

Consequências do fim das queimadas da cana-de-açúcar em São Paulo: Uma avaliação ambiental e técnico-econômica

Implications of the Phase-Out of Sugarcane Burning in São Paulo: An Environmental and Techno-Economic Assessment

Stéphani Cetímia Mariotti Ruiz

Universidade Estadual de Campinas, CCD-Etanol/FAPESP, Campinas, SP, Brasil.

Luís Augusto Barbosa Cortez

Universidade Estadual de Campinas, CCD-Etanol/FAPESP, Campinas, SP, Brasil.

GT3. Evolução, estrutura, competitividade e dinâmica das cadeias agroindustriais

Resumo: O estudo analisa os efeitos da eliminação das queimadas da cana-de-açúcar sobre o funcionamento do sistema sucroenergético paulista, com ênfase nas dimensões produtiva, agrônômica e energética. Metodologicamente, combina revisão bibliográfica, análise documental e avaliação de séries temporais (2000–2024) de produtividade agrícola (PAM/IBGE) e geração de bioeletricidade (UNICA e CCEE), permitindo identificar mudanças estruturais associadas à transição para a colheita mecanizada. Os resultados evidenciam que, embora o fim das queimadas tenha gerado ganhos ambientais e induzido a modernização tecnológica do setor, a produtividade agrícola não apresentou crescimento sustentado após a consolidação da mecanização, exibindo tendência de estagnação e maior variabilidade a partir de 2010. A intensificação do tráfego mecanizado e a compactação do solo emergem como fatores centrais para explicar esse comportamento, deslocando as restrições do sistema do plano trabalhista para o agrônômico. Adicionalmente, a eliminação da queima reconfigurou a economia dos resíduos, transformando bagaço e palha em ativos energéticos estratégicos e ampliando o potencial de cogeração e de rotas tecnológicas como o etanol de segunda geração. Contudo, a oferta de bioeletricidade permanece fortemente condicionada à sazonalidade da cana, limitando sua inserção competitiva no mercado elétrico. Conclui-se que o setor ingressa em uma nova fronteira de desenvolvimento, na qual os principais desafios concentram-se na recuperação da produtividade agrícola e na redução da sazonalidade da oferta de bioenergia, exigindo inovações agrônômicas, novos arranjos produtivos e maior integração entre rotas tecnológicas.

Palavras-chave: mecanização agrícola, produtividade da cana-de-açúcar, bioeletricidade, resíduos agrícolas, transição energética.

Abstract: This study analyzes the effects of the phase-out of sugarcane burning on the functioning of the sugar-energy system in São Paulo, focusing on productive, agronomic, and energy dimensions. Methodologically, it combines a literature review, documentary analysis, and time series evaluation (2000–2024) of agricultural productivity (PAM/IBGE) and bioelectricity generation (UNICA and CCEE), enabling the identification of structural changes associated with the transition to mechanized harvesting. The results show that, although the elimination of burning generated environmental gains and induced technological modernization, agricultural productivity did not sustain long-term growth after the consolidation of mechanization, exhibiting stagnation and increased variability from 2010 onwards. The intensification of mechanized traffic and soil compaction emerge as key factors explaining this pattern, shifting system constraints from the labor dimension to the agronomic domain. Additionally, the phase-out of burning reconfigured the economics of residues, transforming bagasse and straw into strategic energy assets and expanding the potential for cogeneration and advanced technological routes such as second-generation ethanol. However, the supply of bioelectricity remains strongly conditioned by sugarcane seasonality, limiting its competitive integration into the electricity market. The study concludes that the sector has entered a new development frontier, in which the main challenges lie in restoring agricultural productivity and reducing the seasonality of bioenergy supply, requiring agronomic innovations, new production arrangements, and greater integration across technological pathways.

Keywords: mechanized harvesting, sugarcane productivity, bioelectricity, agricultural residues, energy transition.

1. Introdução

Nos últimos anos, a expansão das fontes renováveis de energia tem sido impulsionada não apenas por compromissos climáticos globais, mas também por crescentes preocupações com segurança energética e estabilidade no abastecimento de combustíveis (Hassan et al., 2024;

Ibekwe et al., 2024). Episódios recentes de instabilidade geopolítica e volatilidade nos mercados internacionais de petróleo ampliaram o interesse por fontes domésticas capazes de reduzir a dependência de combustíveis fósseis importados. Nesse contexto, a bioenergia de base agrícola adquiriu relevância estratégica, especialmente em países com elevada disponibilidade de biomassa e capacidade tecnológica de conversão em combustíveis e eletricidade (Krukowski et al., 2024; Negi et al., 2023).

Nesse cenário, o setor sucroenergético brasileiro ocupa posição central na matriz energética nacional, integrando, em um mesmo sistema agroindustrial, a produção de etanol, a cogeração de eletricidade e a geração de subprodutos renováveis (Cortez, 2010; Cortez; ROSILLO-CALLE, 2023; Miranda; Fonseca, 2020; Karp et al., 2021). O estado de São Paulo destaca-se como principal polo produtivo, concentrando área cultivada, capacidade industrial e avanços tecnológicos que moldaram o padrão nacional (Ripoli; Molina; Rípoli, 2003), configurando-se como laboratório institucional e tecnológico da agroindústria canavieira.

Até o final da década de 1990, a produção paulista baseava-se predominantemente na colheita manual precedida pela queima do canavial, prática que eliminava a palha, facilitava o corte e viabilizava o rápido processamento da matéria-prima (Paraíso; Gouveia, 2015; Ripoli; Molina; Rípoli, 2003). Esse modelo estruturava-se em um mercado de trabalho sazonal e intensivo em mão de obra (Castro; Gilio; Machado, 2022; Torquato, 2013), mas gerava impactos ambientais e sociais relevantes, especialmente sobre a qualidade do ar e a saúde da população (Paraíso; Gouveia, 2015; Silveira et al., 2014; Cardoso et al., 2013).

A partir dos anos 2000, consolidou-se um arcabouço institucional voltado à eliminação progressiva da queima, com destaque para a Lei nº 11.241/2002 e o Protocolo Agroambiental (São Paulo, 2002; Goldemberg; Coelho; Guardabassi, 2018; Cardoso et al., 2013). Esse arranjo induziu a difusão da colheita mecanizada, promovendo uma reconfiguração do sistema produtivo. Embora a mecanização tenha reduzido impactos ambientais, introduziu desafios agrônômicos associados à compactação do solo, danos às soqueiras e redução da longevidade dos canaviais (Carvalho; Braunbeck; Chagas, 2012; Rossi Neto et al., 2018).

Paralelamente, a palha passou a desempenhar dupla função: agrônômica, ao contribuir para conservação do solo e ciclagem de nutrientes (Fortes; Trivelin; Vitti, 2012; Meier; Thorburn, 2016), e energética, como parcela relevante do potencial da cultura (Ripoli; Molina; Rípoli, 2003; Cardoso et al., 2013). Contudo, sua remoção excessiva implica trade-offs produtivos, afetando a brotação e a produtividade (Cardoso et al., 2013; Rossi Neto et al., 2018).

Apesar dos ganhos ambientais e tecnológicos, a produtividade agrícola paulista não apresentou crescimento sustentado nas últimas décadas. Dados da PAM-IBGE indicam

aumento até o final dos anos 2000, seguido de queda e estagnação em patamar inferior (IBGE-PAM, 2025; Caldarelli; Gilio, 2018), sugerindo limites estruturais ao modelo vigente. Ademais, o setor permanece condicionado pela sazonalidade da cana, concentrando a oferta de etanol e bioeletricidade na safra e restringindo a estabilidade da oferta energética (Khatiwada et al., 2016; EPE, 2024).

