

EDSON LUIS GERALDI JUNIOR

**ESTUDO DA PRODUÇÃO E COGERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BAGAÇO DE
CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO DE TUPÃ**

Relatório de Pós-doutorado realizado na
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã.

Supervisor: Prof. Dr. Mario Mollo Neto

Tupã

2025

RESUMO

Este estudo avalia o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista, com foco na sustentabilidade energética e ambiental. A metodologia baseia-se na análise de dados secundários para estimar a produção de eletricidade, o sequestro de carbono, as emissões de CO₂ e o consumo de recursos hídricos nas usinas da região entre 2009 e 2023. Os resultados indicam que a bioeletricidade gerada por essas usinas contribui significativamente para a matriz energética local, com um potencial médio anual superior a 0,8 TWh. A análise de diferentes cenários revela que a absorção líquida de CO₂ pelas plantações de cana-de-açúcar supera as emissões das usinas, reforçando o papel do setor sucroenergético na mitigação das mudanças climáticas. Além disso, o consumo estimado de água nos processos industriais está em conformidade com as diretrizes ambientais vigentes, variando conforme a eficiência de cada usina. O estudo destaca a importância da modernização das usinas e da adoção de tecnologias que maximizem a eficiência energética, ao mesmo tempo em que minimizam o consumo de água. A metodologia desenvolvida demonstra ser replicável para outras regiões de São Paulo e do Brasil, baseando-se em fontes de dados nacionais confiáveis. Assim, a cogeração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar consolida-se como uma solução sustentável para a segurança energética e a sustentabilidade ambiental da região da Nova Alta Paulista.

Palavras-chave: Cogeração, bioeletricidade, biomassa de cana-de-açúcar, sequestro de carbono, sustentabilidade, Nova Alta Paulista.

ABSTRACT

This study evaluates the potential for electricity generation from sugarcane biomass in the Nova Alta Paulista region, focusing on energy and environmental sustainability. The methodology is based on the analysis of secondary data to estimate electricity production, carbon sequestration, CO₂ emissions, and water resource consumption in the region's mills between 2009 and 2023. The results indicate that the bioelectricity generated by these mills significantly contributes to the local energy matrix, with an average annual potential exceeding 0.8 TWh. The analysis of different scenarios reveals that net CO₂ absorption by sugarcane plantations surpasses emissions from the mills, reinforcing the role of the sugar-energy sector in mitigating climate change. Additionally, the estimated water consumption in industrial processes complies with current environmental guidelines, varying according to the efficiency of each mill. The study highlights the importance of modernizing the mills and adopting technologies that maximize energy efficiency while minimizing water consumption. The developed methodology proves to be replicable in other regions of São Paulo and Brazil, relying on reliable national data sources. Thus, electricity cogeneration from sugarcane biomass is consolidated as a sustainable solution for energy security and environmental sustainability in the Nova Alta Paulista region.

Keywords: Cogeneration, bioelectricity, sugarcane biomass, carbon sequestration, sustainability, Nova Alta Paulista.

1. ESTRUTURA DO RELATÓRIO

Este relatório final tem como objetivo apresentar, de forma clara e objetiva, as atividades desenvolvidas ao longo do projeto de pós-doutorado realizado entre julho de 2024 e junho de 2025. Para isso, o documento está estruturado nas seguintes seções:

- **Seção 2:** apresenta uma visão geral do cronograma e das etapas desenvolvidas ao longo dos doze meses de execução do projeto de pós-doutorado. São descritas as atividades principais, destacando o cumprimento integral dos objetivos propostos;
- **Seção 3:** introduz o panorama energético nacional e o papel estratégico da biomassa da cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira, com destaque para a relevância da região da Nova Alta Paulista nesse contexto. Também são discutidos avanços tecnológicos na cogeração, o aproveitamento de subprodutos e a importância da gestão hídrica. Ao final, são apresentados o objetivo principal da pesquisa e os objetivos específicos que orientam a análise do potencial energético, do sequestro de carbono, das emissões de CO₂ e do uso de recursos hídricos na região;
- **Seção 4:** fornece uma caracterização da região da Nova Alta Paulista, destacando aspectos populacionais, econômicos e o papel da produção sucroenergética local, com ênfase na geração de bioeletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar;
- **Seção 5:** aborda os conceitos e avanços relacionados à cogeração de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar, com foco nos tipos de ciclos termodinâmicos, nas tecnologias utilizadas nas usinas e em estudos que analisam o desempenho energético, econômico e ambiental do setor. São discutidos desde os sistemas tradicionais baseados em turbinas de contrapressão até tecnologias mais modernas, como BIG/GTCC e biorrefinarias, destacando caminhos para a maximização da eficiência energética e da sustentabilidade na geração de bioeletricidade;
- **Seção 6:** traz as práticas relacionadas à sustentabilidade ambiental nas usinas sucroenergéticas, com foco no sequestro de carbono e no uso eficiente dos recursos hídricos. São discutidas estratégias para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, como a captura de CO₂ e o aproveitamento de resíduos da cana-de-açúcar. Também são apresentadas tecnologias e políticas voltadas para a redução do consumo de água nos processos industriais, destacando iniciativas que contribuem para a eficiência hídrica e para o cumprimento de diretrizes ambientais;

