



Ano XXIX - Vol. XXIX - (1): Janeiro/Dezembro - 2025

ÁGUA VIRTUAL APLICADA À PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DE 2012 A 2021

VIRTUAL WATER APPLIED TO SUGARCANE PRODUCTION:
A BIBLIOMETRIC ANALYSIS FROM 2012 TO 2021

AGUA VIRTUAL APLICADA A LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR:
UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO DE 2012 A 2021

Anderson Ribeiro de Almeida¹

0000-0003-4465-8608
anderson.almeida@ifpr.edu.br

José Francisco dos Reis Neto²

0000-0002-1152-1149
jose.rneto@uniderp.com.br

Antonio Gonçalves de Oliveira³

0000-0002-4191-9406
agoliveira@utfpr.edu.br

1 Professor Ensino Básico Técnico e Tecnológico – EBTT / Instituto Federal do Paraná - Campus Pinhais -PR. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4465-8608>. E-mail: anderson.almeida@ifpr.edu.br.

2 Professor da Universidade Anhanguera-Uniderp. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1152-1149>. E-mail: jose.rneto@uniderp.com.br.

3 Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4191-9406>. E-mail: agoliveira@utfpr.edu.br.

Artigo recebido em maio de 2024 e aceito para publicação em fevereiro de 2025.



Este artigo está licenciado sob uma Licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional.

RESUMO: Estima-se que à produção de uma tonelada de cana-de-açúcar, são necessários, em média, 209 m³ de água. Nesse sentido, os conceitos de pegada hídrica e água virtual têm sido amplamente utilizados no cenário acadêmico-científico. Diante da relevância do tema, este artigo tem como objetivo apresentar uma análise bibliométrica baseada em uma revisão sistemática de estudos publicados entre 2011 e 2021, considerando os termos *virtual water trade*, *water footprint*, *sustainability* e *sugarcane*. A revisão foi realizada em artigos científicos, artigos de conferência, artigos de revisões e acessos antecipados, na base de dados da *Web of Science Core Collection*. Os conteúdos abordados: o cálculo da pegada hídrica; eficiência do uso da água nos sistemas de irrigação; produtividade nos canaviais; e os aspectos de sustentabilidade da água. As lacunas identificadas foram a análise do fluxo da água virtual na produção dos biocombustíveis e o comércio da água virtual dos produtos derivados da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Pegada hídrica. Água virtual. Cana-de-açúcar. Recursos hídricos. Gestão e planejamento de políticas públicas ambientais.

ABSTRACT; The production of one ton of sugarcane requires an average of 209 cubic meters of water. In this context, the concepts of water footprint and virtual water have been widely used in the academic-scientific scenario. Given the importance of this topic, this article aims to present a bibliometric analysis based on a systematic review of studies published between 2011 and 2021, considering the terms *virtual water trade*, *water footprint*, *sustainability*, and *sugarcane*. The review was conducted on scientific articles, conference papers, review articles, and preprints in the Web of Science Core Collection database. The topics covered include the calculation of water footprint, water use efficiency in irrigation systems, productivity in sugarcane fields, and the sustainability aspects of water. Identified gaps include the analysis of virtual water flow in biofuel production and the virtual water trade of products derived from sugarcane.

Keywords: Water footprint. Virtual water. Sugarcane. Water resources. Management and planning of public environmental policies.

RESUMEN: Se estima que la producción de una tonelada de caña de azúcar requiere, en promedio, 209 m³ de agua. En este sentido, los conceptos de huella hídrica y agua virtual han sido ampliamente utilizados en el escenario académico-científico. Dada la relevancia del tema, este artículo tiene como objetivo presentar un análisis bibliométrico basado en una revisión sistemática de estudios publicados entre 2011 y 2021, considerando los términos comercio virtual de agua, huella hídrica, sostenibilidad y caña de azúcar. La revisión se realizó sobre artículos científicos, artículos de congresos, artículos de revisión y acceso temprano, en la base de datos Web of Science Core Collection. Los contenidos abarcaron: cálculo de la huella hídrica; eficiencia en el uso del agua en sistemas de riego; productividad en cañaverales; y aspectos de sostenibilidad del agua. Las brechas identificadas fueron el análisis del flujo de agua virtual en la producción de biocombustibles y el comercio de agua virtual en productos derivados de la caña de azúcar.

Palabras clave: Huella hídrica. Agua virtual. Caña de azúcar. Recursos hídricos. Gestión y planificación de políticas públicas ambientales.

INTRODUÇÃO

A água é um insumo primário necessário para a produção de quase todos os tipos de produtos, seja nos processos industriais ou na produção agrícola (Hoekstra; Hung, 2003; Heinke *et al.*, 2020). A produção agrícola irrigada é a maior consumidora de água do mundo (Heinke *et al.*, 2020; Hellegers, 2022). Segundo a *Food and Agricultural Organization* (FAO, 2020), setenta por cento dos recursos de água doce do mundo são utilizados para irrigar 25% das terras agrícolas do mundo. A concorrência dos demais setores da economia pelos escassos recursos hídricos fez com que produtores, técnicos especializados e formuladores de políticas tivessem um novo olhar de como esse bem precioso é utilizado na agricultura (Evans; Sadler, 2008).

Um dos grandes problemas mencionado na literatura científica é sobre o conflito existente entre a água utilizada no setor agrícola e de alimentos e o desenvolvimento econômico (Yang *et al.*, 2021). As quantidades de água incorporadas em commodities são transferidas via comércio inter-regional, o que aumenta o risco de escassez da região exportadora (Zhang *et al.*, 2020a), enquanto o consumo e a transferência de pegada hídrica azul-verde no setor agrícola constituem a parte mais importante do ciclo da água, considerando os aspectos naturais da região (Long *et al.*, 2021). A escassez dos recursos hídricos se tornou um problema global (Bwambale *et al.*, 2022).

Estudos sobre o consumo de água dos processos econômicos têm sido amplamente conduzidos, mas poucos mapearam a água que é incorporada aos caminhos da cadeia de abastecimento dentro das atividades de comercialização (Wang; Cao; Chen, 2021). Se, por um lado, o setor agrícola e de alimentos contribui significativamente para o PIB na maioria das economias do mundo e para a segurança alimentar a todos, por outro, o setor agrícola e o de alimento são apontados como os grandes consumidores dos recursos hídricos (Bwambale *et al.*, 2022).

A cana-de-açúcar é uma *commodity* fundamental e constitui 29% da produção agrícola mundial (Gerbens-leenes; Hoekstra, 2012). É uma cultura que demonstra baixo rendimento na produtividade, se exposta à escassez de água, mas isso não a inviabiliza economicamente (ANA, 2019). Em todo o mundo, a sua produção requer em torno de 220,0 bilhões de metros cúbicos (m^3) de água por ano, o equivalente a 3,4% do uso global de água na agricultura (OCDE/FAO, 2018).

Conforme apontado pelo WWAP (2012), a agricultura representa a principal atividade consumidora de água, sendo responsável por aproximadamente 70% da água retirada para atender às necessidades humanas. O uso desse recurso na irrigação e na produção de alimentos exerce a maior pressão sobre as fontes renováveis de água doce., o volume total de água usado na agricultura se torna $7.980 \times 10m^3/\text{ano}$. Cerca de um terço desse montante é retirado das bacias para irrigação os dois terços restantes são água do solo. Na indústria, é possível visualizar a água utilizada para produzir alguns alimentos que o brasileiro costuma consumir, como carnes, cereais, frutas, laticínios etc., além de outros bens de consumo, como eletrodomésticos, roupas, carros e papel (Jacobi; Grandisoli, 2017).

Inúmeros estudos sobre essa temática foram realizados anteriormente, sobre diferentes aspectos, no entanto, observou-se uma lacuna quanto a um estudo sistemático de revisão com foco na análise da água virtual na perspectiva do consumo e do comércio no setor sucroenergético brasileiro. Na tentativa de preencher esse espaço, este estudo procurar responder à seguinte questão norteadora: Qual o quantitativo bibliométrico sobre a temática do comércio de “água virtual”, da “pegada hídrica” e da “sustentabilidade” aplicados à produção de “cana-de-açúcar” publicado nos periódicos com os maiores fatores de impactos, nas áreas das Ciências Ambientais e áreas correlatas?

A fim de respondê-la, foram elaborados o Objetivo Geral: apresentar uma análise bibliométrica baseada em uma revisão sistemática de estudos considerando os termos “virtual water trade”, “water footprint” e “sustainability” e “sugarcane”, com artigos publicados entre os anos 2011 e 2021.

Objetivos Específicos: (i) analisar o número de artigos publicados de 2011 a 2021 (10 anos) em função do aumento do número de publicações e disseminação de pegada hídrica na agricultura; (ii) identificar os periódicos com maior número de artigos; (iii) identificar quais países foram alvo desses estudos e quais tiveram maior número de trabalhos publicados; (iv) avaliar quais os principais aspectos abordados nesses trabalhos.

