



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC**

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NEGATIVOS DA DISPOSIÇÃO DA  
VINHAÇA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SOLOS AGRÍCOLAS NO BRASIL:**

Uma revisão bibliográfica sobre os efeitos no solo e nos recursos hídricos

Recife - PE

2025.1

**PATRÍCIA KELLY SOUSA SANTANA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC**

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS NEGATIVOS DA DISPOSIÇÃO DA  
VINHAÇA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM SOLOS AGRÍCOLAS NO BRASIL:**

Uma revisão bibliográfica sobre os efeitos no solo e nos recursos hídricos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental.

**Orientador (a):** Marianne de Lima Barboza

Recife - PE

2025.1

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S232a Santana, Patrícia Kelly Sousa.  
Avaliação dos impactos ambientais negativos da disposição da vinhaça da cana-de-açúcar em solos agrícolas no Brasil: uma revisão bibliográfica sobre os efeitos no solo e nos recursos hídricos / Patrícia Kelly Sousa Santana. – Recife, 2025.  
52 f.: il.

Orientador(a): Marianne de Lima Barboza.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Vinhaça 2. Cana-de-açúcar 3. Vinhaça – Impactos ambientais 4. Solo adequado para agricultura 5. Fertirrigação  
I. Barboza, Marianne de Lima, orient. II. Título

CDD 630



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

DOCUMENTO DE REGISTRO DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 07 dias do mês de agosto de 2025 às 13 horas, realizou-se a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado: "Avaliação dos impactos ambientais negativos da disposição da vinhaça da cana-de-açúcar em solos agrícolas no Brasil: uma revisão bibliográfica sobre os efeitos no solo e nos recursos hídricos", pela aluna - Patrícia Kelly Sousa Santana, matrícula 200712675, de acordo com as Normas Gerais dos Cursos de Graduação da Universidade Federal Rural de Pernambuco e complementadas pelas Normas Internas (PPC) do Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental aprovadas pelo Colegiado de Coordenação Didática do Curso.

A Comissão examinadora foi composta pelos membros:

Profa. Dra. Marianne de Lima Barboza – DEAGRI/UFRPE;  
Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida – DEAGRI/UFRPE;  
Msc. Felipe Figueiras de Almeida –UFPE.

Após a apresentação do TCC e efetuadas as arguições, a aluna recebeu da comissão examinadora os seguintes conceitos.

Membros	Nota
Profa. Dra. Marianne de Lima Barboza	10,0
Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida	10,0
Msc. Felipe Figueiras de Almeida	10,0

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra Marianne de Lima Barboza  
(Orientadora)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Gledson Almeida (Examinador Interno)  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

MSc. Felipe Figueiras de Almeida (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

## DEDICATÓRIAS

A Deus, aos meus pais e ao meu esposo e aso amigos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria e persistência ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Adeilton e Lúcia, por todo o apoio, amor e pelos valores que me ensinaram ao longo da vida e por sempre incentivar meus sonhos, que foram e são fundamentais para minha formação pessoal e acadêmica.

Ao meu esposo, Davi, pelo amor, paciência, incentivo constante e por estar ao meu lado em todos os momentos, celebrando cada conquista e me fortalecendo nas dificuldades.

Aos meus amigos Jeferson, Jaqueline e Emerson pela amizade sincera, por compartilharem momentos importantes dessa caminhada juntos comigo e por estarem sempre prontos para apoiar e incentivar até mesmo quando eu duvido.

Sem vocês, nada disso seria possível.

Sou grata ao grupo de pesquisa da UFPE (Capróticos) pelo apoio, dedicação ao conhecimento e pelas discussões enriquecedoras, que foram essenciais para meu crescimento acadêmico e pessoal.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Marianne, por sua dedicação, disponibilidade e por ter guiado este trabalho com tanto comprometimento e sensibilidade. Sua orientação foi essencial para o desenvolvimento deste TCC.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

“A educação é a arma mais poderosa que você pode usar para  
mudar o mundo.”  
Nelson Mandela.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar, por meio de revisão bibliográfica, os principais impactos ambientais decorrentes da disposição da vinhaça da cana-de-açúcar em solos agrícolas no Brasil, com ênfase nos efeitos negativos sobre a qualidade do solo e dos recursos hídricos. Trata-se de uma pesquisa qualitativa, com abordagem exploratória. Foram priorizadas fontes publicadas nos últimos dez anos, com destaque para pesquisas mais recentes que abordam os impactos da vinhaça no solo e nos recursos hídricos. No entanto, para o levantamento dos marcos legais e normativos aplicáveis, foi necessário ampliar o recorte temporal da pesquisa, em razão da escassez de legislações atualizadas e específicas sobre a temática. Essa limitação evidencia lacunas no arcabouço legal e reforça a importância de revisões periódicas nas normas vigentes. Os resultados indicam que, embora a vinhaça seja um subproduto rico em nutrientes e amplamente utilizado na fertirrigação, sua aplicação sem critérios técnicos pode provocar salinização, compactação, alteração do pH, desequilíbrios microbiológicos, além da contaminação de corpos hídricos por nutrientes e matéria orgânica. Os riscos ambientais incluem a lixiviação de nitratos e fosfatos, a eutrofização de cursos d'água e a perda da biodiversidade. No entanto, diversas alternativas sustentáveis têm sido adotadas, como a digestão anaeróbia para produção de biogás e o uso da vinhaça como substrato para a obtenção de compostos de alto valor agregado, a exemplo da produção do ácido capróico. Conclui-se que o uso da vinhaça deve estar atrelado ao cumprimento de diretrizes técnicas, fortalecimento da fiscalização, monitoramento ambiental constante, inovação tecnológica e atualização das normas ambientais, visando compatibilizar produtividade agrícola e conservação ambiental.

**Palavras-chave:** vinhaça; cana-de-açúcar; impactos ambientais da vinhaça; solos agrícolas; fertirrigação.

## **ABSTRACT**

This study aims to evaluate, through a literature review, the main environmental impacts resulting from the disposal of sugarcane vinasse in agricultural soils in Brazil, with emphasis on its negative effects on soil and water quality. It is a qualitative, exploratory research based on a systematized bibliographic review. The study prioritized sources published in the last ten years, focusing on recent findings related to the impacts of vinasse on soil and water resources. However, due to the scarcity of updated and specific legislation on the topic, the temporal scope of the research was extended to include the identification of legal and regulatory frameworks. This limitation highlights gaps in the legal framework and reinforces the need for periodic revisions of current regulations. The results indicate that, although vinasse is a by-product rich in nutrients and widely used in fertigation, its unregulated and excessive application may lead to soil salinization, compaction, pH alterations, microbiological imbalances, and contamination of water bodies by nutrients and organic matter. Environmental risks include nitrate and phosphate leaching, eutrophication of watercourses, and biodiversity loss. Nevertheless, various sustainable alternatives have been adopted, such as anaerobic digestion for biogas production and the use of vinasse as a substrate for obtaining high-value compounds, such as caproic acid. It is concluded that the sustainable use of vinasse must be based on compliance with technical guidelines, enforcement of environmental regulations, technological innovation, and periodic updates to legislation, aiming to reconcile agricultural productivity with environmental conservation.

**Keywords:** vinasse; sugarcane; environmental impacts; agricultural soils; fertigation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição dos materiais analisados por fonte de consulta .....	18
Figura 2 - Produção de cana-de-açúcar por região (milhões de toneladas) .....	21
Figura 3 - Valor da produção de cana-de-açúcar (Mil reais).....	22
Figura 4 - Processo de produção de açúcar .....	26
Figura 5 - Processo de produção de etanol.....	28
Figura 6 - Processo para obtenção da vinhaça .....	30
Quadro 1. Principais Efeitos da Vinhaça nos Recursos Hídricos.....	38
Quadro 2. Principais marcos legais sobre manejo de vinhaça .....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Estados Produtores de Cana-de-Açúcar no Brasil e Dados de Produção	20
Tabela 2 – Principais Características Físico-Químicas da Vinhaça a Partir de Diferentes Mostos	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas

Ca - Cálcio

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

K - Potássio

Mg - Magnésio

M.O - Matéria Orgânica

N - Nitrogênio

NO<sub>2</sub> - Nitrito

P - Fósforo

PAV - Plano de Aplicação da Vinhaça

PIB - Produto Interno Bruto

Proálcool - Programa Nacional do Alcool

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	14
2. OBJETIVOS .....	16
2.1. Geral.....	16
2.2. Específicos .....	16
3. METODOLOGIA.....	17
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
4.1. Panorama da Cana-de-Açúcar no Brasil .....	19
4.2. Agroindustrialização da Cana-de-Açúcar.....	24
4.3.1. <i>Produção de Açúcar</i> .....	26
4.3.2. <i>Produção de Etanol</i> .....	27
4.3. Resíduos da Produção da Cana-de-Açúcar e do Álcool.....	28
4.3.1. <i>Vinhaça da Cana-de-Açúcar</i> .....	29
4.3.2. <i>Efeitos da Vinhaça no Solo</i> .....	32
4.3.3. <i>Efeitos da Vinhaça nos Recursos Hídricos</i> .....	36
4.3.4. <i>Marco Legal Sobre Vinhaça</i> .....	22
4.3.5. <i>Considerações Ambientais Sobre a Aplicação da Vinhaça na Literatura</i> .....	39
4.3.6. <i>Diretrizes Para o Uso Sustentável da Vinhaça</i> .....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	42
6. CONCLUSÃO .....	44
REFERÊNCIAS.....	45

## 1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos impactos ambientais da disposição da vinhaça da cana-de-açúcar em solos agrícolas no Brasil é um tema de crescente relevância, especialmente considerando as implicações negativas para a qualidade do solo e dos recursos hídricos do país (FUSS et al, 2017). A literatura disponível oferece uma visão abrangente sobre os efeitos da aplicação de vinhaça, desde suas propriedades agrônômicas até os riscos ambientais associados (FERNANDES; OLIVEIRA, 2023; GASPAROTTO et al., 2019).

