

Pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar no Paraná de 2010 a 2020¹

Pedro Sbaraini Cordeiro²
Simone Moro Manini³
Pery Francisco Assis Shikida⁴

Resumo – O objetivo deste trabalho foi estimar as pegadas hídricas verde, azul e cinza da cana-de-açúcar, nas principais mesorregiões produtoras do Paraná, de 2010 a 2020. A metodologia utilizada foi proposta por Hoekstra et al. (2011), com adaptações necessárias para a realidade local. A mesorregião Noroeste Paranaense exibiu os maiores valores para a pegada verde (179,05 m³ Mg⁻¹, em 2010, e 200,26 m³ Mg⁻¹, em 2020). Norte Central e Noroeste Paranaense foram as mesorregiões com os maiores valores médios de pegada azul (47,43 m³ Mg⁻¹ e 46,66 m³ Mg⁻¹, respectivamente). O Noroeste Paranaense apresentou também a maior pegada hídrica cinza, com 12,33 m³ Mg⁻¹, em 2010, e 13,79 m³ Mg⁻¹, em 2020. A mesorregião de maior pegada hídrica média no período foi o Noroeste Paranaense, com 249,3 m³ Mg⁻¹, e a menor pegada média foi a do Norte Pioneiro Paranaense, com 179,35 m³ Mg⁻¹. A média da pegada hídrica total da produção de cana-de-açúcar das mesorregiões paranaenses foi de 206,63 m³ Mg⁻¹.

Palavras-chave: agronegócio, água, cultura canavieira.

Water footprint of sugarcane production from 2010 to 2020 in Paraná state, Brazil

Abstract – The objective of this work was to estimate green, blue, and gray water footprints of sugarcane in the main producing mesoregions of Paraná state, from 2010 to 2020. The methodology used was proposed by Hoekstra et al. (2011), with necessary adaptations for the local reality. The mesoregion Noroeste Paranaense showed the highest values for green footprint (179.05 m³ Mg⁻¹, in 2010, and 200.26 m³ Mg⁻¹, in 2020). Norte Central e Noroeste Paranaense showed the highest average values for blue footprint (47,43 e 46,66 m³ Mg⁻¹, respectively). Norte Paranaense also showed the highest gray water footprint, with 12.33 m³ Mg⁻¹, in 2010, and 13.79 m³ Mg⁻¹, in 2020. In the period, Noroeste Paranaense showed the highest average water footprint (249.37 m³ Mg⁻¹),

¹ Original recebido em 10/3/2022 e aprovado em 15/12/2022.

² Mestrando em Desenvolvimento Regional e Agronegócio. E-mail: pedro.sbarainicordeiro@gmail.com

³ Mestranda em Desenvolvimento Regional e Agronegócio, administradora no Instituto Federal do Paraná (IFPR). E-mail: simone.manini@hotmail.com

⁴ Pós-doutor em Economia, professor do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (PGDRA/Unioeste). E-mail: peryshikida@hotmail.com

and Norte Pioneiro Paranaense showed the smallest average footprint (179.35 m³ Mg⁻¹). The average total water footprint of sugarcane production in the mesoregions of Paraná was 206.63 m³ Mg⁻¹.

Keywords: agribusiness, water, sugarcane culture.

Introdução

A agricultura é a atividade econômica que consome o maior volume de água do planeta, alcançando mais de 70% (FAO, 2020), e por causa da crescente demanda por alimentos, essa atividade exerce pressão sobre os recursos hídricos. Porém, “água limpa e doce é um bem escasso e, portanto, deve ser tratada economicamente” (Hoekstra & Hung, 2002, p.9, tradução nossa).

O volume de água utilizado e/ou poluído no processo produtivo de determinado bem pode ser estimado por meio da pegada hídrica. Entretanto, a pegada hídrica varia entre as diferentes culturas e por região de produção (Mekonnen & Hoekstra, 2010). Por isso, essa informação contribui para a melhor gestão dos recursos hídricos de um país ou região, para a definição de melhores estratégias de produção e para a formulação de políticas voltadas para a escassez de água.

O Brasil possui vantagens quanto à disponibilidade desse recurso, pois detém 12% da água doce do mundo, mas, em razão de sua grande dimensão, os recursos hídricos são desigualmente distribuídos em nosso território (OECD, 2015). O País ocupa também posição de destaque na produção e exportação mundial de commodities agrícolas e, portanto, deve-se mensurar os recursos naturais empregados na produção, entre eles a água incorporada aos produtos comercializados.

Uma das principais culturas agrícolas do Brasil é a cana-de-açúcar, que dá origem a dois importantes produtos para a economia: etanol e açúcar. O complexo sucroalcooleiro representou 9,9% das exportações totais do agronegócio em 2020. Na safra 2019/2020, o País se manteve como o maior exportador de açúcar, com participação de 36,2%, além de alcançar a maior produção mundial, com 18,1% do total (Kreter et al., 2021). No Paraná, um dos cinco maiores

produtores brasileiros, a produção se concentra nas mesorregiões Noroeste, Norte Central, Norte Pioneiro e Centro Ocidental Paranaense (IBGE, 2021).

Quanto à demanda hídrica no Paraná, 42% da água é destinada para o abastecimento público, 24% para uso industrial, 21% para a agricultura e 13% é demandada pela pecuária (Ipardes, 2017). Desde 2020, a região vem sofrendo com estiagens, o que levou o governo do estado a decretar situação emergencial, com medidas para minimizar os impactos da falta de chuvas e garantir condições mínimas de abastecimento (Paraná, 2021).

O objetivo deste estudo foi mensurar as pegadas hídricas azul, verde e cinza da produção de cana-de-açúcar das principais mesorregiões produtoras do Paraná, de 2010 a 2020, para contribuir para a discussão sobre o uso de recursos hídricos pelo agronegócio do estado.

Revisão de literatura

Pegada hídrica e água virtual

De acordo com Hoekstra et al. (2011, p.46, tradução nossa), a pegada hídrica (PH) de determinado produto refere-se ao

[...] volume total de água doce que é utilizado direta ou indiretamente em seu processo produtivo. Sua estimativa é feita com base no consumo e na poluição da água, em todas as etapas da cadeia produtiva.

Ela é obtida pelo cálculo das pegadas azul, verde e cinza (Hoekstra et al., 2011):

- Pegada hídrica azul (PH azul) – corresponde à água doce superficial (rios, lagos) e/ou subterrânea consumida no processo de produção de um bem ou

serviço que não retorna para a bacia de onde foi retirada.