Além desta introdução, o presente trabalho está dividido em quatro sessões. O referencial teórico destaca inicialmente uma revisão sobre pegada hídrica, em seguida são abordados os aspectos água virtual e sustentabilidade. A terceira parte do trabalho descreve os procedimentos metodológicos, ressaltando os participantes, processo de coleta e análise. Em seguida, são apresentados os resultados e as discussões dos achados. Por fim, apontamos a conclusão do nosso estudo, bem como suas limitações e sugestões de pesquisas futuras.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como já foi dito, a água é um recurso primário essencial para a produção agrícola e industrial, sendo a agricultura irrigada a maior consumidora global. A competição por água entre diferentes setores econômicos levou a uma reavaliação sobre seu uso na agricultura. O conflito entre a demanda por água na agricultura e o desenvolvimento econômico é destacado na literatura, especialmente devido à transferência de água incorporada em commodities via comércio internacional. A cana-de-açúcar, representando uma parcela significativa da produção agrícola mundial, requer uma quantidade substancial de água para seu cultivo.

Globalmente, a agricultura utiliza uma quantidade massiva de água, especialmente quando se consideram as perdas por irrigação. A indústria também é uma grande consumidora de água, especialmente na produção de alimentos e bens de consumo (Wang; Cao; Chen, 2021; Yang *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020b; Bwambale; Abagale; Anornu, 2022; Gerbens-Leenes; Hoekstra, 2012). No Brasil, 748,9 mil ha de área plantada necessitam do sistema de irrigação com água de mananciais, sendo 292,5 mil ha na região Centro-Sul e 456,4 mil ha na região Norte-Nordeste (ANA, 2019).

Desde as primeiras publicações sobre *virtual water* (água virtual) ou *water footprint* (pegada hídrica) (Johannessen, 2004; Oki; Kanae, 2004; Rogers *et al.*, 2004) e os avanços teóricos subsequentes para *sustainable consumption e virtual water* (consumo sustentável e água virtual) (Alexoaei; Cojanu; Coman, 2021), tem-se observado uma grande quantidade de artigos científicos sobre diferentes formas de gerenciamento dos recursos hídricos sob aspectos econômicos, ambientais e sociais (Navarro-Ramírez *et al.*, 2020).

Os conceitos de água virtual e pegada hídrica estão intimamente ligados; a diferença está na perspectiva de análise. A base para o conceito e para a metodologia da pegada hídrica foi introduzida em 2002 por Hoekstra na UNESCO-IHE e posteriormente desenvolvida na Universidade de Twente, Holanda. Em princípio, o conceito estabelece um indicador baseado no consumo de uso da água que poderia fornecer informações úteis, além dos indicadores tradicionais que advêm do setor de produção (Hoekstra; Hung, 2003).

A pegada hídrica é diferenciada por três tipos: (i) verde - é considerada a água da chuva evaporada ou adicionada aos produtos durante o processo produtivo; (ii) azul - relaciona-se às águas superficiais ou subterrâneas que evaporam ou são incorporadas ao produto, ou ainda aquelas que são devolvidas ao mar ou despejadas em outras bacias; (iii) cinza - corresponde ao volume de água necessário para diluir a ‘poluição’ gerada durante o processo produtivo industrial (Hoekstra; Hung, 2003).

A pegada hídrica foi desenvolvida em analogia ao conceito de pegada ecológica, que surgiu na década de 1990 (Rees, 1992; Wackernagel; Rees, 1996; Wackernagel *et al.*, 1997). A pegada ecológica de uma população representa a área e os ecossistemas (terrestres e aquáticos) necessários para produção de recursos a serem consumidos por uma determinada população, em uma determinada área geográfica. Considerando que a pegada ecológica quantifica a área necessária para sustentar a vida das pessoas, a pegada hídrica, por sua vez, indica o volume de água necessário para o sustento de uma população. O objetivo é, desse modo, avaliar a sustentabilidade da criação de um produto, além de quantificar a eficiência e a equidade do uso da água e de identificar ações estratégicas para alcançar a sustentabilidade (Hoekstra, 2011).

A água virtual, por sua vez, pode ser analisada tanto pela perspectiva de consumo quanto pelo comércio. Ren *et al.*, (2020) explicam que o comércio virtual de água é uma estratégia eficaz para aliviar a escassez de água, por isso, na literatura, há diferentes métodos para obter uma descrição e uma avaliação quantitativa da água virtual. Além das duas perspectivas mencionadas, a água virtual pode ser amplamente dividida em abordagens de pegada hídrica volumétrica e orientada para o impacto, como foi o caso de Da Silva *et al.*, (2015), que pesquisaram a variação do uso de água no cultivo da cana-de-açúcar cultivada pelo método tradicional, com base no balanço hídrico do solo em condições de campo.

O comércio virtual de água entre países reflete uma vantagem comparativa na eficiência do uso desse recurso, com países exportadores geralmente necessitando de menos água do que países importadores. No entanto, essa troca desigual é influenciada pela distribuição desigual da disponibilidade hídrica global e pela variação sazonal dos períodos chuvosos. Estudos recentes sobre o comércio de água virtual, utilizando metodologias como o modelo regional ou multirregional de entrada e saída, destacam a predominância de pesquisas na China e em países asiáticos. Essas pesquisas analisam o volume e os fluxos de água virtual, demonstrando a complexidade e o impacto dessa dinâmica no cenário global (De Almeida; Dos Reis Neto, 2022).

Análises quantitativas revelam a predominância dos setores primários no consumo direto de água, enquanto a pecuária e a silvicultura exercem influência significativa nos fluxos de água virtual. Países como o Quirguistão e a Malásia dependem da importação líquida de água virtual, com o trigo e produtos agrícolas sendo fontes principais. O comércio de água virtual apresenta taxas de crescimento notáveis, especialmente nas importações da China, impulsionadas pelo setor alimentar. Os Estados Unidos emergem como o maior importador de água virtual, enquanto a Índia lidera as exportações. A África do Sul enfrenta um crescimento mais lento nas importações, enquanto a Rússia registra uma taxa significativa de exportação. Regiões como o Mediterrâneo e o Reino Unido também são importantes no comércio de água virtual, refletindo complexidades econômicas e de sustentabilidade (De Almeida; Dos Reis Neto, 2022).

Estudos realizados no Brasil, especificamente no Ceará, Mato Grosso do Sul e Paraná, abordaram o consumo de água virtual pelos setores econômicos e o saldo do comércio de água virtual. No Ceará, embora a agropecuária seja reconhecida por seu alto consumo de água, não foi identificada como um setor-chave em termos de fluxos hídricos. No Mato Grosso do Sul, destacou-se como exportador

líquido de água virtual, com a soja em grão influenciando outros setores. Já no Paraná, o setor agropecuário foi identificado como o principal consumidor, enquanto o estado mostrou-se exportador líquido no comércio interestadual (De Almeida; Dos Reis Neto, 2022).

Além disso, um estudo nacional realizado pelo IPEA mapeou o uso de água ao longo da cadeia de produção e os impactos da adoção de tecnologias menos intensivas em água. A utilização do modelo de insumo-produto foi comum entre esses estudos para calcular o volume de água virtual em diversos setores produtivos. Essas pesquisas apontam para a necessidade de políticas públicas mais eficientes para o uso dos recursos hídricos, especialmente em tempos de crise como a enfrentada pelo Paraná (De Almeida; Dos Reis Neto, 2022).

METODOLOGIA

A revisão bibliométrica foi realizada através da busca de artigos científicos, artigos de conferência, artigos de revisão e acessos antecipados na base de dados da *Web of Science Core Collection*, publicada pela *Clarivate AnalyticsTM*. A busca limitou-se a publicações de 2012 a 2021.

Os termos considerados na pesquisa, juntamente com seus objetivos, foram os seguintes: (i) Sustentabilidade: com o objetivo de capturar o conceito de sustentabilidade e suas variações nos documentos; (ii) Comércio de água virtual: com o intuito de encontrar documentos com foco em água virtual; (iii) Cana-de-açúcar: para limitar a busca por documentos relacionados a qualquer aplicação no setor sucroalcooleiro.

