão repentinos, enquanto as águas subterrâneas são afetadas pelas consequências da exploração intensiva. Ao avaliar esta dinâmica no lago Baiyangdian, China, Moiwó et al. (2010) relataram que a implantação de múltiplas barragens superficiais levou a diminuição do escoamento superficial, enquanto os níveis de água subterrânea foram reduzidos devido à captação excessiva para irrigação agrícola. No Brasil, Alves et al. (2018) avaliaram os limites de exploração de aquíferos aluviais e apontaram que a gestão integrada a nível de bacia hidrográfica é essencial para concessão de outorgas adequadas para o atendimento às demandas do semiárido pernambucano.

Seguindo esta tendência, as BS têm sido apresentadas como soluções tecnológicas com potencial para serem utilizadas em esquemas de gerenciamento integrado de recursos hídricos. Neste caminho, Fathy et al. (2021) utilizaram

diferentes modelos hidrológicos para avaliar o efeito de técnicas de captação e recarga da água da chuva para proteção contra riscos de inundação e recarga de aquíferos subterrâneos na Península de Sinai, localizada na região árida do Egito. Os resultados mostraram que a instalação de barragens subterrâneas é efetiva para redução da vazão de pico e recarga do lençol freático. Assim como Philipp e Grundmann (2013) que modelaram a dinâmica do fluxo de recarga de barragens subterrâneas instaladas próximas de rios de baixa vazão e verificaram que as BS são capazes de causar forte retenção do fluxo subsuperficial, com taxas potenciais de recarga.

Além do que já foi discutido, nota-se que as BS também têm ganhado cada vez mais atenção por gerarem menos impactos ambientais em relação a outras tecnologias quando construídas em áreas apropriadas (CHINNASAMY et al., 2021; SILVA FILHO, 2022). Para instalação em locais adequados é necessário utilizar critérios para evitar problemas futuros como: desuso da estrutura, armazenamento insuficiente de água, salinização, impactos em corpos d'água superficiais ou na fauna aquática nas proximidades, como apontado nos estudos (DORTAJ et al., 2020; KHARAZI et al., 2019). Em algumas regiões, especialmente em países em desenvolvimento, fatores políticos podem influenciar na tomada de decisão da localização da área para instalação, resultando em projetos caros, instalação demorada, altos custos operacionais, baixas vazões de captação e poluição ambiental (CAYIR ERVURAL et al., 2018; DORTAJ et al., 2020; KHARAZI et al., 2019). Como relatado anteriormente, os países asiáticos estão na vanguarda dos estudos deste tópico e os métodos publicados passaram a ser replicados em outras partes do globo.

Assim, o uso de ferramentas para tomada de decisão em relação a áreas precisas para construção de barragens subterrâneas é um tópico de pesquisa emergente com ampla perspectiva de crescimento. As metodologias levam em consideração critérios como uso da terra, tipo de solo, declividade do solo, profundidade do lençol freático, rede fluvial, cobertura vegetal, precipitação, geologia, áreas protegidas e profundidade do aquífero (CAYIR ERVURAL et al., 2018; DORTAJ et al., 2020a; HOQUE et al., 2022). Seguindo essa tendência, Kharazi et al. (2019) utilizaram um software de Sistema de Informação Geográfica (GIS) e a Análise Hierárquica de Processos (AHP) como método de tomada de decisão para escolha de uma área para construção de BS no Irã. Já Aalkaradaghi et al. (2022) usaram AHP e índice baseado em Fuzzy para propor uma área para instalação de lagoas agrícolas

e barragens subterrâneas da região do Curdistão. Enquanto Al-Shammari et al. (2021) usaram tecnologias de sensoriamento remoto, GIS e análise multicritério para analisar áreas de recarga de aquíferos e captação de água para subsidiar a escolha de locais adequados para construção de BS no Iraque. De forma geral, algumas das ferramentas que se destacaram em trabalhos recentes são tecnologias GIS, sensoriamento remoto, Modelo SWAT, Radar de Penetração do Solo, Redes Neurais, Análise baseada em Índice Fuzzy, Análise Multicritério e Análise Hierárquica de Processos (BOUFALA et al., 2022; DORTAJ et al., 2020; VASQUES et al., 2022). Na figura 3b, é possível verificar que palavras-chave relacionadas com metodologias e ferramentas para tomada de decisão aparecem entre as frequentemente usadas a partir de 2017.