- Pegada hídrica verde (PH verde) – água proveniente da chuva que é armazenada ou permanece temporariamente no solo, na superfície ou na vegetação.
- Pegada hídrica cinza (PH cinza) – volume de água limpa necessário para diluir a água poluída resultante do processo produtivo, de forma que a qualidade da água permaneça acima dos padrões definidos.

Outro conceito relacionado com a pegada hídrica é o da água virtual. A discussão sobre água virtual começou em meados da década de 1980, quando o economista israelense Fishelson, usando o termo *embedded water*, observou que não era sensato exportar produtos com uso intensivo de água, pelo fato de haver escassez hídrica em Israel (Allan, 2003). Na década de 1990, Allan (1993) propôs a importação de água virtual, através de alimentos, como uma solução parcial para problemas de escassez no Oriente Médio. O autor definiu água virtual como a quantidade de água necessária para a produção de commodities agrícolas e acrescentou que o termo também pode ser expandido para produtos não agrícolas (Allan, 2003).

Quando um país exporta produtos com uso intensivo de água para outros países, ele a exporta na forma virtual. Por isso, para aqueles países com escassez de água, pode ser viável importar produtos com alto consumo hídrico em vez de produzi-los no mercado interno. Já os países ricos em água poderiam lucrar com sua abundância (Hoekstra & Hung, 2002). Para Renault (2002), o comércio virtual de água não apenas gera economia de recursos hídricos para os países importadores, mas, por causa do diferencial de produtividade, gera também economia global desse recurso.

Para diferenciar os termos, Hoekstra et al. (2011) explicam que a pegada hídrica está relacionada ao tipo da água utilizada no processo produtivo, bem como quando e onde, enquanto o termo água virtual considera o total desse re-

curso embutido em um produto. Dessa forma, quando se trata da exportação ou importação de água no contexto internacional, o termo água virtual é mais indicado.

Gelain & Istake (2015) estimaram o volume da exportação líquida de água virtual pelo Brasil e por estado em 1997, 2003, 2008 e 2013. Em todos os anos analisados, o País pode ser classificado como exportador líquido de água virtual. O Paraná se destacou entre os estados exportadores líquidos de água, juntamente com Mato Grosso, Rio Grande do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Goiás.

Com base no modelo de insumo-produto ecológico, Montoya (2020) avaliou a pegada hídrica nacional e a balança comercial de água virtual no Brasil para 2015. O resultado foi que a pegada hídrica do País correspondeu a 22.012 hm³/ano de água virtual, equivalente ao consumo per capita de 107,66 m³/ano. Os setores da agropecuária e da agroindústria foram os que incorporaram o maior volume de água por unidade produzida. A balança comercial brasileira exibiu saldo exportador líquido de 8.542 hm³/ano de água virtual em 2015. Assim, percebe-se que o agronegócio nacional contribuiu significativamente, com recursos hídricos, para o bem-estar da população mundial. Nesse sentido, o autor defende a criação de um mercado formal de água virtual.

Silva et al. (2016) investigaram a pegada hídrica do consumo nacional de alimentos no Brasil. Analisaram também os fluxos de água virtual associados ao comércio internacional das principais commodities agrícolas, bem como a escassez desse produto, a autossuficiência e a dependência hídricas por região brasileira, de 1997 a 2012. Os resultados mostraram que a pegada hídrica média do consumo alimentar brasileiro é de 1.619 m³/pessoa/ano, e a carne bovina é a que mais contribuiu (21%) para o volume. Os autores encontraram uma exportação líquida de água virtual de 54,8 bilhões de m³/ano, principalmente para a Europa, que recebe 41% do valor bruto da água virtual exportada pelo Brasil.

Zangiski & Carvalho (2021) buscaram compreender o comércio de água virtual entre o Paraná e as principais regiões com as quais o estado negocia: São Paulo, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e resto do Brasil. Além disso, investigaram se o Paraná se comporta como importador ou exportador regional líquido de água. Com o uso de um modelo de insumo-produto inter-regional, os resultados obtidos foram: no setor agropecuário e no comércio com São Paulo, o Paraná é exportador líquido de água virtual, mas no setor de indústria da transformação e construção e no comércio com o resto do Brasil, o estado é importador líquido. Quando considerados todos os setores e regiões do Brasil, o Paraná é exportador líquido de água virtual. Esse resultado é explicado pela importância da agropecuária para a economia paranaense, pelo alto consumo de água por esse setor e pelo volume de exportação de seus produtos para o Estado de São Paulo.

Santiago et al. (2017) quantificaram a pegada hídrica na produção de colmos e etanol de cana-de-açúcar, em sistemas de cultivos com e sem irrigação, utilizados na Usina Coruripe em Alagoas. Os autores concluíram que, entre os sistemas irrigados, o gotejamento subsuperficial, embora tenha utilizado o maior volume de água azul, foi o que apresentou as menores pegadas hídricas para a produção de colmo (128 L kg^{-1}) e etanol (1.409 L L^{-1}). O sistema de sequeiro, apesar de exibir os menores valores de pegada hídrica – colmo, 116 L kg^{-1} e etanol, 1.303 L L^{-1} –, foi o de menor produtividade.

A cana-de-açúcar, bem como a beterraba e o milho, além de serem culturas alimentares essenciais, são também matérias-primas para o bioetanol. Uma demanda crescente por alimentos e culturas energéticas resulta numa competição cada vez maior por água, o que tem levado os pesquisadores a se preocuparem com a alocação desse recurso na agricultura. A produção em larga escala de bioenergia poderá exigir o uso de água que poderia ser destinada à produção de alimentos (Gerbens-Leenes & Hoekstra, 2012).

Munoz Castillo et al. (2017) analisaram no âmbito estadual os fluxos de água virtual e da

pegada hídrica associada à produção e ao consumo do etanol de cana-de-açúcar no Brasil. Os resultados mostraram que o etanol responde por menos de um terço da pegada hídrica total da cana-de-açúcar – a produção de açúcar e outros alimentos processados respondem pela maior parte da pegada hídrica. Os autores constataram que, estados mais ricos, como São Paulo, se beneficiaram com a exportação de etanol ou produtos que usam essa commodity no processo produtivo, ao mesmo tempo que afetaram a disponibilidade de água em outros estados através da importação da água escassa destes.

Mekonnen et al. (2018) avaliaram as pegadas hídrica, energética e de carbono do bioetanol do milho nos EUA e da cana-de-açúcar no Brasil. Os resultados indicaram que o bioetanol de milho dos EUA tem uma pegada hídrica menor ($541 \text{ L de água/L de bioetanol}$) do que o bioetanol brasileiro de cana-de-açúcar ($1.115 \text{ L de água/L de bioetanol}$). O bioetanol brasileiro tem melhor balanço energético ($17,7 \text{ MJ/L de bioetanol}$) e menor pegada de carbono ($38,5 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}$) do que o bioetanol dos EUA, com $11,2 \text{ MJ/L}$ e $44,9 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}$, respectivamente. As diferenças regionais nas três pegadas destacam a

[...] necessidade de levar essas diferenças em consideração para entender as implicações da produção de biocombustíveis para os recursos hídricos locais, produção líquida de energia e mitigação das mudanças climáticas (Mekonnen et al., 2018, p.14.508, tradução nossa).