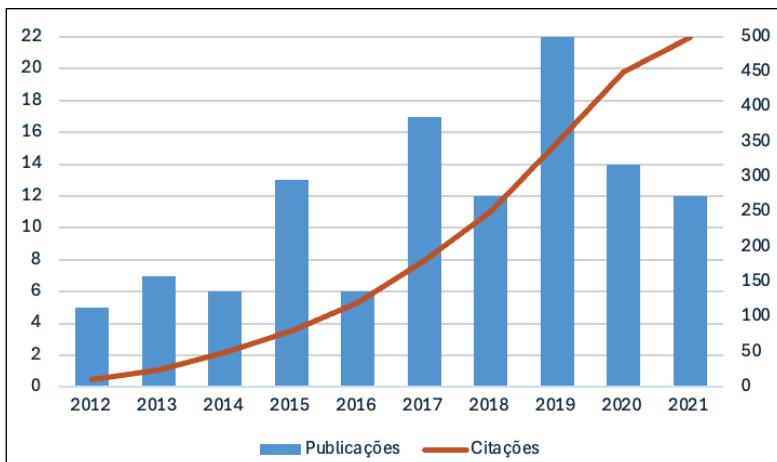
Os termos utilizados na pesquisa foram: “Comércio de água virtual” or “Pegada hídrica” or «Água virtual» or “Produtividade hídrica” or “Consumidor de água” AND “Cana-de-açúcar” or “Cana-de-açúcar” or “Cana-de-açúcar”) AND “Sustentabilidade” or “Sustentável”. Essa configuração de busca (na pesquisa de tópicos, que inclui título, palavras-chave e resumo) gerou 113 documentos, os quais foram organizados no software de gerenciamento de referências EndNote®.

Os documentos foram analisados descritivamente para identificar as seguintes métricas: o número de publicações por ano; o número de citações por ano; os autores mais citados; as fontes e os países influentes; a rede de colaboração entre países; a relação entre autores, países e palavras-chave; as palavras-chave mais utilizadas, sua evolução ao longo dos anos e uma rede de co-ocorrência de palavras. Foram aplicadas ferramentas de visualização analítica (*biblioshiny*) e um pacote de análise bibliométrica (Aria; Cuccurullo, 2017), disponíveis no software R Studio® e Microsoft Excel®, para facilitar a apresentação dos resultados.

ANÁLISE E DISCUSSÃO

Considerando todos os 113 documentos selecionados para a análise bibliométrica, foi possível separá-los por ano de publicação e citações, o que resultou na série temporal. A Figura 1 indica um aumento significativo no número de artigos que discutem o conceito de água virtual no setor sucroalcooleiro com um foco sustentável. Em 2019, houve um ligeiro aumento no número de publicações em relação aos anos anteriores. Essa pequena elevação pode ser explicada principalmente pelo crescimento das bases de dados eletrônicas e pela digitalização de documentos, incentivando os pesquisadores a extrair informações úteis auxiliadas por abordagens computacionais. No entanto, destaca-se o número de artigos publicados em 2017, 2018, 2020 e 2021, que demonstra os mais

diversos setores consolidados na busca por sustentabilidade, principalmente devido à preocupação com a gestão dos recursos hídricos.



Fonte: Elaborado pelo autor e gerado no software de gerenciamento de referência EndNote®.

Figura 1. Números de publicações e citações (113) publicados e citados por ano (2012-2021).

O estudo identificou que a revista que abarcou o maior número de artigos publicados foi o *Journal of Cleaner Production*, que correspondeu 8,8% (10 dos artigos da amostra do estudo), um montante 50% maior do que a segunda revista com maior número de publicações. A revista *Science of the Total Environment* divulgou cinco artigos sobre a temática abordada neste estudo, ao passo que *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *Sustainability* e *Water* apresentaram cada uma quatro artigos. Esses resultados sugerem que esses periódicos podem ser avaliados como alternativas para a divulgação de estudos sobre o comércio de água virtual, a pegada hídrica e a sustentabilidade no uso da água na produção de cana-de-açúcar, aumentando, consequentemente, as publicações e os leitores.

Além das revistas e do número de artigos, foi possível identificar os autores mais relevantes, ou seja, aqueles que mais publicaram estudos na amostra selecionada. O destaque na amostra foi Arjen Y. Hoekstra (7,0%), com oito trabalhos publicados na temática. Arjen Hoekstra é professor de gestão da água na Universidade de Twente, Holanda, e professor visitante na *Lee Kuan Yew School of Public Policy* da Universidade Nacional de Cingapura. Suas publicações estão relacionadas à água, aos alimentos, à energia e ao comércio, e incluem muitos artigos e capítulos de livros altamente citados, como é possível verificar na amostra.

Outro pesquisador mencionado é Mesfin M. Mekonnen (4,4%), com cinco trabalhos publicados. Mesfin Mekonnen é professor assistente do Departamento de Engenharia Civil, Construção e Meio ambiente da Universidade do Alabama, e seus temas de pesquisa são água, energia, sustentabilidade, com especialidades em avaliação da pegada hídrica, produtividade hídrica, nexo água-energia-alimento, escassez de água, gestão da água e modelagem de uso de água de cultivo, modelagem espacial.

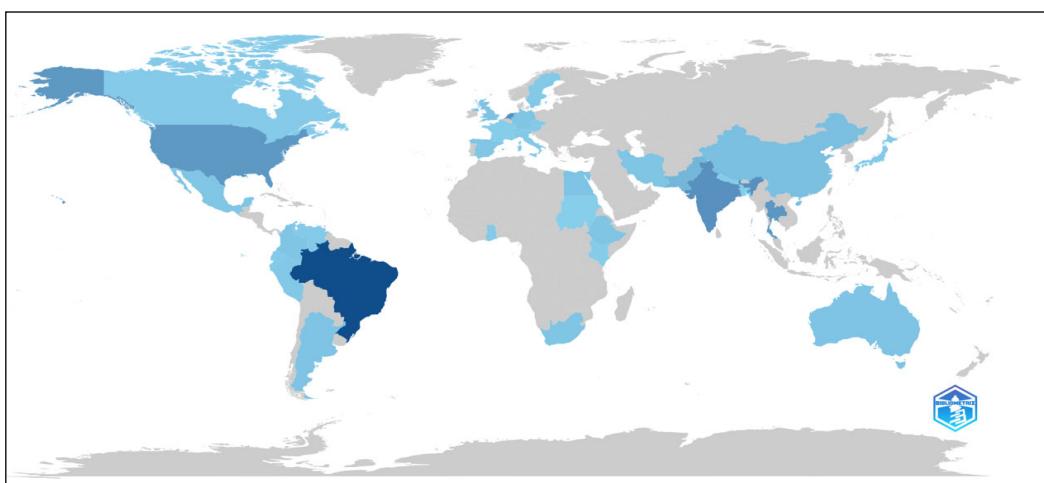
Shabbir H. Gheewala (3%) aparece com quatro artigos publicados. Shabbir Gheewala é professor e pesquisador da Universidade de Tecnologia de King Mongkut Thonburi, Bangkok, Tailândia. Seus estudos estão relacionados à sustentabilidade, à avaliação do ciclo de vida dos sistemas de energia e aos biocombustíveis. Os demais autores indicados na figura publicaram dois ou três artigos concernentes à temática abordada.

A filiação que aparece com maior frequência é a Universidade de São Paulo, com 12,3% de todos os trabalhos publicados na amostra estudada (14 estudos oriundos dessa instituição). Em seguida, com 13 publicações (11,5%), está a Universidade de Twente, Holanda. Esse resultado coincide com o autor mais relevante na amostra (Arjen Hoekstra), professor dessa instituição. Ainda, é importante considerar o *Indian Institute of Technology*, que deu origem a pelo menos quase 8% das publicações na amostra (9 publicações). A *Delft University of Technology*, Holanda (Países Baixos), Kasetsart University, Bangkok, Tailândia, e *University of Agriculture Faisalabad*, Paquistão, contribuíram com seis publicações cada. As demais filiações variaram entre três e cinco trabalhos publicados, sendo seus pesquisadores oriundos destas instituições: *Icar Sugarcane Breeding Institute*, Coimbatore, Índia; Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil; Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil; *University of Nebraska*, Licon, Nebraska, entre outras.

A Holanda (Países Baixos) apareceu 454 vezes nos trabalhos levantados pela amostra, sendo o primeiro país mais citado. A segunda posição ficou com o Brasil, citado 431 vezes. A terceira, quarta e quinta posições foram, respectivamente: Tailândia (216 citações), Estados Unidos (153 citações), Índia (127 citações) e a Austrália (107 citações). Os demais países elencados na figura tiveram citações inferiores a 80 vezes.

Os resultados sugerem que pesquisadores de todo o mundo tomam a Holanda e o Brasil como objetos de pesquisas (associadas ao conceito de sustentabilidade e suas variações e ao comércio de água virtual), limitados a busca por documentos com qualquer aplicação no setor sucroalcooleiro. Como evidência, Gerbens-Leenes *et al.* (2012) citaram o Brasil, os EUA e a China ao dizerem que esses países, juntos, contribuíram com metade da pegada hídrica global de biocombustíveis. Nesse mesmo artigo, os autores mencionaram que a indústria na Holanda adotou recentemente critérios conscientização sobre as questões de sustentabilidade relacionadas ao aumento do uso de biocombustíveis, afirmando que a competição pela água deve ser evitada. Além disso, incluem um indicador que visa a melhorar a quantidade e a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Outros trabalhos também evidenciam esses resultados (Hernandez *et al.*, 2014; Mekonnen *et al.*, 2015; Scarpone *et al.*, 2016a; Surendran *et al.*, 2016b; Karimi *et al.*, 2019; Yuguda *et al.*, 2020; Yakubu *et al.*, 2021).