Segundo dados da EMBRAPA (2022) o Brasil lidera o ranking em maior produtor de cana-de-açúcar em nível mundial, responsável por cerca de 40% da produção global, e o segundo maior produtor de etanol do mundo, destacando-se pelo setor sucroenergético como um dos pilares da matriz energética renovável do país (SPINELLI et al., 2022). Com isso, a geração de resíduos industriais, como a vinhaça, atinge volumes expressivos, apresentando uma média de 14 litros para cada litro de etanol produzido (CARDOSO, 2021; GASPARTTO et al., 2019).

A vinhaça como também é descrita como um subproduto líquido de coloração marrom escuro e natureza ácida, originado da destilação do caldo fermentado da cana-de-açúcar no processo de produção de etanol (FERNANDES; OLIVEIRA, 2023). Sua aplicação excessiva e/ou desordenada no solo, pode resultar em impactos ambientais negativos severos, como a contaminação do solo e da água subterrânea, salinização, alteração do pH do solo e liberação de gases de efeito estufa (DIAS, 2022).

Dias (2022) também revela que o uso contínuo da vinhaça pode levar à saturação do solo por sais, alteração do equilíbrio de nutrientes e degradação da qualidade da água subterrânea, podendo levar a efeitos ainda mais preocupantes quando não há acompanhamento técnico e atenção e cuidado com as características de condições de solo e clima locais, podendo gerar riscos significativos à fauna, flora e meio social.

Neste contexto, torna-se fundamental avaliar os impactos negativos associados à disposição da vinhaça em solos agrícolas, visando identificar os riscos envolvidos, estabelecer limites ambientais toleráveis e definir recomendações técnicas que minimizem seus efeitos prejudiciais. Embora a aplicação da vinhaça represente uma

alternativa de reciclagem de resíduos e redução de custos com fertilizantes, sua utilização frequente e sem planejamento tem levantado preocupações quanto a possíveis danos ambientais (DIAS,2022).

A escolha deste tema justifica-se pela crescente necessidade de conciliar a produtividade do setor agroindustrial com a preservação ambiental, especialmente em um país onde a cana-de-açúcar ocupa vastas extensões territoriais, assim como descrever os principais as principais alterações que a aplicação da vinhaça pode causar nos solos e recursos hídricos (CONAB, 2024).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Geral**

Avaliar, por meio de revisão bibliográfica, os principais impactos ambientais decorrentes da disposição da vinhaça da cana-de-açúcar em solos agrícolas no Brasil, com ênfase nos efeitos negativos sobre a qualidade do solo e dos recursos hídricos.

### **2.2. Específicos**

- Fazer um levantamento histórico da cana-de-açúcar no Brasil;
- Levantar os aspectos físico-químicos e nutricionais da vinhaça que influenciam a dinâmica do solo e dos recursos hídricos;
- Identificar os principais riscos ambientais associados à aplicação contínua e desregulada da vinhaça;
- Apresentar os efeitos agronômicos positivos e negativos da fertirrigação com vinhaça;
- Sistematizar propostas e estratégias de manejo que minimizem os impactos ambientais decorrentes da sua aplicação.

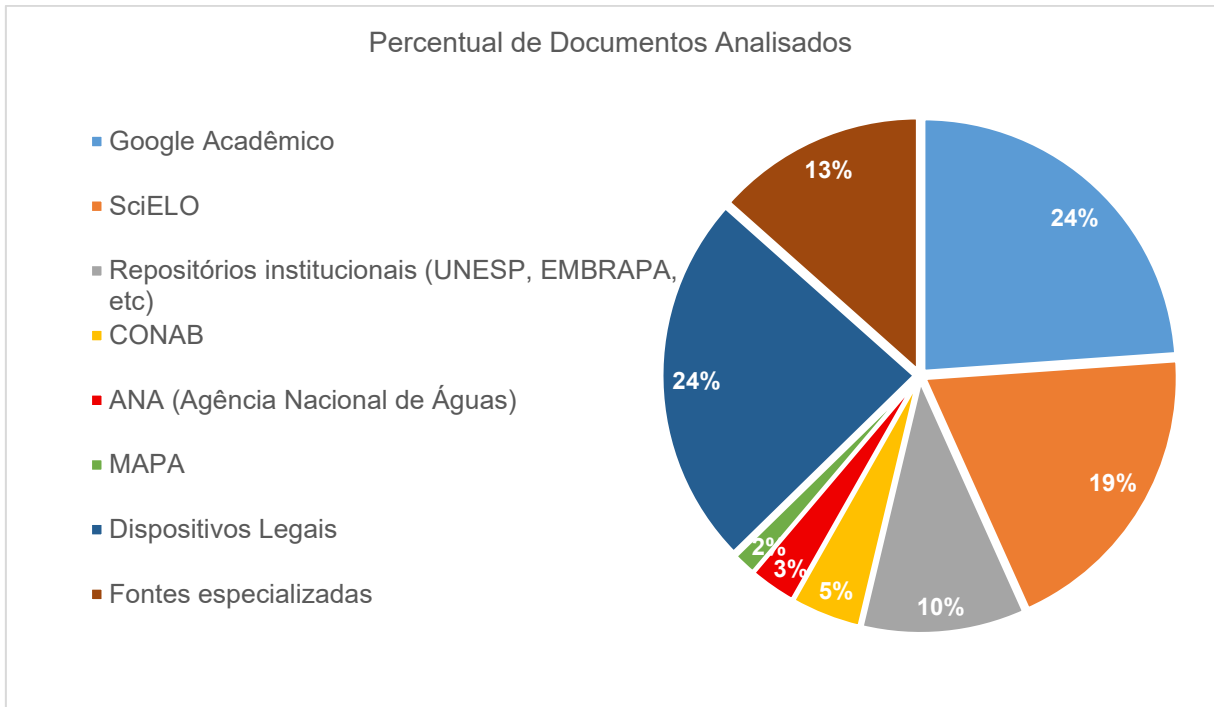
### 3.METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, com abordagem exploratória e descritiva, realizada por meio de uma revisão bibliográfica sistematizada. Segundo autores Lakatos e Marconi (2017, p. 44) a pesquisa bibliográfica permite o levantamento e a análise de publicações já consolidadas sobre determinado tema em artigos científicos e livros, sendo fundamental para identificar, discutir e aprofundar os principais aspectos teóricos e práticos envolvidos.

No desenvolvimento desta revisão bibliográfica, foram analisados 67 documentos, entre artigos científicos, dissertações, normas técnicas e publicações institucionais, sendo 16 desses, marcos legais com foco nos impactos ambientais da aplicação da vinhaça em solos agrícolas. Os materiais foram selecionados com base em critérios de relevância temática, atualidade (priorizando publicações dos últimos 10 anos) e credibilidade das fontes. No entanto, foi necessário ampliar o recorte temporal da pesquisa quanto aos marcos legais referentes ao uso da vinhaça, em razão da escassez de legislações atualizadas e específicas sobre a temática.

Dentre as bases de dados consultadas, destacam-se: Google Acadêmico, com 16 artigos; SciELO, com 13 publicações; repositórios institucionais como os da UNESP, EMBRAPA, CAPES e IFSP, com 7 documentos; sites oficiais da CONAB e Agência Nacional das Águas (ANA), com 5 documentos, o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) 1 documento e os dispositivos legais com 16 documentos analisados.

Além das bases acadêmicas tradicionais, foram incluídas também 9 publicações provenientes de fontes especializadas não indexadas, como revistas científicas independentes, documentos técnicos de instituições estaduais. Essas fontes demonstraram relevância temática, rigor técnico e atualidade, justificando sua inclusão na análise bibliográfica. A Figura 1. ilustra visualmente os percentuais por fontes analisadas.



**Figura 1 - Distribuição dos materiais analisados por fonte de consulta**

Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados coletados durante a revisão bibliográfica (2025).

Foram utilizadas as seguintes palavras-chave: vinhaça; cana-de-açúcar; impactos ambientais da vinhaça; solos agrícolas; fertirrigação.

Os documentos selecionados foram organizados em pastas digitais, com registros sistematizados em fichamentos e planilhas (Word e Excel), nos quais se destacaram informações como tipo de impacto ambiental, local do estudo, ano de publicação e principais conclusões. A análise dos dados seguiu uma abordagem crítica e interpretativa, considerando a relevância científica, a consistência metodológica, a atualidade das publicações e a clareza na apresentação dos resultados, principalmente os resultados com dados numéricos. Foram priorizados estudos publicados em periódicos revisados por pares, documentos técnicos oficiais e diretrizes normativas reconhecidas. Os conteúdos foram confrontados para identificar lacunas de conhecimento e possíveis vieses, estruturando os resultados em eixos temáticos que tratam dos efeitos da vinhaça sobre o solo, os recursos hídricos, os instrumentos legais e o uso sustentável do resíduo.

## **4.REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1.Panorama da Cana-de-Açúcar no Brasil**

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma planta originária do Sudeste Asiático, introduzida no Brasil em 1532 pelo colonizador Martim Afonso de Souza, que viu no território brasileiro um grande potencial para o cultivo da espécie devido às condições edafoclimáticas favoráveis, como solos férteis e clima tropical (BERNAL, 2018). Rapidamente, a cultura tornou-se a base econômica do período colonial, sendo instalada inicialmente na Capitania de São Vicente e posteriormente expandida ao longo do litoral nordestino, especialmente em Pernambuco e na Bahia, com a criação dos primeiros engenhos de açúcar.

Durante os séculos XVI e XVII, o Brasil se consolidou como o maior produtor mundial de açúcar, posição sustentada há séculos, devido à mão de obra escravizada e ao modelo de grandes propriedades monocultoras voltadas à exportação. Essa herança estruturou social e economicamente várias regiões do país e lançou as bases do setor sucroenergético nacional (UNICA, 2023; SPINELLI et al., 2022). Com o avanço da industrialização no século XX, especialmente após a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) em 1933, o setor passou por significativas transformações (SILVA; SOUZA, 2020). Na década de 1970, com a crise do petróleo, foi instituído o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), pelo Decreto nº 76.593/1975, promovendo o uso do etanol como combustível e impulsionando a produção de cana para fins energéticos (DIAS, 2022). Desde então, a cana-de-açúcar se consolidou como uma das principais culturas da matriz energética brasileira.