- **Seção 7:** a metodologia baseia-se em dados secundários para estimar a geração de energia, a absorção e emissão de CO₂, e o consumo hídrico em usinas da Nova Alta Paulista entre 2009 e 2023. As análises consideram variáveis primárias e derivadas, três cenários de captura de CO₂ e dois casos de uso de água, com foco na sustentabilidade regional;
- **Seção 8:** apresenta os resultados obtidos para geração de energia, absorção líquida de CO₂ e consumo hídrico, avaliando três cenários energéticos e seus impactos sobre a sustentabilidade regional e o atendimento da população da Nova Alta Paulista;
- **Seção 9:** a conclusão destaca a contribuição da bioeletricidade da cana para a sustentabilidade regional, evidenciando o potencial energético, o sequestro de CO₂ e a gestão hídrica, além da aplicabilidade da metodologia a outras regiões brasileiras.

Assim, este relatório sintetiza as principais etapas, análises e resultados do projeto, oferecendo subsídios técnicos e metodológicos para futuras pesquisas e ações voltadas à sustentabilidade energética e ambiental no setor sucroenergético e em outras regiões do país.

2. RESUMO DAS ATIVIDADES REALIZADAS NO PERÍODO

Este projeto de pós-doutorado, classificado como PD-II conforme a Resolução UNESP nº 12/2022, foi desenvolvido entre 1º de julho de 2024 e 30 de junho de 2025. Durante esse período, o pesquisador esteve afastado de suas atividades no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), por meio de afastamento remunerado concedido pela instituição. O projeto foi conduzido com dedicação integral, conforme previsto para a modalidade PD-II, respeitando as diretrizes estabelecidas pela UNESP e pelo IFSP.

O cronograma deste projeto de pós-doutorado compreendeu os doze meses de vigência, entre julho de 2024 e junho de 2025, e foi estruturado em etapas sequenciais e complementares, visando o cumprimento dos objetivos propostos. As atividades foram distribuídas de forma a garantir a execução eficiente da pesquisa, contemplando o levantamento bibliográfico, a coleta e análise de dados, o desenvolvimento metodológico, a elaboração de resultados e a redação de artigos científicos. Todas as etapas previstas foram integralmente cumpridas dentro dos prazos estabelecidos. A seguir, cada etapa é detalhada no Quadro 1, com a indicação dos respectivos períodos de execução.

Quadro 1 – Cronograma de execução das etapas do projeto

Etapas	Meses											
	jul/24	ago/24	set/24	out/24	nov/24	dez/24	jan/25	fev/25	mar/25	abr/25	mai/25	jun/25
A												
B												
C												
D												
E												
F												
G												
H												

Fonte: Compilação do autor.

- A. Revisão bibliográfica abrangendo o processo de cogeração, sequestro de carbono, uso de recursos hídricos em usinas de cana-de-açúcar e estudos relevantes sobre o tema na literatura;
- B. Coleta de dados referentes à produção de cana-de-açúcar nas cidades da região da Nova Alta Paulista;
- C. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana na Nova Alta Paulista;
- D. Cálculo das absorções e emissões de gás carbônico;
- E. Estimativa do consumo de recursos hídricos nas usinas da região;
- F. Obtenção e análise detalhada dos principais resultados do projeto;
- G. Redação de artigos científicos baseados nos resultados obtidos;
- H. Elaboração do relatório final consolidando as etapas e resultados do projeto.