Após o apontamento dos países mais citados na amostra, a Figura 2 demonstra os países de origem dos pesquisadores, por número de publicações realizadas.

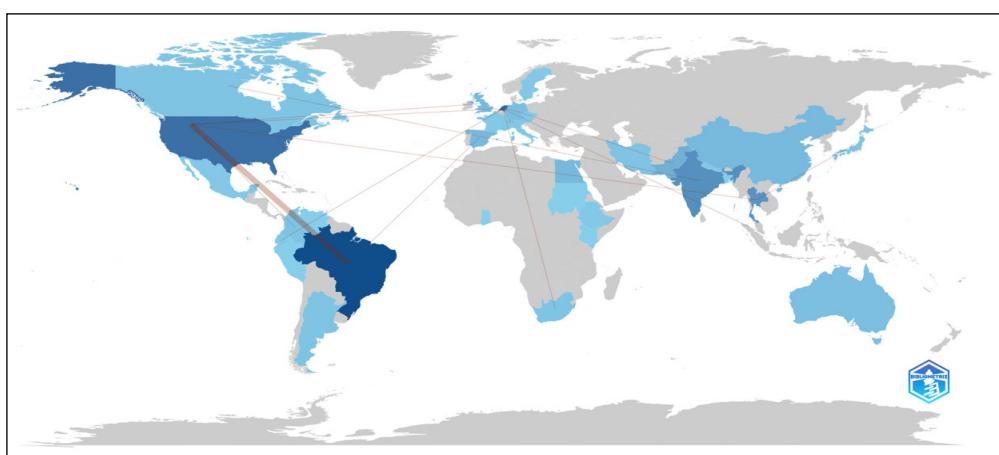


Fonte: Elaborado pelos autores e gerado no software RStudio e Biblioshiny (Bibliometrix).

Figura 2. Números de estudos publicados (113) e citados por país (2012-2021).

Observa-se que o Brasil (Hernandez *et al.*, 2014; Agnellos Barbosa *et al.*, 2017; Munoz Castillo *et al.*, 2017; Barreto *et al.*, 2020; de Souza *et al.*, 2020; Reis *et al.*, 2020), os Estados Unidos (Orfield *et al.*, 2015; Brauman; Viart, 2016; Reis *et al.*, 2020), a Holanda (Bastiaanssen; Steduto, 2017); Morao; de Bie, 2019), a Índia (Garg *et al.*, 2012; Dingre *et al.*, 2021) e a Tailândia (Gheewala *et al.*, 2013; Kaewmai *et al.*, 2021) foram os países com maior número de trabalhos publicados. Esse montante de publicações por país poderia indicar que os autores, durante o período de estudo, residiam nos locais das áreas de estudos.

Além de analisar os países de origem da produção científica, é importante verificar a interação entre os pesquisadores de diferentes países, com contribuições ou parcerias entre distintos autores. A Figura 3 evidencia tais interações, com foco em três epicentros: Holanda, Estados Unidos e Brasil.



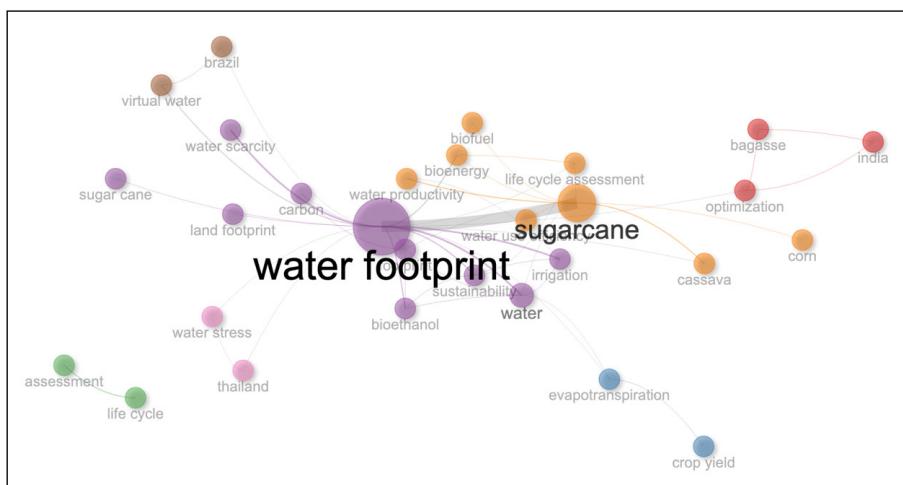
Fonte: Elaborado pelos autores e gerado no software RStudio e Biblioshiny (Bibliometrix).

Figura 3. Rede de colaboração entre os países (2012-2021).

A rede de interação centralizada na Holanda recebeu contribuições e parcerias de autores dos Estados Unidos (Mekonnen; Hoekstra, 2020a, 2020b), África do Sul (Ercin; Chico; Chapagain, 2019), Paquistão (Khan *et al.*, 2021), Suíça (Mekonnen *et al.*, 2015; Karimi *et al.*, 2019), Tailândia (Shrestha *et al.*, 2013) e do Equador (Vaca-Jimenez; Gerbens-Leenes; Nonhebel, 2019a, 2019b).

A rede dos Estados Unidos recebeu contribuições e parceiras principalmente de autores brasileiros (Munoz Castillo *et al.*, 2017; Mekonnen *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2020), colombianos (Duarte; Pinilla; Serrano, 2021), tailandeses (Chaibandit; Konyai; Slack, 2017), ingleses (Hadian; Madani, 2015; Brauman; Viart, 2016) e holandeses (Mekonnen *et al.*, 2018). O Brasil, diferentemente dos demais epicentros, interagiu apenas com autores dos Estados Unidos (Scarpone *et al.*, 2016; Leao *et al.*, 2017; Mantoam *et al.*, 2020) e da Espanha (Chico *et al.*, 2015; Frizzone *et al.*, 2021).

Para otimizar a busca por estudos que possam ser referências na área de aplicação do comércio de água virtual, da pegada hídrica e da sustentabilidade no uso da água na produção de cana-de-açúcar, é importante determinar se há algum padrão nas palavras-chave utilizadas pelos autores em suas publicações. A Figura 4 ilustra a distribuição da rede de palavras-chave em sete clusters. Considerando que cada cluster é um agrupamento (número de vezes que o termo foi citado), quanto maior for a esfera com os termos e mais próximos eles estiverem, maior será a relação entre uma palavra-chave e outra e a probabilidade desses termos estarem relacionados no trabalho.



Fonte: Elaborado pelos autores e gerado no software RStudio e Biblioshiny (Bibliometrix).

Figura 4. Rede de frequência das palavras-chaves mais citadas nos 113 documentos (2012-2021).

Outro elemento a ser considerado na interpretação do diagrama é a posição das palavras-chave em relação às demais, especificamente sua centralidade e as conexões periféricas. No caso específico, a palavra-chave central deste estudo é “*water footprint*” (pegada hídrica), que está fortemente ligada a “*sugarcane*” ou “*sugar cane*”. Essas duas palavras têm conexão com a maioria das outras presentes nos demais clusters, especialmente com “*water productivity*”, “*water use efficiency*”, “*irrigation*” e “*sustainability*”. Assim, é possível verificar a tendência dos autores em utilizar as palavras “*water footprint*” e “*sugarcane*” como síntese de seus estudos.

Essa constatação é verificada em um padrão de trabalhos. Ao apresentarem o cálculo da pegada hídrica, causada principalmente pelo processo de irrigação do sistema de cultivo da cana-de-açúcar, os autores de diferentes partes do mundo apontam uma diversidade de estratégias e métodos para a redução do consumo de água pelas culturas na produção agrícola irrigada, assim como a sua reutilização no processo industrial, como proposta de sustentabilidade e de produtividade da cana-de-açúcar e dos biocombustíveis (Postel *et al.*, 2001; Mekonnen; Hoekstra, 2010; Mao; Yang, 2012; Schyns; Hoekstra, 2014; Chai *et al.*, 2016; Davis *et al.*, 2017; Pi *et al.*, 2017; Nouri *et al.*, 2019; Adetoro *et al.*, 2020).