Atualmente, a produção de açúcar e etanol constitui umas das atividades econômicas mais tradicionais do Brasil, onde a região sudeste se destaca como a maior produtora de cana-de-açúcar enquanto os outros estados juntos representam uma parcela significativa da produção nacional dessa cultivar, com destaque para o estado de São Paulo, que sozinho é responsável por aproximadamente 60% da produção total do país (Tabela 1). Além disso, o país ocupa a posição de maior produtor isolado dos subprodutos da cultura (açúcar e etanol), além de também ser o maior exportador global de açúcar (EMBRAPA, 2023). Diante disso, percebe-se o volume de produção por região, sendo o Sudeste o maior produtor nacional, com aproximadamente 420,2 milhões de toneladas. Já o Centro-Oeste destaca-se como a segunda maior região

produtora, com cerca de 148,4 milhões de toneladas, impulsionada pela expansão da área plantada (CONAB, 2024).

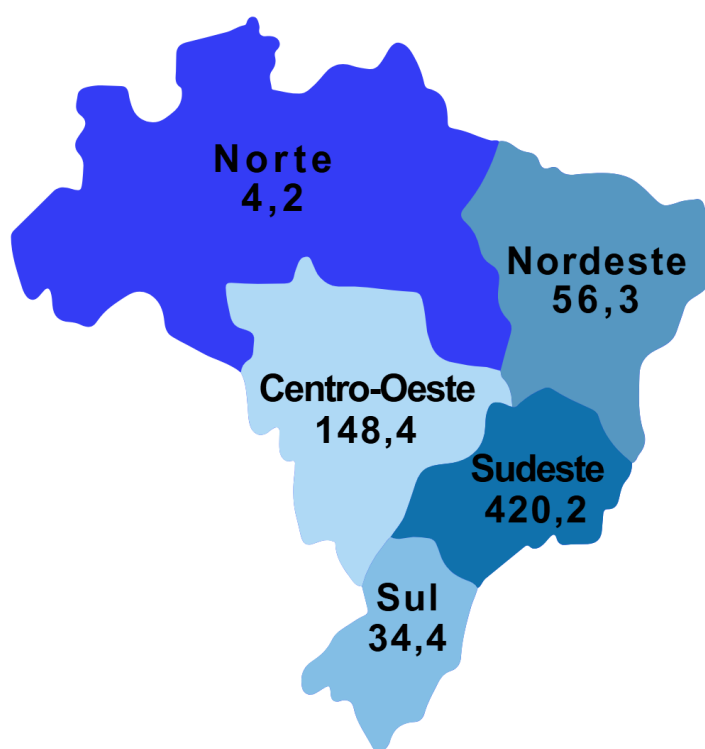
A região Sul apresenta produção moderada (34,4 milhões de toneladas), com estabilidade na produtividade e pequeno aumento da área cultivada. O Nordeste contribui com 56,3 milhões de toneladas, com expectativa de crescimento, sobretudo em função do início da colheita a partir de agosto. Já a região Norte responde por menor volume, estimado em 4,2 milhões de toneladas, embora com ganhos em produtividade (82.395 kg/ha) (CONAB, 2024).

**Tabela 1. Principais Estados Brasileiros Produtores de Cana-de-Açúcar e sua Respectiva Produção (em Milhões de Toneladas)**

Posição	Estado	Produção (milhões de toneladas)	Fonte
1º	São Paulo	439	(UNICA Data, 2023)
2º	Minas Gerais	83	
3º	Goiás	82	
4º	Mato Grosso do Sul	52	(CONAB, 2024)
7º	Alagoas	18,9	(UNICA Data, 2023)
8º	Pernambuco	17	

Fonte: Autora, 2025.

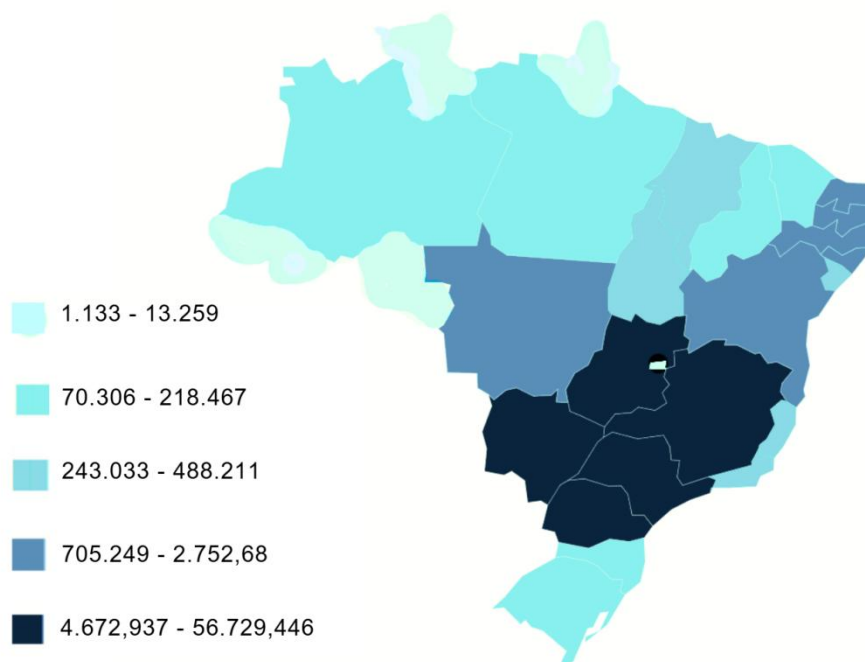
De acordo com o primeiro levantamento da safra de cana-de-açúcar 2025/26 da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB é de que sejam colhidas 663,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar nesta safra e ainda informa que a forte concentração das produções nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, como demonstrado a seguir na Figura 2.



**Figura 2 - Produção de cana-de-açúcar por região (milhões de toneladas)**

Fonte: Autora, 2025.

A Figura 3 apresenta o valor econômico da produção de cana-de-açúcar no Brasil, evidenciando que, além da expressiva quantidade física produzida, essa atividade representa uma importante contribuição para o Produto Interno Bruto (PIB) nacional. Segundo o MAPA (2023), o setor sucroenergético é um dos mais relevantes da agroindústria brasileira, contribuindo não apenas para o abastecimento interno, mas também para a balança comercial por meio da exportação de açúcar e etanol. Observa-se uma maior concentração de valor agregado nos estados com elevado grau de agroindustrialização, especialmente no Sudeste, o que revela desigualdades regionais no setor. Essa centralidade do Sudeste na cadeia produtiva da cana-de-açúcar e do etanol reafirma sua importância tanto em produtividade quanto em geração de valor econômico (CONAB, 2024; MAPA, 2023).



**Figura 3 - Valor da produção de cana-de-açúcar (Mil reais)**

Fonte: Autora adaptado IBGE, 2025.

#### **4.2. Marco Legal Sobre a Vinhaça**

Com a expansão da atividade açucareira, alcooleira e o conseqüente aumento na produção de vinhaça no país, surgiram preocupações dos danos ambientais, uma vez que esse subproduto passou a ser depositado diretamente no solo pelas usinas a partir da década de 1970. Para orientar a disposição final do resíduo, foram criadas diversas normas, decretos e leis (ANA, 2022; ARAUJO et al.,2021).

O Decreto-Lei nº 303, de 23 de fevereiro de 1967, considerou como poluição "qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente — solo, água e ar — causada por substâncias em qualquer estado da matéria, desde que direta ou indiretamente prejudique a saúde, a segurança ou o bem-estar da população" (BRASIL, 1967). Embora tenha sido posteriormente revogado pela Lei nº 5.318, de 1967, que instituiu a Política Nacional de Saneamento, esse decreto foi um marco no reconhecimento da vinhaça como poluente em potencial. Porém, somente em novembro de 1978, a Portaria GM nº 323 proibiu o lançamento direto da vinhaça em corpos hídricos, obrigando os produtores a desenvolverem alternativas sustentáveis para sua destinação. A norma estabeleceu que, a partir da safra de

1979/1980, ficava proibido o lançamento direto ou indireto do vinhoto em qualquer coleção hídrica pelas destilarias de álcool (BRASIL, 1978). Reforçando que:

[...] I - A partir da safra de 1979/1980, fica proibido o lançamento, direto ou indireto, do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool instaladas ou que se venham a instalar no País. II - As empresas proprietárias de destilarias apresentarão, no prazo máximo de 3 meses a partir da data dessa Portaria, projetos para implantação de sistema adequado de tratamento e/ou utilização de vinhoto, visando ao controle da poluição hídrica (Brasil, 1978, p. 1261).

Além disso, a Norma Técnica CETESB P 4.231/2005, instituída no estado de São Paulo, estabeleceu critérios obrigatórios para o uso agrícola da vinhaça, tratando do armazenamento, transporte e aplicação no solo. A norma exige parâmetros como pH, potássio (K), fósforo (P), nitrogênio, sódio (Na), cálcio (Ca), entre outros, e determina a elaboração de um Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV) baseado em análises periódicas do solo e da vinhaça (CETESB, 2015).

Outros marcos legais também foram fundamentais, como a criação do Código das Águas (Decreto nº 24.643/1934) já proibía a disposição de poluentes em corpos hídricos, assim como o Decreto-Lei nº 1.413/1975 tratou do “controle da poluição ambiental provocada por atividades industriais”. Já a Portaria nº 158/1980 e a Portaria nº 124/1980 regulamentaram o lançamento de efluentes e a localização de fontes poluidoras. A Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais) trouxe penalidades específicas para casos de poluição hídrica, e a Resolução CONAMA nº 430/2011 definiu padrões técnicos para o lançamento de efluentes.

Além disso, a Resolução CONAMA nº 357/2005, a Lei nº 9.433/1997 (Política Nacional de Recursos Hídricos), e o Decreto nº 7.404/2010, que a regulamenta, são instrumentos legais que consolidam as diretrizes para a gestão ambiental da vinhaça, reforçando a importância de um manejo sustentável desse subproduto. O Quadro 2. apresenta os principais marcos legais englobando descarte de efluentes, saneamento e vinhaça no Brasil.