Produção de cana-de-açúcar no Paraná

O Paraná não ocupava posição expressiva na produção de cana-de-açúcar no contexto nacional. Tal condição começou a ser revertida depois da crise da economia cafeeira, no norte do estado, e por causa das condições edafoclimáticas favoráveis. Além disso, a proximidade com o Estado de São Paulo, principal produtor canavieiro, e os incentivos estatais na segunda fase do Programa Nacional do Álcool (Proálcool)

contribuíram para a expansão da cultura em solo paranaense (Kaefer & Shikida, 2000).

Atualmente, o estado é o quinto produtor nacional de cana-de-açúcar, atrás de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul. Na safra 2020/2021, sua produção foi de, aproximadamente, 34,8 mil toneladas, o que equivale a 5,7% da produção do Centro-Sul e 5,3% da produção nacional (Unica, 2021). A Figura 1 mostra a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil no Centro-Sul e no Paraná de 2010/2011 a 2020/2021.

O Paraná é o terceiro maior produtor nacional de açúcar. Na safra 2020/2021, foram produzidas 2,6 mil toneladas, que corresponderam a 6,9% e 6,4% da produção do Centro-Sul e nacional, respectivamente. Na produção de etanol total (anidro e hidratado), o estado ocupa o sexto lugar, com produção de 1.261 mil m³ na mesma safra (Unica, 2021). As Figuras 2 e 3 mostram a produção de açúcar e de etanol no Brasil, no Centro-Sul e no Paraná de 2011/2012 a 2020/2021.

Em 2020, a área plantada com cana no Paraná foi de 572.188 hectares, o que significa 5,71% do total da área plantada com essa cultura no Brasil (10.026.114 hectares). Em relação às

lavouras temporárias do estado (10.741.346 hectares), a cana-de-açúcar correspondeu a 5,33% da área total (IBGE, 2021).

Quatro mesorregiões do Paraná foram responsáveis por 99,12% da área plantada: Noroeste Paranaense, 56,41%; Norte Central Paranaense, 26,76%; Norte Pioneiro Paranaense, 12,75%; e Centro Ocidental Paranaense, 3,2% (IBGE, 2021).

Nas exportações paranaenses, em 2020 o complexo sucroalcooleiro alcançou o valor de US\$ 853,6 milhões, ou seja, 6,42% das exportações totais do agronegócio no estado. Os principais destinos foram Iraque (20,14%), Argélia (16,23%) e Malásia (7,49%). Em relação ao total exportado pelo País no mesmo ano, o Paraná foi responsável por 8,58% do valor das exportações desse complexo, ficando em terceiro no ranking dos estados, atrás apenas de São Paulo e Minas Gerais (Agrostat, 2021).

Os condicionantes e realidades técnicas do complexo sucroalcooleiro paranaense podem ser encontrados em Graef et al. (2016), Galafassi, et al. (2020), Goebel et al. (2020), Clein (2021) e Pereira (2021).

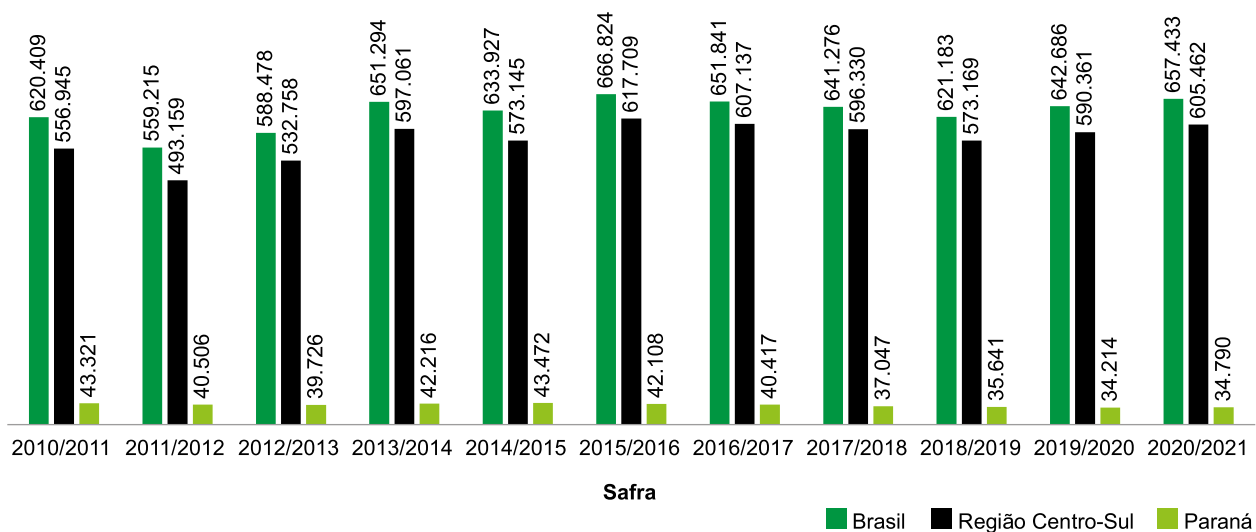


Figura 1. Produção de cana-de-açúcar (t mil) no Brasil, no Centro-Sul e no Paraná de 2010/2011 a 2020/2021.

Fonte: Unica (2021).