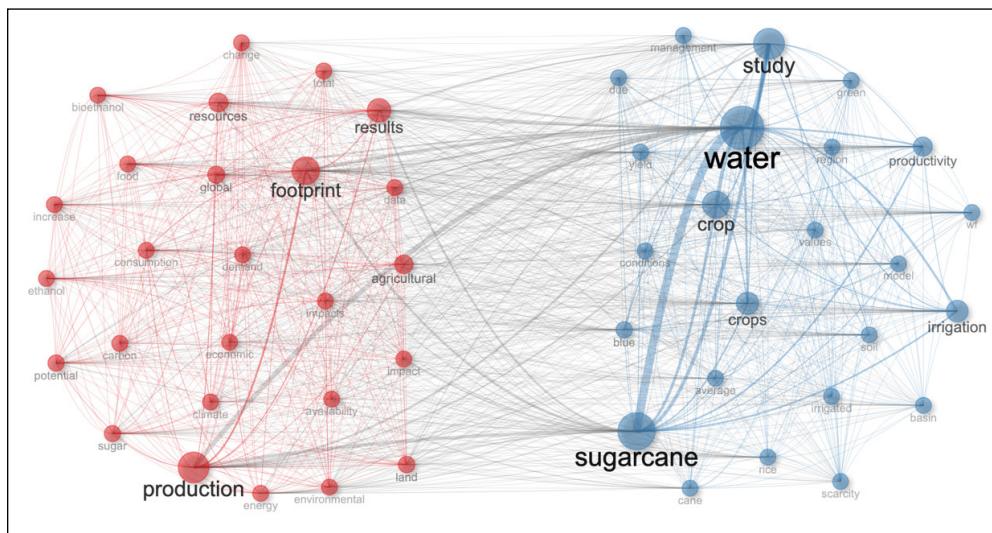
Também é possível verificar a formação do cluster que aparece em verde, como outro grupo de estudo, mas diretamente relacionado ao cluster central. As palavras que formam esse grupo de estudo são “*life cycle assessment*”, “*carbon footprint*”, “*bioenergy*” e “*land footprint*”. Por exemplo, Hiloidhari *et al.* (2021) avaliaram o ciclo de vida da energia, a pegada hídrica e do carbono do açúcar, do etanol e da eletricidade à base de cana-de-açúcar na Índia. Os resultados mostram que os produtos derivados da cana-de-açúcar tiveram a maior eficiência, menor pegada de carbono e água, evidenciando que esses produtos têm maior sustentabilidade no país. Outros estudos também contabilizaram a pegada da terra, da água e do carbono para calcular a apropriação de recursos e as emissões de CO₂ em diferentes cenários energéticos (Holmatov; Hoekstra; Krol, 2019).

Como se pode observar na Figura 4, os *clusters* mais periféricos apresentam características autônomas ou de relação indireta com as palavras-chave centrais. Nesse contexto, é possível identificar lacunas de estudos e análises que possam ligar esses termos. Por exemplo, a palavra-chave “*virtual water trade*”, utilizada como critério metodológico neste estudo, não apresenta nenhuma relação com

os demais termos, exceto “*water scarcity*”, que, segundo a literatura, é a principal justificativa dos estudos nessa abordagem (Allan, 1993; Allan, 2011; Zhang *et al.*, 2020; Ren *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021). Ainda, os resultados sugerem que não existem trabalhos que relacionem o “*virtual water trade*” e a “*sugarcane*”. Portanto, há uma oportunidade de estudo da relação entre o comércio de água virtual e a cana-de-açúcar, na série temporal analisada na amostra. A mesma lógica de interpretação pode ser utilizada para os demais *clusters*: “*virtual water*”, “*Brazil*”, “*pesticide*”, “*gray water footprint*” ou ainda “*optimization*”, “*bagasse*” e “*Índia*”.

Após analisar as palavras, Garcia *et al.* (2019) explicam que, depois do título, em qualquer trabalho científico, o resumo é uma das partes mais lidas, pois o escopo é apresentar um esboço conciso do manuscrito completo. Por isso, o resumo de um artigo deve ser escrito de modo a auxiliar o leitor na decisão se buscará ou não o trabalho completo para informações mais circunstanciadas. Assim, as palavras utilizadas na construção do resumo orientam os pesquisadores na sua busca.

Nesse sentido, é possível observar, na Figura 5, a rede de frequência das palavras-chave mais citadas nos resumos dos artigos da amostra, cujas interações formaram três *clusters*. O conjunto de palavras que formam o primeiro cluster (cor verde) está associado a questões de contextualização e justificativa das pesquisas abordadas. As palavras que mais aparecem são “*crops*”, “*resources*”, “*agricultural*”, “*food*”, “*consumption*”, “*management*”, “*economic*”, “*blue*” e “*green*”. As duas últimas se relacionam à origem da água consumida: azul - águas superficiais ou subterrâneas; e verde - água da chuva.



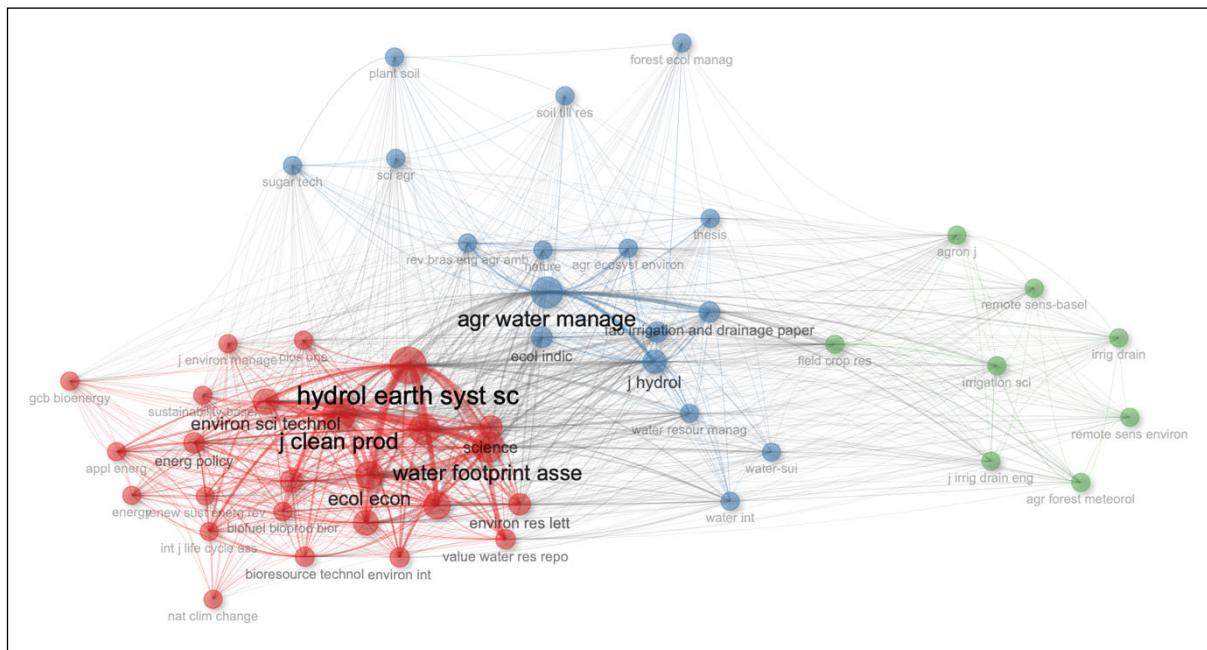
Fonte: Elaborado pelos autores e gerado no software RStudio e Biblioshiny (Bibliometrix).

Figura 5. Rede de frequência das palavras-chaves mais citadas nos *abstracts* dos 113 documentos (2012-2021).

O segundo *cluster* (cor vermelha) direciona a relação ao processo produtivo da cana-de-açúcar. As palavras associadas que mais aparecem e ocupam a centralidade no *cluster* são: «water», “sugarcane”, “study” e “crop”. Elas estão diretamente ligadas entre si e, ao mesmo tempo, criam pequenos agrupamentos com outras palavras associadas, delineando o assunto abordado.

No terceiro cluster (cor azul), as palavras com maior ocorrência foram “*production*”, “*footprint*” e “*results*”. Esse agrupamento demonstra a parte dos resultados no resumo, justificando uma interação mais difusa, uma vez que os resultados tendem a ser variados nos diversos estudos. No entanto, é

possível perceber um padrão nas palavras utilizadas nos resumos dos artigos publicados. A Figura 6 apresenta a rede de cocitação dos periódicos.



Fonte: Elaborado pelos autores e gerado no software RStudio e Biblioshiny (Bibliometrix).