**Quadro 1. Principais marcos legais sobre manejo de vinhaça**

Ano	Instrumento Legal	Conteúdo/Objetivo
1934	Decreto nº 24.643 – Código das Águas	Proíbe a disposição de poluentes em corpos hídricos
1967	Decreto-Lei nº 303	Define como poluição qualquer alteração prejudicial ao meio ambiente
1967	Lei nº 5.318	Institui a Política Nacional de Saneamento e revoga o Decreto-Lei nº 303
1975	Decreto-Lei nº 1.413	Trata do controle da poluição provocada por atividades industriais
1978	Portaria GM nº 323	Proíbe o lançamento direto ou indireto de vinhaça em corpos d'água
1980	Portarias nº 124 e nº 158	Regulam o lançamento de efluentes e localização de fontes poluidoras
1997	Lei nº 9.433	Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos
1998	Lei nº 9.605	Estabelece sanções penais e administrativas para crimes ambientais
2001	Resolução CNRH nº 15	Diretrizes para a gestão integrada das águas
2005	Resolução CONAMA nº 357	Estabelece a classificação dos corpos d'água e seus usos
2005	Norma Técnica CETESB P 4.231	Define critérios para aplicação da vinhaça no solo (armazenamento, transporte etc.)
2011	Resolução CONAMA nº 430	Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes

Fonte: Elaborado pela autora com base em BRASIL (1934, 1967, 1975, 1978, 1980, 1989, 1997, 1998, 2011), CETESB (2005).

Nesse sentido, torna-se imprescindível que o manejo da vinhaça seja conduzido de forma criteriosa, considerando a capacidade de assimilação do solo, as exigências nutricionais da cultura, as condições edafoclimáticas e o monitoramento contínuo da qualidade ambiental. Apenas com a adoção de práticas fundamentadas em critérios técnicos será possível conciliar os benefícios agronômicos desse subproduto com a preservação dos recursos naturais e a promoção da sustentabilidade nos sistemas agrícolas (ANA, 2022; GASPAROTTO et al., 2019; FIALHO et al., 2019).

### **4.3. Agroindustrialização da Cana-de-Açúcar**

Essa posição do Brasil, em quesito de produção da cana-de-açúcar, consolidou-se a partir da década de 1970, quando a cultura da cana-de-açúcar passou a ocupar papel estratégico na matriz energética nacional. Nesse contexto, foi instituído, em 1975, o Programa Nacional do Alcool (Proálcool), por meio do Decreto nº 76.593, com o objetivo de reduzir a dependência brasileira do petróleo importado, em resposta à crise energética mundial daquele período (DIAS, 2022). Desde então, o cultivo e a industrialização da cana-de-açúcar passaram a ser objeto de importantes investimentos e políticas públicas, tornando-se referência internacional tanto em

produtividade quanto em inovação tecnológica no setor sucroenergético (EMBRAPA, 2023).

A agroindustrialização da cana-de-açúcar no país representa uma das cadeias produtivas elaboradas e integradas do agronegócio nacional, envolvendo etapas desde o cultivo da matéria-prima até a transformação industrial em produtos como o açúcar, o etanol e a bioeletricidade. Esse processo é realizado, predominantemente, por usinas e destilarias que operam em sistemas verticalizados, integrando atividades agrícolas e industriais, o que possibilita maior eficiência e aproveitamento de subprodutos (UNICA, 2023).

Historicamente, a agroindústria da cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo responsável por significativa geração de empregos diretos e indiretos, além de contribuir expressivamente para a balança comercial. O setor é caracterizado por elevado grau de mecanização, principalmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, onde a modernização tecnológica tem permitido ganhos em produtividade e redução de impactos ambientais associados às etapas de colheita e transporte da cultura (ZANINI, 2023).

Do ponto de vista industrial, a cana-de-açúcar é processada em dois fluxos principais: a produção de açúcar, voltada tanto para o mercado interno quanto para exportações, e a produção de etanol, utilizado como biocombustível, em especial no setor de transportes. A produção de energia elétrica a partir do bagaço da cana, por meio da cogeração, tem ganhado relevância como uma importante fonte renovável complementar ao sistema energético nacional (EPE, 2022). Essa cadeia produtiva ainda se destaca pela capacidade de reaproveitamento de resíduos. Subprodutos como a torta de filtro, a vinhaça e o bagaço são utilizados em processos de fertilização do solo, produção de biogás, compostagem e cogeração de energia, evidenciando um modelo em transição para a economia circular (GASPAROTTO et al., 2019).

Apesar dos avanços tecnológicos e do potencial sustentável, a agroindustrialização da cana ainda enfrenta desafios relacionados ao uso intensivo dos recursos naturais, à emissão de gases de efeito estufa, à destinação de efluentes líquidos e sólidos, e à necessidade de políticas públicas que incentivem o uso racional e sustentável de seus subprodutos (CONAB, 2024).

### 4.3.1. Produção de Açúcar

A produção de açúcar a partir da cana-de-açúcar envolve um conjunto de etapas industriais que compreendem a lavagem da cana, extração do caldo/moagem, tratamento químico, purificação/filtração, evaporação e cristalização da sacarose (cozimento e centrifugação) e secagem (Figura 4.) (UNICA, 2023). Esse processo é realizado de forma integrada às operações agrícolas, em um modelo que visa à eficiência produtiva e ao mínimo desperdício de matéria-prima (EMBRAPA, 2022). O Brasil destaca-se como o maior exportador de açúcar, com cerca de 25% de produção em escala mundial sendo que cerca de 80% é exportado, no entanto, ainda atende o mercado interno onde o produto é destinado as indústrias alimentícias, de bebidas e farmacêuticas (UNICA, 2023).



**Figura 4 - Processo de produção de açúcar**

Fonte: Autora, 2025.

O rendimento e a qualidade do açúcar produzido dependem de algumas variáveis como o estado da maturação da cana, o teor de sacarose presente nos colmos assim como toda cadeia de manejo das usinas. Em condições ideais, a cana-de-açúcar pode atingir teores de sacarose entre 12% e 16%, sendo este o principal indicador utilizado para estimar a eficiência industrial na produção de açúcar (EMBRAPA, 2022). Enquanto a maturação da cana em geral ocorre entre os meses de maio e setembro

nas principais regiões produtoras, sendo favorecida por períodos de seca e temperaturas amenas, que promovem a concentração de açúcares nos tecidos vegetais. Fatores como variedade cultivada, adubação, irrigação, ponto de colheita e tempo entre o corte e o processamento influenciam diretamente esses teores e, conseqüentemente, o aproveitamento industrial. A utilização de tecnologias de automação, controle de processo e boas práticas industriais tem contribuído para elevar os padrões de eficiência e sustentabilidade da produção, reduzindo perdas e melhorando a qualidade do produto final (EMBRAPA, 2022; UNICA, 2023). A utilização de tecnologias de automação, controle de processo e boas práticas industriais têm contribuído para elevar os padrões de eficiência e sustentabilidade da produção contribuindo com a qualidade do produto (EPE, 2022).

#### 4.3.2. *Produção de Etanol*

O etanol é um dos principais produtos da agroindústria canavieira brasileira, sendo amplamente utilizado como biocombustível em substituição à derivados de combustíveis fósseis. Sua produção (Figura 5) ocorre a partir da fermentação do caldo (mosto) extraído da cana-de-açúcar seguida de processos de fermentação e destilação. A fermentação é conduzida principalmente pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*, numa faixa de pH adequada entre 5,8 a 5,9 (melaço) e entre 5,2 e 6,8 (caldo de cana) que utiliza a sacarose presente no mosto como substrato, convertendo os componentes como a glicose em etanol ( $C_2H_6O$ ) e também em gás carbônico ( $CO_2$ ) através de 12 reações em sequência, podendo ser simplificada na nas etapas abaixo: (LIMA, et al. 2019, SILVA, 2022).

Via aeróbia:  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow \text{respiração} \rightarrow CO_2 + H_2O$  (crescimento celular rápido)

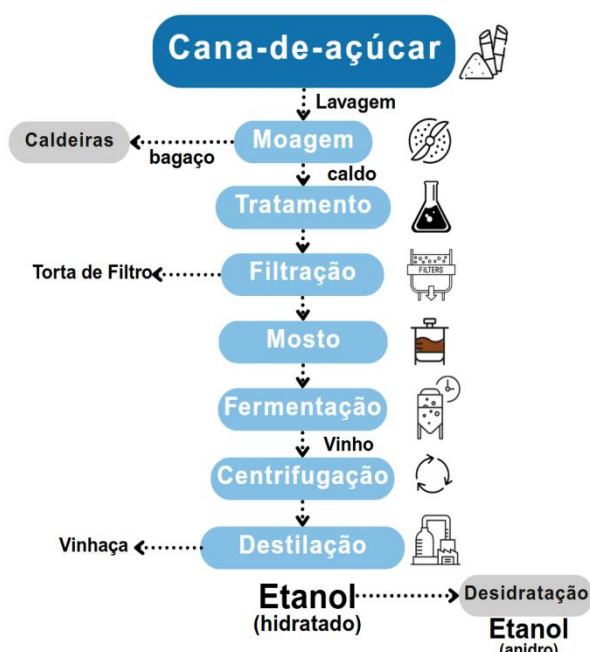
Via anaeróbia:  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow \text{fermentação} \rightarrow C_2H_5OH + CO_2$  (crescimento celular lento)



Essa conversão, resultante do metabolismo da levedura durante a fermentação pode ser representado de forma simplificada conforme Equação 1 a seguir (Silva, 2022):



De acordo com a CONAB (2024), o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, com destaque para o etanol anidro e hidratado, ambos fundamentais para a matriz energética renovável do país.



**Figura 5 - Processo de produção de etanol**

Fonte: Autora, 2025.

O programa Proálcool consolidou a infraestrutura necessária para o desenvolvimento da cadeia produtiva do etanol, resultando na expansão em quantidade de usinas e na melhoria tecnológica dos processos industriais. O etanol hidratado, é utilizado diretamente nos veículos, e o etanol anidro, adicionado à gasolina em proporções regulamentadas pelo governo federal (EPE, 2022).

