

2024

Influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar na qualidade tecnológica e na geração de biomassa

Santos Júnior, Adalberto Alves dos

Universidade Estadual do Norte do Paraná

SANTOS JÚNIOR, Adalberto Alves dos. Influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar na qualidade tecnológica e na geração de biomassa. Orientadora: Flávia Debiagi. 2024. 50 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Campus Luiz Meneghel, Universidade Estadual do Norte do Paraná, Bandeirantes, 2024.

<https://repositorio.uenp.edu.br/handle/123456789/285>

Baixado de Repositório Institucional UENP



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE DO
PARANÁ**
CAMPUS LUIZ MENEGHEL
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

ADALBERTO ALVES DOS SANTOS JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DA IMPUREZA VEGETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
QUALIDADE TECNOLÓGICA E NA GERAÇÃO DE BIOMASSA**

BANDEIRANTES, PR, BRASIL
2024

ADALBERTO ALVES DOS SANTOS JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DA IMPUREZA VEGETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
QUALIDADE TECNOLÓGICA E NA GERAÇÃO DE BIOMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado em Agronomia, da Universidade
Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz
Meneghel.

Orientador(a): Prof. Dra. Flávia Debiagi
Coorientador(a): Prof. Dr. Silvestre Bellettini

BANDEIRANTES, PR, BRASIL
2024

**Catálogo na publicação elaborada pela Biblioteca Central do Campus Luiz Meneghel
da Universidade Estadual do Norte do Paraná.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

S2375i Santos Júnior, Adalberto Alves dos.
Influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar na qualidade
tecnológica e na geração de biomassa / Adalberto Alves dos Santos
Júnior. – 2024.
50 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Flávia Debiagi.
Coorientador: Prof. Dr. Silvestre Belletini.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do
Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Centro de Ciências Agrárias,
Programa de Pós-graduação em Agronomia, 2024.
Inclui bibliografia.

1. Biomassa - Dissertação. 2. Energia renovável - Dissertação. 3.
Subproduto da moagem - Dissertação. 4. Cultura açucareira (cana-de-
açúcar) - Dissertação. 5. Eficiência no uso de nutrientes. I. Debiagi, Flávia.
II. Universidade Estadual do Norte do Paraná. *Campus* Luiz Meneghel.
Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-graduação em Agronomia.
III. Título.

CDD: 621.042 (22.ed.)

Elaborada pelo Bibliotecário Elísio Custódio Brentan Junior (CRB-9 PR n.º 1955/O)

ADALBERTO ALVES DOS SANTOS JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DA IMPUREZA VEGETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
QUALIDADE TECNOLÓGICA E NA GERAÇÃO DE BIOMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Mestrado em Agronomia, da Universidade
Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz
Meneghel.

Aprovada em: __/__/____

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Flavia Debiagi

UENP

Prof. Dr. Oriel Tiago Kolln

UENP

Dr. Guilherme Souza Berton

RIDESA - UFPR

Profa. Dra. Flavia Debiagi
Orientadora
Universidade Estadual do Norte do Paraná,
Campus Luiz Meneghel

DEDICATÓRIA

A aquela pessoa que em especial, foi a grande responsável por toda esta trajetória percorrida ao longo da minha vida, que pude obter a conquista e o mérito. Hoje não se faz presente, mas deixo aqui o meu reconhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que me concedeu sabedoria e iluminou meus passos nesta jornada.

A família pelo companheirismo, apoio, paciência e principalmente pelo incentivo nesta fase e durante toda minha vida.

A Professora e orientadora Dra. Flavia Debiagi agradeço pelo incentivo, orientação e, sobretudo, pela confiança que me proporcionou, resultando em valiosos aprendizados.

Aos Professores Dr. Oriel Kolln e Dr. Silvestre Bellettini pela disposição, ensinamentos, colaboração e sugestões.

Ao Laboratório de Bioinformática da UENP-CLM que contribuiu significativamente com análise e geração dos dados estatísticos.

Ao Grupo Maringá – Usina Jacarezinho, pelo apoio incondicional e em especial ao Diretor Agroindustrial Condurme Aizzo e ao Gerente Agrícola José Ricardo Zanata, que contribuíram de forma significativa para a disponibilidade de recursos e realização da pós-graduação.

Aos amigos e companheiros de trabalho, que auxiliaram em compromissos profissionais e na realização da pesquisa à campo.

Enfim, a todos que colaboraram para a realização e finalização deste trabalho

SANTOS JÚNIOR, Adalberto Alves. **Influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar na qualidade tecnológica e na geração de biomassa.** 2024. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2024.

RESUMO

A busca por fontes alternativas e renováveis de energia tem impulsionado a investigação da capacidade energética de diferentes substratos, como os subprodutos da indústria de processamento de cana-de-açúcar, abundantemente gerados no Brasil. Anteriormente descartados, esses subprodutos agora são considerados matérias-primas promissoras na cogeração de energia elétrica, na produção de etanol de segunda geração e biogás. Assim, o objetivo deste trabalho foi de avaliar a influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar nos parâmetros de qualidade, bem como caracterizar o seu potencial de geração de biomassa visando a produção de energia. Os ensaios foram delineados tendo como base três tipos de tratamentos, cada um com sete repetições. Esses tratamentos incluíram variações nos níveis de impureza vegetal (mínima $\leq 6\%$, média 6,1 a 15% e máxima $\geq 16\%$) em três diferentes épocas de safra, especificamente nos meses de maio, agosto e outubro. Cada parcela experimental consistiu em faixas de colheita dentro do mesmo talhão, com um tratamento por faixa e variações sequenciais dos tratamentos. As amostragens e análises laboratoriais foram realizadas de acordo com as condições que reproduzem o processo produtivo de uma usina de cana-de-açúcar. Para cada tratamento e suas repetições foram determinados os resultados dos níveis de impureza vegetal e da qualidade tecnológica do caldo. As variações em relação ao tratamento padrão (T2) revelaram notáveis disparidades nos indicadores de açúcares, como ATR, Pol e pureza, bem como nos indicadores de geração de biomassa, como a fibra, com ambos os resultados demonstrando uma relação inversamente proporcional em suas amplitudes. Em média dos tratamentos nos diferentes períodos analisados, a cada 1% de impureza vegetal o ATR foi reduzido em 1,43 kg/t e a fibra aumentou 0,34% com destaque para o tratamento de impureza vegetal média e máxima (T2 e T3) no período de meio e final de safra, onde proporcionaram melhores níveis de produção de biomassa sem maiores prejuízos a produção de açúcar. A capacidade global de geração de biomassa, obtida pela média dos tratamentos ao longo dos três períodos analisados, registrou um aumento significativo de 34,98% em comparação com o tratamento padrão estabelecido.

Palavras-chave: Fibra; Subprodutos; Renovável; Bioenergia.

SANTOS JÚNIOR, Adalberto Alves. **Influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar na qualidade tecnológica e na geração de biomassa.** 2024. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, *Campus* Luiz Meneghel, Bandeirantes, 2024.

ABSTRACT

The search for alternative and renewable energy sources has driven the investigation of the energy capacity of different substrates, such as sugar cane processing industry by-products, abundantly generated in Brazil. Previously discarded, these byproducts are now considered promising raw materials in the cogeneration of electrical energy, in the production of second generation ethanol and biogas. Thus, the objective of this work was to evaluate the influence of sugarcane vegetable impurities on quality parameters, as well as to characterize its potential for generating biomass for energy production. The trials were designed based on three types of treatments, each with seven replications. These treatments included variations in vegetable impurity levels (minimum $\leq 6\%$, average 6.1 to 15% and maximum $\geq 16\%$) in three different harvest seasons, specifically in the months of May, August and October. Each experimental plot consisted of harvest strips within the same plot, with one treatment per strip and sequential treatments variations. Sampling and laboratory analyzes were carried out in accordance with conditions that reproduce the production process of a sugar cane factory. For each treatment and its repetitions, the results of vegetable impurity levels and the broth technological quality were determined. Variations in relation to the standard treatment (T2) revealed notable disparities in sugar indicators, such as ATR, Pol and purity, as well as in biomass generation indicators, such as fiber, with both results demonstrating an inversely proportional relation in their amplitudes. On average of the treatments in the different periods analyzed, for every 1% of vegetable impurity, the ATR was reduced by 1.43 kg/t and the fiber increased by 0.34%, with emphasis on the medium and maximum vegetable impurity treatment (T2 and T3) during the middle and end of the harvest season, which provided better levels of biomass production without major losses to sugar production. The global biomass generation capacity, obtained by averaging the treatments over the three periods analyzed, registered a significant increase of 34.98% compared to the established standard treatment.

Key-words: Fiber; Byproducts; Renewable; Bioenergy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma simplificado da produção de açúcar, etanol, energia e subprodutos da cana-de-açúcar.	12
Figura 2. Matriz energética brasileira e suas fontes.	17
Figura 3. Geração de bioeletricidade sucroenergética, 2012 a 2021 em GWh. Adaptado de União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia – UNICA, Bioeletricidade em números (2022).	18
Figura 4. Oferta mensal de energia elétrica considerando diferentes fontes de energéticas primárias.	19

LISTA DE FIGURAS - ARTIGO

Figura 1. Dados climatológicos mensais de precipitação pluvial (mm) e temperatura mínima e máxima (°C) para os anos de 2022 e 2023.	28
Figura 2. Sonda oblíqua (a) e Unidade de transporte (a e b)	31
Figura 3. Amostras de cana-de-açúcar coletadas para análise seguindo as configurações de trabalho da colhedora para determinação dos tratamentos	31
Figura 4. Estratificação e pesagem das amostras para determinação dos níveis de impureza vegetal.....	32
Figura 5. Desintegração e homogeneização da amostra (a); Pesagem da amostra (b); Prensagem da amostra para extração do caldo (c); Determinação do °brix (d); Filtragem do caldo (e); Determinação da Pol do caldo (f).....	33
Figura 6. Açúcar total recuperável – ATR(kg/t) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra	36
Figura 7. Níveis de ATR(kg/t) e impureza vegetal (baixa, média, alta) em diferentes períodos de safra – Curva de maturação	37
Figura 8. Percentual de fibra na cana-de-açúcar (fibra%) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra.	38
Figura 9. Concentração de sacarose aparente (Pol%) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra.	39
Figura 10. Pureza da cana-de-açúcar (%) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra.	40
Figura 11. Correlação entre as variáveis ATR(kg/t) e impureza vegetal (%).	42
Figura 12. Correlação entre as variáveis fibra (%) e impureza vegetal (%).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Indicadores da qualidade e valores recomendados para a cana-de-açúcar. 14

LISTA DE TABELAS - ARTIGO

Tabela 1. Níveis de impureza vegetal da cana-de-açúcar e as faixas esperadas (FE) (%). 29

Tabela 2. Configurações de trabalho na colheita da cana-de-açúcar para determinação da faixa de impureza vegetal. 30

Tabela 3. Resultados da análise de regressão linear entre as variáveis ATR(kg/t) e impureza vegetal (%) e fibra (%) e impureza vegetal (%) nos períodos de início, meio e final de safra. 43

Tabela 4. Resultados da obtenção de geração de biomassa (BIP%) considerando os resultados medios das variáveis fibra no bagaço (FIB%) e fibra da cana (FCA%) obtidos das análises laboratoriais referente ao período de avaliação dos ensaios..... 44

Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	9
2.2. O SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO	9
2.3. CARACTERÍSTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR	10
2.4. PROCESSO INDUSTRIAL	11
2.4.1. Fatores de qualidade na produção agroindustrial da cana-de-açúcar.....	13
2.4.2. Efeito da impureza vegetal na qualidade da matéria-prima.....	15
2.5. GERAÇÃO DE BIOMASSA	16
2.6. ENERGIA E BIOMASSA	17
REFERÊNCIAS	20
ARTIGO: INFLUÊNCIA DA IMPUREZA VEGETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA QUALIDADE TECNOLÓGICA E NA GERAÇÃO DE BIOMASSA	25
1. INTRODUÇÃO	26
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
2.1 Caracterização do experimento e delineamento experimental	27
2.2 Amostragem e análises laboratoriais	31
2.3 Determinação da geração de biomassa	34
2.4 Análise estatística	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4. CONCLUSÕES GERAIS	47
5. AGRADECIMENTOS	48
6. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na economia brasileira, posicionando-se como a terceira cultura de maior valor de produção na agricultura do país, conforme apontado pelo IBGE em 2020. Sua história remonta aos primórdios da colonização do Brasil, e ao longo dos anos, essa cultura estabeleceu-se como um dos principais produtos de exportação, desempenhando um papel crucial em ciclos de grande relevância econômica.

De acordo com os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2022), na safra 2021/2022, a área de cultivo de cana-de-açúcar atingiu 8,3 milhões de hectares, com uma produtividade de 70,3 toneladas por hectare, resultando em uma produção de 585,1 milhões de toneladas e um teor de açúcar (ATR) de 141,6 kg por tonelada. Esses números se traduziram em 35,05 milhões de toneladas de açúcar e 26,7 bilhões de litros de etanol. É relevante notar que, em comparação com a safra anterior, 2020/2021, a produção de cana-de-açúcar na safra atual registrou uma redução de 10,6%, conforme dados da CONAB em 2022.

Após a colheita, a cana-de-açúcar é submetida a diversas análises laboratoriais, as quais são utilizadas como parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar. Portanto, o pagamento aos fornecedores é alicerçado nos valores de ATR (açúcar total recuperável) e não apenas a quantidade de cana-de-açúcar (IBGE, 2022). Em um estado habitual de produção de uma usina, onde a finalidade é predominantemente a produção do açúcar e do álcool, espera-se da matéria prima para a produção a “cana-de-açúcar” que o seu caldo tenha a qualidade com maior concentração de sacarose aparente (Pol%) e pureza, acompanhado de menores concentrações de glicose e frutose (AR%). Tais índices devem resultar em maior rendimento de toneladas de açúcar extraído. (EMBRAPA, 2022).