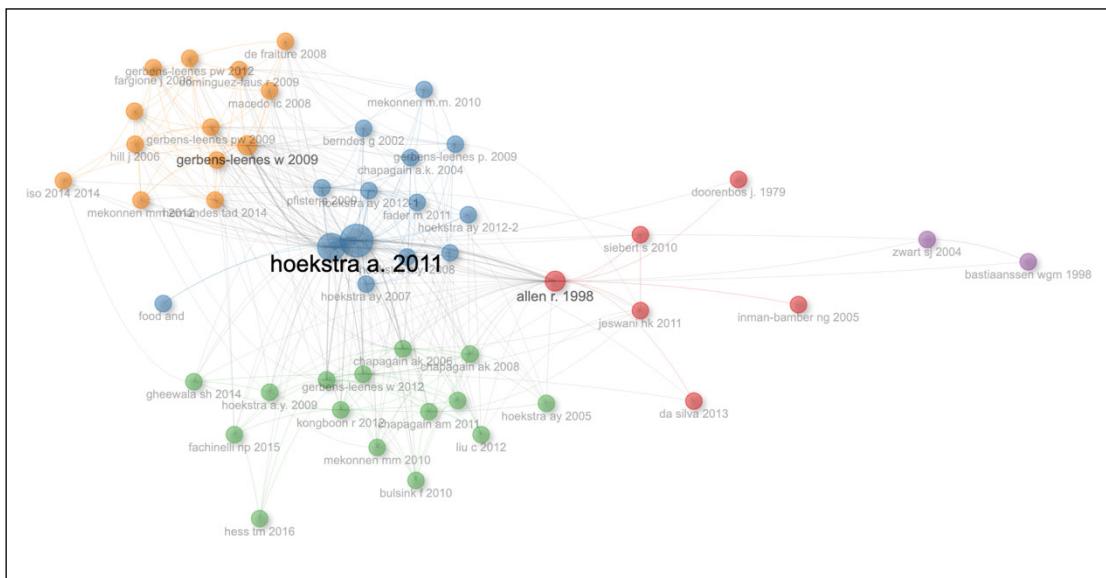
Figura 6. Rede cocitação por periódico (2012-2021).

Os três periódicos que mais aparecem são: *Agricultural Water Management*, *Journal of Cleaner Production* e *Hydrology and Earth System Sciences*. Eles formam uma rede de co-citações em suas respectivas áreas, interagindo com os demais periódicos. A revista *Agricultural Water Management* tem um fator de impacto de 4.516, classificando-se como 12º de 91 em Agronomia, segundo a plataforma Elsevier. No Sucupira, da CAPES, ela possui qualis A1 em áreas como Ciências Agrárias I, Ciências Ambientais, Engenharias I, Engenharias III e Zootecnia/Recursos Pesqueiros, e A2 em Geociências, Interdisciplinar e Medicina Veterinária.

O *Journal of Cleaner Production* apresenta um fator de impacto de 9.297 e classifica-se como o 18º de 274 em Ciências Ambientais, segundo a plataforma Elsevier. No Sucupira da CAPES, o periódico tem *qualis A1* em diversas áreas, incluindo Administração Pública e de Empresas, Ciências Contábeis e Turismo, Biotecnologia, Ciência Política e Relações Internacionais, e Ciências Agrárias I e Ambientais.

A revista *Hydrology and Earth System Sciences* possui um fator de impacto de 5.153 na Web of Science Group e 5.906 na Scopus. No Sucupira da CAPES, ela recebe qualis A1 em Ciências Agrárias I, Ciências Ambientais, Engenharias I e III, e Geociências. Esses dados justificam o número de citações dos artigos publicados nos periódicos e a formação da rede de co-citações apresentada.

Após demonstrar a rede de co-citações entre os periódicos, é importante apontar a rede de co-citações entre os trabalhos, conforme visualizado na Figura 7.



Fonte: Elaborado pelos autores e gerado no software RStudio e Biblioshiny (Bibliometrix).

Figura 7. Rede cocitação entre trabalhos (2012-2021).

O trabalho mais citado foi o de Hoekstra (2011), intitulado “The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard”. Seu objetivo era estabelecer um padrão no cálculo da pegada hídrica, resultando na apresentação de uma metodologia amplamente utilizada em diferentes estudos, conforme demonstrado no diagrama. Esse estudo referenciou outros trabalhos anteriores, como os de Chapagain e Hoekstra (2003b, 2004, 2008); Hoekstra e Chapagain (2007) e Dietzenbacher e Velázquez (2007). A partir do trabalho de Hoekstra (2011), surgiram novas pesquisas, como as de Chapagain e Hoekstra (2011), Scarpone *et al.* (2016a), Scarpone *et al.* (2016b), Liu *et al.* (2012), entre outras.

Ao analisar os documentos da amostra, observa-se um número significativo de publicações que consideram a pegada hídrica dos países a partir de diversas perspectivas, não apenas ecológicas, mas também relacionadas aos aspectos socioeconômicos das regiões investigadas. Por exemplo, os estudos de Gerbens-Leenes *et al.* (2012a), Gerbens-Leenes e Hoekstra (2012b) destacam que, nos países ricos, o maior consumo de bens e serviços resulta em pegadas hídricas mais altas. Em termos de produção, há uma variação na produtividade relacionada ao uso de água, influenciada pela diversidade climática e pelas diferenças nos rendimentos. Países como Cuba, Paquistão, Índia, Vietnã e Tailândia apresentam pegadas hídricas muito acima da média global (Gerbens-Leenes *et al.*, 2012), indicando a necessidade de maior atenção ao desenvolvimento de tecnologias para melhorar a eficiência no uso da água na produção de cana-de-açúcar.

No Brasil, é possível identificar que os autores ainda calculam a pegada hídrica com o objetivo de analisar o fluxo de água nos setores econômicos, como demonstrado por Vale *et al.* (2019), que estimam o consumo total de água na produção de cana-de-açúcar em 101 bilhões de m³, com 54 bilhões de m³ comercializados virtualmente em todo o país. Além disso, mais de 2,5 bilhões de m³ de água azul virtual foram atribuídos à produção de cana-de-açúcar.

Pesquisas mais recentes têm avaliado a pegada hídrica na produção de cana-de-açúcar, com foco na análise da eficiência do uso da água nos sistemas de irrigação, como demonstrado por Bwambale, Abagale e Anornu (2022). Os pesquisadores destacam a necessidade de desenvolver um modelo

matemático que incorpore estratégias de monitoramento baseadas em clima, solo e planta, associadas à estratégia de controle preditivo, para otimizar o processo de irrigação.

Bordonal *et al.* (2018) discutem a adoção de tecnologias inovadoras na cadeia produtiva da cana-de-açúcar, sugerindo que melhorias nessa área contribuíram para uma maior sustentabilidade e aceitação dos produtos no mercado mundial. O estudo também ressalta avanços na eficiência do (re)uso da água e na redução da pegada hídrica na produção brasileira de cana-de-açúcar entre 1975 e 2015.

Joseph *et al.* (2020) examinam diferentes abordagens para quantificar o uso sustentável da água e a escassez de água em grande escala, propondo uma estrutura de modelagem para descrever esses componentes de avaliação. A pesquisa destaca a importância de desenvolver modelos que considerem a disponibilidade de água, associada à terra, por meio de bancos de dados estatísticos, para melhorar as avaliações do uso sustentável da água em grande escala.

Essas pesquisas indicam uma diversidade de estratégias para reduzir o consumo de água na produção agrícola irrigada e enfatizam a importância da sustentabilidade no uso da água. Estudos como o de Navarro-Ramírez *et al.* (2020) abordam indicadores de uso sustentável da água na indústria, buscando desenvolver modelos que considerem aspectos sociais, econômicos e ambientais da sustentabilidade no uso da água.

A pesquisa bibliométrica também revela estudos sobre a sustentabilidade na produção de cana-de-açúcar no Brasil, como o de Bordonal *et al.* (2018), que analisa as implicações ambientais da expansão do cultivo de cana-de-açúcar e identifica oportunidades para melhorar a eficiência sustentável na cadeia produtiva.

CONCLUSÕES

O objetivo geral deste artigo foi apresentar uma análise bibliométrica baseada em uma revisão sistemática de estudos considerando os termos comércio de água virtual, pegada hídrica e sustentabilidade, associados à produção de cana-de-açúcar, com artigos publicados entre os anos de 2011 e 2021.

Empregando uma análise bibliométrica em 113 artigos selecionados na base de dados Web of Science, identificou-se que o ano com maior número de publicações foi 2019, enquanto 2021 registrou o maior número de citações. Os periódicos que se destacaram na divulgação desses estudos foram o *Journal of Cleaner Production*, *Science of the Total Environment*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *Sustainability* e *Water*. Arjen Hoekstra foi o autor mais relevante na temática.

Na análise proposta, verificou-se que os países alvo desses estudos incluíram a Holanda, o Brasil, a Tailândia, os Estados Unidos, a Índia e a Austrália, sendo o Brasil, os Estados Unidos, a Holanda, a Índia e a Tailândia os países com maior número de trabalhos publicados. A Universidade de São Paulo (Brasil) e a Universidade de Twente (Holanda) destacaram-se como as instituições com maior produção, com base na amostra selecionada. Além disso, o Brasil e os Estados Unidos foram grandes parceiros nas publicações, e a Holanda e os Estados Unidos foram os países que mais interagiram.