Embora a literatura destaque os benefícios ambientais da eliminação da queima, ainda são limitados os estudos que analisam de forma integrada seus efeitos técnico-econômicos sobre produtividade, uso de resíduos e dinâmica operacional do setor. Diante disso, este estudo analisa como a eliminação da queima e a difusão da colheita mecanizada transformaram o sistema sucroenergético paulista, avaliando seus efeitos sobre a produtividade agrícola, o uso econômico dos resíduos e a dinâmica temporal da bioenergia. Ao articular essas dimensões, o trabalho contribui para compreender como mudanças institucionais e tecnológicas reconfiguram simultaneamente o desempenho agrônomo, energético e operacional do setor.

2. Materiais e Métodos

Este estudo adota uma estratégia analítica evolutiva que combina pesquisa bibliográfica, documental e análise de séries temporais. O desenho metodológico investiga os efeitos da transição tecnológica associada à eliminação da queima da cana-de-açúcar sobre três dimensões interdependentes do sistema sucroenergético paulista: produtividade agrícola, uso econômico dos resíduos e geração de bioeletricidade.

A escolha do estado de São Paulo fundamenta-se em seu papel pioneiro na formação do sistema sucroenergético brasileiro. Desde a expansão da agroindústria canavieira e, especialmente, a partir do Proálcool, o estado consolidou-se como principal polo tecnológico, produtivo e institucional do setor, concentrando a produção nacional e centros de pesquisa em bioenergia. Essa trajetória o caracteriza como laboratório das transformações tecnológicas da agroindústria canavieira (Cortez, 2010; Cortez; Rosillo-Calle, 2023).

O referencial teórico é construído por meio de revisão bibliográfica nas áreas de economia da energia, economia agrícola, agronomia e engenharias, com o objetivo de identificar os mecanismos que orientam a análise empírica: (i) a mecanização como mudança de regime tecnológico; (ii) seus efeitos sobre a estrutura do solo e a longevidade do canavial; e (iii) a conversão dos resíduos em ativos energéticos.

A etapa empírica organiza-se em três blocos analíticos. O primeiro examina a dinâmica da produtividade agrícola da cana-de-açúcar a partir da série histórica da PAM-IBGE para o período de 2000 a 2024, utilizando análise de tendência para identificar mudanças de regime e

desaceleração dos ganhos produtivos. O segundo analisa a transformação dos resíduos em insumos energéticos com base em pesquisa documental e literatura especializada, caracterizando sua função econômica e inserção na matriz energética. O terceiro investiga a dinâmica da bioeletricidade em duas escalas: anual, com dados da UNICA (safras 2013/2014 a 2025/2026), e mensal, com dados da CCEE (setembro de 2012 a dezembro de 2025), permitindo identificar a trajetória da oferta e seu padrão sazonal.

A análise dos dados baseia-se em estatística descritiva, análise de tendência e comparação entre subperíodos, possibilitando estabelecer relações entre produtividade, disponibilidade de biomassa e geração de bioeletricidade. A abordagem não busca estimar relações causais, mas identificar regularidades empíricas e mudanças no funcionamento do sistema, interpretadas à luz do referencial teórico.

3. Resultados

3.1. Evolução do setor sucroenergético paulista após os anos 2000

A transição do sistema manual com queima para a colheita mecanizada de cana “crua” em São Paulo representou mais que uma mudança operacional, configurando uma reconfiguração tecnológica com efeitos estruturais sobre o desempenho agrícola e energético. Até o início dos anos 2000, a queima pré-colheita eliminava a palha, facilitando o corte manual e o processamento do colmo (Ripoli; Molina; Rípoli, 2003). Contudo, evidências associaram a prática ao aumento de material particulado e a impactos sobre a saúde respiratória, gerando pressão institucional para sua eliminação (Cançado et al., 2006; Manrique et al., 2025).

A inflexão ocorreu com a Lei nº 11.241/2002, que estabeleceu cronograma progressivo de eliminação da queima, diferenciando áreas mecanizáveis (até 2021) e não mecanizáveis (até 2031) (São Paulo, 2002). Ao reduzir a incerteza regulatória, a legislação funcionou como instrumento de indução tecnológica, estimulando investimentos em mecanização e reorganização produtiva. Em 2007, o Protocolo Agroambiental (Protocolo Goldemberg) antecipou prazos e consolidou um arranjo de coordenação público-privada, com mecanismos de monitoramento e compromissos voluntários que aceleraram a adoção da colheita mecanizada (Goldemberg; Coelho; Guardabassi, 2018).

Como evidenciado na Tabela 1 (seção 3.2, a seguir), a difusão da mecanização foi rápida, baseada em tecnologias importadas. Entretanto, esse processo introduziu novas restrições agronômicas. O tráfego intensivo de máquinas aumentou a compactação do solo, reduzindo porosidade, limitando o desenvolvimento radicular e afetando a produtividade e longevidade do canavial (Esteban et al., 2019; Júnnyor et al., 2019). Evidências recentes

indicam que a compactação associada à logística infield tornou-se variável crítica para a sustentabilidade dos sistemas mecanizados (Esteban et al., 2024).

Simultaneamente, a eliminação da queima redefiniu o papel da palha, que passou a permanecer no campo como ativo agrônomo e energético (Projeto Sucre, 2020). Sua manutenção contribui para conservação do solo e aumento de carbono (Fortes; Trivelin; Vitti, 2012; Junior et al., 2018; Dias et al., 2016; Okuno et al., 2019), enquanto sua remoção para fins energéticos envolve *trade-offs* produtivos relevantes (Junior et al., 2018; Gonçalves et al., 2023). A integração da palha ao bagaço amplia o potencial de bioeletricidade e rotas avançadas, mas introduz novos dilemas de sustentabilidade (Seabra et al., 2010; Cardoso et al., 2013).

No âmbito industrial, o bagaço consolidou-se como base da cogeração, com potencial de exportação de eletricidade em configurações eficientes (Seabra; Macedo, 2011; Coelho Junior et al., 2024). Contudo, sua disponibilidade permanece vinculada à moagem, mantendo a geração concentrada na safra. Mesmo com o uso da palha, a bioeletricidade continua condicionada ao ciclo agrícola da cana, limitando contratos estáveis no setor elétrico (Seabra et al., 2010; Khatiwada et al., 2016).

Em síntese, o período pós-2000 foi marcado por forte evolução institucional e tecnológica, com ganhos ambientais relevantes. Entretanto, a partir da década de 2010, emergem limites estruturais do modelo baseado na cana-de-açúcar, evidenciados pela estagnação produtiva, pelos trade-offs no uso dos resíduos e pela persistência da sazonalidade energética. Nesse contexto, as seções seguintes analisam os desdobramentos desses processos sobre a produtividade, os mercados de biomassa e as restrições do modelo atual.

3.2. Tecnologias de colheita mecanizada de cana no Brasil e consequências produtivas

A mecanização da colheita de cana-de-açúcar no Brasil não pode ser interpretada apenas como substituição da colheita manual por “colhedoras” ou “colheitadeiras”, mas como uma reconfiguração do sistema produtivo desencadeada pela eliminação da queima. O elemento central dessa transição foi o aumento significativo da biomassa total movimentada por hectare. No sistema tradicional com queima pré-colheita, a biomassa efetivamente transportada à usina correspondia predominantemente ao colmo industrializável, tipicamente em torno de 70–85 t/ha (IBGE-PAM, 2026). Com a adoção da colheita de cana “crua”, a permanência da palha no campo elevou a biomassa total movimentada para valores próximos de 110–120 t/ha, incorporando cerca de 30–40 t/ha de material adicional composto por folhas secas, folhas verdes e ponteiros (Ripoli; Molina; Rípoli, 2003). Esse aumento inviabilizou economicamente a

continuidade do corte manual e tornou a mecanização uma necessidade física e logística, não apenas uma opção tecnológica.