É importante salientar que alguns fatores relacionados a composição da cana-de-açúcar podem afetar significativamente a recuperação do açúcar na fabricação e na qualidade final do produto, como os açúcares redutores, fibras, amido e compostos fenólicos. Tais fatores podem ser afetados de acordo com a idade do canavial, variedade da cana, variações do clima e solo. Em sua maioria, estes fatores podem ser controlados ou se oportuno podem ser potencializados ou reduzidos (LOPES, 2011).

Sendo o maior produtor mundial de açúcar e o segundo de etanol, as agroindústrias brasileiras de processamento de cana-de-açúcar tem se modernizado e acompanhado as novas tendências gerenciais de mercado. Com a definição de processos cada vez mais

direcionados para a obtenção de maior produção por hectare de cana-de-açúcar e a derivação de um maior volume de açúcar e álcool, a indústria começou a descartar, conseqüentemente, maiores quantidades resíduos agroindustriais, os quais passaram a ser conhecidos como subprodutos.

Esses subprodutos, até então praticamente descartados décadas atrás, tornaram-se matérias-primas potenciais para a cogeração de energia elétrica para a produção de etanol de segunda geração e a produção de biogás. O bagaço de cana é um destes, considerado como importante fonte no balanço energético com aproximadamente 28% da massa de cana-de-açúcar produzida, um dos resíduos agroindustriais mais abundantes no país. Durante um longo período esse resíduo foi incinerado nas plantações com o simples objetivo de reduzir o seu volume ocupado, entretanto, ele passou a ser utilizado no processo de cogeração nas caldeiras das indústrias sucroalcooleiras. Isso não só fez das usinas de açúcar e álcool autossuficientes, como também favoreceu a obtenção de uma nova fonte de receita com a venda do excedente de energia elétrica (GEBRIN et al., 2021).

Neste contexto, o setor vem protagonizando um novo segmento em crescente ascensão: o energético. Recentemente denominado como setor sucroenergético, vem se destacando não somente por seus produtos primários, mas pela capacidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável, através de uma produção limpa e renovável. A busca por fontes alternativas e renováveis de energia tem impulsionado a investigação da capacidade energética de diferentes substratos, como os subprodutos da indústria de processamento de cana-de-açúcar, abundantemente gerados no Brasil. A indústria sucroalcooleira busca conciliar as preocupações relativas ao meio ambiente e os efeitos indesejáveis da utilização dos combustíveis fósseis, ao produzir etanol a partir de fonte renovável (CONAB, 2020).

O setor sucroenergético brasileiro chama a atenção por se encaixar justamente nesses moldes, podendo se consolidar como fornecedor importante de grande fração da matriz energética do país, por meio da produção de energia elétrica limpa dentro de seu processo produtivo e do etanol, obtido atualmente como um combustível renovável de baixo custo energético e de baixa emissão de carbono. (SILVEIRA, 2019).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar nos parâmetros de qualidade, bem como, caracterizar o seu potencial de geração de biomassa, visando a produção de energia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

A cana-de-açúcar foi introduzida no Brasil, durante o início da colonização, sendo os primeiros exemplares vindos da Ilha da Madeira (Portugal), em 1515. Anos depois, em 1532, foi construído o primeiro engenho para processamento da cana, na capitania de São Vicente. Desde então, essa cultura faz parte da história do nosso país, destacando-se como um dos principais produtos agrícolas do Brasil, até os dias de hoje (BARBOSA, 2018).

Em 2022, o Brasil se destacou na produção de cana-de-açúcar, com uma área colhida abrangendo 9,8 milhões de hectares ficando atrás apenas da soja e do milho. A impressionante quantidade produzida atingiu 724 milhões de toneladas, resultando em um rendimento médio de 73,3 toneladas por hectare. O estado de São Paulo destacou-se como o principal produtor dessa cultura no cenário nacional (IBGE 2022).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2020), a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao seu potencial na produção de etanol e seus respectivos subprodutos. A agroindústria sucroalcooleira nacional, diferentemente do que ocorre nos demais países, opera em uma conjuntura positiva e sustentável. O segmento industrial brasileiro produz o bioetanol, que não afeta a camada de ozônio e é obtido a partir de fonte renovável.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de açúcar, com 22 % de toda a produção mundial e o segundo maior na produção de etanol, com 29 % da produção global. O complexo sucroenergético, açúcar e etanol, ocupa papel de destaque na pauta de exportação, e em 2020 o setor teve participação nacional de 9,9%, sendo o quarto setor mais representativo do país no produto interno bruto (PIB), representando quase 2% do valor total (NACHILUK, 2021).

2.2. O SETOR SUCROENERGÉTICO BRASILEIRO

No Brasil, o setor sucroenergético sempre foi um vetor de crescimento da economia, sendo uma das culturas mais antigas e que se espalha por todo o território nacional, apesar da predominância do cultivo no centro sul do país, a cana-de-açúcar também está presente em todos estados brasileiros.

As regiões tradicionais de plantio da cana são o Triângulo Mineiro, o norte do estado do Paraná, os estados de São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, e algumas regiões do

Nordeste, sendo São Paulo o maior produtor atualmente (CONAB, 2022). A produção de cana-de-açúcar na safra 2022/23 foi estimada em 677,6 milhões de toneladas, com um acréscimo de 10,9% da produção referente à safra anterior de 2021/22. Exclusivamente nesta safra estimou-se uma produção superior de açúcar (46,8 milhões de toneladas), representando um aumento de 27,4% comparado a safra anterior (2021/22). Da mesma forma, a produção de etanol também registrou um aumento de 5,5%, totalizando 1,46 bilhão de litros a mais do que na safra 2021/22. A estimativa de produção total para a safra 2022/23 é de 34,05 bilhões de litros. Nas últimas safras, as usinas, principalmente as localizadas no Centro-Sul, voltaram gradativamente a elevar seus investimentos em projetos ligados à melhoria no desempenho do setor (CONAB, 2022).

O setor sucroenergético passou por grandes mudanças na última década. A desregulação estatal ocorrida no setor sucroenergético e o aquecimento do mercado de etanol, açúcar e bioeletricidade atraiu diversas corporações nacionais e transnacionais altamente capitalizadas e financeirizadas (SANTOS, 2018). Tais mudanças, vem consolidando o setor através de fusões e aquisições ano após ano, com formação de grandes grupos para conseguir amparar operações e ganhar escala produtiva. Ainda assim, vemos um setor majoritariamente familiar, quando olhamos a sua totalidade. Contudo, tanto as empresas familiares quanto grandes grupos de usinas tem se modernizado e investido cada vez mais em tecnologia, tanto para a indústria, quanto para o campo.

O comportamento do mercado interno e externo fez com que o setor sucroenergético adotasse alternativas estratégicas de crescimento, provocando mudanças no cenário tais como ampliações da produção agrícola e industrial, fusões e incorporações dentre outras alternativas, para se alinharem aos interesses da organização e dos investidores do negócio (SOLIANI; ARGOUD, 2019). Tal movimento vem aumentando a pressão por resultados e rentabilidades que justifiquem os investimentos.

2.3. CARACTERÍSTICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma gramínea semiperene com metabolismo fotossintético C4 da família das Poaceae. Essa adaptação, permite que a cana-de-açúcar otimize a captura de dióxido de carbono (CO₂) em ambientes com elevadas temperaturas e baixa disponibilidade de água, resultando em uma notável taxa de crescimento (TAIZ *et al.*, 2017; ALOVISI *et al.*, 2018).

A cana-de-açúcar desenvolve-se em touceiras, com a parte aérea formada por colmos originados do desenvolvimento de perfilhos que brotam de gemas presentes nos propágulos. Os colmos e perfilhos são categorizados em primários, secundários e terciários, com base em sua origem. Em outras palavras, os perfilhos primários resultam da brotação das gemas presentes nos propágulos plantados, enquanto os secundários provêm das gemas que brotaram dos perfilhos primários. Os terciários, por sua vez, são formados pela brotação das gemas dos perfilhos secundários (BEAUCLAIR; SCARPARI, 2006).

O acúmulo de sacarose nos colmos ocorre, durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar, na fase de maturação. Esta fase pode ser definida como o momento em que a planta reduz significativamente seu crescimento vegetativo e passa a acumular maior quantidade de sacarose nos colmos. Os mecanismos fisiológicos que ocorrem na planta durante esta fase ainda não são completamente conhecidos. A determinação de quais são esses mecanismos e como eles operam para culminar na maior concentração de sacaroses no colmo é de grande interesse para oferecer ferramentas para a seleção e desenvolvimento de variedades mais produtivas (WATT *et al.*, 2014).

O ciclo de cultivo da cultura pode ser de 12 meses (cana de ano) e 18 meses (cana de ano e meio) em cana-planta. Após o primeiro corte, o ciclo passa a ser de 12 meses, e a partir do primeiro corte passa a ser denominada de cana-soca. Fatores como a precipitação pluviométrica, umidade relativa e horas de luz são condicionantes climáticos importantes e possuem efeito no desenvolvimento, maturação e produtividade da cana-de-açúcar. (VAZ *et al.*, 2017).

2.4. PROCESSO INDUSTRIAL

Após realizada a colheita, a cana-de-açúcar é transportada, lavada para retirada de material particulado e moída para extração do caldo (Figura 1). Como subproduto dessa etapa é gerado o bagaço, também conhecido como biomassa, equivalente a cerca de 30% da massa inicial, é utilizado como combustível pela própria usina por meio de sua queima para geração de vapor, produzindo energia para o processamento da cana-de-açúcar e para algumas unidades a venda de energia. O caldo extraído é submetido a um tratamento físico-químico para retirada de impurezas, gerando também o subproduto torta de filtro. Em seguida, o caldo é encaminhado para o processo de evaporação, cozimento, centrifugação e secagem na produção de açúcar, gerando como subproduto o melaço de cana-de-açúcar, de elevado teor de sacarose (QUINTERO *et al.*, 2008; SALOMON, LORA, 2009).

O processo de fabricação do açúcar, segundo Machado (2012), é de forma simples um processo de concentração, uma vez que o açúcar é um produto produzido pela natureza e posteriormente é coletado pelas usinas e disponibilizado a partir várias modalidades, tais como mascavo, cristal, líquido, VHP (Very High Polarization) ou VVHP (Very Very High Polarization) cada uma com suas características e finalidades. Nas usinas, uma porcentagem do processamento da matéria prima normalmente é destinada para a produção de açúcar e outra para produzir álcool (o que pode ser chamado de “mistura” – a mistura depende principalmente do mercado e das necessidades dos produtores).

Já para a fabricação de álcool, após a fermentação do melaço, do mosto (mistura de caldo e melaço) ou do caldo de cana, por meio de microrganismos fermentadores capazes de romper as moléculas de glicose e produzir etanol e gás carbônico, o líquido resultante (vinho), composto por uma mistura de leveduras, açúcares não fermentáveis e etanol, é direcionado para as colunas de destilação para separação do etanol, em que, por sua vez, produz um resíduo denominado vinhaça ou vinhoto. O produto da destilação do vinho passa por retificação gerando o etanol hidratado, com grau alcoólico de 93,5%, o qual, por desidratação obtém-se o produto final: etanol anidro (DIAS *et al.*, 2015; QUINTERO *et al.*, 2008; SALOMON, LORA, 2009).

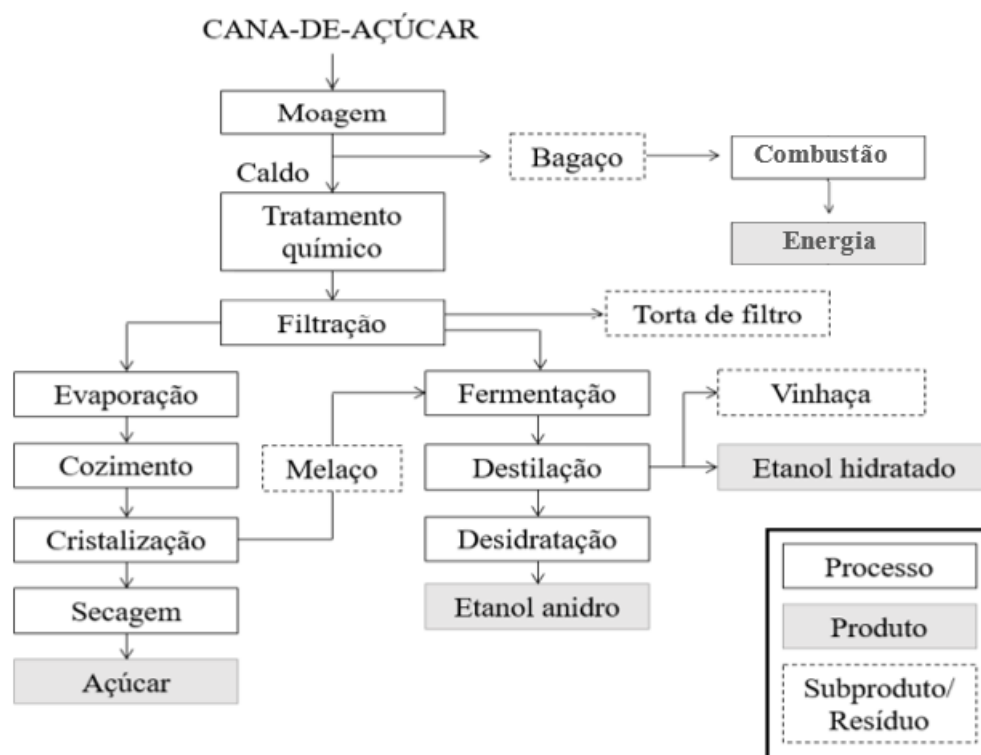


Figura 1. Fluxograma simplificado da produção de açúcar, etanol, energia e subprodutos da cana-de-açúcar. Adaptado de Takeda (2021).

2.4.1. Fatores de qualidade na produção agroindustrial da cana-de-açúcar

A qualidade do produto final proveniente da cana-de-açúcar é dependente da quantidade de impurezas presente no sistema de produção e colheita. À medida que a quantidade dessas impurezas (de origem vegetal ou mineral) aumenta, a qualidade da cana-de-açúcar pode ser comprometida. Os efeitos na qualidade se tornam mais evidentes, pois o aumento significativo de fibras reduz a eficiência da extração, resultando em uma diminuição na quantidade de sacarose e na pureza do caldo (GUEDES; PEREIRA, 2018).