Os principais aspectos abordados nos artigos selecionados estavam relacionados ao cálculo da pegada hídrica, tanto a nível nacional quanto nos setores produtivos do complexo sucroenergético, tanto no Brasil quanto globalmente. Foram identificados estudos que avaliaram a eficiência dos sistemas de irrigação, a produtividade nos canaviais e os aspectos de sustentabilidade da água nos processos produtivos.

Apesar do grande número de estudos, ainda existem lacunas em áreas como análise do fluxo da água virtual na produção de biocombustíveis, na produção de cana-de-açúcar e no comércio de água virtual dos produtos derivados da cana-de-açúcar. Além disso, há oportunidades de estudos na pegada da água cinza, considerando a ótica da responsabilidade ambiental.

Os resultados desta pesquisa podem sugerir implicações em outras áreas de estudo, identificando aspectos técnicos de manejo do solo para reduzir a evaporação. Portanto, estudos futuros podem analisar as barreiras e as motivações para o desenvolvimento de novas tecnologias visando reduzir o excesso de água depositado no solo pelo sistema de irrigação, em busca do desenvolvimento sustentável.

Sugere-se, ainda, estudos adicionais com o objetivo de: analisar modelos e metodologias para encontrar métricas adequadas para definir e quantificar os três principais eixos de sustentabilidade hídrica utilizados no setor sucroenergético; discutir as discrepâncias e semelhanças entre vários autores e fornecer uma visão geral das abordagens gerenciais; e determinar os aspectos dos esquemas sustentáveis da pegada hídrica, como classificação dos princípios da sustentabilidade, tipos de aplicação e finalidades de uso.

Apesar das vantagens da análise bibliométrica, este artigo apresenta algumas limitações. Embora seja adequado para analisar a quantidade de material publicado e identificar padrões ou tendências, há desafios relacionados às características dos termos de pesquisa e à identificação de termos em nuvens de palavras. Tais limitações devem ser consideradas pelos pesquisadores ao continuar investigando e identificando lacunas na literatura. Uma sugestão para aprimorar esta pesquisa é a aplicação de inferência estatística para observar tendências de estudos e o impacto da produção científica no desenvolvimento do setor.

REFERÊNCIAS

- ADETORO, A. A. et al. Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production: The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. **Groundwater for sustainable development**, v. 11, out. 2020.
- AGNELLOS BARBOSA, E. A. et al. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 153, n. 1, p. 448–456, jun. 2017.
- ALEXOAEI, A. P.; COJANU, V.; COMAN, C. I. On Sustainable Consumption: The Implications of Trade in Virtual Water for the EU's Food Security. **Sustainability**, v. 13, n. 21, 2021.
- ALLAN, J. A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. **Priorities for water resources allocation and management**, v. 13, n. 4, p. 26, 1993.
- ALLAN, T. **Virtual water**: tackling the threat to our planet's most precious resource. [s.l.] Bloomsbury Publishing, 2011.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. **Journal of informetrics**, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; STEDUTO, P. The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. **Science of the total environment**, v. 575, p. 595–611, jan. 2017.
- BORDONAL, R. DE O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy**

for sustainable development, v. 38, n. 2, abr. 2018.

BRAUMAN, K. A.; VIART, N. Development of a Regionally Sensitive Water-Productivity Indicator to Identify Sustainable Practices for Sugarcane Growers. **Integrated environmental assessment and management**, v. 12, n. 4, p. 811–820, out. 2016.

BWAMBALE, E.; ABAGALE, F. K.; ANORNU, G. K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. **Agricultural water management**, v. 260, p. 107324, 2022.

CHAI, Q. et al. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 36, p. 1–21, 2016.

CHAIBANDIT, K.; KONYAI, S.; SLACK, D. C. Evaluation of the Water Footprint of Sugarcane in Eastern Thailand. **Engineering journal-thailand**, v. 21, n. 5, p. 193–201, set. 2017.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products**. [s.l.] Citeseer, 2003a. v. 13

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. **Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products**. [s.l.] Citeseer, 2003b. v. 13

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprints of nations. 2004.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. **Water international**, v. 33, n. 1, p. 19–32, 2008.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological economics**, v. 70, n. 4, p. 749–758, 2011.

CHICO, D.; SANTIAGO, A. D.; GARRIDO, A. Increasing efficiency in ethanol production: Water footprint and economic productivity of sugarcane ethanol under nine different water regimes in north-eastern Brazil. **Spanish journal of agricultural research**, v. 13, n. 2, jun. 2015.

DA SILVA, V. DE P. R. et al. Measurements and modelling of water footprint of sugarcane cultivated in Paraiba State/Medicoes e modelagem da pegada hidrica da cana-de-acucar cultivada no Estado da Paraiba. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental**, v. 19, n. 6, p. 521–527, 2015.

DAVIS, K. F. et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. **Nature Geoscience**, v. 10, n. 12, p. 919–924, 2017.

DE ALMEIDA, A. R.; DOS REIS NETO, J. F. O papel do comércio de água virtual na distribuição dos recursos hídricos globais. Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN), v. 6, n. 1, 2022. **Anais[...]**

DE SOUZA, C. A. et al. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v. 79, n. 4, p. 400–411, out. 2020.

DIETZENBACHER, E.; VELÁZQUEZ, E. Analysing Andalusian virtual water trade in an input-output framework. **Regional studies**, v. 41, n. 2, p. 185–196, 2007.

DINGRE, S. K. et al. Sugarcane response to different soil water replenishment-based deficit irrigation treatments during different growth stages in an Indian semi-arid region. **Irrigation and Drainage**, v. 70, n. 5, p. 1155–1171, 2021.

DUARTE, R.; PINILLA, V.; SERRANO, A. The globalization of Mediterranean agriculture: A long-term view of the impact on water consumption. **Ecological economics**, v. 183, maio 2021.

ERCIN, E.; CHICO, D.; CHAPAGAIN, A. K. Vulnerabilities of the European Union's Economy to

- Hydrological Extremes Outside its Borders. **Atmosphere**, v. 10, n. 10, out. 2019.
- EVANS, R. G.; SADLER, E. J. Methods and technologies to improve efficiency of water use. **Water resources research**, v. 44, n. 7, p. W00E04-n/a, 2008.
- FRIZZONE, J. A. et al. Socio-Economic Indexes for Water Use in Irrigation in a Representative Basin of the Tropical Semiarid Region. **Water**, v. 13, n. 19, out. 2021.
- GARG, K. K. et al. Spatial mapping of agricultural water productivity using the swat model in upper Bhima catchment, India. **Irrigation and drainage**, v. 61, n. 1, p. 60–79, fev. 2012.
- GERBENS-LEENES, P. W. et al. Biofuel scenarios in a water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030. **Global environmental change-human and policy dimensions**, v. 22, n. 3, p. 764–775, ago. 2012.
- GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol. **Environment international**, v. 40, p. 202–211, abr. 2012.
- GHEEWALA, S. H. et al. Implications of the biofuels policy mandate in Thailand on water: The case of bioethanol. **Bioresource technology**, v. 150, p. 457–465, dez. 2013.
- HADIAN, S.; MADANI, K. A system of systems approach to energy sustainability assessment: Are all renewables really green? **Ecological indicators**, v. 52, p. 194–206, maio 2015.
- HEINKE, J. et al. Water use in global livestock production—opportunities and constraints for increasing water productivity. **Water Resources Research**, v. 56, n. 12, p. e2019WR026995, 2020.
- HELLEGERS, P. Food security vulnerability due to trade dependencies on Russia and Ukraine. **Food security**, v. 14, n. 6, p. 1503–1510, 2022.
- HERNANDEZ, F. B. T. et al. Determining Large Scale Actual Evapotranspiration Using Agro-Meteorological and Remote Sensing Data in the Northwest of São Paulo State, Brazil. (P. Braun, M. Stoll, J. Zinkernagel, Eds.)VII international symposium on irrigation of horticultural crops. **Anais[...]**. Acta Horticulturae.PO Box 500, 3001 Leuven 1, Belgium: Int Soc Horticultural Science, 2014.
- HILOIDHARI, M. et al. Life cycle energy?carbon?water footprints of sugar, ethanol and electricity from sugarcane. **Bioresource technology**, v. 330, jun. 2021.
- HOEKSTRA, A. How sustainable is Europe's water footprint? v. 26, p. 24–26, mar. 2011.
- HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. **Integrated assessment of water resources and global change: A north-south analysis**, p. 35–48, 2007.
- HOEKSTRA, A. Y.; HUNG, P. Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade 12, Delft, 2003. **Anais[...]** 2003.
- HOLMATOV, B.; HOEKSTRA, A. Y.; KROL, M. S. Land, water and carbon footprints of circular bioenergy production systems. **Renewable & sustainable energy reviews**, v. 111, p. 224–235, set. 2019.
- JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E. **Água e sustentabilidade: desafios, perspectivas e soluções**. São Paulo: IEE-USP e Reconectta, 2017.
- JOHANNESSEN, Å. Summary and conclusions from the SIWI Seminar for Young Water Professionals Drainage basin security-implications of virtual water trade and agricultural subsidies at regional, national and local levels. **Water Science and Technology**, v. 49, n. 7, p. 215–218, 2004.
- JOSEPH, N. et al. A review of the assessment of sustainable water use at continental-to-global scale. **Sustainable water resources management**, v. 6, n. 2, fev. 2020.