A tecnologia predominante no Brasil para colheita mecanizada de cana-de-açúcar baseia-se em colhedoras autopropelidas do tipo “*chopper harvester*”, capazes de realizar corte basal, alimentação, picagem em rebolos (*billets*), extração primária e secundária de impurezas e descarga em unidades de transbordo (Cardoso *et al.*, 2018). Trata-se de um sistema integrado no qual colhedora, transbordo e transporte rodoviário (Figura 1) operam de forma sincronizada, configurando uma cadeia operacional contínua até a usina (Cardoso *et al.*, 2013). Portanto, o desempenho da colheita depende simultaneamente da regulagem dos extratores, da altura de corte, da velocidade de deslocamento e da interação com as condições agrônômicas do talhão, afetando perdas invisíveis, teor de impurezas minerais e vegetais e consumo energético do processo (Cardoso *et al.*, 2013; 2018).

Figura 1 - Esquema do sistema mecanizado convencional de cana-de-açúcar.



Fonte: Elaborado pelos autores.

No mercado brasileiro consolidou-se predominantemente a linhagem tecnológica originada na Austrália (*Austoft/Case IH*), posteriormente incorporada por outros fabricantes globais como John Deere e Fluxo Máquinas Agrícolas. No Quadro 1, apresentam-se as diferenças entre modelos: em número de linhas colhidas (1 ou 2), peso (massa) do equipamento, sistema de tração (pneus ou esteiras), eficiência do sistema de limpeza e nível de automação embarcada. Apesar dessas variações, observa-se convergência tecnológica: máquinas de grande porte, peso superior a 30 toneladas e alta capacidade diária de colheita (Esteban *et al.*, 2019). Essa convergência implica um padrão técnico dominante caracterizado por elevada eficiência operacional e simultânea intensificação do tráfego sobre o solo (Carvalho; Braunbeck; Chagas, 2012; Esteban *et al.*, 2019).

Quadro 1 - Comparação técnica entre as principais colhedoras comerciais no Brasil.

	Marcas			
	Case IH	John Deere	FXMA **	Jacto
Principal Modelo	A8800 (Série Austoft 8000)	CH670	FX 400	Hover 500

XVI World Congress of Rural Sociology
64th Congress of the Brazilian Society of Rural
Economics, Management and Sociology

JULY 19 - 23, 2026 | PORTO ALEGRE/RS | BRAZIL | UFRGS

Peso Operacional	~32–35 t	~31 t	~17–18 t	~21–23 t
Sistema de Tração	Pneus (opção esteira em versões recentes)	Pneus	Pneus	Esteiras (flutuação)
Nº de Linhas	1 ou 2	1 ou 2	1	2
Capacidade Operacional*	100–150 t/h	90–140 t/h	60–100 t/h	80–130 t/h
Comparação Técnica	Alta produtividade em 2 linhas; sistema eficiente de extração; padrão dominante no Brasil	Sistema AutoTrac e automação de corte; robustez estrutural; boa adaptação a terrenos irregulares	Menor peso; indicada para áreas declivosas; menor compactação relativa	Conceito de flutuação sobre o solo; menor pressão específica; foco em redução de compactação
Referências	Case IH (2009); Goiasmaq (2014); Icontrol3 (2013)	John Deere (2026); John Deere (2023).	FXMA (2026) Revista RPA News (2023)	Jacto (2026; 2026).
Ilustração exemplificativa				

Fonte: Elaborado pelos autores.

Nota: *Capacidade operacional varia conforme produtividade do talhão, teor de impurezas e logística. ** Fluxo Máquinas Agrícolas.

A rápida difusão da mecanização da colheita da cana-de-açúcar no estado de São Paulo evidencia a força desse padrão tecnológico (Baccarin, 2019). Monitoramento por sensoriamento remoto demonstrou crescimento significativo da colheita sem queima já na segunda metade dos anos 2000 (Moura, 2022). Dados da Conab (2025; 2026) indicam que a participação da colheita mecanizada no estado de São Paulo superou 90% já em 2015, já em nível nacional apenas em 2017 ultrapassou a marca de 90% de colheita mecanizada (Tabela 1). A transição foi acelerada pelo arcabouço regulatório (lei estadual 11.241/2002 e o Protocolo Goldemberg), mas sua consolidação decorreu da viabilidade econômica do sistema mecanizado em larga escala.

Tabela 1 - Proporção da colheita manual e mecanizada no agrupamento por safra de 2007 a 2026.

Safra	Colheita mecanizada (%)			
	Brasil	Norte/Nordeste	Centro-Sul	São Paulo
2007/08	24,4	3,3	28,5	33
2008/09	37,1	5,1	42,8	47,6
2009/10	47,6	5,6	54,9	58,6
2010/11	55,1	11,2	62,2	62,7
2011/12	63,7	13,9	71,6	72,2
2012/13	69,2	16,5	77,2	77,7
2013/14	74,0	16,9	82,0	81,3
2014/15	76,8	18,2	84,3	85,1
2015/16	85,1	22,7	93,0	94,5
2016/17	89,8	23,5	94,6	94,5
2017/18	90,2	23,2	95,6	95,9
2018/19	91,6	25,4	97,0	93,3
2019/20	91,8	24,3	97,7	97,2
2020/21	89,4	23,2	97,1	98,3
2021/22	89,4	26,2	96,9	96,9
2022/23	90,8	29,8	98,5	99,2
2023/24	92,4	32,0	98,6	99,2
2024/25	92,4	32,0	98,6	98,2
2025/26	92,4	32,0	98,6	98,2

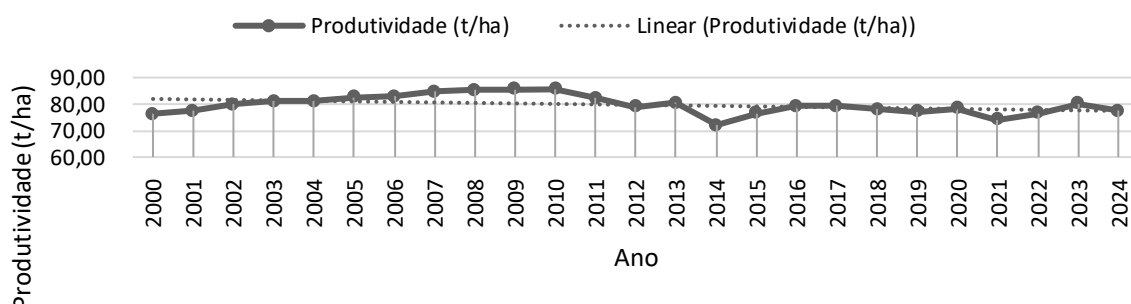
Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da Conab (2025; 2026).

Entretanto, o aumento da biomassa movimentada e o uso de equipamentos pesados introduziram novas restrições biofísicas. O tráfego intenso de colhedoras e transbordos promove compactação do solo, redução da macro porosidade e restrição ao crescimento radicular, afetando a infiltração de água e a longevidade das soqueiras. Estudos empíricos associam a compactação ao declínio de produtividade em ciclos subsequentes (Rossi Neto *et al.*, 2018). A literatura aponta que tais efeitos passaram a constituir variável crítica para a sustentabilidade produtiva do sistema mecanizado, deslocando o centro do problema produtivo do plano trabalhista para o plano agrônomo.