No Brasil, as barragens subterrâneas fazem parte do catálogo de tecnologias do Programa Nacional de Apoio à Captação de Água de Chuva e outras Tecnologias Sociais financiado desde 2003 pelo Ministério da Cidadania por meio da Secretaria Especial de Desenvolvimento Social do país. A tecnologia é bem aceita pelas comunidades que a utilizam, como relatado por Cirilo et al. (2003) que entrevistaram famílias beneficiadas pela instalação de 151 barragens subterrâneas no semiárido pernambucano e verificaram que as BS permitiram maior acesso a alimentos e água, além de contribuir significativamente para o desenvolvimento da agricultura nas comunidades. E Barbosa et al. (2011) que relataram que as BS têm contribuído para a transição agroecológica em comunidades na Paraíba.

Seguindo as tendências globais, os pesquisadores do país também têm direcionado os estudos recentes à sistematização da escolha de áreas com maior potencial para instalação das BS. Dos sete trabalhos publicados nos últimos cinco anos, quatro fazem uso de modelagem ou métodos para tomada de decisão para auxiliar a escolha de locais para instalações futuras. Porém, ressalta-se que a definição de área para instalação de BS mais difundida no país (relatada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Semiárido) é mais rudimentar, pois a verificação de fatores como profundidade do solo, possível tamanho da BS e presença de zonas de possível perda de água é realizada a partir da abertura de trincheiras em áreas próximas à leitos de rios ou a zonas de drenagem pluvial (EMBRAPA, 2011).

Como neste tipo de método há limitações para avaliar a dinâmica da interação entre o aquífero aluvial e corpo d'água superficial, a escolha inadequada do tipo de

barragem subterrânea ou da área para construção pode decorrer em problemas como rompimento da estrutura durante eventos extremos (principalmente nas BS submersíveis), salinização e desequilíbrio entre a recarga e descarga dos aquíferos.

Logo, apesar de haver um grande esforço dos centros de pesquisa brasileiros, da EMBRAPA e de organizações como a Articulação no Semiárido Brasileiro (ASA), um dos maiores desafios para disseminação da tecnologia no país é o investimento em instrumentos mais robustos para otimizar a tomada de decisão sobre a construção de BS.

Além disso, ainda é preciso adequar os instrumentos previstos pela política de recursos hídricos do Brasil a áreas que convivem com a seca, em especial para diminuir a superexploração de aquíferos por meio da abertura irregular de poços subterrâneos em pequenas comunidades. Aliado a isso, o gerenciamento integrado de águas subterrâneas e superficiais a nível de bacia é uma demanda urgente. Atualmente, o semiárido brasileiro é uma das principais áreas de vulnerabilidade climática da América do Sul e a população da região tem sofrido com eventos extremos recorrentes. Entre 2011 e 2017 foram registradas secas históricas e o déficit na precipitação média acumulada chegou a 60% em comparação com os demais anos, como relatado por Cunha et al. (2019). De acordo com IPCC (2018), a redução nas taxas de precipitação na região pode chegar a 20% até 2015 e 35% até 2070. Além da redução na chuva, os impactos das mudanças climáticas no semiárido do Brasil incluem desertificação, redução significativa na recarga dos aquíferos de água subterrânea, perda de biodiversidade e eventos chuvosos com picos de vazão repentinas (CUNHA et al., 2019; MOIWO et al., 2010; OUHAMDOUCH et al., 2016).

Neste sentido, os estudos futuros no semiárido brasileiro devem estar focados em ampliar as ferramentas utilizadas para caracterização e tomada de decisão, além de buscar fornecer resultados que possam subsidiar políticas de gestão integrada de recursos hídricos na região. Ademais, por se tratar de uma área de vulnerabilidade climática, o uso de recursos para modelar os impactos de mudanças em processos naturais como precipitação, evaporação, evapotranspiração e percolação e as suas relações com o uso de barragens subterrâneas é um tópico de pesquisa com ampla perspectiva de crescimento no país.