Com o objetivo de alcançar produtos economicamente rentáveis, as indústrias do setor sucroalcooleiro buscam uma maior qualidade da matéria-prima de seu processo, uma vez que a partir desta são obtidos os demais subprodutos da cana-de-açúcar, dependendo diretamente de parâmetros tecnológicos como o teor de sólidos solúveis (°brix), teor de sacarose (%), pureza do caldo (%), fibras (%) e percentagem de açúcar bruto (%), e por meio destes é possível estimar o valor da tonelada da cana produzida e o seu potencial econômico (CORREIA *et al.*, 2014).

De maneira geral, a composição em termos percentuais da cana é composta de açúcares, fibras e água, cerca de 8 a 14% é fibra que contém celulose, hemicelulose e lignina, o caldo formado por água e sólidos solúveis também chamado de brix e os açúcares redutores totais compondo cerca de 84% a 92% (MATSUOKA, SANTOS e BORÉM, 2016).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2022) define que os principais fatores relacionados à qualidade da cana-de-açúcar são a Pol (sacarose aparente), pureza, ATR (açúcar total recuperável) na cana, teor de açúcares redutores, percentagem de fibra e tempo de queima e corte. A Tabela 1 apresenta os principais indicadores de qualidade da cana-de-açúcar que são empregados pela indústria sucroalcooleira.

Tabela 1. Indicadores da qualidade e valores recomendados para a cana-de-açúcar.

Indicadores	Valores Recomendados
Pol	>14
Pureza (pol/brix)	>85%
ATR (sacarose, glicose, frutose)	>15% maior possível
AR (glicose, frutose)	<0,8%
Fibra	11 a 13%
Tempo de queima/corte	< 35h para cana com corte manual
Terra na cana (minerais)	< 5kg/t de cana
Amido da cana	< 500ppm/brix
Palhiço na cana	< 5,0%

Fonte: Adaptado por Ripoli e Ripoli (2004).

Ainda segundo a EMBRAPA (2022), as cultivares de cana-de-açúcar podem apresentar diferentes características qualitativas no decorrer de uma safra (abril a novembro). Desta maneira, considerando-se as regiões Centro-Sul do Brasil, têm-se variedades precoces (condições de corte nos meses de abril a junho), variedades medias (aptas à industrialização nos meses de julho a agosto) e variedades tardias (condições de corte nos meses de setembro a novembro).

Henrique *et al.* (2012), conduziram uma avaliação da maturação e qualidade de diversas variedades de cana-de-açúcar em diferentes épocas de colheita em Tietê/SP e observaram que a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar foi afetada pela variedade durante as quatro épocas de colheita nas condições locais.

Os indicadores de qualidade da cana-de-açúcar desempenham um papel crítico em diversos aspectos da indústria sucroalcooleira, incluindo produção, eficiência, lucratividade e impacto ambiental. Durante a colheita, uma vez que são cortados na base, rente ao solo, despontados no último entrenó maduro, livres de impurezas oriundas da própria cana como plantas daninhas, terra, folhas, ponteiros, entre outras, a cana será entregue a unidade processadora. Quanto maior a quantidade de impurezas carregadas para a indústria, por exemplo, maior será o desgaste dos equipamentos e utilização de insumos visando reduzir a carga microbiana trazida junto com a matéria-prima (SILVEIRA, 2019).

2.4.2. Efeito da impureza vegetal na qualidade da matéria-prima

O processo de colheita da cana-de-açúcar é uma etapa fundamental na qualidade da matéria-prima que será entregue na indústria de processamento. Apesar das diversas vantagens advindas da colheita mecanizada, sobretudo quanto ao rendimento, há sempre necessidade de maximizar a qualidade do processo, reduzindo custos e melhorando a qualidade a sua execução.

A qualidade do produto final obtido a partir da cana-de-açúcar está intimamente ligada à quantidade de impurezas presentes na matéria-prima. Essas impurezas são inevitáveis e sua quantidade e natureza variam de acordo com o sistema de produção, a qualidade da colheita da matéria-prima, o manuseio, o transporte e as condições ambientais. Em sua maioria, essas impurezas têm origem tanto vegetal quanto mineral (SANTOS, 2021).

A problemática do desponte da cana-de-açúcar é constantemente abordada entre técnicos e pesquisadores, uma vez que a região apical do colmo deprecia a qualidade da cana, pois confere ao caldo menores teores de sacarose e maiores teores de compostos indesejáveis, como açúcares redutores, água, compostos fenólicos, ácidos orgânicos, aminoácidos e polissacarídeos, que interferem negativamente nos processos de clarificação do caldo e cristalização da sacarose durante a produção de açúcar.

Teodoro (2019), analisou a influência dos diferentes níveis de desponte da cana-de-açúcar a produtividade e a qualidade de sacarose durante a safra de 2017 e 2018. Segundo o autor, os parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar variaram de acordo com o desponte, sendo que cana-de-açúcar sem o desponte apresentou menores valores de Brix, Pol do caldo, ATR e consequentemente maiores valores de AR do caldo.

Em consonância com as indústrias sucroenergéticas do Brasil, Thai e Doherty (2011), ressaltando o interesse substancial dentro da indústria açucareira australiana em diversificação dos produtos como forma de reduzir sua exposição à flutuação dos preços do açúcar bruto e para aumentar sua viabilidade comercial buscam alternativas nos resíduos fibrosos para cogeração e produção de *biocommodities*, e neste sentido, realizou um estudo da composição do caldo da cana-de-açúcar sob três diferentes derivados de colheita, sendo cana queimada, cana com a metade da palha extraída e cana verde com total de palha. Os autores concluíram que os tratamentos integrados com resíduos fibrosos resultaram em teores menores de Brix e Pol, enquanto o tratamento da cana queimada apresentou maior pureza e teor de umidade.

2.5. GERAÇÃO DE BIOMASSA

Impulsionado pela legislação que proíbe as queimadas e consequentemente a redução da colheita manual, a mecanização da colheita de cana-de-açúcar no Brasil resultou em maiores volumes de palha tanto no campo como na matéria prima entregue as indústrias. De maneira geral, a composição em termos percentuais da cana é composta de açúcares, fibras e água (TAVARES; AMARAL, 2014).

Nas últimas décadas o setor sucroenergético passou por grandes transformações devido à proibição do uso prévio de fogo antes da colheita e ao advento da colheita mecanizada. Atualmente, a colheita mecanizada sem queima é adotada em cerca de 92,4% da área de cultivo no Brasil e 97,7% da área cultivada na região Centro-Sul (CONAB, 2022). Consequentemente, quantidades significativas de palha da cana-de-açúcar (8 a 20 t ha⁻¹) passaram a ser mantidas no campo, especialmente no Centro-Sul (CARVALHO *et al.*, 2017).

A fibra corresponde a parte insolúvel em água, sendo composto de celulose, hemicelulose, lignina, pentosanas, pectinas, proteínas, compostos fenólicos, dentre outros (TAVARES; AMARAL, 2014). O bagaço de cana é o material obtido após a etapa de extração do caldo nos processos agroindustriais, cerca de 28% da massa de cana-de-açúcar produzida se resume ao bagaço, o aumento de fibra proporcionará relativamente maiores quantidades de bagaço retiradas do processo (GEBRIN *et al.*, 2021).

Descartado por anos, a biomassa proveniente da moagem de cana-de-açúcar adquiriu relevância gerando energia para as usinas de açúcar e álcool por meio da sua combustão nas caldeiras, fornecendo ainda uma nova fonte de receita por meio da venda do excedente de energia. A grande versatilidade da cana, aliada à busca de fontes sustentáveis em substituição aos combustíveis fósseis, traz a necessidade do estudo e conhecimento das propriedades dessa biomassa, a fim de se obter uma maior eficiência do processo de combustão (DORI, 2022).

Com grande potencial de geração de bioeletricidade, o setor sucroenergético aproveita apenas 15% do potencial, se houvesse o aproveitamento pleno da biomassa presente nos canaviais, a bioeletricidade teria potencial técnico para chegar a 142 mil GWh, quase sete vezes o volume que ofertado em 2018, o que representaria atender mais de 30% do consumo de energia no sistema interligado nacional (UNICA, 2022).

2.6. ENERGIA E BIOMASSA

O crescimento populacional e o enriquecimento de países em desenvolvimento, nos faz analisarmos o cenário energético mundial, quando em pauta, é um dos principais itens de estudo referente à sustentabilidade, pois a demanda de energia primária é crescente e possui como integrantes majoritários matérias primas não renováveis. De encontro, o desafio de atendermos esta demanda e mitigar os impactos ambientais. No cenário brasileiro a matriz energética (Figura 2) é composta em sua maioria 60,5% de fontes hidráulica, 21,71% de fonte térmica, após de fonte eólica com 12,54%, posteriormente a solar com 4,15% e por último com 1,10% de fonte nuclear.

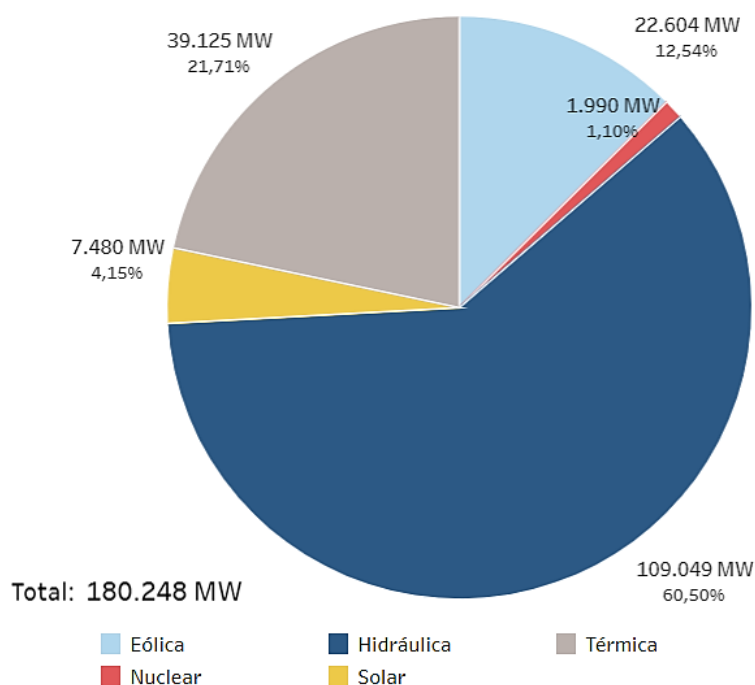


Figura 2. Matriz energética brasileira e suas fontes. Operador Nacional do Sistema elétrico – ONS (2022).

Dessa forma, o Brasil está aumentando a exploração de outras fontes e formas de produção de energia e a diversificação de sua matriz energética, em que a energia térmica é um substituto inicial dos recursos hidrelétricos do país. Dentre as matérias-primas utilizadas em usinas termelétricas, a biomassa se destaca como um produto renovável com alto potencial de geração de energia.

Como fonte para a produção de bioeletricidade, a biomassa de cana-de-açúcar segundo a União da Indústria de cana-de-açúcar (UNICA 2022), produziu 79,5% do total da produção de bioeletricidade no ano de 2021 que foi de 25,4 mil GWh, seguindo por licor

negro com 11,9% e pelo biogás com 4,5%. A geração de bioeletricidade proveniente do bagaço de cana na produção e comercialização de energia elétrica vem aumentando nos últimos anos (Figura 3), em que apenas no ano de 2021 houve um leve declínio na geração pela redução do volume de cana-de-açúcar processada na região Centro-Sul do país.

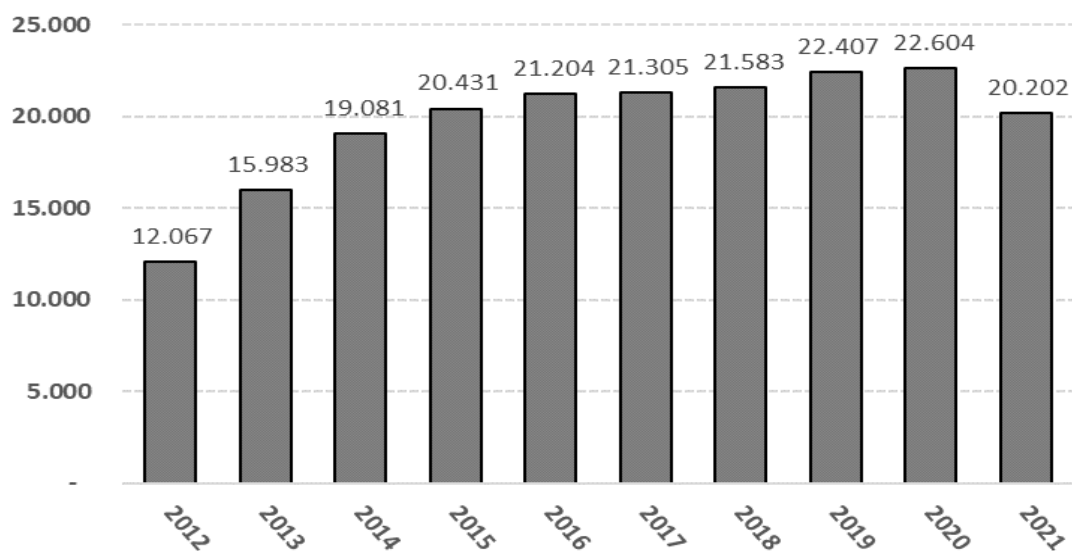


Figura 3. Geração de bioeletricidade sucroenergética, 2012 a 2021 em GWh. Adaptado de União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia – UNICA, Bioeletricidade em números (2022).