3.3. Produtividade agrícola da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

A produtividade agrícola da cana-de-açúcar em São Paulo exibiu trajetória não monotônica entre 2000 e 2024, com crescimento nos anos 2000 e inflexão negativa após 2010 (Gráfico 1). Em termos empíricos, segundo os dados da PAM-IBGE (2026), o rendimento estadual saiu de 76,078 t/ha (2000) para 85,54 t/ha (2010), o que implica alta de 12,44% no subperíodo 2000–2010. Posteriormente, observou-se ruptura entre 2010 e 2014, a produtividade cai para 72,10 t/ha, correspondendo a diminuição de 15,71%. No intervalo posterior (2014–2024), houve recuperação parcial, atingindo 77,53 t/ha em 2024, com acréscimo no período de 7,53%, porém sem retorno ao pico do fim dos anos 2000, permanecendo em patamar inferior e mais volátil (IBGE-PAM, 2025).

Gráfico 1 - Produtividade da cana-de-açúcar no estado de São Paulo no período de 2000 a 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de PAM-IBGE (2026).

A mudança de nível de produtividade também aparece ao comparar médias por blocos. No período pré-2010 (2000–2010), a produtividade média foi de 81,971 t/ha; já no período pós-2010 (2011–2024), a média recua para 77,87 t/ha, isto é, uma redução média de 5% em relação ao patamar anterior. Em paralelo, a tendência linear estimada para 2000–2024 (Gráfico 1 e Quadro 2) é negativa: coeficiente $-0,19$ t/ha por ano ($\approx -1,87$ t/ha por década), sinalizando perda tendencial de rendimento no horizonte longo, ainda que com baixo poder explicativo isolado ($R^2 \approx 0,16$), dado o componente cíclico (IBGE-PAM, 2025).

Quadro 2 - Regimes da produtividade da cana-de-açúcar em São Paulo (2000–2024).

	I – Expansão com ganhos técnicos	II – Pico e inflexão da produtividade	III – Estagnação em novo patamar
Período	2000–2007	2008–2013	2014–2024
Produtividade média (t/ha)	80,51	82,49	77,75
Variação no regime	+11,7% (76,08 → 84,96)	–6,9% (85,26 → 79,41)	+7,5% (72,10 → 77,53)
Taxa média anual	+1,59% a.a.	–1,18% a.a.	+0,73% a.a.
Caracterização	Expansão em áreas mais favoráveis, melhorias varietais e operacionais; mecanização ainda parcial	Consolidação acelerada da colheita mecanizada; início dos efeitos sobre soca e estrutura do solo	Sistema plenamente mecanizado; maior variabilidade e ausência de recuperação do pico histórico

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de PAM-IBGE (2026).

Nota: Coeficiente da tendência linear período completo (2000–2024) foi negativo de 0,187 t/ha por ano, com R² da tendência em 0,16.

A decomposição da série em três regimes evidencia mudança na dinâmica produtiva paulista (Quadro 2). Entre 2000 e 2007, observa-se crescimento da produtividade, associado à expansão em áreas favoráveis e a ganhos tecnológicos. O período 2008–2013 marca a inflexão, coincidindo com a rápida difusão da colheita mecanizada induzida pelo novo arcabouço institucional, quando a produtividade interrompe o crescimento e inicia trajetória descendente. A partir de 2014, consolida-se um regime de maior variabilidade e estabilização em patamar inferior ao máximo histórico. A redução de 3,43 t/ha entre os regimes inicial e final, somada à tendência negativa de longo prazo, indica que os ganhos ambientais e operacionais foram acompanhados por restrições agrônômicas que passaram a condicionar a produtividade.

Do ponto de vista institucional, essa inflexão converge com a transformação do sistema de colheita. A Lei nº 11.241/2002 elevou a previsibilidade regulatória e induziu a reorganização tecnológica, acelerando a mecanização na década seguinte. Entre 2007 e 2013, a participação da colheita mecanizada em São Paulo aumentou de 46,6% para 83,7% (Tabela 1, seção 3.2, anterior), período em que a produtividade agregada passou a apresentar deterioração relativa (Castro; Gilio; Machado, 2022). Evidências de sensoriamento remoto reforçam essa transição rápida para a colheita “verde” (Aguiar et al., 2011).

A literatura agrônômica aponta mecanismos consistentes para esse comportamento. O tráfego intensivo de máquinas aumenta a compactação, reduz porosidade e infiltração, restringe o desenvolvimento radicular e compromete a produtividade e a longevidade do canavial, tornando o “efeito solo” variável crítica em sistemas mecanizados (Esteban et al., 2019). Além disso, a colheita sem queima altera o balanço de resíduos, com a palha passando a interagir com a brotação e ampliando *trade-offs* de manejo (Franco et al., 2013).

Assim, São Paulo não sustentou o padrão de ganhos observado nos anos 2000: após o pico em 2010, verifica-se queda, seguida de recuperação parcial e estabilização em nível

inferior, com tendência levemente negativa (Gráfico 1; Quadro 2). Essa inflexão coincide com a consolidação do regime mecanizado, que redefiniu os determinantes agrônômicos da produtividade e a dinâmica dos resíduos. A colheita sem queima ampliou a disponibilidade de palha e reforçou o papel do bagaço como ativo energético, intensificando disputas pelo uso da biomassa. Nesse contexto, a seção seguinte analisa a formação de novos mercados para esses resíduos, especialmente na cogeração e em rotas avançadas de biocombustíveis.

3.4. Resíduos agrícolas e agroindustriais no pós-queima: novos mercados de biomassa e a bioeletricidade

A eliminação das queimadas e a consolidação da colheita mecanizada redefiniram a economia dos resíduos da cana ao converter fluxos antes dissipados em ativos energéticos e industriais. A palha passou a permanecer no campo, enquanto o bagaço teve sua disponibilidade ampliada e sua qualidade energética elevada pela redução de impurezas e maior eficiência operacional, criando novos mercados de biomassa e competição entre rotas tecnológicas (Macedo; Seabra; Silva, 2008; Dias et al., 2012; Leal et al., 2013).

No caso da palha, sua permanência passou a desempenhar função agrônômica essencial, contribuindo para conservação da umidade, ciclagem de nutrientes, controle da erosão e mitigação da compactação. Contudo, sua remoção parcial economicamente viável transformou esse resíduo em nova atividade produtiva, condicionada por custos de coleta, enfardamento, transporte e armazenamento, além de restrições associadas à sustentabilidade do sistema (Cerri et al., 2013; Carvalho et al., 2017).

Diferentemente do bagaço, gerado no processo industrial e com custo de oportunidade próximo de zero, a palha depende de decisões descentralizadas e envolve custos de transação e problemas de coordenação típicos das cadeias de biomassa (Khanna; Zilberman, 2017; Jonker et al., 2015). As diferenças técnicas entre ambos são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Comparação técnica e econômica entre bagaço e palha de cana-de-açúcar.