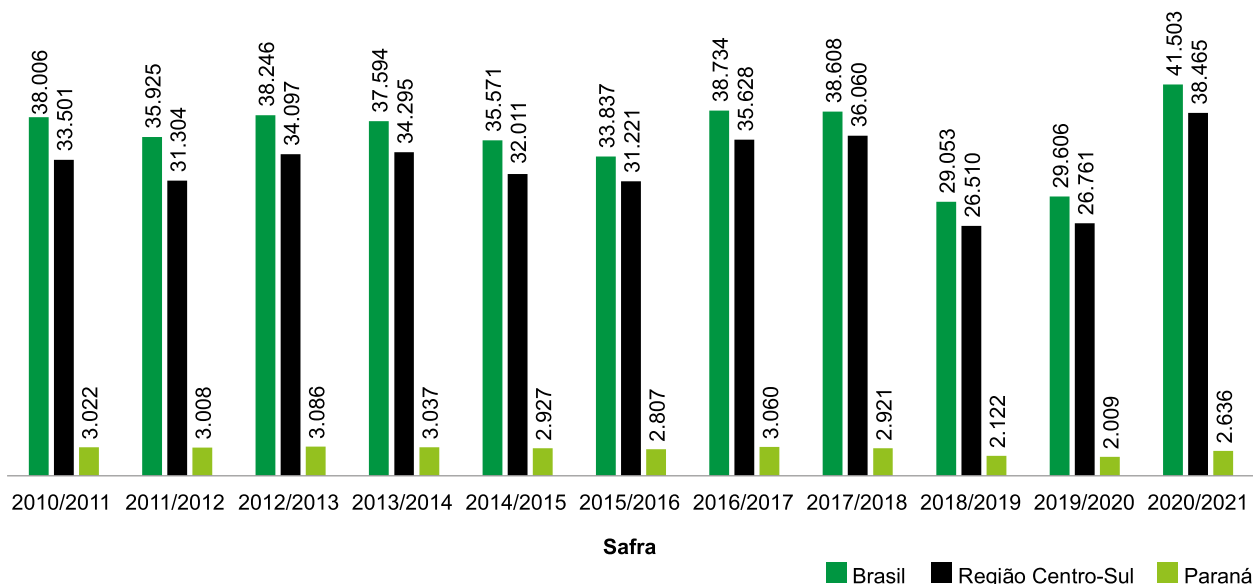


Figura 2. Produção de açúcar (t mil) no Brasil, no Centro-Sul e no Paraná de 2010/2011 a 2020/2021.

Fonte: Unica (2021).

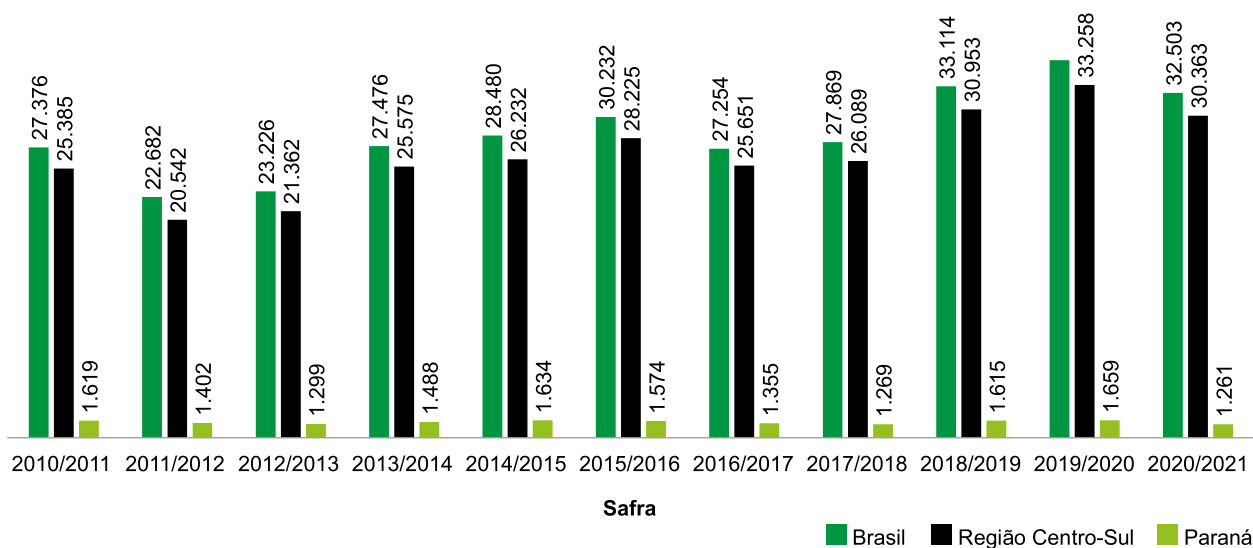


Figura 3. Produção de etanol total (m³ mil) no Brasil, no Centro-Sul e no Paraná de 2010/2011 a 2020/2021.

Fonte: Unica (2021).

Metodologia

Área de estudo e fonte de dados

Esta pesquisa foi desenvolvida nas quatro mesorregiões que mais produzem cana-de-açúcar no Paraná: Noroeste Paranaense, Norte Central Paranaense, Centro Ocidental

Paranaense e Norte Pioneiro Paranaense. Essas mesorregiões abrangem 211 municípios, que representam, aproximadamente, 53% do total de municípios do estado. A Figura 4 mostra a produção média de cana-de-açúcar paranaense entre 2010 e 2020. Os dados foram obtidos da Produção Agrícola Municipal (PAM), disponibilizada pelo IBGE (2021).



Produção média de cana-de-açúcar (2010–2020) [10] (t)

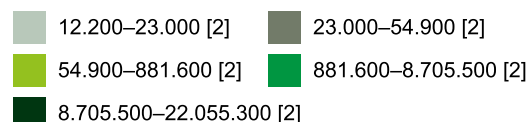


Figura 4. Produção média de cana-de-açúcar do Paraná entre 2010 e 2020.

Fonte: elaborado com base nos dados de IBGE (2021).

Procedimentos metodológicos

Esta pesquisa tem caráter empírico e exploratório e empregou o método de cálculo da pegada hídrica por cultura proposto por Hoekstra et al. (2011), adaptado para a realidade local. Segundo os autores, a pegada hídrica total da cultura é a soma das pegadas hídricas verde, azul e cinza:

$$PH_{cultura} = PH_{cultura,verde} + PH_{cultura,azul} + PH_{cultura,cinza} \text{ [Volume/massa]}$$

O primeiro passo foi o cálculo das pegadas verde e azul da cana-de-açúcar para 2010–2020. A pegada verde representa a quantidade de água consumida pela cultura proveniente das precipitações. Já a pegada azul reflete a quantidade de água superficial/subterrânea utilizada no cultivo (Hoekstra et al., 2011). A pegada hídrica cinza, conforme a Water Footprint Network (2021), é considerada a quantidade de água necessária para assimilar os poluentes de modo a atender aos padrões de qualidade hídrica. Os poluentes, de acordo com Hoekstra et al. (2011), são os fertilizantes, pesticidas e inseticidas empre-

gados no cultivo da cultura em questão, sendo considerados para o cálculo apenas os fluxos de resíduos que vão para os corpos d'água, o que representa uma fração da taxa total de aplicação de fertilizantes no campo. A Tabela 1 mostra as equações utilizadas nos cálculos.