A produção de etanol também resulta na geração de grandes volumes de resíduos agroindustriais, entre os quais se destacam a vinhaça e o bagaço da cana (Conab, 2024). A vinhaça é gerada em proporções elevadas, e tem sido amplamente empregada na fertirrigação (CORREIA, 2017; ANA, 2022). Já o bagaço é tradicionalmente aproveitado na cogeração de energia nas próprias usinas, contribuindo para a autossuficiência energética do setor (EMBRAPA, 2022)

#### 4.4. Resíduos da Produção da Cana-de-Açúcar e do Álcool

Embora a cadeia produtiva da cana-de-açúcar seja eficiente aproveitando cerca de 95% da biomassa da planta, ainda assim são gerados diversos resíduos durante o

processamento agrícola e industrial. Entre os principais subprodutos resultantes do cultivo e da transformação da cana destacam-se a palha, o bagaço, a torta de filtro, a levedura residual e, especialmente, a vinhaça. Esses resíduos podem ser classificados como sólidos, líquidos ou semissólidos e possuem composição variada, com potencial tanto para aproveitamento agrônômico quanto para impactos ambientais, caso sejam manejados inadequadamente (EMBRAPA, 2022; GASPAROTTO et al., 2019; DIAS, 2022).

O bagaço da cana, remanescente da etapa de moagem, representa cerca de 30% da massa da cana processada e é amplamente utilizado na cogeração de energia nas usinas, contribuindo para a autossuficiência energética do setor. Já a torta de filtro, subproduto da clarificação do caldo, é rica em fósforo e matéria orgânica, sendo comumente utilizada na adubação dos canaviais. As leveduras residuais, por sua vez, podem ser reaproveitadas na alimentação animal ou na produção de biomassa microbiana (UNICA, 2023).

#### **4.4.1. Vinhaça da Cana-de-Açúcar**

Resíduo com grande volume e relevância ambiental que pode ser chamado de vinhaça e também reconhecida como vinhoto, é um efluente líquido gerado na destilação do mosto alcoólico durante a produção do etanol. O processo de obtenção desse resíduo está esquematizado na Figura 6, que ilustra as principais etapas da produção de etanol, desde a limpeza e moagem da cana-de-açúcar até a destilação final, em que a vinhaça é gerada como subproduto (GASPAROTTO et al., 2019; CONAB, 2023).



**Figura 6 - Processo para obtenção da vinhaça**

Fonte: Autora, 2025.

Estima-se que, para cada litro de etanol produzido, sejam gerados média de 14 litros de vinhaça (Conab, 2024). Sua composição se dá majoritariamente por uma grande porcentagem de água sendo cerca de 93% a 95% e por uma fração significativa de matéria orgânica (M.O.) e nutrientes como potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e nitrogênio (N). A vinhaça proveniente da fermentação do melaço apresenta maior concentração de sólidos e nutrientes do que aquela originada do caldo de cana, devido à sua composição inicial mais concentrada além de apresentar também uma temperatura elevada, pH ácido, corrosividade e eutrofização quando despejados em corpos hídricos (EMBRAPA, 2022).

Segundo Silva (2017) a composição química da vinhaça depende de alguns fatores como origem da matéria prima, da maturação da cana-de-açúcar, da técnica adotada no processo da fermentação, do tipo de levedura e do método de destilação. As principais características físico-químicas do subproduto, de acordo com o tipo de mosto utilizado na fermentação está apresentada na Tabela 2:

Apesar de seu reconhecido potencial agrônomo, a vinhaça apresenta riscos ambientais relevantes, como a salinização e compactação do solo, contaminação de corpos hídricos, emissão de gases de efeito estufa e a proliferação de microrganismos patogênicos (ANA, 2022). A presença de matéria orgânica em elevada concentração, aliada à umidade do solo após a aplicação, pode favorecer o crescimento de

microrganismos como *Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Clostridium perfringens* e outros coliformes fecais, especialmente quando a vinhaça é proveniente de processos com baixa eficiência sanitária, o que representa risco à saúde humana e animal caso ocorra a contaminação de águas superficiais ou subterrâneas (FIALHO et al., 2019). No aspecto biológico, embora o aporte de matéria orgânica possa inicialmente estimular a atividade microbiana do solo, aplicações sucessivas sem o devido planejamento técnico podem levar a desequilíbrios na comunidade microbiana, com redução da diversidade biológica e proliferação de espécies indesejadas (FERNANDES, OLIVEIRA, 2023; DIAS, 2022).

**Tabela 2. Principais características físico-químicas da vinhaça a partir de diferentes mostos**

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 – 100	80 – 100	80 – 100
(1) DBO (mg/L O <sub>2</sub> )	25.000	6.000 – 16.500	19.000 – 20.000
(2) DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg/L)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg/L)	60.000	20.500	39.000
Sólidos fixos (mg/L)	21.500	3.200	13.700
Nitrogênio (mg/L N)	1.560 – 2.110	150 – 700	480 – 1.200
Fósforo (mg/L P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	100 – 290	10 – 210	9 – 200
Potássio (mg/L K <sub>2</sub> O)	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg/L CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg/L MgO)	420 – 1.520	200 – 490	580 – 700
Sulfato (mg/L SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	6.400	600 – 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg/L C)	11.200 – 22.900	2.700 – 13.300	7.160 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,07 – 27,11	16,4 – 18,5
Matéria orgânica (mg/L)	63.400	17.800	42.000
Subst. redutoras (mg/L)	9.500	700 – 2.300	3.800

(1) DBO = Demanda Bioquímica de oxigênio

(2) DQO = Demanda Química de oxigênio

Fonte: Elaborado pelo autor com base em ANA, 2022.

A análise comparativa dos valores apresentados na Tabela de composição físico-química da vinhaça com a prática de campo revela que, embora a concentração média

de potássio registrada em estudos (variando entre 1.200 e 2.500 mg L<sup>-1</sup>) esteja de acordo com a literatura técnica, a aplicação real no campo tende a variar significativamente. Essa variação está diretamente relacionada ao Plano de Aplicação de Vinhaça (PAV), que define a dose ideal considerando a capacidade de retenção e absorção do solo, as exigências nutricionais da cultura e a disponibilidade hídrica. Em solos argilosos, por exemplo, as doses tendem a ser mais elevadas devido à maior capacidade de troca catiônica, enquanto em solos arenosos, aplicações mais baixas são adotadas para evitar lixiviação e salinização. Da mesma forma, a condutividade elétrica média encontrada (0,8 a 1,5 dS m<sup>-1</sup>) pode ser aceitável em áreas bem drenadas, mas exige redução de volume e diluição em áreas com drenagem limitada, a fim de mitigar riscos de salinização e impactos à microbiota do solo. Assim, a prática no campo deve sempre associar a análise laboratorial da vinhaça à caracterização físico-química do solo para garantir a eficiência agrônômica e evitar impactos ambientais (FIALHO, 2019; ANA, 2022, CETESB, 2005).

Com isso, a elevada carga orgânica da vinhaça contribui também para o aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), favorecendo a geração de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), sobretudo em condições anaeróbias, o que agrava o desequilíbrio climático e compromete a fertilidade e a microbiota do solo destacando a necessidade de utilizar medidas mitigadoras como forma de manejo (FERNANDES, OLIVEIRA, 2023; DIAS, 2022; ALMEIDA et al., 2025).

Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de estratégias de gestão ambiental integrada para os resíduos da agroindústria canavieira, visando à maximização dos benefícios econômicos e agrônômicos e à minimização dos passivos ambientais, dentro de um modelo de produção sustentável.

#### **4.4.2. Efeitos da Vinhaça no Solo**

De acordo com a literatura, o método de aplicação da vinhaça no solo mais utilizado no Brasil, principalmente no Estado de São Paulo, é a fertirrigação com a vinhaça *in natura* (ANA, 2022). Essa aplicação pode promover melhorias na fertilidade do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes e contribuindo para a elevação da capacidade de troca catiônica (CTC) e a capacidade de retenção de água, além de estimular a atividade microbiana, contudo, é necessário ter um manejo criterioso com doses adequadas para que essas condições sejam alcançadas (EMBRAPA, 2024).

Diante disso, a aplicação do resíduo no solo agrícola, embora amplamente adotada como prática de reaproveitamento de resíduos da agroindústria canavieira, vem sendo objeto de crescente preocupação por parte da comunidade científica e de órgãos ambientais (GASPAROTTO et al., 2019). Pesquisas apontam que o uso indiscriminado desse subproduto pode desencadear alterações significativas nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, comprometendo sua qualidade e sustentabilidade a longo prazo (DIAS, 2022; FERNANDES; OLIVEIRA, 2023, ALTOÉ, 2021).

Um dos principais impactos negativos quanto à disposição da vinhaça, está associado ao aumento da salinidade do solo, especialmente em áreas que apresentam características de baixa capacidade de drenagem e solos arenosos. De acordo com Gasparotto et al. (2019), a aplicação contínua de vinhaça pode causar acúmulo de potássio, sódio e outros cátions, afetando o equilíbrio iônico do solo e resultando na redução da disponibilidade de outros nutrientes essenciais às plantas. Esse excesso de sais também pode provocar alterações na condutividade elétrica (CE), comprometendo o desenvolvimento radicular e a absorção de água pelas culturas (LIMA et al., 2020).

Corroborando, Lance et al. (2023), em um experimento conduzido em Argissolo com cultivo de cana-de-açúcar, foram avaliados os efeitos da aplicação de vinhaça sobre a CE e o teor de potássio no solo na camada do solo de 0–20 cm, onde os tratamentos incluíram a fertirrigação com vinhaça localizada nos sulcos de plantio, denominado Vlocal, aplicação em área total-Vtotal e uma testemunha sem aplicação de vinhaça. Os resultados do experimento em 24 horas foram que a CE aumentou de 0,10 dS/m (testemunha) para 1,43 dS/m (Vlocal) e 0,37 dS/m (Vtotal), indicando significativo acúmulo de sais solúveis. Na análise após 30 dias, os valores ainda se mantinham elevados, com 1,20 dS/m no Vlocal e 0,36 dS/m no Vtotal, refletindo o efeito persistente da aplicação. Quanto ao teor de potássio no solo, os valores iniciais foram de 2,37 mg/kg (testemunha), 4,87 mg/kg (Vlocal) e 4,04 mg/kg (Vtotal), permanecendo elevados os resultados mesmo após 30 dias. Esses dados evidenciam que o uso da vinhaça, especialmente quando aplicada de forma localizada, pode provocar salinização do solo e desequilíbrio iônico, exigindo cuidados técnicos quanto à dose e frequência de aplicação.