Característica	Bagaço	Palha
Origem	Resíduo industrial da moagem	Resíduo agrícola da colheita mecanizada
Disponibilidade	Gerado na usina, proporcional à moagem; fluxo relativamente “limpo”.	Passa a existir economicamente após o fim das queimadas, permanece no campo e depende de coleta/remoção
Custo de obtenção	Não possui custo direto de aquisição, pois encentra-se no processo produtivo industrial.	Possui custo de coleta, enfardamento, transporte e armazenamento.
Umidade	45–55%	10–20% (enfardada), a granel a umidade pode ser maior.
Impurezas minerais	Baixas	Elevadas
Composição lignocelulósica	Celulose (≈40–45%) Hemicelulose (≈25–30%) Lignina (≈20–25%)	Celulose (≈35–40%) Hemicelulose (≈25–30%) Lignina (≈20–25%)

Uso principal atual	Cogeração (vapor + eletricidade) é o “uso-âncora”; também pode alimentar 2G	Cogeração adicional (substitui/ complementa bagaço); também pode alimentar 2G (dependendo do desenho da biorrefinaria).
Potencial para etanol 2G	Alto	Alto
Período de produção	Safra de cana-de-açúcar com possibilidade de estocagem	Safra de cana-de-açúcar com possibilidade de estocagem
Implicações agrônômicas	Não se aplica	Remoção excessiva reduz carbono do solo e aumenta compactação
Custo de obtenção	Praticamente nulo	Elevado (recolhimento e logística)
Sazonalidade da oferta	Alta	Alta

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Dias *et al.* (2012); Leal *et al.* (2013); Carvalho *et al.* (2017); Bonomi *et al.* (2015); Ripoli; Molina; Ripoli (2003); Seabra *et al.* (2010); Cardoso *et al.* (2013) e Losordo *et al.* (2016).

A viabilização do etanol de segunda geração (E2G) ampliou a relevância econômica dos resíduos ao permitir maior produção de etanol sem expansão de área. A conversão integrada de bagaço e palha eleva a produtividade energética por hectare e transforma o sistema canavieiro em uma plataforma de biorrefinaria (Dias et al., 2012; Leal et al., 2013; Bonomi et al., 2015). Contudo, essa rota introduz um conflito de alocação da biomassa entre cogeração, etanol celulósico e outros bioprodutos.

Esse conflito manifesta-se sobretudo no bagaço, cuja cogeração consolidou-se como fonte relevante de receita desde os anos 2000. A inserção ativa da bioeletricidade no mercado elétrico, a partir de 2012, decorreu de três fatores: (i) a difusão de caldeiras de alta pressão e turbinas mais eficientes, que elevaram o excedente exportável por tonelada de cana (Waldheim; Monis; Leal, 2008; Macedo; Seabra; Silva, 2008); (ii) a contratação em leilões regulados, que viabilizou sua inserção no Sistema Interligado Nacional (ANEEL, 2008; EPE, 2010; ONS, 2020); e (iii) a mecanização da colheita e o fim das queimadas, que ampliaram a disponibilidade de biomassa residual (Goldemberg; Coelho; Guardabassi, 2018; Leal et al., 2013).

Em termos nacionais, a bioeletricidade de biomassa representou 16,9% da geração elétrica em 2023 (EPE, 2024), com produção de cerca de 28,1 mil GWh, dos quais aproximadamente 44,2% provenientes de São Paulo, evidenciando sua centralidade nesse mercado. Apesar do crescimento anual, a geração a partir do bagaço permanece condicionada ao ciclo agrícola. Dados da UNICA (Tabela 2) mostram que, em São Paulo, a produção passou de 9,87 TWh na safra 2013/14 para 12,14 TWh em 2017/18, estabilizando-se entre 10 e 11,7 TWh. A distribuição mensal revela forte concentração entre maio e outubro (1,3–1,7 milhão de MWh) e queda para níveis próximos de zero na entressafra, reduzindo o fator de capacidade e limitando contratos firmes de longo prazo, em um descompasso entre a lógica agrícola e as exigências do sistema elétrico (Khatiwada et al., 2016; EPE, 2024).

Tabela 2 – Geração interna e externa anual de bioeletricidade a partir do bagaço em usinas do estado de São Paulo, safra de 2013/2014 a 2025/2026.

Safra	Geração total (TWh)	Índice de Variação (%)
-------	---------------------	------------------------

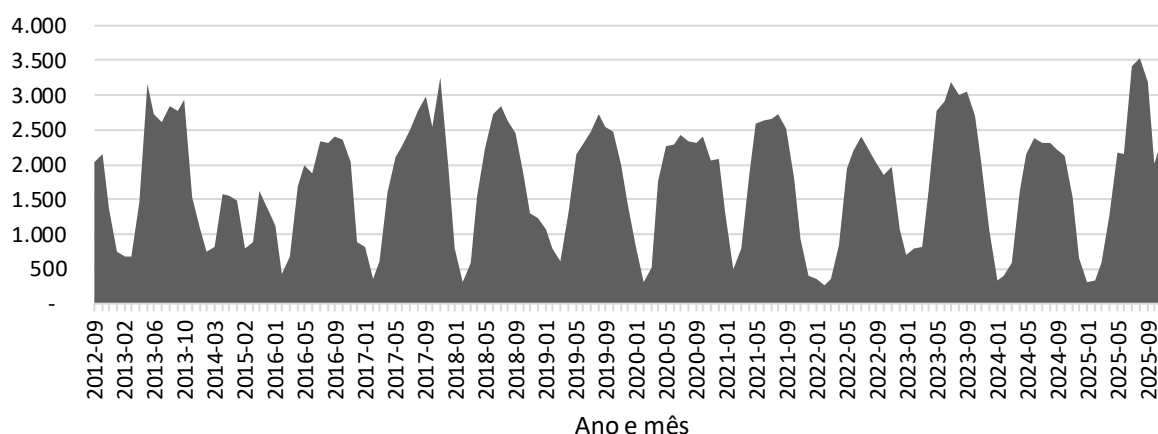
2013/2014	9,87	—
2014/2015	11,02	+11,6%
2015/2016	11,18	+1,5%
2016/2017	11,54	+3,2%
2017/2018	12,14	+5,2%
2018/2019	11,71	-3,5%
2019/2020	11,51	-1,7%
2020/2021	11,21	-2,6%
2021/2022	10,07	-10,2%
2022/2023	9,71	-3,6%
2023/2024	11,23	+15,7%
2024/2025	10,93	-2,7%
2025/2026*	10,38	-5,0%

Fonte: UNICA Data (2026). Nota: *valor parcial conforme painel da UNICA Data (2026).

A estabilização da geração anual de bioeletricidade após a safra 2017/2018 (Tabela 2) ocorre em paralelo à desaceleração dos ganhos de produtividade agrícola, indicando que a expansão do excedente energético passou a depender menos de ganhos de eficiência industrial e mais da disponibilidade de biomassa por hectare.

Essa restrição também se reflete na operação mensal das usinas. Dados da CCEE evidenciam forte sazonalidade da geração térmica a biomassa, com elevação entre abril e outubro, período de moagem e maior oferta de bagaço e palha, e retração entre novembro e março, na entressafra. Assim, a limitação da bioeletricidade não se expressa apenas como um teto anual, mas como elevada concentração temporal da geração, diretamente condicionada ao ciclo agroindustrial da cana (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Exportação de bioeletricidade pelas usinas do estado de SP, de 09/2012 a 12/2025, Megawatt médio



Fonte: Elaborado pelos autores a partir dos dados da CCEE (2026).

Notas: (i) Os dados de geração mensal foram obtidos a partir do painel de dados da CCEE e estruturados em série temporal própria para análise da sazonalidade da bioeletricidade. (ii) A disponibilidade de séries consistentes de bioeletricidade a partir de aproximadamente 2012 não constitui uma limitação estatística, mas o resultado da convergência entre transformações tecnológicas e institucionais no setor sucroenergético.