O modelo CROPWAT 8.0 é um software livre desenvolvido pela FAO e foi utilizado neste estudo para obter os dados da evapotranspiração verde e azul da cana-de-açúcar. O programa usa dados obtidos das estações meteorológicas para a estimativa da evapotranspiração. Nesta pesquisa, os cálculos foram feitos com os dados climáticos das estações mais próximas de cada mesorregião, considerando a latitude, a longitude e a altitude em que se encontram. Os dados foram obtidos por meio de outro software da FAO, o CLIMWAT 2.0 for CROPWAT. A obtenção do programa e sua utilização são descritas no manual de Hoekstra et al. (2011).

Estimados os dados sobre a evapotranspiração verde e azul, seguindo as equações anteriormente descritas, foi possível calcular os usos da água verde e azul pela cultura canavieira. Depois disso, foi calculada, de fato, as pegadas hídricas verde e azul da cultura.

Resultados e discussão

Esta seção traz os resultados obtidos para as pegadas hídricas verde, azul e cinza da produção de cana-de-açúcar nas quatro maiores mesorregiões produtoras do Paraná em 2010–2020.

Primeiramente, foi calculado o uso de água verde e azul pela cultura (UAC), com os dados provenientes do modelo CROPWAT (Tabela 2).

Depois do cálculo do UAC verde e azul, foram estimadas as pegadas hídricas verde, azul e cinza da produção de cana de cada mesorregião estudada (Figura 5).

Quanto à pegada hídrica verde, o Noroeste Paranaense foi a mesorregião que exibiu os maiores valores, 179,05 m³/t em 2010 e 200,26 m³/t em 2020, com crescimento de 11,85% no período. Houve crescimento também nas demais

Tabela 1. Equações do cálculo da pegada hídrica verde e azul.

Equação	Componente
$PH_{cana,verde} = UAC_{verde} / RM$	UAC_{verde} = uso da água verde pela cultura (m ³ /ha)
$PH_{cana,azul} = UAC_{azul} / RM$	UAC_{azul} = uso da água azul pela cultura (m ³ /ha) RM = rendimento médio da produção (t/ha)
$UAV_{verde} = 10 \times \sum_{d=1}^{Tc} ET_{verde}$	ET_{verde} = evapotranspiração verde da cultura, obtida pelo modelo CROPWAT
$UAV_{azul} = 10 \times \sum_{d=1}^{Tc} ET_{azul}$	ET_{azul} = evapotranspiração azul da cultura, obtida pelo modelo CROPWAT Tc = tempo da cultura (dias) 10 = fator de conversão da água em milímetros para m ³ /ha
$PH_{cana,cinza} = [(\alpha \times TA) / (C_{max} - C_{nat})] / RM$	α = taxa de lixiviação sobre o escoamento dos agrotóxicos no solo, definida por Franke et al. (2013). Neste estudo, $\alpha = 0,1$ TA = taxa de aplicação média de fertilizantes por hectares do cultivo da cana-de-açúcar, dados obtidos de Rossetto & Santiago (2020). Neste estudo, $TA = 87,5$ kg/ha C_{max} = carga máxima de poluentes no sistema, considerada como 10% da taxa de aplicação C_{nat} = carga natural de poluentes no corpo hídrico, considerada nula

Fonte: adaptado de Hoekstra et al. (2011).

Tabela 2. Cana-de-açúcar – uso de água verde e azul pelas mesorregiões paranaenses.

Mesorregião	UAC verde (m ³ /ha)	UAC azul (m ³ /ha)
Noroeste Paranaense	12.709	3.127
Centro Ocidental Paranaense	12.698	2.091
Norte Central Paranaense	10.621	3.748
Norte Pioneiro Paranaense	12.945	2.242

mesorregiões, pela ordem: Centro Ocidental Paranaense, Norte Pioneiro Paranaense e Norte Central Paranaense. No Noroeste, a pegada hídrica verde é alta para sua baixa quantidade média de cana produzida, e isso corrobora o exposto por Hoekstra et al. (2011): quando há consumo elevado de água para uma produção média-baixa, isso revela baixa produção por volume de água consumido, ressaltando que outros fatores afetam a produção além do fator hídrico. Os autores acrescentam que a produtividade da água varia ao longo dos anos por diversos motivos, que muitas vezes não possuem relação com

a água, acarretando transformações na pegada hídrica de um ano para o outro. Quando se compara a produção média do Centro Ocidental (1,8 milhões de toneladas) com a do Noroeste (22 milhões de toneladas), a diferença foi, em média, de 11,90 vezes entre 2010 e 2020.

Em comparação com os resultados de Kongboon & Sampattagul (2012), que calcularam a pegada hídrica para a produção de cana na Tailândia, os valores encontrados aqui foram maiores do que a média dos autores, que obtiveram em torno de 90 m³/t para a pegada hídrica verde. Já num contexto nacional, Reis et al. (2020), no Município de São Carlos, SP, encontraram para a PH verde o valor de 109,8 m³/t; e Scarpore et al. (2016), no mesmo estado, no cultivo alimentado pela chuva, encontraram a média de PH verde em torno de 145 m³/t, valor próximo das médias das mesorregiões do Paraná (158,67 m³/t). Mekonnen & Hoekstra (2011) fizeram o cálculo da pegada hídrica média mundial da produção de cana-de-açúcar, e os valores encontrados para a PH verde das mesorregiões