4. CONCLUSÕES

Ao longo de 49 anos a pesquisa científica sobre barragens subterrâneas resultou em diversos insights para o aprimoramento da tecnologia e atualmente se mantém em amplo crescimento. A análise sistemática da literatura mostrou que na última década as publicações têm estado relacionadas com os esforços globais para enfrentar ou diminuir os impactos causados pelas mudanças climáticas. O interesse pelo tema está presente em todos os continentes e o uso das BS é mais disseminado nas regiões áridas e semiáridas da Ásia e da Europa. O uso de ferramentas diferentes e cada vez mais robustas para otimizar o processo de tomada de decisão sobre locais precisos para instalação de BS é uma das principais tendências da pesquisa sobre o tema. Já o uso das BS em esquemas para a gestão integrada de recursos hídricos em regiões de escassez é um dos maiores desafios a nível global. No Brasil, as barragens subterrâneas são utilizadas como tecnologia social, mas ainda é necessário investir no desenvolvimento de instrumentos para que as BS possam ser mais exploradas como alternativa para garantir segurança hídrica no cenário atual de alta vulnerabilidade climática na região semiárida do país.

REFERÊNCIAS

- ABD-ELATY, I.; STRAFACE, S.; KURIQI, A. Sustainable saltwater intrusion management in coastal aquifers under climatic changes for humid and hyper-arid regions. **Ecological Engineering**, v. 171, 1 nov. 2021.
- ALKARADAGHI, K. et al. Geospatial Technique Integrated with MCDM Models for Selecting Potential Sites for Harvesting Rainwater in the Semi-arid Region. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 233, n. 8, 1 ago. 2022.
- AL-SHAMMARI, M. M. A. et al. Integrated Water Harvesting and Aquifer Recharge Evaluation Methodology Based on Remote Sensing and Geographical Information System: Case Study in Iraq. **Natural Resources Research**, v. 30, n. 3, p. 2119–2143, 1 jun. 2021.
- ALVES, E. J. C. et al. Limits and conditions for the exploitation of alluvial aquifers in the Brazilian semi-arid region. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, 2018.
- BARBOSA, G. et al. Sustentabilidade de agroecossistemas com barragens subterrâneas no semiárido brasileiro: a percepção dos agricultores na Paraíba 1 Sustainability of agroecosystems with subsurface dams in Brazilian semiarid: perception of farmers in Paraíba. [s.d.].
- BHAGAT, C.; MOHAPATRA, P. K.; KUMAR, M. Unveiling the extent of salinization to delineate the potential submarine groundwater discharge zones along the North-western coast of India. **Marine Pollution Bulletin**, v. 172, 1 nov. 2021.
- BOUFALA, M. H. et al. Assessment of the best management practices under a semi-arid basin using SWAT model (case of M'dez watershed, Morocco). **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, n. 1, p. 713–731, 1 mar. 2022.
- BOUWER, H. Role of groundwater and artificial recharge in future water resources management. **Future groundwater resources at risk**, p. 491–497, 1994.
- CAYIR ERVURAL, B.; EVREN, R.; DELEN, D. A multi-objective decision-making approach for sustainable energy investment planning. **Renewable Energy**, v. 126, p. 387–402, 1 out. 2018.
- CHINNASAMY, P. et al. Sustainable development of water resources in marginalised semi-arid regions of India: Case study of Dahod in Gujarat, India. **Natural Resources Forum**, v. 45, n. 2, p. 105–119, 1 maio 2021.
- CIRILO, J. et al. Soluções para o suprimento de água de comunidades rurais difusas no semi-árido brasileiro: avaliação de barragens subterrâneas. **researchgate.net**, 2003.
- CUNHA, A. P. M. A. et al. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. **Atmosphere 2019, Vol. 10, Page 642**, v. 10, n. 11, p. 642, 24 out. 2019.
- DORTAJ, A. et al. A hybrid multi-criteria decision making method for site selection of subsurface dams in semi-arid region of Iran. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 10, 1 abr. 2020.
- DOS SANTOS, A. L. M. et al. Global research trends on anaerobic digestion and biogas production from cassava wastewater: a bibliometric analysis. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, n. September, 2021.

- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Instruções técnicas da EMBRAPA Semiárido – Barragem Subterrânea**. Petrolina, PE: EMBRAPA Semiárido, 2011. 2 p. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/54893/1/INT96.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- FATHY, I.; AHMED, A.; ABD-ELHAMID, H. F. Integrated management of surface water and groundwater to mitigate flood risks and water scarcity in arid and semi-arid regions. **Journal of Flood Risk Management**, v. 14, n. 3, p. e12720, 1 set. 2021.
- FILHO, E. L. DA S. et al. Evaluation of the alluvial use potential for a construction of underground dams in the semi-arid region of Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 5, p. 2402–2416, 2020.
- FOSTER, S. et al. Brazil, Kenya: Subsurface dams to augment groundwater storage in basement terrain for human subsistence. **World Bank Sustainable Groundwater Management Lessons from Practice**, p. 1-8, 2004
- FREITAS, D. et al. Water Quality of Cisterns and Underground Dams in Semiarid Regions: Case Study of Afogados da Ingazeira, Pernambuco – Northeast Brazil. [s.d.].
- GHAZAVI, R.; VALI, A. B.; ESLAMIAN, S. Impact of Flood Spreading on Groundwater Level Variation and Groundwater Quality in an Arid Environment. **Water Resources Management**, v. 26, n. 6, p. 1651–1663, 1 abr. 2012.
- GUIRAUD, R. Interflux dams: their advantage for Saharan and Sahelian Africa. **The-state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa. Proc. Sahel Forum, Ouagadougou, 1989**, p. 320–329, 1990.
- HANJRA, M. A.; QURESHI, M. E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food Policy**, v. 35, n. 5, p. 365–377, 1 out. 2010.
- HE, S. et al. **Application and problems of emergy evaluation: A systemic review based on bibliometric and content analysis methods. Ecological Indicators** Elsevier B.V., , 1 jul. 2020a. . Acesso em: 1 dez. 2020
- HE, Z. et al. Impact of human activities on coastal groundwater pollution in the Yang-Dai River plain, northern China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 30, p. 37592–37613, 1 out. 2020b.
- HOQUE, M. A. AMIN et al. Site suitability analysis for the construction of water reservoirs in drought-prone areas of Bangladesh using geospatial techniques. **World Water Policy**, v. 8, n. 1, p. 65–85, 1 maio 2022.
- JAMALI, I. A.; OLOFSSON, B.; MÖRTBERG, U. Locating suitable sites for the construction of subsurface dams using GIS. **Environmental Earth Sciences**, v. 70, n. 6, p. 2511–2525, nov. 2013.
- KHARAZI, P.; YAZDANI, M. R.; KHAZEALPOUR, P. Suitable identification of underground dam locations, using decision-making methods in a semi-arid region of Iranian Semnan Plain. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 9, p. 100240, 1 out. 2019.
- LADO, C. Socio-economic factors influencing sustainable water supply in Botswana. **GeoJournal**, v. 41, n. 1, p. 43–53, 1997.
- LIMA, A. D. O. et al. Revista IRRIGA. **IRRIGA**, v. 18, n. 2, p. 200–211, 18 jun. 2013.