Neste mesmo sentido, o autor Fialho et al. (2019) também afirma em sua pesquisa que em solos com característica argilosa quando submetido à aplicação de vinhaça por fertirrigação, observou-se elevação significativa da CE (de 0,28 para 0,63 dS m<sup>-1</sup>), bem como o aumento do teor de potássio de 0,19 para 0,44 cmolc kg<sup>-1</sup>.

Em pesquisa desenvolvida por Silva et al. (2019) confirmam que o uso da vinhaça pode alterar significativamente a concentração de nutrientes no solo, com destaque para esses dois componentes (potássio e o magnésio). Em solos tratados com vinhaça concentrada (T3), os teores de potássio alcançaram valores de até 97,00 mg/L na profundidade de 0–20 cm, enquanto na vinhaça in natura (T1), os valores foram de 74,83 mg/L, superando os teores observados nos tratamentos com ureia (50,67 mg/L) e testemunha (45,83 mg/L). Já em camadas mais profundas, como entre 20–40 cm, os teores de potássio no tratamento com vinhaça concentrada ainda atingiram 30,20 a 48,17 mg/L, demonstrando a persistência dos nutrientes no perfil do solo. Quanto ao magnésio, os valores variaram entre 0,75 e 1,05 cmolc/dm<sup>3</sup> nos tratamentos com vinhaça, enquanto tratamentos com ureia e testemunha apresentaram concentrações menores em várias profundidades. Esses resultados indicam que, apesar do potencial de enriquecimento do solo, o uso recorrente da vinhaça pode favorecer o acúmulo de determinados nutrientes, implicando em riscos de desequilíbrio nutricional e eventual lixiviação para camadas mais profundas (SILVA et al., 2019).

Embora diversas pesquisas relatem os benefícios agronômicos decorrentes da aplicação de vinhaça no solo, como o incremento de matéria orgânica e o aumento da disponibilidade de macronutrientes, esses efeitos positivos devem ser analisados com cautela. Diante disso, Rosa et al. (2019) e Vendruscolo et al. (2018), por exemplo, pesquisaram a aplicação do subproduto (vinhaça da cana-de-açúcar) em um Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico cultivado com cana-de-açúcar mostrando que elevou os teores de cálcio e magnésio em até 300% e os de potássio em até 230%, quando comparados a áreas sem aplicação. Apesar desses ganhos aparentes na fertilidade, o acúmulo contínuo de nutrientes pode favorecer processos de salinização, lixiviação para camadas mais profundas e desequilíbrio nutricional, especialmente quando não há um manejo adequado que considere as características do solo como a capacidade de absorção do solo e as exigências da cultura. Assim, mesmo efeitos inicialmente

benéficos podem se converter em impactos negativos ao ambiente, caso o manejo da vinhaça não seja criteriosamente monitorado.

Dessa forma, a aplicação de vinhaça pode impactar a decomposição da palhada remanescente da cana-de-açúcar. Em uma pesquisa conduzida por Andreotti et al. (2015) verificaram que a aplicação de doses elevadas de vinhaça (acima de  $137 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) promoveu a imobilização de nutrientes pela microbiota do solo, reduzindo a taxa de decomposição do palhicho. Essa dinâmica foi atribuída à baixa relação C:N da vinhaça, que supre diretamente as necessidades microbianas, diminuindo a necessidade de mineralização da palha. O estudo também demonstrou que, nos primeiros 90 dias após a aplicação, a decomposição ocorreu mais intensamente, sendo posteriormente desacelerada, o que reforça a forte influência da vinhaça e das condições climáticas como a temperatura e umidade sobre a atividade biológica do solo. Esses resultados destacam a importância do monitoramento da relação C:N dos resíduos e das doses aplicadas, a fim de evitar acúmulos de material vegetal e alterações na ciclagem de nutrientes no sistema agrícola.

Nesse contexto, a ANA (2018) ressalta a necessidade constante de realização de análise físico-química da vinhaça que será aplicada no solo, além da análise do solo para saber a necessidade de adubação, pois o solo é o meio pelo qual as plantas, através da absorção radicular, obtêm os elementos minerais essenciais.

Das pesquisas realizados pela ANA (2022), observou-se que inicialmente, nos primeiros dez dias após a aplicação da vinhaça, pode haver uma queda no teor de pH do solo; pois a vinhaça possui pH naturalmente ácido (geralmente entre 4,0 e 5,0), devido à presença de ácidos orgânicos e compostos voláteis gerados durante o processo de fermentação da cana-de-açúcar. Após isso, ocorre uma elevação brusca devido a decomposição da matéria orgânica presente na vinhaça por microrganismos, levando a produzir cátions básicos como  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Na}^+$  que por vez esses cátions substituem os íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  nos coloides do solo, reduzindo a acidez e aumentando o pH, tornando o solo alcalino (condição que favorece a absorção de nutrientes pelas plantas, já que o pH influencia diretamente o movimento dos íons no solo).

Também se destacam os efeitos sobre a emissão de gases de efeito estufa. Lopes et al. (2017) relataram em pesquisa os aumentos significativos no fluxo de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) após a aplicação de  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça em argissolo amarelo distrófico, com valores de até  $195 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  cinco horas após aplicado, enquanto áreas sem aplicação apresentaram emissões próximas de zero. Considerando que o  $\text{N}_2\text{O}$  possui elevado potencial de aquecimento global, a intensificação dessas emissões representa um desafio ambiental considerável.

No estudo realizado no estado de São Paulo por Fuess (2021) observou-se uma alta emissão de metano em decorrência a conversão incontrolada da M.O. no solo alcançando resultados de até  $732,10 \text{ kg CO}_2\text{-eq ha}^{-1}$ , em áreas fertirrigadas com vinhaça in natura. Esse valor é equivalente às emissões anuais geradas por áreas com densidade populacional de até 293 habitantes por hectare, o que indica que os benefícios agrônômicos da aplicação da vinhaça não justificam as perdas ambientais associadas.

#### **4.4.3. Efeitos da Vinhaça nos Recursos Hídricos**

A aplicação da vinhaça no solo, quando realizada sem critérios técnicos ou em volumes excessivos, representa um significativo risco de contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Esse risco decorre principalmente da elevada carga orgânica e de nutrientes como presentes na vinhaça, especialmente potássio, nitrogênio, fósforo e compostos orgânicos solúveis. Quando aplicada em solos com baixa capacidade de retenção ou durante períodos chuvosos, a vinhaça pode ser lixiviada para o lençol freático ou escoar superficialmente para corpos d'água, comprometendo sua qualidade (GASPAROTTO et al., 2019; ANA, 2022).

Uma pesquisa conduzida por Mariano (2016), a aplicação de vinhaça elevou as concentrações de nitrato nas águas subterrâneas para  $52,80 \text{ mg/L}$  (posto 1) e  $39,60 \text{ mg/L}$  (posto 2), ultrapassando o limite de  $10 \text{ mg/L}$  estabelecido pela Portaria n.º 518/2004 do Ministério da Saúde para água potável. Esse aumento está associado tanto às altas concentrações de nitrato presentes quanto à conversão de nitrogênio orgânico e amônia em nitrato via nitrificação. De forma semelhante, Jain et al. (2005) observaram concentrações de  $71,00 \text{ mg/L}$  e  $83,50 \text{ mg/L}$  após aplicação de vinhaça tratada em reator anaeróbio em áreas de cultivo de arroz e trigo, representando

aumento superior a 100% em relação aos valores iniciais e tornando a água imprópria para consumo humano.

Além disso, a aplicação excessiva de vinhaça aumenta o risco de contaminação das fontes de água por meio da lixiviação de nitratos e fosfatos, principalmente em áreas com declive acentuado ou com solos arenosos que contém características de baixa capacidade de retenção. Estudos realizados pela ANA (2022) e por Correia (2017), demonstram que a presença desses compostos em nas águas pode contribuir para processos de eutrofização e perda da biodiversidade aquática.

A ANA (2022) ainda afirma que a vinhaça possui alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), que, ao atingirem corpos d'água, provocam rápida depleção de oxigênio dissolvido. Esse fenômeno pode levar à mortandade de peixes, proliferação de algas e bactérias anaeróbias, além da eutrofização. Estudos indicam que o fósforo presente na vinhaça é altamente reativo e, quando transportado para os cursos d'água, atua como limitante para o crescimento de organismos aquáticos, afetando negativamente os ecossistemas (MACHADO et al., 2020).

Além da contaminação direta por nutrientes e matéria orgânica, há também o risco de poluição por compostos tóxicos resultantes da decomposição da vinhaça, como fenóis e substâncias nitrogenadas. Em regiões de solos arenosos, a percolação da vinhaça pode transportar esses compostos para aquíferos subterrâneos, agravando o risco à saúde humana, especialmente em áreas onde há captação de água para abastecimento (LIMA et al., 2020; COSTA, 2021).

De acordo com Oliveira et al. (2021), a aplicação de vinhaça acima da capacidade de retenção e assimilação do solo leva à saturação da solução do solo, favorecendo a migração de nutrientes além da zona radicular, com consequências diretas para a qualidade da água subterrânea. Estudos comparativos em solos agrícolas com elevada permeabilidade ( $K \approx 150$  cm/h) mostram que aplicações anuais de 200 m<sup>3</sup>/ha podem gerar concentrações de nitrato que atingem até 50 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L no lençol freático, que são níveis significativamente acima do padrão natural, onde geralmente é inferior a 1 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/L em áreas sem adição de fertilizantes (DIAS, 2022; ARAÚJO et al., 2021). Esses efeitos são ainda mais pronunciados em áreas que não seguem o

Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV), conforme preconizado pela CETESB (2005), ou que desconsideram o balanço hídrico e a declividade do terreno.

Além disso, a poluição da água por vinhaça é considerada mais agressiva que o esgoto doméstico, dada sua elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), afetando gravemente a fauna aquática, a flora submersa e tornando a água imprópria para o consumo humano (FIALHO et al., 2019). Neste sentido, percebe-se que o impacto é agravado durante períodos de chuva intensa, que contribuem para o escoamento superficial e a percolação dos compostos presentes na vinhaça. Tais compostos, ao atingirem corpos d'água e reservatórios como represas hidrelétricas e poços artesianos, comprometem a qualidade da água potável e a saúde da população rural, que muitas vezes consome essa água sem tratamento adequado (FIALHO et al., 2019). Além disso, o acúmulo de M.O nas águas pode favorecer não só processos de eutrofização e desoxigenação, acarretando mortandade de peixes, proliferação de insetos, mas também agravamento de doenças endêmicas (Quadro 1.).