A participação majoritária das usinas de bioeletricidade a bagaço de cana-de-açúcar localizadas na região sudeste determina a sazonalidade típica da geração de energia a biomassa na matriz. Oriunda de processos de cogeração para a produção de açúcar e etanol, a geração elétrica a bagaço acompanha os períodos de safra e entressafra da cana-de-açúcar, sendo mais elevada na safra, com redução acentuada na entressafra. Esta bioeletricidade gerada através de biomassa demonstra-se uma estratégia à segurança energética do país pela sua complementariedade a matriz hídrica, uma vez que os períodos tipicamente mais secos são, também, os de maior produção de biomassa (Figura 4).

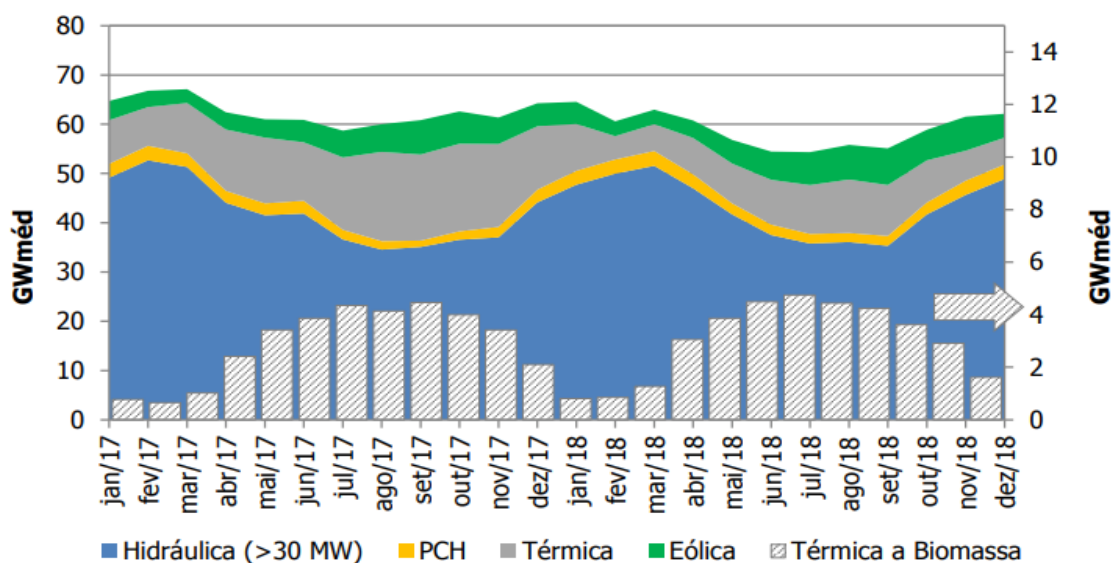


Figura 4. Oferta mensal de energia elétrica considerando diferentes fontes de energéticas primárias. Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019).

Trombeta (2017), em um estudo do potencial de biomassa da cana-de-açúcar no Centro-Sul e análise dos indicadores agroindustriais compreendeu que as biomassas de cana-de-açúcar desempenham um papel relevante no que se diz respeito à segurança energética da matriz brasileira e na geração de receitas ao setor canavieiro do país.

Ainda neste sentido, Rípoli, Molina Jr. e Rípoli (2000), também em um estudo do potencial de energia de biomassa de cana-de-açúcar no Brasil, concluiu que um país como o Brasil, que tem problemas energéticos, faça melhor uso desse recurso de biomassa, pois cerca de 12,5 milhões de pessoas podem ser atendidas por energia proveniente do bagaço de cana, o que equivale a mais do que a população de Portugal (10 milhões de pessoas).

A produtividade e disponibilidade da biomassa em território nacional apresenta uma vantagem em comparação a outros combustíveis para geração, especialmente os fósseis, pois, no caso da biomassa, praticamente todos os custos de geração são atrelados à moeda local e os reajustes contratuais usualmente à taxa de inflação. Em relação ao impacto ambiental, as termelétricas a biomassa apresentam baixa pegada de carbono, vantagem expressiva comparada às termelétricas que utilizam combustíveis fósseis, como carvão mineral ou diesel. Adicionalmente, em contraste com as fontes renováveis de geração em expansão no Brasil, notadamente a eólica e a fotovoltaica, caracterizadas por geração não controlável, as termelétricas, considerando disponibilidade de combustível, apresentam a vantagem de controle da geração e possibilidade de flexibilidade (EPE, 2019).

REFERÊNCIAS

ALOVISI, A. M. T., AGUIAR, G. C. R., ALOVISI, A. A., GOMES, C. F., TOKURA, L. K., LOURENTE, E. R. P., MAUAD, R. S. S. **Efeito residual da aplicação de silicato de cálcio nos atributos químicos do solo e na produtividade da cana-soca**. Agrarian, v.11, n.40, p.150-158. 2018.

BARBOSA, P. S. **Procedimentos para caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar**: estudos para otimização e padronização. 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. (Org.). **Plantio de cana-de-açúcar**: estado da arte. Piracicaba: Livrocere, 2006. v. 1, p. 80-91.

CARVALHO, J. L. N., NOGUEIROL, R. C., MENADRO, L. M. S., BORDONAL, R. O., BROGES, C. D., CANTARELLA, H., FRANCO, H. C. J. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. **Gcb Bioenergy**, v. 9, n. 7, p. 1181-1195, 2017.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).. **Acompanhamento da Safra Brasileira**: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, 2020. Brasília: Conab, 2020. 58p.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, Safra 2021/2022 – 4º Levantamento**, 2022. Brasília: Conab, 2022. 58p.

CORREIA, C. B. G., AZEVEDO, H. M., DANTAS NETO, J., CARVALHO, C. M., SILVA, L. L., FEITOSA, S. O. Cana-de-açúcar: parâmetros tecnológicos em função de diferentes lâminas de irrigação e adubação de cobertura. **REVISTA BRASILEIRA DE AGRICULTURA IRRIGADA-RBAI**, v. 8, n. 1, p. 26-37, 2014.

DIAS, M. O. S., MACIEL FILHO, R., MANTELATTO, P. E., CAVALETT, O., ROSSEL, C. E. V., BONOMI, A., LEAL, M. R. L. V. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35–51, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.004>.

DORI, Décio Júnior Lovison. Análise do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia. 2022.

EMBRAPA. **Agência de Informação Embrapa**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-cucar/arvore/CONTAG01_138_22122006154842.html Acesso em: 14 maio de 2022.

EMBRAPA. **Agência de Informação Embrapa**: Cana – Variedades, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas/variedades>. Acesso em: 14 dezembro de 2023.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Expansão da Geração – Termelétricas a biomassa no leilão de energia no Brasil**, 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br> >. Acesso em: 2 maio de 2022.

GEBRIN, V. M. G.; CARVALHO, A. A. de; DORI, D. J. L.; OLIVEIRA, R. P. A.; DALBÓ, V.; FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ. FAURGS, Gramado – RS, 2021.

GUEDES, Wesley Nascimento; PEREIRA, Fabíola Manhas Verbi. Classifying impurity ranges in raw sugarcane using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and sum fusion across a tuning parameter window. **Microchemical Journal**, Araraquara, v. 143, p. 331-336, dez. 2018.

HENRIQUE, C. M., CAMARGO, M. S., FOLTRAN, D. E., WYLER, P. Qualidade tecnológica e épocas de colheita de nove variedades de cana-de-açúcar para TIETÊ/SP. **Colloquium Agrariae**. ISSN: 1809-8215, 7(1), 01–08. 2012. Disponível em <https://journal.unoeste.br/index.php/ca/article/view/436>. Acesso em 1 outubro de 2023.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção Agropecuária**, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 10 maio de 2022.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Produção de cana-de-açúcar – Brasil, 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cana-de-acucar/br>. Acesso em: 02 dezembro de 2023.

LOPES, Cláudio Hartkopf. Tecnologia de produção de açúcar de cana. 2011.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da fabricação do açúcar**. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás, Inhumas, 2012.

MATSUOKA, Sizuo; SANTOS, F.; BORÉM, A. **Cana-de-açúcar: do plantio a colheita**. Viçosa, Editora UFV, 2016.

NACHILUK, K. Alta na Produção e Exportações de Açúcar Marcam a Safra 2020/21 de Cana. Publicado por: **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 16, n. 6, p. 1-5, 2021.

ONS. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Histórico da operação**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 14 maio de 2022.

QUINTERO, J. A., MONTOYA, M. I., SÁNCHEZ, O. J., GIRALDO, O. H., CARDONA, C. A. Fuel ethanol production from sugarcane and corn: comparative analysis for a Colombian case. **Energy**, v. 33, n. 3, p. 385-399, 2008.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques. 302p, 2004.

RÍPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; MOLINA JR, Walter Francisco; RÍPOLI, Marco Lorenzo Cunali. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 57, p. 677-681, 2000.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.001>>.

SANTOS, H. F.; Oligopolização e financeirização do setor sucroenergético brasileiro no século XXI. **Revista de Geografia**, v. 35, n.2, p.113-133, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/230494/29032>>. Acesso em 02 maio de 2022.

SANTOS, Lucas Janoni dos. **Uso de inteligência artificial para quantificar e classificar impurezas em cana-de-açúcar para fins industriais**. 2021.

SILVEIRA, Giovanni Módolo. **Curvas de maturação em cana energia**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2019.

SOLIANI, R. D.; ARGOUD, A. R. T. T.; A verticalização das operações logísticas de um grupo do setor sucroenergético. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção**, 2019. v.19 n. 2, p.597-616. Disponível em <<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/3306/1790>>. Acesso em 02 maio de 2022.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I. M., MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Porto Alegre: Artmed. 2017, p. 220.

TAVARES, SR de L.; AMARAL, Fernando Cezar Saraiva. Determinação do teor de fibra de cana-de-açúcar em diferentes biomas visando o processamento de resíduos para a produção de biocombustíveis sólidos e biomassa energética. In: Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: **CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA, 9., 2014**. São Paulo. Anais... Paraná: Porths Eventos, 2014.

TAKEDA, P. Y. **Manutenção da produção de metano em indústrias sucroalcooleiras, a partir da substituição de vinhaça por glicerol no período de entressafra de cana-de-açúcar**. 2021. 121f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

TEODORO, Priscila Gualberto. **Desponte na produtividade e qualidade de sacarose da cana-de-açúcar**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Norte do Paraná, 2019.

THAI, Caroline; DOHERTY, William. The composition of sugarcane juices derived from burnt cane and whole green cane crop. In: Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 2011. **Australian Society of Sugar Cane Technologists/Curran Associates, Inc.**, 2011. p. 368-376.

TROMBETA, Natália de Campos; CAIXETA, José Vicente. Potencial e Disponibilidade de Biomassa de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, p. 479-496, 2017.

ÚNICA, União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Bioeletricidade em Números. **Boletim de bioeletricidade do ano de 2021**. São Paulo, 2022. 7 p.

VAZ, T. A., THOMÉ, P., GROFF, A. M. Fatores e Técnicas do cultivo cana-de-açúcar e sua correlação com a Qualidade e a Produtividade. EEPA, 2017. **11º Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**. Universidade estadual do Paraná – UNESPAR – Paraná. 2017.

WATT, Derek A.; MCCORMICK, Alistair J.; CRAMER, Michael D. Source and sink physiology. **Sugarcane: physiology, biochemistry, and functional biology**, p. 483-520, 2014.

Capítulo 1

**INFLUÊNCIA DA IMPUREZA VEGETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA
QUALIDADE TECNOLÓGICA E NA GERAÇÃO DE BIOMASSA**

Artigo a ser submetido à Scientia Agrícola

[\(https://scientiaagricola.com.br/\)](https://scientiaagricola.com.br/)

ARTIGO: INFLUÊNCIA DA IMPUREZA VEGETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR NA QUALIDADE TECNOLÓGICA E NA GERAÇÃO DE BIOMASSA

RESUMO

A busca por fontes alternativas e renováveis de energia tem impulsionado a investigação da capacidade energética de diferentes substratos, como os subprodutos da indústria de processamento de cana-de-açúcar, abundantemente gerados no Brasil. O objetivo deste trabalho foi de avaliar a influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar nos parâmetros de qualidade, bem como caracterizar o seu potencial de geração de biomassa visando a produção de energia. Os ensaios foram delineados tendo como base três tipos de tratamentos, cada um com sete repetições. Esses tratamentos incluíram variações nos níveis de impureza vegetal (mínima $\leq 6\%$, média 6,1 a 15% e máxima $\geq 16\%$) em três diferentes épocas de safra, especificamente nos meses de maio, agosto e outubro. Cada parcela experimental consistiu em faixas de colheita dentro do mesmo talhão, com um tratamento por faixa e variações sequenciais dos tratamentos. As amostragens e análises laboratoriais foram realizadas de acordo com as condições que reproduzem o processo produtivo de uma usina de cana-de-açúcar. Para cada tratamento e suas repetições foram determinados os resultados dos níveis de impureza vegetal e da qualidade tecnológica do caldo. As variações em relação ao tratamento padrão (T2) revelaram disparidades nos indicadores de açúcares e na geração de biomassa, destacando uma relação inversamente proporcional entre eles. Isso evidencia a adaptabilidade do processo, permitindo ajustes na produção de biomassa conforme necessário. Constatou-se que em média, a cada 1% de impureza vegetal, o ATR foi reduzido em 1,43 kg/t, enquanto a fibra aumentou 0,34%. O tratamento de impureza vegetal média e máxima (T2 e T3) no meio e final de safra apresentaram uma maior eficiência na produção de biomassa sem maiores prejuízos a produção do açúcar. A capacidade global de geração de biomassa aumentou significativamente em 34,98% em relação ao tratamento padrão estabelecido.

Palavras-chave: Fibra; Subprodutos; Renovável; Bioenergia.

1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético tem ganhado destaque não apenas como o principal produtor de açúcar, mas também como o fornecedor da principal matéria-prima para a produção de etanol, além dos produtos secundários resultantes do processamento da cana-de-açúcar, como bagaço, torta de filtro e vinhaça. Após a colheita, a cana-de-açúcar é submetida a diversas análises laboratoriais para determinar parâmetros de qualidade. Em um estado habitual de produção de uma usina, onde se prioriza a produção de açúcar e álcool, espera-se que a matéria-prima tenha caldo de alta concentração de sacarose aparente (Pol%) e pureza, com baixas concentrações de glicose e frutose (AR%). Esses índices visam aumentar o rendimento de toneladas de açúcar extraído, resultando em maiores quantidades de resíduos agroindustriais, agora conhecidos como subprodutos (EMBRAPA, 2022).