3. CONTEXTO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Em 2023, a oferta interna de energia primária do Brasil alcançou 313,9 Mtep, registrando um crescimento de 3,5% em relação ao ano anterior. A matriz energética brasileira manteve uma participação significativa de 49,1% de fontes renováveis, percentual substancialmente superior à média global e à dos países da OCDE. A matriz elétrica do Brasil é predominantemente renovável, com destaque para a energia hidrelétrica. Em 2023, as fontes renováveis representaram 89,2% da matriz elétrica, correspondendo a um aumento de 1,2% em comparação ao ano anterior [1]. Esse valor supera amplamente a participação global de 30% da geração de eletricidade proveniente de fontes renováveis no mesmo ano [2]. Durante esse

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo será
disponibilizado
somente a partir de 13/12/2025.

dois cenários destacados nesse trabalho, que foram baseados em estudos realizados em [38], podem haver outros cenários, que podem ser mais vantajosos do que o próprio cenário 2. A decisão pela porcentagem de captura de CO₂ a ser implementada depende de aspectos técnicos das plantas da região.

9. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar na região da Nova Alta Paulista, com foco nas emissões de carbono, no sequestro de CO₂ e no consumo de água. Este objetivo principal foi alcançado a partir de quatro objetivos específicos, que foram todos atingidos. A resposta para a pergunta de pesquisa deste trabalho segue na sequência.

De que forma a geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar nas usinas da Nova Alta Paulista pode contribuir para a sustentabilidade regional, considerando o potencial energético, o sequestro de carbono, as emissões de CO₂ e o uso de recursos hídricos?

A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa de cana-de-açúcar desempenha um papel estratégico para a sustentabilidade energética e ambiental da região da Nova Alta Paulista. As avaliações e estimativas realizadas evidenciam que a bioeletricidade gerada nas usinas locais não apenas contribui para o suprimento energético da região, mas também apresenta um impacto positivo na redução das emissões de CO₂ e na gestão dos recursos hídricos. A análise dos diferentes cenários revelou que, mesmo sem considerar a implementação da tecnologia de captura de CO₂, a absorção líquida desse gás pelas plantações de cana-de-açúcar supera significativamente as emissões industriais, reforçando o potencial do setor sucroenergético na mitigação das mudanças climáticas. Diante desses resultados, destaca-se a importância da modernização das usinas e da adoção de tecnologias que maximizem a eficiência energética e reduzam o consumo de recursos hídricos, garantindo um balanço ambiental ainda mais favorável. Assim, a bioeletricidade gerada a partir da cana-de-açúcar se consolida como uma alternativa viável e sustentável para a matriz elétrica da NAP, promovendo segurança energética e benefícios ambientais de longo prazo.

Além do cumprimento do objetivo principal, a metodologia desenvolvida neste estudo se mostra robusta e replicável para outras regiões do estado de São Paulo e do Brasil, visto que as fontes de dados utilizadas, como IBGE, EPE e ANEEL, possuem abrangência nacional.

Dessa forma, a aplicação dessa abordagem em diferentes localidades pode fornecer informações estratégicas para a formulação de políticas públicas voltadas à ampliação da bioeletricidade e ao aprimoramento da sustentabilidade do setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço energético nacional 2024:** ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- [2] REN21. **Renewables 2024 global status report collection:** energy supply. Paris: REN21 Secretariat, 2024. ISBN 978-3-948393-15-1.
- [3] UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Bioeletricidade em números:** maio de 2024. São Paulo: UNICA, 2024. Disponível em: <https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=134>. Acesso em: 20 abr. 2024.
- [4] NOVACANA. **Cogeração:** como funciona a produção de energia elétrica. [S. l.]: NovaCana, [202-]. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cogerao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- [5] ALVES, M.; PONCE, G. H.; SILVA, M. A.; ENSINAS, A. V. Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel. *Energy*, Oxford, v. 91, p. 751–757, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.08.101.
- [6] BIZZO, W. A.; LENÇO, P. C.; CARVALHO, D. J.; VEIGA, J. P. S. The generation of residual biomass during the production of bio-ethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 29, p. 589–603, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.056.
- [7] FIORANELLI, A.; BIZZO, W. A. Generation of surplus electricity in sugarcane mills from sugarcane bagasse and straw: Challenges, failures and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Oxford, v. 186, n. 113647, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113647.
- [8] CERRI, C. E. P. et al. Carbon balance in the sugarcane sector - conference report. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 375, n. 134090, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134090.
- [9] BARBOSA, L. de S. N. S.; HYTÖNEN, E.; VAINIKKA, P. Carbon mass balance in sugarcane biorefineries in Brazil for evaluating carbon capture and utilization opportunities. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 105, p. 351–363, 2017. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.07.015.
- [10] UPPALAPATI, S. et al. Environmental impact and energy balance assessment in ethanol production from sugarcane molasses: A life cycle analysis in southern India. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, Oxford, v. 204, n. 114807, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114807.