**Quadro 2. Principais Efeitos da Vinhaça nos Recursos Hídricos**

<b>Impacto Identificado</b>	<b>Solo Natural</b>	<b>Solo Alterado</b>	<b>Consequência Ambiental</b>
Lixiviação de nitratos e fosfatos	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> < 10 mg/L (padrão potabilidade); P < 0,1 mg/L	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> até 35 mg/L; P até 1,5 mg/L	Eutrofização e perda da biodiversidade aquática
Elevada DBO e DQO	DBO < 5 mg/L; DQO < 20 mg/L	DBO até 3.000 mg/L; DQO > 10.000 mg/L	Redução do oxigênio dissolvido e mortandade de peixes
Percolação em solos arenosos	Nitrato - 5 mg/L em águas subterrâneas	Até 25 mg/L	Contaminação de aquíferos e lençóis freáticos
Presença de fenóis e nitritos	Fenóis < 0,5 µg/L; NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> < 0,1 mg/L	Fenóis > 10 µg/L; NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> até 1,2 mg/L	Potencial tóxico para flora, fauna e saúde humana
Escoamento superficial em áreas inclinadas	Sólidos suspensos < 5 mg/L	Até 150 mg/L	Poluição de rios, represas e poços artesianos
Aplicação sem controle técnico	Parâmetros dentro dos padrões da Resolução CONAMA nº 357/2005	Parâmetros fora dos padrões, com presença de coliformes termotolerantes acima de 1.000 NMP/100 mL	Inviabilidade da água para consumo e proliferação de doenças

Fonte: Elaborado pela autora com base em ANA (2022), Fialho et al. (2019), Lima et al. (2020), Costa (2021), Correia (2021), Resolução CONAMA nº 357/2005.

Diante disso, os autores defendem a necessidade de maior fiscalização ambiental e cumprimento da legislação ambiental vigente, especialmente dos artigos 6º, 196 e 225 da Constituição Federal, que tratam do direito à saúde, ao meio ambiente equilibrado e ao controle das atividades poluidoras.

#### **4.4.4. Considerações Ambientais Sobre a Aplicação da Vinhaça na Literatura**

Diversos autores como Gasparotto et al. (2019), Dias (2022), Fialho et al. (2019), Correia (2017) e ANA (2022) reforçam a necessidade de avaliar os impactos ambientais da vinhaça sob diferentes perspectivas — agronômica, ecológica e socioeconômica — a fim de garantir seu uso sustentável. Assim como Silva e Miziara (2015) discutem os impactos ambientais negativos do cultivo de cana-de-açúcar, incluindo a contaminação do solo e da água, além da redução da biodiversidade. Esses dados são cruciais para entender as consequências da disposição inadequada da vinhaça. Já Andrade (2016) investiga a dinâmica do carbono e nitrogênio em solos irrigados de cana-de-açúcar, evidenciando que a conversão de vegetação nativa em monocultivos pode levar a mudanças prejudiciais nas propriedades do solo.

Por sua vez, Silva et al. (2020) propõem estratégias mais sustentáveis para o aproveitamento dos resíduos gerados pela agroindústria canavieira, como a recuperação de áreas degradadas e a biorremediação, com o objetivo de minimizar os impactos negativos da vinhaça. De forma complementar, Hilgemberg e Sottomaior (2017) destacam os potenciais agronômicos da vinhaça, especialmente seu uso como fertilizante na própria cultura da cana-de-açúcar, mas alertam para a importância de um manejo adequado para evitar efeitos colaterais adversos no solo e nos recursos hídricos enfatizando que as quantidades não devem ultrapassar a capacidade de retenção de íons do solo.

Neste mesmo sentido, Wissmann, Assis e Shikida (2017) enfatizam que a análise dos impactos da vinhaça deve considerar não apenas os aspectos ambientais, mas também os econômicos e sociais, tendo em vista que a disposição inadequada do resíduo pode gerar efeitos poluentes significativos e comprometer a sustentabilidade da cadeia produtiva da cana-de-açúcar. Gilio e Castro (2017) reiteram essa visão integrada ao defender a adoção de estratégias interdisciplinares e baseadas em evidências técnicas, visando mitigar os riscos ambientais associados à aplicação contínua da vinhaça em áreas agrícolas sem acompanhamento técnico adequado.

#### 4.4.5. Diretrizes Para o Uso Sustentável Critérios Técnicos de Aplicação da Vinhaça

O uso inadequado da vinhaça no solo pode gerar impactos ambientais significativos, o que tem motivado a formulação de diretrizes e alternativas sustentáveis para seu manejo em diferentes contextos produtivos. Essas estratégias visam garantir o reaproveitamento do resíduo sem comprometer a qualidade ambiental e os recursos naturais (FUESS et al., 2017).

A definição de uma dose segura para aplicação não é padronizada, pois depende de variáveis edafoclimáticas e de manejo, como tipo e capacidade de drenagem do solo, necessidades nutricionais da cultura, composição química da vinhaça (que varia conforme o processo industrial), histórico de uso da área e condições climáticas, uma vez que períodos chuvosos favorecem a lixiviação e a contaminação hídrica (FIALHO et al., 2019).

As normas vigentes reforçam a adequação das doses às condições locais. A CETESB P4.231/2005 recomenda aplicação máxima de  $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de vinhaça in natura, ajustada conforme teor de potássio e capacidade de retenção do solo, evitando-se períodos de chuva intensa ou solos saturados. De forma complementar, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022) estabelece que o Plano de Aplicação de Vinhaça (PAV) contemple análise físico-química do resíduo e do solo, ajuste da dose, rotação de talhões e prevenção de aplicações consecutivas na mesma área.

Estudos indicam que aplicações contínuas superiores a  $150\text{--}180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  elevam a condutividade elétrica do solo e o risco de salinização, sobretudo em solos de baixa drenagem (GASPAROTTO et al., 2019; SILVA et al., 2019; LANCE et al., 2023). Assim, recomenda-se análise prévia do solo e da vinhaça, definição da dose com base no teor de potássio (não excedendo  $150 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), aplicação fracionada — como três parcelas de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  com intervalos de 20–30 dias — em períodos sem previsão de chuva, rotação de áreas a cada safra e monitoramento pós-aplicação de condutividade elétrica, pH, potássio ( $\text{K}^+$ ) e sódio ( $\text{Na}^+$ ) no solo.

Além da fertirrigação, alternativas tecnológicas têm sido adotadas para o aproveitamento da vinhaça. A digestão anaeróbia possibilita a produção de biogás,

reduzindo a carga orgânica do resíduo e mitigando emissões de gases de efeito estufa (FERNANDES et al., 2023; MOREIRA; ZAIAT, 2016). Outra alternativa é o uso como substrato para produção de compostos de alto valor agregado, como ácidos graxos voláteis, por fermentação anaeróbica. Essa abordagem transforma a vinhaça em insumo de interesse comercial, com aplicações nas indústrias farmacêutica, alimentícia e de biocombustíveis. Almeida et al. (2025) demonstram que, associada a resíduos lácteos, a vinhaça da cana-de-açúcar pode atingir rendimentos de até 2,32 g/L de ácido caprótico, reforçando a integração de conceitos de biorrefinaria e economia circular na cadeia sucroenergética.

A aplicação localizada, em substituição à distribuição em área total, tem se mostrado eficiente na redução da lixiviação e salinização, direcionando nutrientes para a zona radicular e otimizando a absorção (BARRETO et al., 2015). A EMBRAPA (2015) recomenda a integração com práticas como rotação de culturas, uso de cobertura vegetal e adoção de indicadores ambientais de qualidade do solo e da água, visando avaliar os efeitos de médio e longo prazo.

Em síntese, a segurança do uso agrícola da vinhaça depende do equilíbrio entre dose, frequência, tipo de solo e manejo adotado. A faixa segura, segundo a legislação e a literatura científica, situa-se entre 100 e 200 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. A adoção do PAV, associada a um sistema de monitoramento contínuo e a tecnologias apropriadas, é essencial para prevenir impactos ambientais e assegurar a sustentabilidade dessa prática.

## 5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise sistemática da literatura científica dos principais resultados obtidos na revisão bibliográfica acerca dos impactos ambientais negativos da disposição da vinhaça da cana-de-açúcar em solos agrícolas no Brasil, foram sistematizados em quatro eixos temáticos: os efeitos da vinhaça no solo, os impactos sobre os recursos hídricos, as diretrizes para o uso sustentável desse subproduto e os dispositivos legais que regulamentam sua utilização e descarte.

A elevação da condutividade elétrica (CE) e da concentração de cátions como  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , documentada em diversas pesquisas pelos autores ANA (2022), Andreotti et al. (2015), Rosa et al. (2019), Vendruscolo et al. (2018), Silva et al. (2019) e Fialho et al. (2019) apontam para um risco concreto de salinização dos solos, principalmente em áreas com baixa capacidade de drenagem. Tal acúmulo pode comprometer a absorção radicular de água e nutrientes, dificultar o desenvolvimento das plantas e induzir desequilíbrios no sistema de troca de cátions, afetando diretamente a estrutura química do solo. Esses efeitos adversos, ainda que originados por um resíduo rico em nutrientes, evidenciam que o potencial fertilizante da vinhaça não é sinônimo de uso indiscriminado, e sim de uma aplicação tecnicamente orientada.

Adicionalmente, os dados indicam que alterações nos níveis de pH do solo — com alterações constantes de acidez para alcalinidade— afetam a microbiota e as reações químicas do solo. A curto prazo, essas alterações podem favorecer a solubilização dos nutrientes presentes no solo, mas, a longo prazo, causam desequilíbrios biogeoquímicos e favorecem a proliferação de microrganismos patogênicos, afetando o ecossistema edáfico.