Esses subprodutos, até então praticamente descartados décadas atrás, tornaram-se matérias-primas potenciais para a cogeração de energia elétrica para a produção de etanol de segunda geração e a produção de biogás. O bagaço de cana é um destes, considerado como importante fonte no balanço energético com aproximadamente 28% da massa de cana-de-açúcar produzida, um dos resíduos agroindustriais mais abundantes no país. Durante um longo período esse resíduo foi incinerado nas plantações com o simples objetivo de reduzir o seu volume ocupado, entretanto, ele passou a ser utilizado no processo de cogeração nas caldeiras das indústrias sucroalcooleiras. Isso não só fez das usinas de açúcar e álcool autossuficientes, como também favoreceu a obtenção de uma nova fonte de receita com a venda do excedente de energia elétrica (GEBRIN *et al.*, 2021).

Neste contexto, o setor vem protagonizando um novo segmento em crescente ascensão: o energético. Recentemente denominado como setor sucroenergético, vem se destacando não somente por seus produtos primários, mas pela capacidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável, através de uma produção limpa e renovável. A busca por

fontes alternativas e renováveis de energia tem impulsionado a investigação da capacidade energética de diferentes substratos, como os subprodutos da indústria de processamento de cana-de-açúcar, abundantemente gerados no Brasil. A indústria sucroalcooleira busca conciliar as preocupações relativas ao meio ambiente e os efeitos indesejáveis da utilização dos combustíveis fósseis, ao produzir etanol a partir de fonte renovável (CONAB, 2020).

O setor sucroenergético brasileiro chama a atenção por se encaixar justamente nesses moldes, podendo se consolidar como fornecedor importante de grande fração da matriz energética do país, por meio da produção de energia elétrica limpa dentro de seu processo produtivo e do etanol, obtido atualmente como um combustível renovável de baixo custo energético e de baixa emissão de carbono. (SILVEIRA, 2019).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da impureza vegetal da cana-de-açúcar nos parâmetros de qualidade, bem como, caracterizar o seu potencial de geração de biomassa, visando a produção de energia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do experimento e delineamento experimental

O experimento foi desenvolvido na Usina Jacarezinho unidade sucroenergética do Grupo Maringá, localizada na BR 153, km 09 no município de Jacarezinho, estado do Paraná, tendo como coordenadas latitude 23°05' S, longitude 49°56' W e altitude de 426m. Durante o período da safra 2022/2023 nos meses de abril a novembro com a colheita da cana-de-açúcar. As análises para determinação dos parâmetros de qualidade da cana-de-açúcar foram realizadas no laboratório próprio da usina, seguindo as normas previamente estabelecidas do manual de instruções do Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo (CONSECANA-SP, 2015).

Conforme ilustrado na Figura 1, as precipitações pluviárias no local do estudo em 2022 totalizaram 1.633mm, com resultados semelhantes para ano de 2023, atingindo 1.664mm. Ambos os anos apresentando variações ao longo dos meses. No ano em que ocorreu a colheita, no período de início de safra (maio), foram registrados 18mm; no meio da safra (agosto), 17mm; e no final da safra (outubro), 211mm.

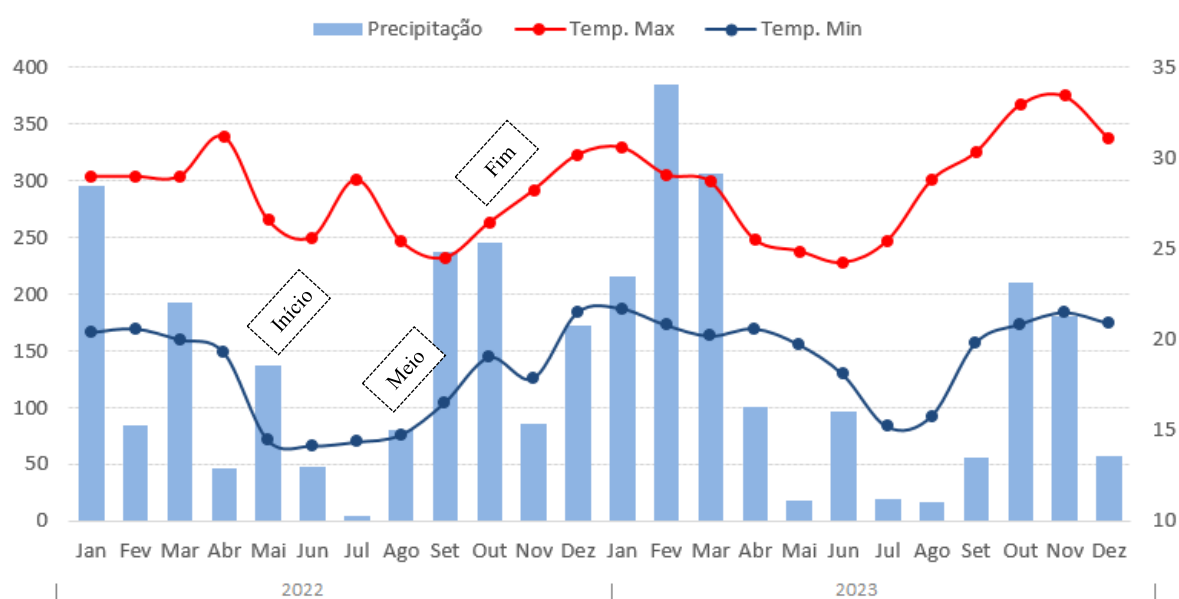


Figura 1. Dados climatológicos mensais de precipitação pluvial (mm) e temperatura mínima e máxima (°C) para os anos de 2022 e 2023. Fonte: Grupo Maringá, 2023.

A media anual de temperatura em 2022 foi de 22,7°C, com uma media máxima de 27,8°C em janeiro, o mês mais quente, e uma media mínima de 14,2°C em junho, tipicamente o mês mais frio. Em 2023, a temperatura media anual aumentou em relação ao ano anterior, atingindo 24,1°C, com uma media máxima de 28,7°C e uma media mínima de 19,6°C, sendo os meses de outubro e novembro apresentando as maiores medias (Figura 1).

A classe de solo predominante na região do estudo e utilizado para cultivo da cana-de-açúcar são os latossolos de subdivisão vermelho e vermelho-amarelo, caracterizados pelo avançado estágio de intemperização, profundos, em geral fortemente ácidos com baixa saturação por bases (EMBRAPA, 2018).

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC) com três tratamentos e sete repetições, sendo três níveis de impureza vegetal em três diferentes épocas de safra, ou seja, nos meses de maio, agosto e outubro (Tabela 1).

Dentro de um mesmo talhão, cada parcela experimental foi composta por faixas de colheita que abrangiam o preenchimento de dois transbordos para completar uma unidade de transporte a cada tratamento, seguindo sucessivamente das repetições. O experimento foi conduzido em ciclo de cana planta para todos os tratamentos.

Seguindo as condições que representam o processo produtivo de uma usina de cana-de-açúcar, o ponto amostral foi representado por uma unidade de transporte (Figura 2) conforme determinado por CONSECANA-SP (2015).

Tabela 1. Níveis de impureza vegetal da cana-de-açúcar e as faixas esperadas (FE) (%).

Tratamento	Descrição	FE
T1 – 1 2 3	Impureza vegetal mínima	≤ 6
T2 _a – 1 2 3	Impureza vegetal média	6,1 a 15
T3 – 1 2 3	Impureza vegetal máxima	≥ 16

^a Nível de impureza vegetal comumente aplicadas pelo Grupo Maringá – Usina Jacarezinho (tratamento controle).

Para todos os tratamentos foram empregados a mesma colhedora, com configurações de fábrica marca John Deere; modelo CH670; ano de fabricação 2021; motor John Deere 6090T PowerTech; potência do motor 380cv e rodado de esteiras.

Os tratamentos foram estratificados afim de se determinar os diferentes níveis de impureza vegetal da cana-de-açúcar e para isto no instante da colheita mecanizada através dos ajustes nas configurações de trabalho da colhedora (Tabela 2 e Figura 3) é que se definiu a eficiência de limpeza da cana-de-açúcar em relação a impureza vegetal.

Tabela 2. Configurações de trabalho na colheita da cana-de-açúcar para determinação da faixa de impureza vegetal.

ITEM DE CONTROLE	FAIXA DE IMPUREZA		
	Impureza vegetal mínima	Impureza vegetal média	Impureza vegetal máxima
Extrator primário (rpm)	930	600	Desligado
Rotação do motor (rpm)	2200	1900	1500
Velocidade (km/h)	2,5	2,5	3,0
Desponte	Sim	Não	Não

É importante ressaltar, que na condição em que se desejou obter impureza vegetal máxima, a cana-de-açúcar foi colhida integralmente, isto significa que o extrator primário foi desligado e não houve o desponte da parte apical onde permanecem o palmito e folhas verdes ativas.

Em uma avaliação temporal de safra, todos os tratamentos foram submetidos à colheita mecânica, sem a queima, empregando a mesma variedade de cana, a RB867515, e adotando o mesmo espaçamento de cultivo de 0,90m x 1,50m. Além das variáveis previamente analisadas, também foram considerados alguns critérios semelhantes para determinar a área amostral, relacionados ao desenvolvimento da cana-de-açúcar. Isso incluiu fatores como canavial de mesma idade, a classificação pedológica do solo de cultivo, o porte do canavial e a estágio de corte, todos eles referentes à área experimental em questão. Os talhões de cana destinados a pesquisa, apresentavam uma produtividade estimada de 120 TCH (toneladas de cana por hectare) para o período de início de safra, 110 TCH para o meio de safra e 100 TCH para o final de safra.

2.2 Amostragem e análises laboratoriais

Com o propósito de assemelhar-se as condições existentes do processo de colheita, de amostragem e de análises laboratoriais, os tratamentos seguiram a realidade da usina, ou seja, as amostragens foram feitas por sonda oblíqua (Figura 2a) em caminhões conforme padrão proposto pela CONSECANA-SP (2015).



Figura 2. Sonda oblíqua (a) e Unidade de transporte (a e b). Foto: Santos Júnior, 2023.

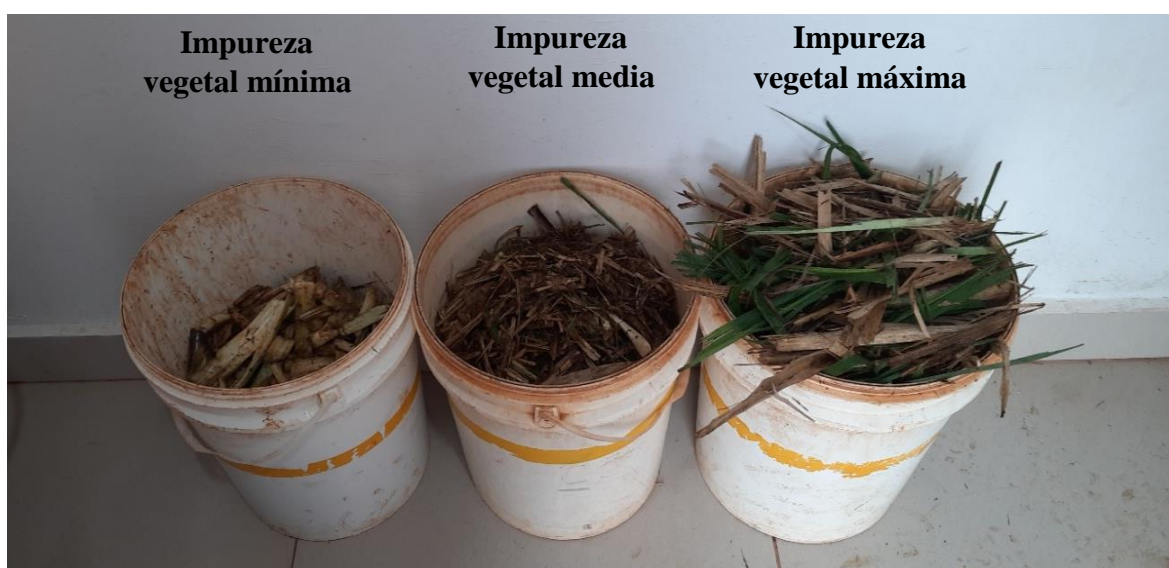


Figura 3. Amostras de cana-de-açúcar coletadas para análise seguindo as configurações de trabalho da colhedora para determinação dos tratamentos. Foto: Santos Júnior, 2023.

Duas coletas de amostras foram realizadas em cada unidade de transporte, uma delas destinada à avaliação dos níveis de impurezas vegetais, enquanto a outra foi utilizada para a determinação analítica e tecnológica do caldo.

Os níveis de impureza vegetal são determinados por meio da estratificação, pesagem e cálculo das impurezas vegetais e dos colmos de cana-de-açúcar, considerando o peso total da amostra conforme Figura 4.



Figura 4. Estratificação e pesagem das amostras para determinação dos níveis de impureza vegetal. Foto: Santos Júnior, 2023.

Para extração do caldo destinado as análises, as amostras foram desintegradas por uma forrageira e homogeneizadas por uma betoneira (Figura 5a). Após realizadas as pesagens com uma balança de precisão eletrônica (Figura 5b), as amostras foram submetidas a prensagem para extração do caldo em uma prensa hidráulica automática e a pesagem do bolo úmido para determinação dos teores de fibra (Figura 5c). No caldo, foram quantificados os sólidos solúveis totais (°brix) com refratômetro digital Autopol 589 (Tecnal Equipamentos para Laboratórios, Piracicaba, SP), dotado de correção automática de temperatura (Figura 5d). A percentagem de sacarose aparente no caldo (Pol) foi obtida por meio da filtragem do caldo (Figura 5e) e introduzido para análise no sacarímetro automático

Autopol 589 (Tecnal, Equipamentos para Laboratórios, Piracicaba, SP) (Figura 5f). De posse dos resultados das análises, foram determinados a porcentagem de fibra, a pureza, o açúcar total recuperável (ATR) e a porcentagem de sacarose no colmo conforme CONSECANA SP (2015).