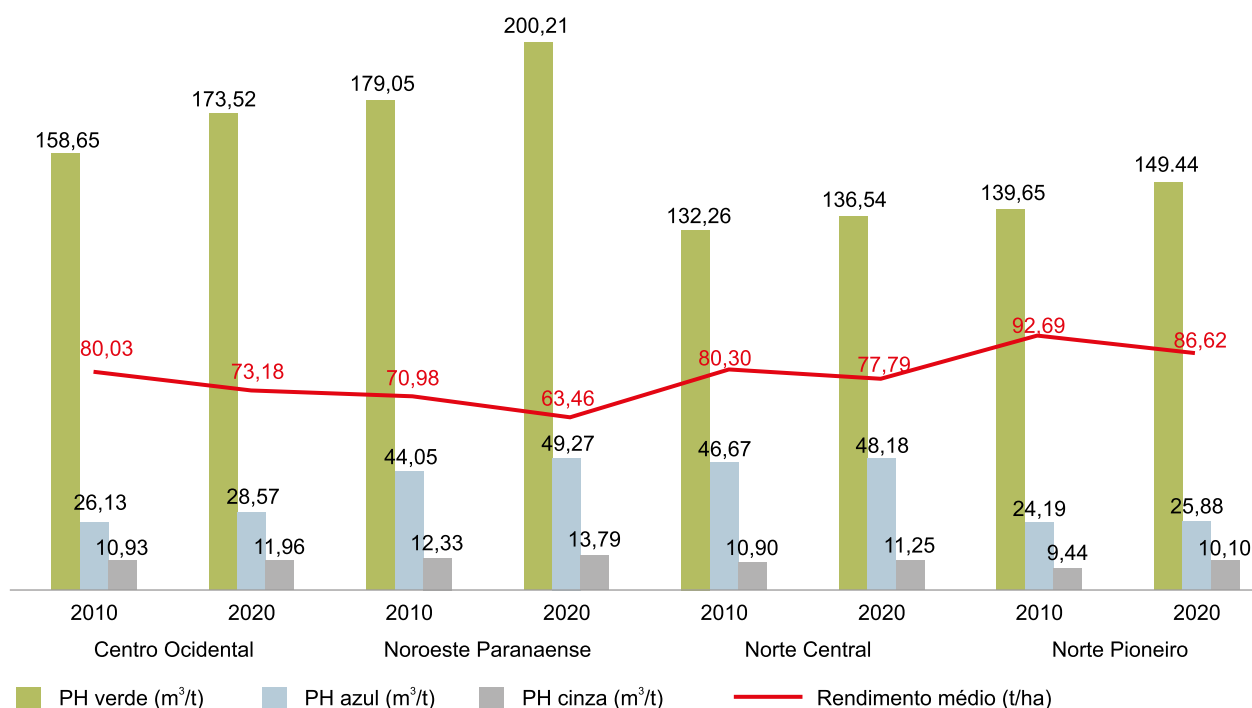


Figura 5. Cana-de-açúcar – pegada hídrica verde, azul e cinza e rendimento médio das mesorregiões paranaenses em 2010–2020.

deste estudo são próximos do encontrado pelos autores, que foi de 139 m³/t.

Quanto à PH azul, o Norte Central foi a mesorregião de maior pegada média: 47,43 m³/t. A explicação para valores de PH azul elevados, mesmo quando a região registrou as menores PH verde em ambos os anos, é sua alta demanda pelo UAC azul (Tabela 2). Esse fato corrobora o entendimento de que há maior retirada de água do solo/superficial (água azul) para o cultivo nessa mesorregião, já que ela demandou uma quantidade de água disponível no solo 79,25% a mais do que o Centro Ocidental.

Entretanto, a pegada hídrica azul média mundial calculada por Mekonnen & Hoekstra (2011) para a cana-de-açúcar é maior do que a PH azul nas mesorregiões aqui estudadas, 57 m³/t contra 36,62 m³/t, o que revela que o cultivo da cana no Paraná usa menores quantidades de água do solo e da superfície. Além disso, o estudo de Reis et al. (2020), no Município de São Carlos, SP, estimou a PH azul média da produção de cana em 45,9 m³/t, ou seja, também

nessa comparação as mesorregiões do Paraná deixam uma pegada hídrica azul menor.

Para a pegada hídrica cinza, que é a quantidade de água utilizada para absorver os poluentes do sistema – no caso deste estudo, a taxa de fertilizantes aplicados –, o Noroeste Paranaense registrou os maiores valores, com 12,33 m³/t em 2010 e 13,79 m³/t em 2020, e o maior crescimento no período: 11,84%. Um fato que chamou a atenção foi o comportamento da relação inversa entre o rendimento médio e o valor da PH cinza, ou seja, com a queda do rendimento médio observado no estudo, houve maior necessidade de água para assimilar os poluentes do sistema.

Para a pegada hídrica cinza média da cana, Mekonnen & Hoekstra (2011) encontraram o valor de 13 m³/t, Reis et al. (2020) calcularam 10,5 m³/t e Scarpore et al. (2016), 18 m³/t (Tabela 3). Neste estudo, a PH cinza média calculada em 2010–2020 foi de 11,34 m³/t, ou seja, a quantidade de água necessária para assimilar a carga de contaminação proveniente da cultura é similar à encontrada em outros estudos para a cana-de-açúcar.

Tabela 3. PH da cana-de-açúcar – comparativo entre estudos.

Estudo	PH verde (m ³ /t)	PH azul (m ³ /t)	PH cinza (m ³ /t)	PH total (m ³ /t)
Mekonnen & Hoekstra (2011) – Mundo	139	57	13	210
Scarpate et al. (2016) – São Paulo	145	38	18	201
Reis et al. (2020) – São Carlos/SP	109,8	45,9	10,5	166,2
Kongboon & Sampattagul (2012) – Tailândia	90	87	25	202
Paraná (2010–2020)	158,67	36,62	11,34	206,63

Silva et al. (2015) fizeram um experimento em uma fazenda no litoral da Paraíba para comparar as medições da pegada hídrica da cana com os resultados do modelo CROPWAT. Os resultados evidenciaram que os valores da PH verde e PH cinza caem à medida que ocorre acréscimo na lâmina de irrigação. Já os valores da PH azul crescem sempre que há incremento na lâmina de irrigação. Os autores observaram que a pegada hídrica da cana-de-açúcar obtida com base no modelo CROPWAT superestimou os valores da PH verde e PH azul e subestimou a PH cinza em comparação com os resultados obtidos com base no balanço hídrico do solo. Porém, o uso da métrica “m³/ha⁻¹” pelos autores impossibilitou a comparações.

No panorama individual, a produção canavieira das mesorregiões do Paraná consome mais água proveniente da chuva, em vez das águas superficiais (rios e lagos), valor similar ao de Scarpate et al. (2016), o que explica o estado possuir a menor PH azul. A PH cinza da cana paranaense também foi baixa, aproximando-se da média mundial e do estudo realizado em São Carlos, SP, anteriormente citado.

Quanto às diferenças entre as pegadas hídricas das mesorregiões paranaenses, ressalta-se que vários fatores interferem nos resultados. As pegadas variam conforme a safra, a região, a estação de plantio, a eficiência do local de produção e a duração do processo produtivo (Gobin et al., 2017). Assim, estudos que se baseiam em um único cultivo podem encontrar resultados diferentes dos de outras pesquisas com o mesmo plantio em regiões sob condições diferentes (Ribeiro et al., 2019).

A Figura 6 mostra os totais e as respectivas porcentagens das pegadas hídricas estimadas neste estudo. A mesorregião com a maior pegada hídrica média no período foi o Noroeste Paranaense, com 249,37 m³/t, e a média da PH total das mesorregiões produtoras de cana-de-açúcar foi de 206,63 m³/t.