Nota-se no Gráfico 2, que a série mensal de geração térmica a biomassa em operação comercial no estado de São Paulo confirma a sazonalidade da bioeletricidade sucroenergética. Ao longo de todo o período 2012–2025¹, observa-se um padrão recorrente de expansão da geração entre abril e outubro (fase na qual coincidente com a safra e com a maior disponibilidade de bagaço e palha) e retração sistemática entre novembro e março, durante a entressafra. Nos meses centrais do ciclo produtivo, a geração frequentemente supera 2.500 MW médios, alcançando valores superiores a 3.000 MW médios em diversos anos, como em agosto de 2025 (3.532 MW médios), julho de 2025 (3.417 MW médios), julho de 2023 (3.192 MW médios) e setembro de 2017 (2.974 MW médios). Em contraste, nos meses de menor disponibilidade de biomassa, os níveis de geração caem de forma acentuada, atingindo patamares inferiores a 800 MW médios em vários momentos da série, com mínimos próximos a 300 MW médios, como em fevereiro de 2018 (309 MW médios), fevereiro de 2020 (301 MW médios), janeiro de 2024 (328 MW médios) e janeiro de 2025 (319 MW médios).

Esse diferencial recorrente entre safra e entressafra implica uma amplitude sazonal frequentemente superior a 2.000 MW médios, evidenciando que, embora tecnicamente despachável, a bioeletricidade permanece condicionada à dinâmica de suprimento do setor agroindustrial. No recorte mais recente da série, dezembro de 2025 registrou geração de 1.412 MW médios, valor substancialmente inferior aos picos observados nos meses de safra do mesmo ano, que ultrapassaram 3.000 MW médios. Esse comportamento pode confirmar o papel da biomassa como fonte complementar ao SIN, com contribuição mais intensa justamente no período seco do subsistema Sudeste/Centro-Oeste, quando a disponibilidade hídrica é mais restrita e a geração hidrelétrica tende a se reduzir. Essa evidência empírica permite destacar três implicações centrais para a transição tecnológica do setor:

1. A mecanização da colheita e o manejo da palha podem ampliar o potencial de regularização temporal da oferta energética, ao possibilitar estocagem e utilização da biomassa na entressafra, reduzindo a volatilidade anual da cogeração.
2. A bioeletricidade sucroenergética apresenta elevada complementaridade com a matriz hidrelétrica, contribuindo para a segurança energética justamente no período de maior estresse do sistema.
3. A persistência da forte sazonalidade indica que a principal restrição à expansão da geração fora do período de moagem não é apenas tecnológica, mas também logística e institucional, associada à capacidade de armazenamento, à estrutura contratual do setor elétrico e aos

¹ A série inicia-se em setembro de 2012, pois foi início da divulgação dos dados pela CCEE.

incentivos econômicos para a operação contínua com outros tipos de matérias-primas, por exemplo: utilização de milho de 2^a safra.

Nesse contexto, a decisão sobre o uso do bagaço e da palha deixa de ser determinada apenas pela disponibilidade física e passa a depender da estrutura de preços, dos contratos energéticos, da capacidade tecnológica das usinas e das alternativas de matérias-primas para produção de etanol. A eliminação das queimadas e a consolidação da colheita mecanizada devem ser interpretadas não apenas como mudanças agronômicas, mas como transformações que criam as bases materiais para a transição de uma bioenergia rigidamente sazonal para um modelo com maior capacidade de modulação temporal da oferta elétrica, condição essencial para ampliar a contribuição da biomassa à segurança energética e à descarbonização da matriz.

Assim, a mecanização ampliou o potencial de geração de valor dos resíduos, mas manteve a dependência do ciclo agrícola da cana como determinante da oferta de bioenergia e biomassa. A bioeletricidade deixou de ser marginal e passou a compor parcela relevante da matriz elétrica, porém com caráter complementar e sazonal; a palha emergiu como novo ativo energético e industrial, mas sua utilização envolve custos e *trade-offs* agronômicos.

4. Discussões

4.1. Maturidade tecnológica e a mecanização

Os resultados indicam que o setor sucroenergético paulista atingiu elevado grau de maturidade tecnológica, caracterizado pela consolidação da colheita mecanizada, eliminação da queima e internalização da bioeletricidade no sistema produtivo. Essa transição configura mudança de regime tecnológico, na qual a competitividade deixa de depender do trabalho manual e passa a estar associada à eficiência agronômica e à gestão da biomassa residual.

Entretanto, essa maturidade não se traduz em crescimento da produtividade agrícola nem da produção de etanol. Em 2025, a produção foi de 11,8 milhões de m³, inferior aos 13,7 milhões de m³ de 2017 (ANP, 2026). A estagnação pós-mecanização sugere que os ganhos ambientais e operacionais foram acompanhados por novas restrições agronômicas, especialmente compactação do solo e alterações na longevidade do canavial. Assim, a mecanização desloca o núcleo das restrições do plano trabalhista para o agrônomo, redefinindo desafios para produtividade, produção de etanol e bioeletricidade.

Observa-se ainda dissociação entre o balanço energético e o valor econômico da biomassa. Embora a cana seja composta, em termos energéticos, por aproximadamente um terço de caldo, um terço de bagaço e um terço de palha, o valor econômico permanece concentrado no açúcar e no etanol. O bagaço, apesar de seu elevado valor energético, é

majoritariamente internalizado no processo industrial e apenas parcialmente monetizado via bioeletricidade ou venda como fibra. A palha apresenta reconhecimento econômico ainda mais limitado, apesar de sua relevância agrônômica e energética, contribuindo para que os ganhos ambientais do fim das queimadas não se traduzam proporcionalmente em ganhos econômicos.

Adicionalmente, com a queda da produtividade, a bioeletricidade deixou de ser vetor principal de receita e passou a desempenhar função de suporte ao processo industrial, orientado pela maximização do etanol. A eficiência energética torna-se, assim, sistêmica e não apenas elétrica, priorizando o uso térmico do bagaço no processo produtivo em detrimento de sua conversão exclusiva em eletricidade exportável.

4.2. Produtividade agrícola como variável limitante da bioenergia

A desaceleração dos ganhos de produtividade implica que a expansão do etanol e da bioeletricidade passa a depender não apenas da eficiência industrial, mas também da disponibilidade de biomassa por hectare, evidenciando que o desempenho energético do setor é condicionado por variáveis físicas. Essa relação reforça a natureza sistêmica da agroindústria canavieira: a bioeletricidade não constitui um segmento autônomo, mas uma função da produtividade agrícola e do manejo sustentável do solo, enquanto a produção de etanol permanece diretamente dependente da produtividade da cana-de-açúcar.

Nesse contexto, a estagnação da produtividade deixa de ser apenas um problema agrônômico e passa a representar um limite estrutural à expansão da bioenergia, ao restringir simultaneamente a oferta de matéria-prima para etanol, bagaço para cogeração e palha para novas rotas tecnológicas. Isso reforça a necessidade de inovações agrônômicas e de novos arranjos produtivos que ampliem o uso dos ativos industriais ao longo do ano. Destaca-se, nesse sentido, a integração com o etanol de milho na entressafra, que permite aproveitar o excedente energético do bagaço, elevar a eficiência global e reduzir a ociosidade sem expansão de área.

Assim, a sustentabilidade da expansão energética depende de inovações agrônômicas, novos padrões de manejo da palha, formação de estoques de biomassa para geração na entressafra e da incorporação de outras matérias-primas, como o milho de segunda safra, para mitigar a sazonalidade do setor.