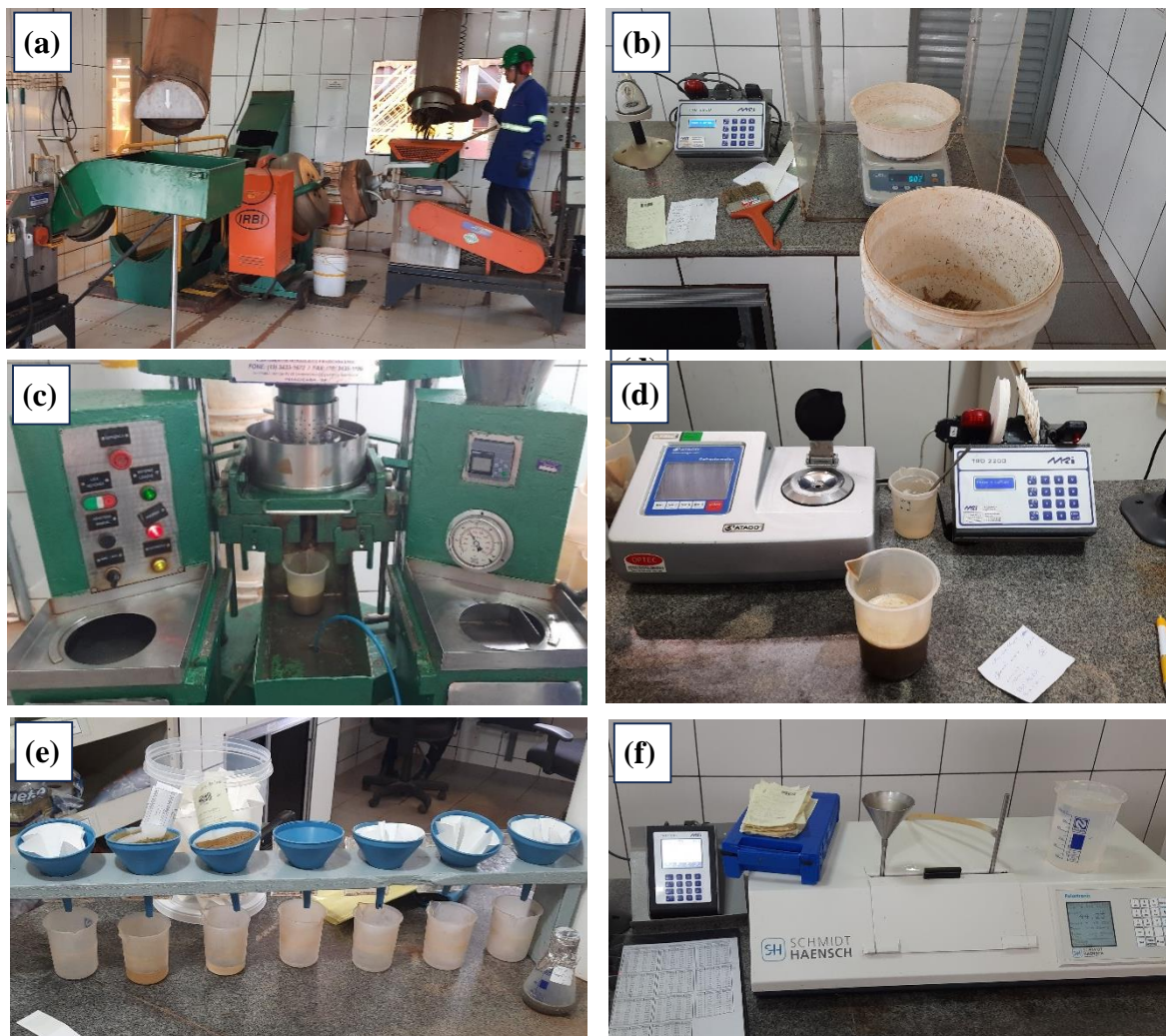


Figura 5. Desintegração e homogeneização da amostra (a); Pesagem da amostra (b); Prensagem da amostra para extração do caldo (c); Determinação do °brix (d); Filtragem do caldo (e); Determinação da Pol do caldo (f). Foto: Santos Júnior, 2023.

2.3 Determinação da geração de biomassa

Os teores de percentuais de fibra constituinte na cana-de-açúcar, foram determinados por análises laboratoriais e servirão de base de cálculo para geração da biomassa ao qual se relaciona com os resultados das avaliações laboratoriais do percentual da fibra do bagaço obtida após a extração do caldo segundo a equação descrita por Copersucar (1997):

$$\text{Biomassa \% Cana} = (\text{Fc} / \text{Fb}) \times 100$$

Onde: Fc – fibra % cana

Fb – fibra % bagaço

As variações do resultado de % fibra em relação ao tratamento controle T2 (impureza vegetal media), foram contabilizados em porcentagem condicionados a capacidade máxima e mínima de geração de biomassa ao que compreende os demais tratamentos.

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos a testes prévios de normalidade, pelo teste de Shapiro-wilk e de homocedasticidade das variâncias pelo teste de Levene. Após constatado normalidade dos dados, foi utilizado uma análise de variância (ANOVA) e teste a posteriori de Tukey ($P \leq 0,05$) para avaliar a diferença entre os tratamentos, baseado na media. Os dados foram tratados e analisados no Software Rstudio (RSTUDIO TEAM, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da influência dos diferentes níveis de impureza vegetal da cana-de-açúcar nos parâmetros tecnológicos, bem como o ATR (kg/t), fibra (% cana), Pol (% cana) e a pureza da cana (% cana) estão apresentados nas Figuras 6 a 10.

As variações dos resultados tecnológicos em relação ao tratamento padrão T2 (impureza vegetal média), foram comparadas, analisadas e discutidas para uma melhor oportunidade na totalidade processo produtivo de uma usina de cana-de-açúcar.

No que diz respeito ao parâmetro do Açúcar Total Recuperável (ATR), o tratamento que registrou os maiores níveis de ATR demonstrou as menores taxas de impurezas. Essa associação sugere a existência de uma ligação direta entre essas variáveis de resposta. O ATR é uma medida usada na indústria de cana-de-açúcar para quantificar a quantidade de sacarose presente na matéria-prima, geralmente expressa quilograma por tonelada de cana. O ATR considera tanto o açúcar naturalmente presente na cana como o açúcar que pode ser extraído durante as etapas de processamento, sendo um indicador crucial para o controle de qualidade e rendimento nas usinas (PINCELLI-SOUZA, 2020).

De acordo com a Figura 6, a configuração operacional da colhedora de cana-de-açúcar associada ao nível de impureza vegetal T1 (impureza vegetal mínima) apresentou uma diferença estatística significativa (Teste Tukey $p \leq 0,05$). Além disso, é importante destacar que esse cenário se manteve constante, ao longo das distintas fases da safra "Início", "Meio" e "Final", em comparação com as demais configurações (T2 e T3). Os resultados obtidos neste estudo, estão de acordo com Pelloso *et al.* (2021), que também concluíram que os tratamentos com os maiores níveis de ATR também demonstraram as menores taxas de impurezas.

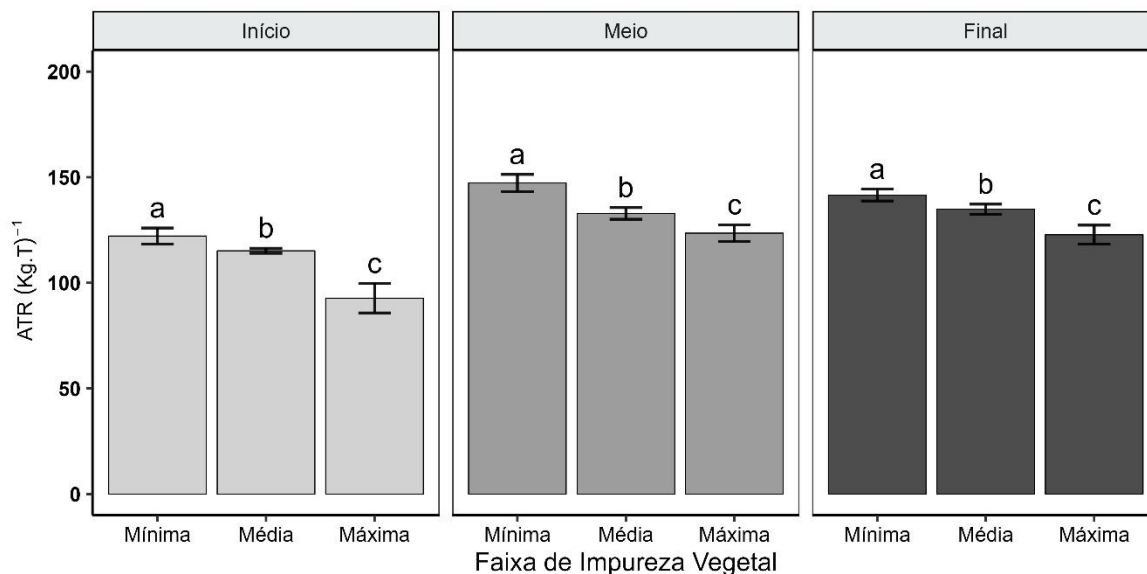


Figura 6. Açúcar total recuperável – ATR(kg/t) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra. Grupo Maringá – Usina Jacarezinho, safra 2022/2023.

Com o objetivo de estabelecer uma curva de maturação para o ano safra, relacionando os resultados dos níveis de ATR com diferentes períodos de safra, conduziu-se uma análise de regressão para cada tratamento. A equação polinomial foi identificada como a que melhor expressou a curva, conforme demonstrado na Figura 7.

Os níveis de ATR foram igualmente impactados pelo estágio da safra (início, meio e fim), sendo notável o alcance do valor máximo de 153,5 kg/t de ATR durante a fase intermediária da safra no tratamento T1. Essa observação está associada ao processo de maturação dos colmos da cana-de-açúcar na região Centro Sul. Conforme observado por Parazzi *et al.* (2018), na região Sudeste do Brasil, a maturação dos colmos da cana-de-açúcar ocorre naturalmente a partir de abril, atingindo o ponto máximo de acumulação de sacarose em setembro. Esse período coincide com o meio de safra no contexto do experimento.

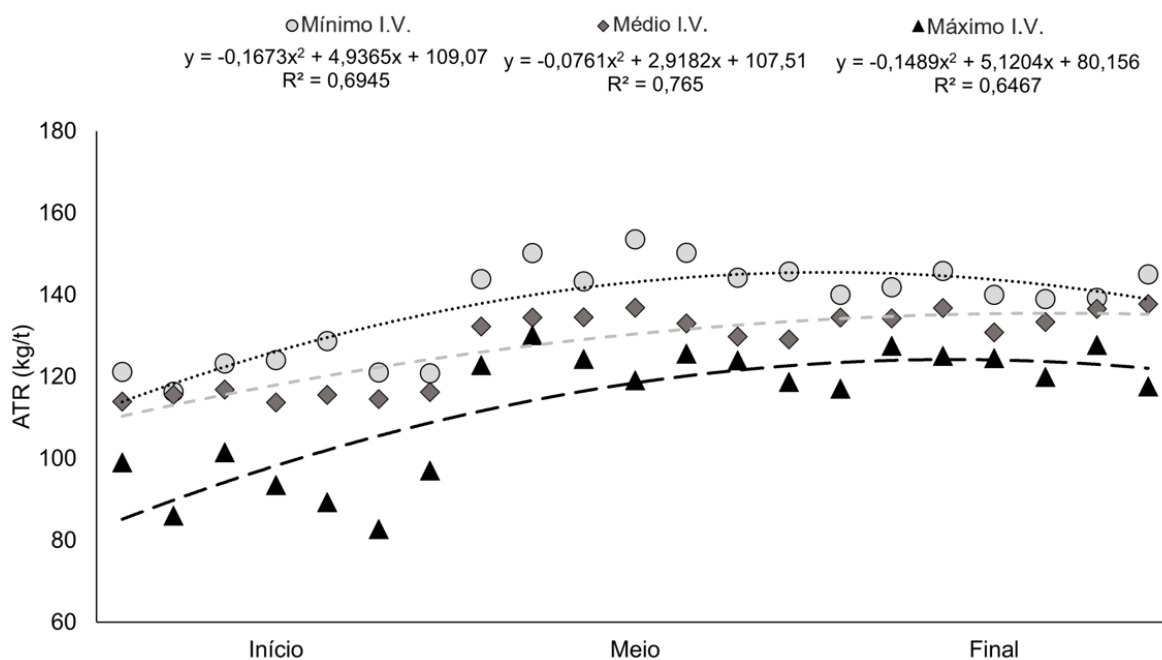


Figura 7. Níveis de ATR(kg/t) e impureza vegetal (baixa, media, alta) em diferentes períodos de safra – Curva de maturação.

Subjetivamente, se uma unidade industrial optasse por aplicar cada tratamento indicado pela curva de regressão polinomial durante o período de safra, em relação ao parâmetro de ATR, o tratamento T1 (impureza vegetal mínima) apresentaria uma média de 137,0 kg/ATR, seguido pelo T2 (impureza vegetal media) com 127,6 kg/ATR e o T3 (impureza vegetal máxima) com 113,0 kg/ATR.

No que diz respeito aos teores percentuais de fibra (Figura 8), o tratamento T3 (impureza vegetal máxima) foi o que demonstrou significativas respostas e diferença estatística (Teste Tukey $p \leq 0,05$) nos três períodos avaliados em relação ao demais tratamentos. Nesse sentido, Bovi e Serra (2001), avaliando as folhas verdes, folhas secas, fibra do colmo e clarificação do caldo de cana-de-açúcar mencionam em seu trabalho que as impurezas causam um aumento da fibra industrial e, conseqüentemente, redução na capacidade de moagem e extração.