- KAEWMAI, R. et al. Assessing the water scarcity footprint of food crops by growing season available water remaining (AWARE) characterization factors in Thailand. **Science of the total environment**, v. 763, abr. 2021.
- KARIMI, P. et al. Global Satellite-Based ET Products for the Local Level Irrigation Management: An Application of Irrigation Performance Assessment in the Sugarbelt of Swaziland. **Remote sensing**, v. 11, n. 6, mar. 2019.
- KHAN, T. et al. Water Footprint, Blue Water Scarcity, and Economic Water Productivity of Irrigated Crops in Peshawar Basin, Pakistan. **Water**, v. 13, n. 9, maio 2021.
- LEAO, R. M. et al. Environmental and technical feasibility of cellulose nanocrystal manufacturing from sugarcane bagasse. **Carbohydrate polymers**, v. 175, p. 518–529, nov. 2017.
- LONG, A. et al. Understanding the Spatial-Temporal Changes of Oasis Farmland in the Tarim River Basin from the Perspective of Agricultural Water Footprint. **Water**, v. 13, n. 5, 2021.
- MANTOAM, E. J. et al. Energy, carbon and water footprints on agricultural machinery. **Biosystems engineering**, v. 198, p. 304–322, out. 2020.
- MAO, X.; YANG, Z. Ecological network analysis for virtual water trade system: A case study for the Baiyangdian Basin in Northern China. **Ecological Informatics**, v. 10, p. 17–24, 2012.
- MEKONNEN, M.; HOEKSTRA, A. Y. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. Volume 2: appendices. 2011.
- MEKONNEN, M. M. et al. Sustainability, Efficiency and Equitability of Water Consumption and Pollution in Latin America and the Caribbean. **Sustainability**, v. 7, n. 2, p. 2086–2112, fev. 2015.
- MEKONNEN, M. M. et al. Water, Energy, and Carbon Footprints of Bioethanol from the US and Brazil. **Environmental science & technology**, v. 52, n. 24, p. 14508–14518, dez. 2018.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. **Hydrology and earth system sciences**, v. 14, n. 7, p. 1259–1276, 2010.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Blue water footprint linked to national consumption and international trade is unsustainable. **Nature food**, v. 1, n. 12, p. 792–800, 2020a.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Sustainability of the blue water footprint of crops. **Advances in water resources**, v. 143, set. 2020b.
- MORAO, A.; DE BIE, F. Life Cycle Impact Assessment of Polylactic Acid (PLA) Produced from Sugarcane in Thailand. **Journal of polymers and the environment**, v. 27, n. 11, p. 2523–2539, nov. 2019.
- MUNOZ CASTILLO, R. et al. Uncovering the green, blue, and grey water footprint and virtual water of biofuel production in Brazil: a nexus perspective. **Sustainability**, v. 9, n. 11, p. 2049, 2017.
- NAVARRO-RAMÍREZ, V. et al. Methodological frameworks to assess sustainable water resources management in industry: A review. **Ecological Indicators**, v. 119, p. 106819, 2020.
- NOURI, H. et al. Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: the effect of soil mulching and drip irrigation. **Science of the total environment**, v. 653, p. 241–252, 2019.
- OKI, T.; KANAE, S. Virtual water trade and world water resources. **Water Science and Technology**, v. 49, n. 7, p. 203–209, 2004.
- ORFIELD, N. D. et al. Growing Algae for Biodiesel on Direct Sunlight or Sugars: A Comparative Life Cycle Assessment. **ACS sustainable chemistry & engineering**, v. 3, n. 3, p. 386–395, mar. 2015.
- PAES BARRETO, M. DE L. et al. Gray water footprint assessment for pesticide mixtures applied to a sugarcane crop in Brazil: A comparison between two models. **Journal of cleaner production**, v.

276, dez. 2020.

- PI, X. et al. Effects of mulching for water conservation on soil carbon, nitrogen and biological properties. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 4, n. 2, p. 146–154, 2017.
- POSTEL, S. et al. Drip irrigation for small farmers: A new initiative to alleviate hunger and poverty. **Water International**, v. 26, n. 1, p. 3–13, 2001.
- REES, W. E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. **Environment and urbanization**, v. 4, n. 2, p. 121–130, 1992.
- REIS, A. et al. Water footprint analysis of temporary crops produced in São Carlos (SP), Brazil. **RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020.
- REN, Y. et al. Inter-Regional Agricultural Virtual Water Flow in China Based on Volumetric and Impact-Oriented Multi-Regional Input-Output (MRIO) Approach. **Water**, v. 12, n. 1, jan. 2020.
- ROGERS, P. et al. Workshop 7 (synthesis): role and governance implications of virtual water trade. **Water Science and Technology**, v. 49, n. 7, p. 199–201, 2004.
- SCARPARE, F. V. et al. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tiete/Jacare watershed assessment. **Journal of cleaner production**, v. 112, n. 5, p. 4576–4584, jan. 2016a.
- SCARPARE, F. V. et al. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 133, p. 1318–1327, out. 2016b.
- SCHYNS, J. F.; HOEKSTRA, A. Y. The added value of water footprint assessment for national water policy: a case study for Morocco. **PLoS One**, v. 9, n. 6, p. e99705, 2014.
- SHRESTHA, S. et al. Green, Blue and Grey Water Footprints of Primary Crops Production in Nepal. **Water resources management**, v. 27, n. 15, p. 5223–5243, dez. 2013.
- SURENDRAN, U.; JAYAKUMAR, M.; MARIMUTHU, S. Low cost drip irrigation: Impact on sugarcane yield, water and energy saving in semiarid tropical agro ecosystem in India. **Science of the total environment**, v. 573, p. 1430–1440, dez. 2016.
- VACA-JIMENEZ, S.; GERBENS-LEENES, P. W.; NONHEBEL, S. The water footprint of electricity in Ecuador: Technology and fuel variation indicate pathways towards water-efficient electricity mixes. **Water resources and industry**, v. 22, dez. 2019a.
- VACA-JIMENEZ, S.; GERBENS-LEENES, P. W.; NONHEBEL, S. Water-electricity nexus in Ecuador: The dynamics of the electricity's blue water footprint. **Science of the total environment**, v. 696, dez. 2019b.
- VALE, R. L. et al. Assessment of the gray water footprint of the pesticide mixture in a soil cultivated with sugarcane in the northern area of the State of Pernambuco, Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 234, p. 925–932, out. 2019.
- WACKERNAGEL, M. et al. **Ecological footprints of nations. How much nature do they use? How much nature do they have?** 1997. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:40033366>>
- WACKERNAGEL, M.; REES, W. Our Ecological Footprint. The new catalyst bioregional series. **Gabriola Island, BC: New Society Publishers**, 1996.
- WANG, J.; WANG, S.; ZHOU, C. Quantifying embodied cultivated land-use change and its socioeconomic driving forces in China. **Applied geography**, v. 137, dez. 2021.
- WANG, S. G.; CAO, T.; CHEN, B. Identifying critical sectors and supply chain paths for virtual water and energy-related water trade in China. **Applied energy**, v. 299, 2021.

WWAP. World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 4:** Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris: UNESCO, 2012.

YAKUBU, A. et al. Impact of sugarcane bagasse mulching boards on soil erosion and carrot productivity. **Catena**, v. 206, nov. 2021.

YANG, G. et al. Coordinated development of agricultural water resources and the socio-economy in Shanxi province considering uncertainty. **Irrigation and drainage**, v. 70, n. 4, p. 861–870, 2021.

YUGUDA, T. K. et al. Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: A case study of Savannah Sugar Irrigation District, Nigeria. **Science of the total environment**, v. 715, maio 2020.

ZHANG, W. et al. Spillover risk analysis of virtual water trade based on multi-regional input-output model -A case study. **Journal of environmental management**, v. 275, 2020a.

ZHANG, Z. et al. A review and discussion on the water-food-energy nexus: Bibliometric analysis. **Chinese science bulletin-chinese**, v. 65, n. 16, p. 1569–1580, 2020b.