4.3. Sazonalidade da bioeletricidade e suas implicações econômicas

A análise da geração mensal evidencia forte concentração da bioeletricidade no período de safra, resultando em elevada ociosidade das unidades na entressafra. Essa rigidez temporal afeta diretamente a formação de preços e a inserção competitiva no mercado elétrico.

A sazonalidade da oferta reduz o valor econômico da energia ao limitar a celebração de contratos firmes de longo prazo com distribuidoras e comercializadoras. Esse aspecto é particularmente relevante em negociações com empresas como a CPFL Energia, nas quais a intermitência dificulta condições contratuais mais favoráveis. A baixa previsibilidade ao longo do ano contribui, assim, para preços relativamente reduzidos, mesmo diante da crescente demanda por fontes renováveis associada às metas de descarbonização.

Evidências recentes indicam que a baixa remuneração, combinada à ausência de mecanismos de valorização da potência firme da biomassa, reduziu a atratividade da cogeração como negócio autônomo. Nesse contexto, a bioeletricidade apresenta elevado valor sistêmico, especialmente pela complementaridade com a geração hidrelétrica no período seco, mas baixo valor de mercado em condições normais, configurando um descompasso central para sua expansão.

Adicionalmente, as limitações técnicas e econômicas do armazenamento de bagaço indicam que estratégias mais eficientes envolvem seu uso imediato ou de curto prazo no processo produtivo, ou sua conversão em produtos de maior valor energético, como etanol lignocelulósico, biogás e biometano. Este último destaca-se como rota promissora, especialmente pela substituição do diesel no transporte e nas operações agrícolas.

Assim, a sazonalidade configura não apenas uma característica técnica, mas um fator determinante da rentabilidade do setor. A ampliação da geração na entressafra, via armazenamento, integração tecnológica ou uso de matérias-primas complementares, pode elevar o fator de capacidade, aumentar a previsibilidade da oferta e viabilizar contratos de maior valor econômico.

5. Considerações finais

O setor sucroenergético paulista passou por profunda transformação institucional e tecnológica nas últimas duas décadas. A eliminação das queimadas e a difusão da colheita mecanizada configuraram uma mudança de regime produtivo, com ganhos ambientais relevantes e modernização das operações agrícolas. Contudo, essa transição também reconfigurou o sistema ao introduzir novos condicionantes agronômicos, operacionais e energéticos que passaram a influenciar seu desempenho.

Apesar dos avanços, a produtividade agrícola não apresentou crescimento sustentado após a consolidação desse novo regime. Após o pico em meados de 2010, observou-se inflexão negativa e estabilização em patamar inferior, indicando limites associados ao sistema

mecanizado, sobretudo à compactação do solo, à redução da longevidade das soqueiras e às mudanças no manejo da palha.

Paralelamente, a eliminação das queimadas redefiniu a economia dos resíduos. A palha passou a exercer função simultaneamente agrônômica e energética, introduzindo trade-offs entre conservação do solo e uso energético, enquanto o bagaço consolidou-se como base da cogeração e viabilizou a inserção das usinas no mercado de bioeletricidade. Ainda assim, a oferta de bioeletricidade permanece fortemente condicionada ao ciclo agrícola, com elevada concentração na safra e retração na entressafra.

Nesse contexto, o setor ingressa em uma nova fronteira de desenvolvimento, na qual os desafios deslocam-se da mecanização para dois eixos centrais: (i) a recuperação da trajetória de crescimento da produtividade agrícola, condição para ampliar a produção de etanol, a disponibilidade de bagaço e o potencial energético da biomassa; e (ii) a redução da sazonalidade da oferta de bioenergia, atualmente limitante ao aproveitamento da infraestrutura e ao valor econômico da bioeletricidade.

A superação desses desafios requer avanços institucionais, tecnológicos e organizacionais, incluindo novos arranjos contratuais no mercado elétrico que valorizem a complementaridade da bioeletricidade com a geração hidrelétrica, estratégias de integração produtiva que ampliem a regularidade da oferta energética e novos arranjos industriais que reduzam a ociosidade na entressafra. Nesse sentido, a integração entre etanol de cana na safra e etanol de milho na entressafra surge como alternativa relevante para elevar o uso dos ativos, aumentar a eficiência energética e reduzir a volatilidade da oferta.

Por fim, a relevância estratégica da bioenergia tende a se ampliar diante das crescentes preocupações com segurança energética e volatilidade dos mercados de petróleo. Nesse contexto, o setor sucroenergético brasileiro mantém vantagens comparativas associadas à produtividade agrícola, disponibilidade de biomassa e maturidade tecnológica, permanecendo como um dos principais pilares para a expansão da bioenergia, embora condicionado a novos desafios estruturais relacionados à sustentabilidade agrônômica e à sazonalidade da produção.

Referências

AGUIAR, D. A. et al. Remote sensing images in support of environmental protocol: monitoring the sugarcane harvest in São Paulo State, Brazil. *Remote Sensing*, v. 3, n. 12, p. 2682–2703, 2011.

ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.

ANP. Painel dinâmica da produção de etanol: Estado de São Paulo. Brasil, 2026.

- BACCARIN, J. G. Efeitos ambientais, sociais e econômicos na cana-de-açúcar. *Pegada*, v. 20, n. 3, p. 141–173, 2019.
- BARRETO, E. A.; TERESO, M. J. A.; ABRAHÃO, R. F. Projeto de cabine para colheita de cana. *Ciência Rural*, v. 43, p. 823–830, 2013.
- BONOMI, A. et al. The virtual sugarcane biorefinery concept. In: *Virtual biorefinery*. Springer, 2015.
- BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana com auxílio mecânico. *Engenharia Agrícola*, v. 26, p. 300–308, 2006.
- CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry in São Paulo. *Land Use Policy*, v. 76, p. 264–274, 2018.
- CANÇADO, J. E. D. et al. Impact of sugarcane burning emissions. *Environmental Health Perspectives*, v. 114, n. 5, p. 725, 2006.
- CARDOSO, T. F. et al. Technical and economic assessment of trash recovery. *Scientia Agrícola*, v. 70, p. 353–360, 2013.
- CARDOSO, T. F. et al. Economic and environmental impacts of sugarcane systems. *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, v. 12, n. 1, p. 68–82, 2018.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Agronomic and environmental implications of straw removal. *GCB Bioenergy*, v. 9, n. 7, p. 1181–1195, 2017.
- CARVALHO, J. L. N.; BRAUNBECK, O. A.; CHAGAS, M. F. *Plantio direto de cana-de-açúcar*. Campinas: LNBR, 2012.
- CASE IH. *Sugarcane harvesters Austoft A8000 series*. [S.l.], 2009.
- CASTRO, N. R.; GILIO, L.; MACHADO, G. C. Impactos da mecanização na produtividade. *Rev. Econ. Sociol. Rural*, v. 60, 2022.
- CCEE. Geração de energia elétrica: painel interativo. 2026.
- CERRI, C. E. P. et al. Quantifying soil carbon stocks. *Scientia Agrícola*, v. 70, 2013.
- CNPEM. Pesquisa cria colhedora com ganho de produtividade. Campinas, 2014.
- COELHO JUNIOR, L. M. et al. Supply of bioelectricity from sugarcane bagasse. *Sustain. Environ. Res.*, 2024.
- CONAB. *Acompanhamento da safra 2025/26*. Brasília: CONAB, 2025.
- CONAB. *Série histórica da cana-de-açúcar*. Brasília: CONAB, 2026.
- CORTEZ, L. A. B. *Bioetanol de cana-de-açúcar*. São Paulo: Blucher, 2010.
- CORTEZ, L. A. B.; ROSILLO-CALLE, F. *The future role of biofuels in the new energy transition: Lessons and perspectives of biofuels in Brazil*. Editora Blucher, 2023.
- DIAS, M. et al. Use of VSB to assess biorefinery strategies. In: *Virtual biorefinery*. Cham: Springer, 2016.
- DIAS, M. O. S. et al. Integrated vs. stand-alone ethanol production. *Bioresour. Technol.*, v. 103, p. 152–161, 2012.
- DONKE, A. et al. Environmental and energy performance of ethanol production. *Resources*, 2017.
- EPE. *Analysis of current biofuels outlook*. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

EPE. *Plano decenal de energia*. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

ESTEBAN, D. A. A. et al. Risk assessment of soil compaction. *Soil Tillage Res.*, v. 244, 2024.