[11] CORRÊA DO LAGO, A. et al. Sugarcane as a carbon source: The Brazilian case. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 46, p. 5–12, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.09.007.

[12] DIAS, M. O. de S. et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*, Oxford, v. 15, p. 35–51, 2015. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.03.004.

[13] BORDONAL, R. D. O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Paris, v. 38, n. 2, p. 1–23, 2018. DOI: 10.1007/s13593-018-0490-x.

[14] GONÇALES FILHO, M. et al. Opportunities and challenges for the use of cleaner production to reduce water consumption in Brazilian sugar-energy plants. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 186, p. 353–363, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.114.

[15] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal 2022: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. 12 p. (Informativo; v. 49). ISSN 0101-3963. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 10 dez. 2024.

[16] GIL, Izabel Castanha. **Nova Alta Paulista, 1930-2006: entre memórias e sonhos**. Do desenvolvimento contido ao projeto político de desenvolvimento regional. 2007. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

[17] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE Cidades. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 11 dez. 2024.

[18] SÃO PAULO (Estado). Últimas notícias. Portal do Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/ultimas-noticias>. Acesso em: 11 dez. 2024.

[19] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**: 2017. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. 82 p. e-ISBN 978-85-240-4418-2. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100600.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

[20] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA – Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/signa-sistema-de-informacoes-de-geracao-da-aneel>. Acesso em: 16 dez. 2024.

- [21] COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia. **Cogeração: conceito e tecnologias.** Disponível em: <https://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [22] BOYCE, Meherwan P. **Handbook for cogeneration and combined cycle power plants.** 2. ed. New York: ASME Press, 2010.
- [23] PROGRAMA POTENCIALIZEE. **Programa PotencializEE – Eficiência Energética na Indústria.** Disponível em: <https://www.programa-potencializee.com.br>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- [24] DELGADO, Rafael Filipe Lourenço. **Estudo e implementação de um sistema de cogeração.** 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.
- [25] ALVES, Moisés. **Estudo de sistemas de cogeração em usinas de açúcar e álcool, com utilização do bagaço e palha da cana.** 2011. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Acervo/Detail/807858>. Acesso em: 29 abr. 2024.
- [26] RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. CO₂ capture in a thermal power plant using sugarcane residual biomass. *Energies*, Basel, v. 16, n. 12, 4570, 2023. DOI: 10.3390/en16124570.
- [27] REY, J. Copa; PACHECO, J. Tamayo; TARELHO, L. António da Cruz; SILVA, V.; CARDOSO, J.; SILVEIRA, J. et al. Evaluation of cogeneration alternative systems integrating biomass gasification applied to a Brazilian sugar industry. *Renewable Energy*, v. 178, p. 318–333, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.06.053.
- [28] GHAFARPOUR, Z.; MAHMOUDI, M.; MOSAFFA, A.; FARSHI, L. Thermoeconomic assessment of a novel integrated biomass based power generation system including gas turbine cycle, solid oxide fuel cell and rankine cycle. *Energy Conversion and Management*, v. 161, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.01.071.
- [29] PEDROSO, D.; MACHIN, E.; PROENZA PEREZ, N.; BRAGA, L.; SILVEIRA, J. Technical assessment of the biomass integrated gasification/gas turbine combined cycle (BIG/GTCC) incorporation in the sugarcane industry. *Renewable Energy*, v. 114, p. 464–479, 2017. DOI: 10.1016/j.renene.2017.07.038.
- [30] MACHIN, E. et al. Biomass integrated gasification-gas turbine combined cycle (BIG/GTCC) implementation in the Brazilian sugarcane industry: economic and environmental appraisal. *Renewable Energy*, v. 172, p. 529–540, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.03.074.
- [31] LOZANO, M.; SANTOS, R.; SANTOS, J.; SERRA, L. Optimal modes of operation and product cost allocation in sugarcane steam cogeneration plants. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 52, n. 102686, 2024. DOI: 10.1016/j.tsep.2024.102686.