- LLAMAS, M. R. La insercion de las aguas subterranas en los sistemas de gestion integrada. **Boletin Geologico y Minero**, v. 110, n. 4, p. 9–25, jul. 1999.
- LOPES, M. S. et al. Capítulo 2 Barragem subterrânea. **Agropedia Brasilis**, 2003.
- MAO, G. et al. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 1081–1090, 1 set. 2018.
- MARTÍN-ROSALES, W. et al. Estimating groundwater recharge induced by engineering systems in a semiarid area (southeastern Spain). **Environmental Geology**, v. 52, n. 5, p. 985–995, maio 2007.
- MD KHUDZARI, J. et al. Bibliometric analysis of global research trends on microbial fuel cells using Scopus database. **Biochemical Engineering Journal**, v. 136, p. 51–60, 15 ago. 2018.
- MOIWO, J. P. et al. Impact of water resource exploitation on the hydrology and water storage in Baiyangdian Lake. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 21, p. 3026–3039, 15 out. 2010.
- MOZZI, G. et al. Hydrologic Assessment of Check Dam Performances in Semi-Arid Areas: A Case Study From Gujarat, India. **Frontiers in Water**, v. 3, 20 abr. 2021.
- ONDER, H.; YILMAZ, M. Underground Dams - A Tool of Sustainable Development and Management of Groundwater Resources. **European Water**, v. 11, p. 35–45, 2005.
- OUHAMDOUCH, S. et al. Vulnerability and impact of climate change processes on water resource in semi-arid areas: In Essaouira basin (Morocco). **Green Energy and Technology**, v. PartF2, p. 719–736, 2016.
- PEREIRA, N. S. et al. Mid to late 20th century freshening of the western tropical South Atlantic triggered by southward migration of the Intertropical Convergence Zone. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 597, p. 111013, 1 jul. 2022.
- PHILIPP, A.; GRUNDMANN, J. Integrated Modeling System for Flash Flood Routing in Ephemeral Rivers under the Influence of Groundwater Recharge Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1234–1246, dez. 2013.
- PINHEIRO JUNIOR, C. R. et al. Can topography affect the restoration of soil properties after deforestation in a semiarid ecosystem? **Journal of Arid Environments**, v. 162, p. 45–52, 1 mar. 2019.
- PRIYAN, K. Issues and Challenges of Groundwater and Surface Water Management in Semi-Arid Regions. **Groundwater Resources Development and Planning in the Semi-Arid Region**, p. 1–17, 2021.
- QUILIS, R. O. et al. Measuring and modeling hydrological processes of sand-storage dams on different spatial scales. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 34, n. 4–5, p. 289–298, 2009.
- RITCHIE, H.; EISMA, J. A.; PARKER, A. Sand Dams as a Potential Solution to Rural Water Security in Drylands: Existing Research and Future Opportunities. **Frontiers in Water**, v. 3, p. 31, 14 abr. 2021.
- ROBLES-ARENAS, V. M. et al. Sulphide-mining impacts in the physical environment: Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain) case study. **Environmental Geology**, v. 51, n. 1, p. 47–64, out. 2006.

- SANTOS, R. A.; DE, J.; LEMOS, J. S. O SEMIÁRIDO NO MUNDO. **Encontros Universitários da UFC**, v. 3, n. 1, p. 5937–5937, 2018.
- SEFIANI, S. et al. Evaluation of Groundwater Quality and Agricultural use Under a Semi-arid Environment: Case of Agafay, Western Haouz, Morocco. **Irrigation and Drainage**, v. 68, n. 4, p. 778–796, 1 out. 2019a.
- SHENG, Z. Impacts of groundwater pumping and climate variability on groundwater availability in the rio grande basin. **Ecosphere**, v. 4, n. 1, 11 jan. 2013.
- SILLERO, L. et al. A bibliometric analysis of the hydrogen production from dark fermentation. **International Journal of Hydrogen Energy**, 29 jun. 2022.
- SILVA FILHO, E. L. DA. Avaliação do potencial de aproveitamento de aluviões para a construção de barragens subterrâneas no Semiárido Pernambucano. 12 maio 2022.
- SOARES, M. O. et al. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 267–278, 1 jul. 2021a.
- TSAI, F. M. et al. Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 124132, 2020.
- VAN ECK, Nees Jan; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.
- VASQUES, G. M. et al. Ground penetrating radar (GPR) models of the regolith and water reservoir of an underground dam in the Brazilian semiarid region. **Journal of Applied Geophysics**, v. 206, 1 nov. 2022.
- VINSON, D. S. et al. Biogeochemistry at the zone of intermittent saturation: Field-based study of the shallow alluvial aquifer, Rio Grande, New Mexico. **Geosphere**, v. 3, n. 5, p. 366–380, 2007.
- VON DER HEYDEN, C. J.; NEW, M. G. Groundwater pollution on the Zambian Copperbelt: Deciphering the source and the risk. **Science of the Total Environment**, v. 327, n. 1–3, p. 17–30, 5 jul. 2004.
- YEUNG, A. W. K. et al. The ethnopharmacological literature: An analysis of the scientific landscape. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 250, n. November 2019, 2020.