ESTEBAN, D. A. A. et al. Soil compaction and productivity. *Soil Tillage Res.*, v. 187, 2019.

FAPESP. Máquina versátil na colheita de cana. *Pesq. FAPESP*, n. 189, 2011.

FEAGRI. Colhedora reduz desperdício e preserva empregos. Campinas, 2007.

FORTES, C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Decomposition of residues. *Biomass Bioenergy*, v. 42, p. 189–198, 2012.

FRANCO, H. C. J. et al. Assessment of sugarcane trash. *Scientia Agricola*, v. 70, 2013.

FRANCO, H. C. J. et al. Nitrogen in sugarcane. *Field Crops Research*, v. 121, 2011.

FXMA. FX400 – Fluxo Máquinas Agrícolas. 2026.

GOIASMAQ. Colhedoras de cana A8000. [S.l.], 2014.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. Sustainability of ethanol production. In: *Renewable Energy*. Routledge, 2018.

GONÇALVES, F. O. et al. Strategies for fuel security in Brazil. *Biomass*, v. 3, p. 1–17, 2023.

HASSAN, Q. et al. Renewable energy transformations. *Renew. Energy Focus*, v. 48, 2024.

IBEKWE, K. I. et al. Energy security in global context. *Eng. Sci. Technol. J.*, v. 5, 2024.

IBGE. Pesquisa agrícola municipal. Rio de Janeiro: IBGE, 2025.

ICONTROL3. Colhedora A8800 multi-row. [S.l.], 2013.

JACTO. Colhedora Hover 500. 2026.

JACTO. Hover 500 [folheto técnico]. 2022.

JOHN DEERE. CH570 & CH670 – replacement parts guide. 2023.

JOHN DEERE. Colhedora CH670. 2026.

JONKER, J. G. G. et al. Outlook for ethanol production costs. *Appl. Energy*, v. 147, 2015.

JUNIOR, J. G. A. S. et al. Soil carbon and nitrogen responses. *BioEnergy Research*, v. 11, 2018.

JÚNNYOR, W. S. G. et al. Soil compaction in harvesting operations. *Scientia Agricola*, v. 76, 2019.

KARP, S. G. et al. Bioeconomy and biofuels. *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, v. 15, 2021.

KHANNA, M.; ZILBERMAN, D. *Handbook of bioenergy economics*. Springer, 2017.

KHATIWADA, D. et al. Optimizing ethanol and bioelectricity. *Renewable Energy*, v. 85, 2016.

KRUKOWSKI, A. et al. Agriculture in renewable energy production. *Energies*, v. 17, 2024.

LEAL, M. R. L. V. et al. Sugarcane straw availability. *Biomass Bioenergy*, v. 53, 2013.

LOSORDO, Z. et al. Second-generation ethanol production. *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, v. 10, p. 589–602, 2016.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. GHG emissions in ethanol production. *Biomass Bioenergy*, v. 32, p. 582–595, 2008.

MACRELLI, S.; GALBE, M.; WALLBERG, O. Ethanol profitability in integrated plants. *Biotechnol. Biofuels*, v. 7, p. 26, 2014.

- MAGALHÃES, A. M.; FERREIRA, M. D.; MORETTI, C. L. Avaliação de limpeza em tomates. *Engenharia Agrícola*, v. 29, p. 699–704, 2009.
- MANRIQUE, A. et al. Health effects of sugarcane burning. *Environmental Health Perspectives*, v. 133, 2025.
- MEIER, E. A.; THORBURN, P. J. Crop residue retention. *Front. Plant Sci.*, v. 7, 2016.
- MILANEZ, A. Y. et al. Produção de etanol com milho-safrinha. *Rev. BNDES*, n. 41, 2014.
- MIRANDA, E. E.; FONSECA, M. F. Sugarcane: food, energy, and environment. In: *Sugarcane biorefinery*. Academic Press, 2020.
- MOURA, A. C. M. Agricultura de precisão por sensoriamento remoto. Tese (Doutorado) – UFMG, 2022.
- NEGI, H. et al. Biomass availability and bioenergy potential. *Energies*, v. 16, 2023.
- OKUNO, F. M. et al. Straw recovery: baling and harvesting. *BioEnergy Research*, v. 12, p. 930–943, 2019.
- OLIVEIRA, L. S. B. L.; CRUZ, A. J. G. Techno-economic analysis of flex plants. *Bioresour. Technol. Rep.*, v. 24, 2023.
- ONS. *Planejamento da operação energética*. São Paulo: Artliber, 2020.
- PARAISO, M. L. S.; GOUVEIA, N. Health risks of sugarcane burning. *Rev. Bras. Epidemiol.*, v. 18, p. 691–701, 2015.
- PROJETO SUCRE. *Sugarcane renewable electricity*. Campinas: LNBR, 2020.
- REVISTA RPA NEWS. Novo conceito de colhedora de cana. 2023.
- RÍPOLI, T. C.; MOLINA JR., W. F.; RÍPOLI, M. L. C. Energy potential of sugarcane biomass. *Scientia Agrícola*, v. 57, p. 677–681, 2003.
- ROSSI NETO, J. et al. Planting spacing and yield. *BioEnergy Research*, v. 11, 2018.
- SÃO PAULO (Estado). Lei nº 11.241, de 19 set. 2002.
- SEABRA, J. E. A. et al. Life cycle assessment of sugarcane products. *Biofuels Bioprod. Biorefin.*, v. 5, p. 519–532, 2011.
- SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Power generation vs ethanol production. *Energy Policy*, v. 39, p. 421–428, 2011.
- SILVEIRA, H. C. S. et al. Emissions and genotoxicity. *Environmental Health*, v. 12, 2013.
- SUMIKAWA, V. I. O.; MEDEIROS, A. L. Technoeconomic evaluation of flex ethanol plant. *Chem. Eng. Technol.*, v. 44, p. 2147–2158, 2021.
- TORQUATO, S. A. Mecanização da colheita da cana. *Rev. Bras. Ciênc. Ambient.*, n. 29, 2013.
- UNICA. Base de dados de bioeletricidade. São Paulo: UNICA, 2026.
- UNICAMP. Colhedora de cana. *Jornal da Unicamp*, 2007.
- WALDHEIM, L.; MONIS, M.; LEAL, M. R. V. Biomass power generation. In: BRIDGWATER, A. V. *Progress in thermochemical biomass conversion*. Oxford: Blackwell, 2008.
- ZIERO, H. D. et al. Foresight for corn-to-ethanol mills. *J. Environ. Chem. Eng.*, v. 9, 2021.