- [32] FONSECA, G.; COSTA, C.; CRUZ, A. Economic analysis of a second-generation ethanol and electricity biorefinery using superstructural optimization. *Energy*, v. 204, n. 117988, 2020. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117988.
- [33] ALKIMIM, A.; CLARKE, K. Land use change and the carbon debt for sugarcane ethanol production in Brazil. *Land Use Policy*, v. 72, p. 65–73, 2018. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.12.039.
- [34] CABRAL, O. et al. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182–183, p. 54–66, 2013. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.08.004.
- [35] PATEL, N. et al. Dynamics of CO₂ fluxes and controlling environmental factors in sugarcane (C₄)–wheat (C₃) ecosystem of dry sub-humid region in India. *International Journal of Biometeorology*, v. 65, p. 1069–1084, 2021. DOI: 10.1007/s00484-021-02088-y.
- [36] RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. Techno-economic assessment of bioenergy with carbon capture and storage systems in a typical sugarcane mill in Brazil. *Energies*, v. 12, n. 1129, 2019. DOI: 10.3390/en12061129.
- [37] MOREIRA, J. et al. BECCS potential in Brazil: achieving negative emissions in ethanol and electricity production based on sugar cane bagasse and other residues. *Applied Energy*, v. 179, p. 55–63, 2016. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.044.
- [38] BUNYA, B. et al. Optimization and tradeoff analysis for multiple configurations of bioenergy with carbon capture and storage systems in Brazilian sugarcane ethanol sector. *Entropy*, v. 26, n. 8, p. 698, 2024. DOI: 10.3390/e26080698.
- [39] CARMO, J. B. et al. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy*, v. 5, n. 3, p. 267–280, 2012. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x.
- [40] FORMANN, S. et al. Beyond sugar and ethanol production: value generation opportunities through sugarcane residues. *Frontiers in Energy Research*, v. 8, 579577, 2020. DOI: 10.3389/fenrg.2020.579577.
- [41] RESTREPO-VALENCIA, S.; WALTER, A. BECCS opportunities in Brazil: comparison of pre and post-combustion capture in a typical sugarcane mill. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 124, n. 103859, 2023. DOI: 10.1016/j.ijggc.2023.103859.
- [42] MIKULIC, H. et al. Flexible carbon capture and utilization technologies in future energy systems and the utilization pathways of captured CO₂. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 114, n. 109338, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109338.
- [43] KARP, S.; BURGOS, W.; VANDENBERGHE, L. et al. Sugarcane: A promising source of green carbon in the circular bioeconomy. *Sugar Tech*, v. 24, p. 1230–1245, 2022. DOI: 10.1007/s12355-022-01161-z.

- [44] ANSORGE, L.; STEJSKALOVÁ, L. Water footprint as a tool for selection of alternatives (comments on “Food recommendations for reducing water footprint”). *Sustainability*, v. 14, n. 6317, 2022. DOI: 10.3390/su14106317.
- [45] HU, M. et al. Spatial-temporal variations in green, blue and gray water footprints of crops: how do socioeconomic drivers influence? *Environmental Research Letters*, v. 17, n. 124024, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/aca4e5.
- [46] SHEN, R.; YAO, L. A holistic analysis of China’s consumption-based water footprint (2012–2017) from a multilevel perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 429, n. 139593, 2023. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139593.
- [47] SCARPARE, F.; HERNANDES, T.; RUIZ-CORREA, S. et al. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 4576–4584, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.05.107.
- [48] TAYADE, A.; VASANTHA, S.; ANUSHA, S. et al. Water-efficient genotypes along with conservation measures significantly reduce the green and blue water footprints in sugarcane (*Saccharum spp.*). *Scientific Reports*, v. 13, n. 13229, 2023. DOI: 10.1038/s41598-023-40223-4.
- [49] RAJKUMAR, R. et al. Drip irrigation for sustaining high sugarcane (*Saccharum officinarum*) yield in marginally to moderately waterlogged saline Vertisols of Karnataka, India. *Irrigation and Drainage*, 2024. DOI: 10.1002/ird.2990.
- [50] BARROQUELA, W.; BEGA, J.; ANICIO, S. d. O.; OLIVEIRA, J. d. Water consumption in the production process of the sugar-energy industry: case study in the northwest of São Paulo (Brazil). *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, v. 58, n. 2, p. 251–260, 2023. DOI: 10.5327/Z2176-94781559.
- [51] SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Protocolo Etanol Mais Verde**. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/sma/etanolverde/>. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [52] SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução SMA nº 88, de 19 de dezembro de 2008**. Dispõe sobre critérios e diretrizes para o uso da água nas unidades de produção de etanol no Estado de São Paulo. Disponível em: https://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2008_Res_SMA_88.pdf. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [53] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 4 jan. 2025.
- [54] USINA LINS. **Relatório de Sustentabilidade: Safra 2022/2023**. Lins: Usina Lins, [s.d.]. Disponível em: https://www.usinalins.com.br/Relatorio_Sustentabilidade.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