Afim de se potencializar a produção de açúcares ou a produção de fibra, as configurações operacionais de trabalho de uma colhedora são inversamente proporcionais

quando deseja-se obter os maiores resultados a cada parâmetro de qualidade. Ambos os indicadores ATR e fibra foram significativamente diferentes ao tratamento considerado padrão operacional de trabalho T2 (impureza vegetal media).

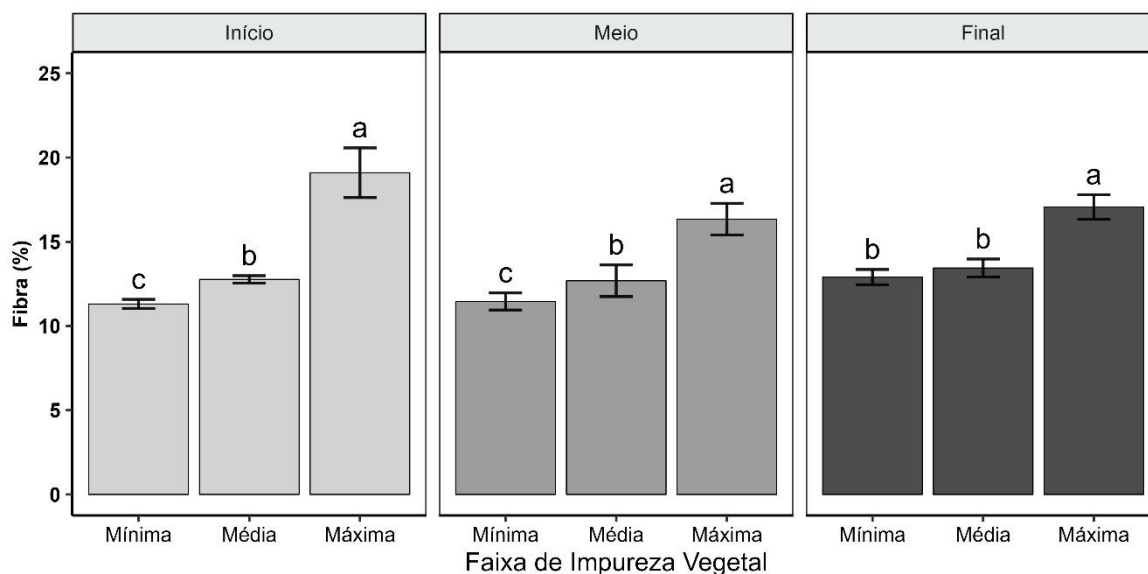


Figura 8. Percentual de fibra na cana-de-açúcar (fibra%) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra. Grupo Maringá – Usina Jacarezinho, safra 2022/2023.

De maneira geral, a composição da cana-de-açúcar é constituída por açúcares, fibras e água, expressos em percentagens. Quando aumenta a proporção de um desses componentes, consequentemente, reduz a proporção de um ou ambos os outros componentes.

Na Figura 9 pode-se observar que em todos os períodos da safra, T1 foi significativo ($p \leq 0,05$) para parâmetro de concentração de sacarose aparente (Pol%) e impureza vegetal em comparação com T2 e T3. Os níveis de Pol para os períodos de meio e final de safra não se diferenciaram-se nos tratamentos de media e máxima impureza vegetal, T2 e T3, respectivamente. Vale ressaltar que o menor nível de impureza vegetal nos três períodos de safra ao que se refere este parâmetro, expressou um maior resultado em 16,1 % Pol.

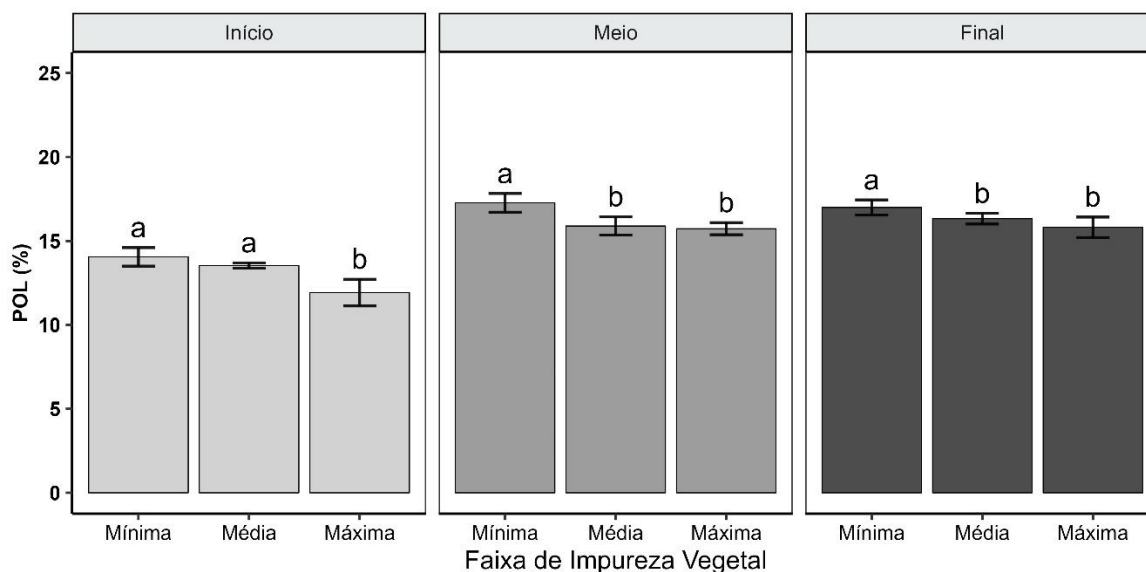


Figura 9. Concentração de sacarose aparente (POL%) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra. Grupo Maringá – Usina Jacarezinho, safra 2022/2023.

Quanto aos níveis de pureza, os resultados sugerem que o tratamento considerado padrão operacional (T2), não apresentou diferença significativa entre os períodos de início, meio e fim de safra em todos os tratamentos, conforme apresentado na Figura 10. O padrão não se diferenciou ao tratamento que corresponde a impureza vegetal mínima no decorrer do período de safra.

Outros autores, como Pelloso *et al.* (2021), obtiveram resultados semelhantes ao encontrado nesta pesquisa em que os maiores valores obtidos para Pol e pureza foram condizentes com as demais variáveis respostas, em que os tratamentos com menores velocidades de rotação do extrator primário e conseqüentemente maiores níveis de impurezas vegetais, proporcionaram valores inferiores para ambas as variáveis resposta. É importante destacar que neste estudo, os autores avaliaram apenas um período de safra.

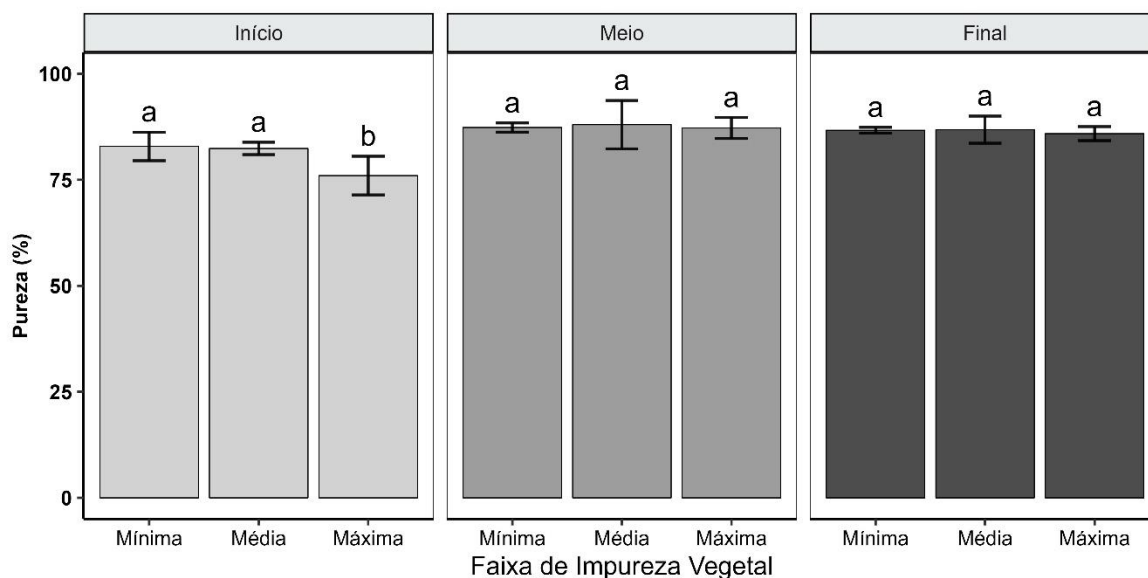


Figura 10. Pureza da cana-de-açúcar (%) em três faixas de impureza vegetal Mínima $\leq 6\%$, Média 6,1% a 15% e Máxima $\geq 16\%$ em análise temporal de início, meio e fim de safra. Grupo Maringá – Usina Jacarezinho, safra 2022/2023.

De acordo com Ripoli e Ripoli (2004), enfatizou que os valores desejáveis para Pol e pureza são maiores $>14\%$ e $>85\%$, respectivamente. No contexto do teor de Pol (sacarose) na cana-de-açúcar, o tratamento T3 (impureza vegetal máxima) revelou valores medios inferiores ao ideal, registrando 11,93% de Pol no início da safra, ao passo que os demais tratamentos e períodos mantiveram-se acima do padrão considerado ideal.

Segundo Lopes (2011), o processamento de cana-de-açúcar com baixa pureza tende a afetar negativamente a recuperação de sacarose no processo de cristalização, resultando na redução da qualidade do produto final. Essa observação foi corroborada pelos valores medios de pureza encontrados nesta pesquisa, onde os três tratamentos (T1, T2 e T3) durante o início da safra apresentaram resultados abaixo dos valores considerados desejáveis.

A utilização da análise de correlação entre os parâmetros de ATR e impureza vegetal (Figura 11), assim como entre fibra e impureza vegetal (Figura 12), representa um método crucial para estabelecer a associação entre essas variáveis. Isso se deve ao fato de ambos os parâmetros serem diretamente empregados na avaliação da capacidade da cana-de-açúcar de ser convertida em açúcar ou etanol, bem como em biomassa.

No contexto da relação entre aspectos fisiológicos e tecnológicos da cana-de-açúcar, Moura (2016), obteve como resultado de investigação uma correlação indireta para as amostras de fibras e dos fatores que correspondem ao desempenho e influência das variáveis no acúmulo de sacarose como as clorofilas a, b, a+b e carotenoides. A justificativa para esse resultado reside na competição entre a síntese de fibras nos tecidos e a produção de sacarose. Em determinados momentos durante o ciclo da cultura, a alocação de hexoses para o crescimento e lignificação dos tecidos prevalece sobre o acúmulo de sacarose. No entanto, durante a fase de maturação, a orientação preferencial para otimizar a produtividade agrônômica seria a direcionada à síntese de sacarose.

No que diz respeito ao parâmetro ATR, o período que melhor descreve sua relação negativa com os diversos níveis de impureza vegetal é o início da safra. A equação $y = -1,8548x + 133,22$ cujo o coeficiente de determinação (r^2) foi de 0,87, significando que a Impureza Vegetal, neste caso, explica 87% da variabilidade existente nos valores de ATR. Foram determinados $p \leq 0,05$ indicando que a correlação é significativa a 1%.

Quando se pretende compreender a influência da impureza vegetal nos diferentes períodos de safra, utilizando as curvas das regressões ilustradas na Figura 11, pode-se observar que a presença de 1% a mais de impureza vegetal resulta em uma diminuição de 1,85 Kg/t no ATR durante o início da safra, uma diminuição de 1,46 Kg/t durante o período de meio de safra e uma redução de 0,99 Kg/t no final da safra. Em média, a cada acréscimo de 1% e impureza vegetal, o ATR diminui em 1,43 Kg/t (Tabela 3).

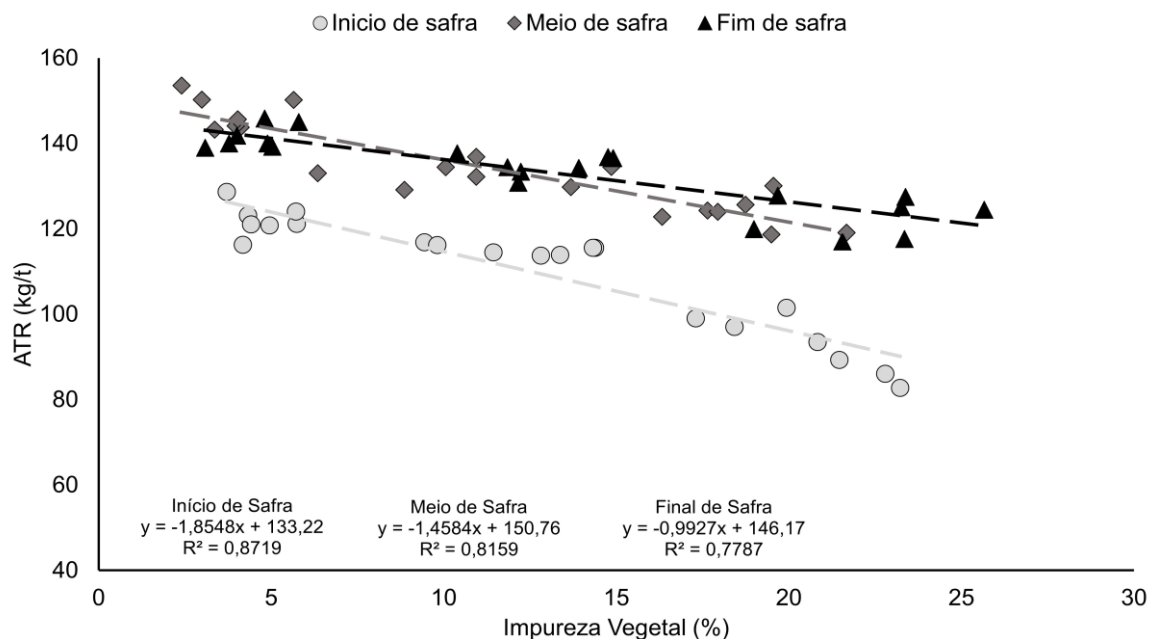


Figura 11. Correlação entre as variáveis ATR(kg/t) e impureza vegetal (%).