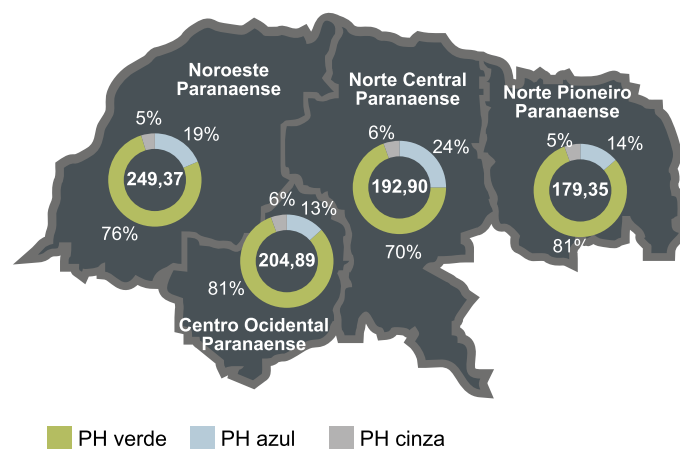


Figura 6. Pegadas hídricas verde, azul e cinza médias (%) e pegada hídrica total média no Paraná em 2010–2020.

Considerações finais

O objetivo deste artigo foi estimar as pegadas hídricas verde, azul e cinza da cana-de-açúcar nas principais mesorregiões produtoras do Paraná em 2010–2020. A mesorregião com os maiores valores para a pegada verde foi o Noroeste Paranaense, com 179,05 m³/t em 2010 e 200,26 m³/t em 2020. Quanto à pegada azul, o Norte Central exibiu o maior valor em 2010, com 46,67 m³/t, e o Noroeste em 2020, com

49,27 m³/t. O Noroeste Paranaense registrou também a maior pegada hídrica cinza, com 12,33 m³/t em 2010 e 13,79 m³/t em 2020.

A mesorregião de maior pegada hídrica média no período foi o Noroeste Paranaense, com 249,37 m³/t; a de menor pegada foi o Norte Pioneiro Paranaense: 179,35 m³/t. A média da pegada hídrica total da produção de cana-de-açúcar das mesorregiões paranaenses foi de 206,63 m³/t, resultado próximo aos de outros estudos de âmbitos mundial e nacional.

Tais informações podem ajudar no planejamento e gestão integrada de recursos hídricos e contribuir para a adoção de medidas para elevar a eficiência do uso da água.

Para melhorar os índices de pegada hídrica da cana-de-açúcar, algumas considerações podem ser úteis. Primeiro, diante da constatação de que tanto a área colhida quanto a produtividade da cana no Paraná caíram entre 2010 e 2020 (Conab, 2022), uma alternativa seria o melhoramento genético da planta com vistas à redução da demanda de água em seu processo produtivo, o que diminuiria as necessidades hídricas verdes ou azuis. Da mesma forma, a pegada hídrica cinza pode ser reduzida se a produção usar menores cargas de poluentes, o que mais uma vez está atrelado ao melhoramento das variedades de cana-de-açúcar. De acordo com Morais et al. (2015), as características desejáveis para a planta são muitas, e agregá-las em um só genótipo não é simples – o melhoramento pode demorar de dez a 15 anos.

É necessário que haja também o aprofundamento de discussões acerca de outras culturas com expressiva área plantada no Paraná. Sugere-se, como agenda para pesquisas futuras, o cálculo do fluxo de exportação da água virtual para evidenciar o papel do estado e da cultura no contexto mundial. Outra sugestão é a análise da pegada hídrica na cultura canavieira em outras regiões brasileiras sob o mesmo procedimento metodológico.

Referências

- AGROSTAT: Estatísticas de Comercio Exterior do Agronegócio Brasileiro. 2021. Disponível em: <<https://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/AGROSTAT.html>>. Acesso em: 19 set. 2021.
- ALLAN, J.A. Virtual water - the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? **IWRA, Water International**, v.28, p.106-113, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1080/02508060.2003.9724812>.
- ALLAN, T. Fortunately there are substitutes for water: otherwise our hydropolitical futures would be impossible. In: CONFERENCE ON PRIORITIES FOR WATER RESOURCES ALLOCATION AND MANAGEMENT, 1992, London. **Proceedings**. London: ODA, 1993. p.13-26. Disponível em: <<https://www.ircwash.org/sites/default/files/210-93PR-11967.pdf#page=18>>. Acesso em: 4 out. 2021.
- CLEIN, C. **Motivos e consequências da falência de agroindústrias canavieiras no Estado do Paraná**. 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Série histórica das safras: cana-de-açúcar - agrícola**. 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/891-cana-de-acucar-agricola>>. Acesso em: 22 set. 2022.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of Food and Agriculture 2020: overcoming water challenges in agriculture**. Rome, 2020.
- FRANKE, N.A.; BOYACIOGLU, H.; HOEKSTRA, A.Y. **Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines**. Delft: Unesco-IHE, 2013. (Value of Water Research Report Series, n.65).
- GALAFASSI, L.B.; BEBBER, R.A.; SHIKIDA, P.F.A. Uma análise da distribuição espacial da produção de cana-de-açúcar no Paraná (1975-2018). **Teoria e Evidência Econômica**, ano26, p.272-296, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5335/rtee.v26i55.12137>.
- GELAIN, J.G.; ISTAKE, M. Exportação líquida de água virtual brasileira e estadual. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, v.9, p.150-168, 2015. Disponível em: <<https://revistaaber.org.br/rberu/article/view/101>>. Acesso em: 29 set. 2021.
- GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A.Y. The water footprint of sweeteners and bio- ethanol. **Environment International**, v.40, p.202-211, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.06.006>.
- GOBIN, A.; KERSEBAUM, K.C.; EITZINGER, J.; TRNKA, M.; HLAVINKA, P.; TAKÁČ, J.; KROES, J.; VENTRELLA, D.; DALLA MARTA, A.; DEELSTRA, J.; LALIC, B.; NEJEDLIK, P.; ORLANDINI, S.; PELTONEN-SAINIO, P.; RAJALA,