- [55] COLOMBO AGROINDÚSTRIA. **Relatório de Sustentabilidade Anual**. Colombo Agroindústria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.colomboagroindustria.com.br/relatorio-de-sustentabilidade-anual>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [56] ZILOR. **Relatório de Sustentabilidade**. Zilor, [s.d.]. Disponível em: <https://www.zilor.com.br/relacoes-com-investidores/governanca-corporativa/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [57] SÃO MANOEL. **Sustentabilidade**. São Manoel, [s.d.]. Disponível em: <https://www.saomanoel.com.br/sustentabilidade>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [58] TEREOS. **Relatório de sustentabilidade**. [S.l.]: Tereos, [s.d.]. Disponível em: <https://br.tereos.com/pt-pt/sustentabilidade/relatorio-sustentabilidade/>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [59] SÃO MARTINHO. **Relatório Anual de Sustentabilidade**. [S.l.]: São Martinho, [s.d.]. Disponível em: <https://www.saomartinho.com.br/ListRelatorio.aspx?idCanal=E/5CI5hbGiTfjZ7mhu2y5w==>. Acesso em: 10 out. 2024.
- [60] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [61] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Tabela 6579: Cana-de-açúcar - Área colhida, quantidade produzida e rendimento médio da produção - Brasil - Série histórica**. Rio de Janeiro: IBGE, [s.d.]. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6579>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [62] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, jun. 2024. Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [63] BRASIL. Ministério das Cidades. **SNIS – Série Histórica: Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. Disponível em: <https://app4.cidades.gov.br/serieHistorica/>. Acesso em: 24 jan. 2025.
- [64] ROSER, Max; RITCHIE, Hannah; ORTIZ-OSPINA, Esteban; RODÉS-GRAU, Pablo. **CO₂ and Greenhouse Gas Emissions**. Our World in Data, 2024. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- [65] COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **A geração termoeletrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil: análise do desempenho da safra 2009-2010**. Brasília: Conab, mar. 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-termoeletrica-com-a-queima-do-bagaco-de>

cana-de-acucar/termoeletrica-com-a-queima-do-bagaco-de-cana-de-acucar-no-brasil-safra-2009-2010.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

[66] NOVACANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em: 10 out. 2024.

[67] MENANDRO, Lauren Maine Santos et al. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 11, n. 3, p. 488–504, 2017. DOI: 10.1002/bbb.1760.

[68] CARVALHO, Danilo José; VEIGA, João Paulo Soto; BIZZO, Waldir Antonio. Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation. *Energy*, v. 119, p. 178–187, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.067.

[69] PAULA, Mauro de; PEREIRA, Francisco Assis Rolim; ARIAS, Edison Rubens Arrabal; SCHEEREN, Bruno Ricardo; SOUZA, Celso Correia de; MATA, Danúbia Sales da. Fixação de carbono e a emissão dos gases de efeito estufa na exploração da cana-de-açúcar. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 34, n. 3, p. 633–640, jun. 2010. DOI: 10.1590/S1413-70542010000300015.

[70] DIAS, Raquel de Freitas; CARMINATI, Hudson Bolsoni; ARAÚJO, Ofélia de Queiroz Fernandes; MEDEIROS, José Luiz de. Water and power consumption, ethanol production and CO₂ emissions: high-scale sugarcane-based biorefinery toward neutrality in carbon. In: *CARBON DIOXIDE: PROBLEMS AND DECISIONS II*, 2019. Materials Science Forum, [S. l.], v. 965, p. 87–95, set. 2019. Trans Tech Publications Ltd. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.965.87.

[71] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, out. 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202014.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2025.

[72] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 21 jan. 2025.