Com comportamento oposto aos resultados obtidos com o ATR, os teores de fibra, se expressaram com uma alta relação positiva com os maiores níveis de impureza vegetal no decorrer de uma safra.

Pilan *et al.* (2017), realizaram uma análise de caracterização de variedades de cana-de-açúcar e usaram procedimentos estatísticos para examinar as variações dos índices de fibra % e ATR em diferente estágio de cortes. Eles também encontraram uma forte correlação negativa entre esses parâmetros.

Para impulsionar a produção de biomassa, de acordo com a Figura 12 o período de início de safra é o que melhor ilustra a conexão entre essas variáveis. Essa relação é modelada pela equação da curva $y = -0,4836x + 8,3447$ ($r^2=0,864$ e $p \leq 0,05$).

De acordo com a Tabela 3, ao analisar os dados relativos à relação entre a fibra e os diferentes níveis de impureza vegetal, nota-se que, em cada 1% de impureza vegetal durante os três períodos de safra, a fibra aumenta em 0,48% no início da safra, 0,31% no meio da safra e 0,22% no final da safra. Em media, a cada 1% adicional de impureza vegetal, ocorre um aumento de 0,34% na fibra.

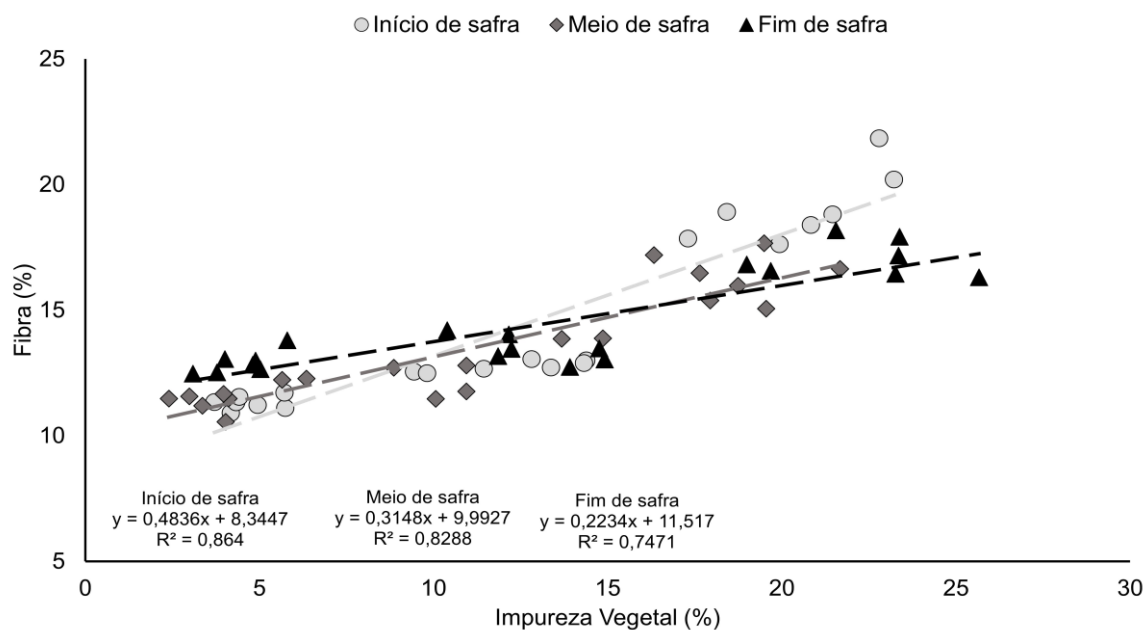


Figura 12. Correlação entre as variáveis fibra (%) e impureza vegetal (%).

Portanto o que ocorre biologicamente e com ação humana nas configurações operacionais de trabalho de uma colhedora de cana, há um balanço entre teor de fibra e de sacarose. Figurativamente, uma gangorra representa bem esse balanço: se um lado sobe, o outro desce.

Tabela 3. Resultados da análise de regressão linear entre as variáveis ATR(kg/t) e impureza vegetal (%) e fibra (%) e impureza vegetal (%) nos períodos de início, meio e final de safra:

Parâmetros Tecnológicos	Início de safra	Meio de safra	Final de safra	Media safra
	A cada 1% de impureza vegetal			
ATR (kg/t)	-1,85	-1,46	- 0,99	- 1,43
Fibra (% cana)	0,48	0,31	0,22	0,34

A fibra da cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na geração da biomassa, sendo composta principalmente por componentes insolúveis em água, cerca de 50% de celulose, 28% de hemicelulose, 20% de lignina e 2% de cinzas, além de outros compostos, como proteínas, enzimas e compostos fenólicos. É importante ressaltar que esses

materiais são notavelmente ricos em carbono e hidrogênio, elementos essenciais para a formação de biomassa (TAVARES; AMARAL, 2016).

Utilizando-se como a base de cálculo para determinação do nível de geração de biomassa, Tabela 4 apresenta os resultados da equação que determina a geração de biomassa, levando em consideração as variáveis médias obtidas em análises laboratoriais referente ao período de avaliação do ensaio.

Tabela 4. Resultados da obtenção de geração de biomassa (BIP%) considerando os resultados médios das variáveis fibra no bagaço (FIB%) e fibra da cana (FCA%) obtidos das análises laboratoriais referente ao período de avaliação dos ensaios:

Faixa de Impureza	Início de Safra		Meio de Safra		Final de Safra	
	FCA(%)	BIP (%)	FCA(%)	BIP (%)	FCA(%)	BIP (%)
Impureza vegetal mínima	11,31	23,63	11,45	23,87	12,90	27,23
Impureza vegetal média	12,77	26,68	12,68	26,43	13,44	28,37
Impureza vegetal máxima	19,1	39,91	16,34	34,06	17,06	36,01

Fonte: Resultados do boletim industrial de análises obtidos da media do dia 05 de maio de 2022 relativo ao período de início de safra com a variável fibra no bagaço (FIB%): 47,85; do dia 15 de agosto de 2022 relativo ao período de meio de safra FIB%: 47,9 e do dia 28 de outubro de 2022 relativo ao período de final de safra FIB%: 47,3 - Grupo Maringá – Usina Jacarezinho 2022.

As configurações de trabalho na colhedora de cana-de-açúcar que foram ajustadas para maximizar a presença de impurezas vegetais demonstraram uma resposta significativa, resultando em maiores teores de fibra (%) e, por conseguinte, uma produção de biomassa maior. Em contrapartida, os tratamentos que minimizaram a presença de impurezas vegetais apresentaram resultados que indicam um potencial reduzido na geração de biomassa. Ao analisar os três períodos considerados, é possível estabelecer uma media de aproximadamente 24,91% de potencial na geração de biomassa em relação ao volume de cana processado em uma safra. Quando isentos da influência das impurezas, esses

tratamentos demonstram que a planta, ao longo da safra, registra um aumento progressivo nos teores de fibra, atingindo valores mais elevados no final do período.

A quantidade de folhas e a massa vegetal da cana-de-açúcar tende a ser maior durante o período de início de safra. Isso ocorre porque, nesse estágio inicial, a planta está em pleno crescimento e desenvolvimento, priorizando a produção de biomassa, incluindo a formação de folhas e o crescimento dos colmos. Além disso, as condições climáticas no início da safra, como o maior teor de umidade, podem ser mais propícias coleta dessas impurezas vegetais juntamente com os colmos, uma vez que estão mais presentes e abundantes nesse momento.

Moura (2016), esclarece que durante o estágio vegetativo da cana-de-açúcar, uma parte das hexoses (açúcares simples como a glicose e a frutose) é alocada para a formação do esclerênquima, em detrimento da sacarose. À medida que o ciclo da cultura se desenvolve, essa alocação de hexoses se inverte justificando assim, os maiores níveis de fibra no ciclo de final de safra.

Diante das variações dos resultados em relação aos tratamentos, observa-se uma capacidade de elasticidade no processo caso haja uma necessidade de se elevar a produção de biomassa ou a reduzi-la. Ao comparar os resultados mais extremos neste estudo, observa-se que o tratamento com impureza vegetal máxima no início da safra superou o tratamento com a impureza vegetal mínima em 68,9%. No período de meio de safra, essa diferença foi de 42,69%, e no final de safra, foi de 32,24%. Isso demonstra a flexibilidade do processo em responder às variações na quantidade de impurezas vegetais, permitindo ajustes na produção de biomassa conforme necessário.

Ao avaliar a capacidade total de geração de biomassa com base na média dos tratamentos durante os três períodos analisados, o tratamento designado como padrão operacional, denominado T2 (impureza vegetal média), possui uma capacidade estimada de produzir aproximadamente 706 mil toneladas de biomassa diante de uma capacidade

industrial 2,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra ao qual foi a unidade objeto de estudo.

Considerando os dados apresentados, a capacidade total de geração de biomassa durante um período de safra, quando comparada à média entre os tratamentos com menor e maior nível de impureza em relação ao tratamento padrão, apresentou uma redução de 8,28% na produção de biomassa no caso do tratamento com a impureza vegetal mínima e um aumento significativo de 34,98% na capacidade de produção de biomassa no tratamento com impureza vegetal máxima.

Sendo assim, para se moldar as demandas de mercado as indústrias buscam a transformação e adaptação de seus processos para horizontes alternativos de produção. A julgar estas possibilidades, o que antes era considerado um produto de baixo valor agregado, passa a ser o de maior retorno econômico, dessa forma cabem mudanças no processo produtivo e seus efeitos podem ser compreendidos neste trabalho.

4. CONCLUSÕES GERAIS

As variações que ocorreram nos tratamentos impureza vegetal mínima (T1) e máxima (T3) em comparação com o padrão de impureza vegetal (T2), influenciaram significativamente e foram inversamente proporcionais nos valores de ATR e fibra.

No decorrer do período de safra, considerando os três períodos avaliados, a configuração operacional de trabalho da colhedora que corresponde ao menor nível de impureza vegetal (T1) foi a que apresentou os maiores teores de açúcares, refletindo nos parâmetros de qualidade tecnológica, como o ATR, Pol e a pureza.

O período de início de safra foi o que mais apresenta influência negativa da impureza vegetal quando se deseja a maior produção de açúcar e etanol em uma usina. Em relação aos demais períodos analisados (meio e fim de safra), o tratamento de impureza vegetal média (T2) e máxima (T3) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas para POL e pureza.

Os melhores resultados quando se deseja obter os maiores teores de fibra e conseqüentemente uma maior geração de biomassa, estão relacionados com o tratamento de impureza vegetal máxima (T3) e de maior significância para o período de final de safra.

As informações apresentadas nesta pesquisa podem ser condicionadas a valores financeiros (R\$), considerando os valores de ATR (kg/t) estabelecidos pelo CONSECANA e de biomassa (t) determinado principalmente pelo mercado na negociação de produtores e consumidores regionais.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Grupo Maringá – Usina Jacarezinho e aos professores, orientadores e ao laboratório de bioinformática da UENP-CLM.

6. REFERÊNCIAS

BOVI, Roberto; SERRA, Gil Eduardo. Folhas verdes, folhas secas, fibra do colmo e a clarificação do caldo de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 457-463, 2001.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento**, 2020. Brasília: Conab, 2020. 58p.

CONSECANA S-P. Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e etanol do estado de São Paulo. Manual de instruções. 6.ed. Piracicaba: Ed. Eletrônica, 2015. 80 p.

COPERSUCAR. Métodos analíticos. In: COPERSUCAR. **Manual de Controle Químico da Fabricação de Açúcar**. Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. cap. 6, p. 1-15.

EMBRAPA. **Agência de Informação Embrapa**. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-cucar/arvore/CONTAG01_138_22122006154842.html Acesso em: 14 maio de 2022.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 ed. **Rev. ampl.** Brasília: Embrapa, 2018. 355 p.

GEBRIN, V. M. G. et al. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ**. FAURGS, Gramado – RS, 2021.

LOPES, Cláudio Hartkopf. Tecnologia de produção de açúcar de cana. 2011.

MOURA, Paula Caroline Silva. Correlações entre variáveis morfológicas, fisiológicas e tecnológicas na maturação da cana-de-açúcar, 2016.

PARAZZI, Clóvis et al. Estudo da qualidade físico-química, tecnológica e sensorial de caldos de cana-de-açúcar para consumo. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 3-10, 2018.

PELLOSO, M.F. et al. Influence of Harvester and Rotation of the Primary Extractor Speed in the Agroindustrial Performance of Sugarcane. **Sugar Tech** **23**, 692–696 (2021). <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00944-6>.

PILAN, Paulo Henrique et al. Caracterização de variedades de Cana-de-açúcar submetidas à processo mecanizados de colheita em diferentes estágios de corte. **Tekhne e Logos**, v. 8, n. 3, p. 167-182, 2017.

PINCELLI-SOUZA, Renata P. et al. Hormetic effect of glyphosate persists during the entire growth period and increases sugarcane yield. **Pest management science**, v. 76, n. 7, p. 2388-2394, 2020.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. Piracicaba: Barros & Marques. 302p, 2004.

RSTUDIO TEAM (2023) **RStudio**: Integrated Development for R, Version 2021.09.0 Build 351. Rstudio, Boston. <https://www.rstudio.com/>.

SILVEIRA, Giovanni Módolo. **Curvas de maturação em cana energia**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2019.

TAVARES, S.R.L.; AMARAL, F.C.S. **Determinação do teor de fibra de cana-de-açúcar em diferentes biomas visando o processamento de resíduos para a produção de biocombustíveis sólidos e biomassa energética**. 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-depublicacoes/-/publicacao/996817/determinacao-do-teor-de-fibra-de-cana-de-acucar-em-diferentes-biomas-visando-o-processamento-de-residuos-para-a-producao-de-biocombustiveis-solidos-e-biomassa-energetica>. Acesso em 06 agosto de 2023.