- A.; SAUE, T.; SAYLAN, L.; STRICEVIC, R.; VUCETIC, V.; ZOUMIDES, C. Variability in the water footprint of arable crop production across European regions. **Water**, v.9, art.93, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9020093>.
- GOEBEL, M.A.; CAVALCANTE, D.L.; CLEIN, C.; MORENO, J.; SHIKIDA, P.F.A. Judicial recovery and bankruptcy of sugarcane agroindustries in the State of Paraná. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, v.16, p.25-35, 2020. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/5394>. Acesso em: 06 nov. 2021.
- GRAEF, C.E.; SIGOLO, É.A.; SUBELDIA JUNIOR, O.L.L.; WIECHORK, S.; SHIKIDA, P.F.A. Concentração na agroindústria canavieira paranaense (safra 2000/2001, 2014/2015). **Revista de Economia**, v.43, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5380/re.v42i1.49115>.
- HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A.K.; ALDAYA, M.M.; MEKONNEN, M.M. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. London: Earthscan, 2011.
- HOEKSTRA, A.Y.; HUNG, P.Q. **Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade**. Delft: IHE Delft, 2002. (Value of Water Research Report Series, n.11).
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PAM – Produção Agrícola Municipal 2020**. 2021. Disponível em: <https://ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 15 out. 2021.
- IPARDES. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Indicadores de desenvolvimento sustentável por bacias hidrográficas do estado do Paraná**. Curitiba, 2017.
- KAEFER, G.T.; SHIKIDA, P.F.A. A gênese da cana-de-açúcar no Paraná e seu desenvolvimento recente. **Tempo da Ciência**, v.7, p.93-104, 2000.
- KONGBOON, R.; SAMPATTAGUL, S. The water footprint of sugarcane and cassava in northern Thailand. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v.40, p.451-460, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.215>.
- KRETER, A.C.; PASTRE, R.; BASTOS FILHO, G.S. Comércio exterior de produtos do agronegócio: balanço de 2020 e perspectivas para 2021. **Carta de Conjuntura**, n.50, Nota de Conjuntura, n.29, 2021. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/conjuntura/210331_cc_50_nota_29_set_or_externo_agro.pdf. Acesso em: 19 out. 2021.
- MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. **The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products**. Delft: Unesco-IHE, 2010. (Value of Water Research Report Series, n.47).
- MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.15, p.1577-1600, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>.
- MEKONNEN, M.M.; ROMANELLI, T.L.; RAY, C.; HOEKSTRA, A.Y.; LISKA, A.J.; NEALE, C.M.U. Water, energy, and carbon footprints of bioethanol from the U.S. and Brazil. **Environmental Science & Technology**, v.52, p.14508-14518, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03359>.
- MONTOYA, M.A. A pegada hídrica da economia brasileira e a balança comercial de água virtual: uma análise insumo-produto. **Economia Aplicada**, v.24, p.215-248, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/1980-5330/ea167721>.
- MORAIS, L.K. de; CURSI, D.E.; SANTOS, J.M. dos; SAMPAIO, M.; CAMARA, T.M.M.; SILVA, P. de A.; BARBOSA, G.V.; HOFFMANN, H.P.; CHAPOLA, R.G.; FERNANDES JUNIOR, A.R.; GAZAFFI, R. **Melhoramento genético de cana-de-açúcar**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 200). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/142119/1/Doc-200.pdf>. Acesso em: 29 set. 2022.
- MUNOZ CASTILLO, R.; FENG, K.; HUBACEK, K.; SUN, L.; GUILHOTO, J.; MIRALLES-WILHELM, F. Uncovering the green, blue, and grey water footprint and virtual water of biofuel production in Brazil: a nexus perspective. **Sustainability**, v.9, art.2049, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112049>.
- OECD. Organisation for Economic Co-operation and Development. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. Paris: OECD Publishing, 2015. Disponível em: <https://www.oecd.org/fr/gov/governanca-dos-recursos-hidricos-no-brasil-9789264238169-pt.htm>. Acesso em: 12 out. 2021.
- PARANÁ. **Decreto nº 8.299 de 05 de agosto de 2021**. Declara situação de emergência no Estado do Paraná, pelo período de 90 dias, tendo em vista a redução o volume de água disponível para captação para o consumo humano e dessedentação de animais, que teve como causa estiagem classificada como desastre, conforme Instrução Normativa nº 2, de 20 de dezembro de 2016, do Ministério de Integração Nacional. 2021. Disponível em: <https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=251637&indice=6&totalRegistros=389&anoSpan=2023&anoSelecionado=2021&mesSelecionado=8&isPaginado=true>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- PEREIRA, A.L. **Dinâmicas de desenvolvimento nos municípios paranaenses com agroindústria sucroenergética instalada: uma abordagem multidimensional**. 2021. 186p. Dissertação (Mestrado)

– Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

REIS, A.; SANTOS, A.C. dos; ANACHE, J.A.A.; MENDIONDO, E.M.; WENDLAND, E.C. Water footprint analysis of temporary crops produced in São Carlos (SP), Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.25, e33, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200017>.

RENAULT, D. Value of virtual water in food: principles and virtues. In: WORKSHOP ON VIRTUAL WATER TRADE, 2002, Delft. [Proceedings]. Delft: FAO, 2002. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=d1bd32a50dfce72fed108d6da226b270c3215005>>. Acesso em: 14 abr. 2023.

RIBEIRO, G. de A.; DANTAS NETO, J.; MENDONÇA, M.F. de. The water footprint of the sugarcane agro-industry in the Northeast region of Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, p.1203-1210, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1832>.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A.D. Cana: correção e adubação. In: MARIN, F.R. **Cana**. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_6_711200516715.html#>. Acesso em: 10 out. 2021.

SANTIAGO, A.D.; CHICO, D.; ANDRADE JUNIOR, A.S. de; GARRIDO, A.; CARNAÚBA, P.J.P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. **Agrometeoros**, v.25, p.209-216, 2017. DOI: <https://doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26281>.

SCARPARE, F.V.; HERNANDES, T.A.D.; RUIZ-CORRÊA, S.T.; KOLLN, O.T.; GAVA, G.J. de C.; SANTOS, L.N.S. dos; VICTORIA, R.L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.4576-4584, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.107>.

SILVA, V. de P.R. da; ALBUQUERQUE, M.F. de; ARAÚJO, L.E. de; CAMPOS, J.H.B. da C.; GARCÊZ, S.L.A.; ALMEIDA, R.S.R. Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.521-526, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p521-526>.

SILVA, V. de P.R. da; OLIVEIRA, S.D. de; HOEKSTRA, A.Y.; DANTAS NETO, J.; CAMPOS, J.H.B.C.; BRAGA, C.C.; ARAÚJO, L.E. de; ALEIXO, D. de O.; BRITO, J.I.B. de; SOUZA, M.D. de; HOLANDA, R.M. de. Water footprint and virtual water trade of Brazil. **Water**, v.8, art.517, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/w8110517>.

UNICA. União das Indústrias de Cana-de-Açúcar. **UNICADATA**. 2021. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>. Acesso em: 19 set. 2021.

WATER FOOTPRINT NETWORK. **What is a water footprint?** 2021. Disponível em: <<https://waterfootprint.org/en/water-footprint/what-is-water-footprint>>. Acesso em: 10 out. 2021.

ZANGISKI, G.H.; CARVALHO, T.S. Análise do comércio de água virtual no estado do Paraná: uma abordagem de insumo-produto. **Economia & Região**, v.9, p.149-171, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5433/2317-627X.2021v9n2p149>.