Outro ponto crítico é o impacto sobre o ciclo do carbono e do nitrogênio, com registros de aumento expressivo nas emissões de óxido nitroso ( $N_2O$ ) e metano ( $CH_4$ ) após a aplicação da vinhaça desde as primeiras horas de aplicação, especialmente quando aplicados na forma in natura como comumente são utilizados. Esses gases possuem elevado potencial de aquecimento global, o que coloca em pauta a contradição entre o uso da vinhaça como insumo agrícola e os compromissos ambientais assumidos pelo país em termos de mitigação de emissões. Assim, o manejo inadequado da

vinhaça pode inverter sua função: de subproduto útil que contribui com a adição de M.O no solo para causador de impactos ambientais e potenciador climático.

Do ponto de vista ecológico, o uso contínuo da vinhaça também tem implicações na dinâmica da M.O e na ciclagem de nutrientes. A baixa relação C:N da vinhaça pode interferir na decomposição de resíduos vegetais como o palhico da cana-de-açúcar, reduzindo a taxa de decomposição natural e, por consequência, o aproveitamento dos nutrientes pelas plantas. A imobilização de nutrientes pela microbiota foi evidenciada em pesquisa pelo autor Andreotti et al. (2015) em aplicações com doses superiores a  $137 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , o que reforça a importância de se respeitar os limites de carga orgânica do solo.

Em termos de política ambiental, a revisão mostra que há avanços normativos importantes, porém ainda insuficientes. A Norma Técnica CETESB P4.231/2005 e a Portaria nº 323/1978 permanecem como referências, mas apresentam limitações frente à diversidade dos solos brasileiros, dos regimes pluviométricos e dos biomas do país. A ausência de diretrizes regionais específicas e limitantes atualizados para a aplicação de vinhaça reduz a eficácia da regulação atual e compromete o controle dos impactos ambientais. Além disso, verifica-se escassez de indicadores de monitoramento ambiental e de ferramentas de gestão adaptadas às realidades locais.

Portanto, o uso sustentável da vinhaça depende não apenas da sua composição química e do tipo de solo, mas de um conjunto articulado de ações, que envolvem: a análise prévia do solo e da vinhaça que será aplicada, a elaboração de um Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV), a capacitação técnica dos produtores rurais, a adoção de boas práticas agrícolas, o investimento em tecnologias de tratamento e reaproveitamento, além do fortalecimento da fiscalização ambiental constante.

## 6.CONCLUSÃO

A análise das publicações técnico-científicas e legislações demonstrou que, embora a vinhaça da cana-de-açúcar apresente elevado potencial agrônomo devido à sua composição rica em nutrientes e matéria orgânica, o uso indiscriminado e em doses excessivas pode ocasionar impactos ambientais relevantes, como salinização, contaminação de recursos hídricos, emissões de gases de efeito estufa ( $N_2O$  e  $CH_4$ ) e desequilíbrios na microbiota do solo.

Seu uso sustentável é viável desde que haja manejo criterioso, respeitando a capacidade de retenção e absorção do solo, as condições ambientais locais e as diretrizes técnicas vigentes. Recomenda-se a aplicação sistemática do Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV), a observância da Norma CETESB P4.231/2005, o monitoramento ambiental contínuo e a capacitação de produtores rurais, aliados ao fortalecimento da fiscalização. O estudo evidencia a necessidade de atualização das normas, atualmente defasadas frente às novas tecnologias e aos desafios ambientais contemporâneos, de forma a oferecer diretrizes mais abrangentes, regionais e integradas às políticas públicas.

A diversificação do aproveitamento da vinhaça, com destaque para a digestão anaeróbia para produção de biogás e a conversão em compostos de maior valor agregado, como o ácido capróico, representa alternativa promissora para reduzir impactos, gerar energia e fortalecer o conceito de biorrefinarias no setor sucroenergético. Essas práticas dialogam diretamente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6, 12, 13 e 15), promovendo conservação de recursos hídricos, consumo responsável e mitigação das mudanças climáticas.

Por fim, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise dos efeitos cumulativos da vinhaça em diferentes solos, culturas e biomas, especialmente a longo prazo, e desenvolvam indicadores específicos de monitoramento. Compreender os limites e potencialidades desse subproduto é essencial para compatibilizar a produtividade agroindustrial com a conservação ambiental, em um modelo de produção mais resiliente e alinhado à economia circular.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. de; LIMA, F.; GAVAZZA, S.; MENEZES, O. dos. *Produção de ácido capróico a partir de resíduos agroindustriais por fermentação anaeróbia em biorreatores de bancada*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 14, n. 7, p. 432–445, 2025. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/7014/3691>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ALMEIDA, Rodrigues; J. F. et al. Avaliação dos impactos ambientais do etanol utilizando a Matriz de Leopold. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 4, n. 2, p. 98–115, 2015. 18(4), 1443–1459. <https://doi.org/10.5902/2236117015157>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/15157>.

ALTOÉ, M. E. Avaliação da fertilidade e efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas do solo cultivado com cana-de-açúcar. 2021. 114 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2021. Acesso em: 5 jun. 2025.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Manejo e cuidados no uso da vinhaça na fertirrigação*. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: [https://capacitacao.ana.gov.br/images/curso\\_manejo\\_e\\_cuidados\\_no\\_uso\\_da\\_vinha\\_ca\\_fertirrigacao/Manejo\\_de\\_vinhaca.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/images/curso_manejo_e_cuidados_no_uso_da_vinha_ca_fertirrigacao/Manejo_de_vinhaca.pdf). Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/cursos>. Acesso em: 2 jun. 2025.

ANDRADE, C. B. Dinâmica do carbono e nitrogênio em solos irrigados com vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001100005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/DcsxJF493KTxzjC33vpmLqz/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

ANDREOTTI, M. et al. Palhada remanescente e nutrientes acumulados em função da aplicação de vinhaça e tempo de decomposição. Bioscience Journal, Uberlândia, v. 31, n. 4, p. 1104-1114, 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22426/16145>. DOI: <https://doi.org/10.14393/BJ-v31n2a2015-22426>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ARAÚJO, Geraldo J. F. de; OLIVEIRA, Sonia Valle Walter Borges de. **Vinhaça: conceito, desafios e oportunidades: uma revisão bibliográfica**. *Revista de Agronegócio - Reagro*, Jales, v. 10, n. 1, p. 52-62, jan./jun. 2021. Disponível em: [https://www.fatecjales.edu.br/revista-agro/images/artigos/1a\\_edicao/volume10-1/vinhaca-conceito-desafios-e-oportunidades-uma-revisao-bibliografica.pdf](https://www.fatecjales.edu.br/revista-agro/images/artigos/1a_edicao/volume10-1/vinhaca-conceito-desafios-e-oportunidades-uma-revisao-bibliografica.pdf). Acesso em: 11 ago. 2025.

BARRETO, R. C.; PAZIANI, S. F.; PERES, A. M. *Gestão ambiental da vinhaça na agroindústria canavieira: estudo de caso em uma unidade do setor sucroalcooleiro*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 10, p. 981–987, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/15174522-102487>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Fr4PtJxb5psRPVVJfC6SXHn>. Disponível em: Acesso em: 7 jul. 2025.

BERNAL, Andressa Picioneri. Bioprodução de hidrogênio e metabólitos solúveis em reatores anaeróbios de leito granular expandido mesofílicos e cultura mista utilizando vinhaça de cana-de-açúcar como substrato orgânico. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. Doi: <https://doi.org/10.11606/D.18.2019.tde-31052019-151032>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-31052019-151032/pt-br.php>. Acesso em: 2 jun. 2025.

BRASIL. Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Código das Águas. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1930-1949/D24643.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1930-1949/D24643.htm). Disponível em: [http://planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d24643compilado.htm](http://planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643compilado.htm). Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305/2010 Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 24 dez. 2010. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm). Acesso em: 11 ago. 2025.

BRASIL. Decreto-Lei nº 1.413, de 14 de agosto de 1975. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais. Diário Oficial da União, Brasília, 15 ago. 1975. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/1965-1988/del1413.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/del1413.htm). Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Decreto-Lei nº 303, de 23 de fevereiro de 1967. Dispõe sobre a criação do Conselho Nacional de Controle da Poluição Ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 fev. 1967. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto-lei/1965-1988/del0303.htm#:~:text=Del0303&text=DECRETO%2DLEI%20N%C2%BA%20303%2C%20DE%2028%20DE%20FEVEREIRO%20DE%201967.&text=Cria%20o%20Conselho%20Nacional%20de,Ambiental%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs.&text=Ocasione%20danos%20%C3%A0%20fauna%20e%20%C3%A0%20flora](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/del0303.htm#:~:text=Del0303&text=DECRETO%2DLEI%20N%C2%BA%20303%2C%20DE%2028%20DE%20FEVEREIRO%20DE%201967.&text=Cria%20o%20Conselho%20Nacional%20de,Ambiental%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAs.&text=Ocasione%20danos%20%C3%A0%20fauna%20e%20%C3%A0%20flora). <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bra25137.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2025. Acesso em: 2 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, 3 ago. 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs#:~:text=A%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Res%C3%ADduos,o%20tema%20no%20Congresso%20Nacional>. Acesso em: 2 jun. 2025. Acesso em: 2 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 5.318, de 26 de setembro de 1967. Institui a Política Nacional de Saneamento. Diário Oficial da União, Brasília, 27 set. 1967. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1950-1969/l5318.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/l5318.htm). Acesso em: 10 jun. 2025. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 7.960, de 21 de dezembro de 1989. Dispõe sobre a prisão temporária, incluindo casos de envenenamento de água potável. Diário Oficial da União, Brasília,

22 dez. 1989. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l7960.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l7960.htm). Acesso em: 10 jun. 2025. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, 9 jan. 1997. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm). Acesso em: 10 jun. 2025. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente. Diário Oficial da União, Brasília, 13 fev. 1998. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9605.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9605.htm). Acesso em: 10 jun. 2025. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Cana-de-açúcar: importância econômica e produção no Brasil. Brasília: MAPA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura>. Acesso em: 02 julho de. 2025.

BRASIL. Portaria nº 124, de 20 de agosto de 1980. Estabelece normas de prevenção da poluição hídrica para localização de indústrias. Diário Oficial da União, Brasília, 21 ago. 1980. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MINTER/PT124.200880.PDF>. Acesso em: 20 julho de. 2025.

BRASIL. Portaria nº 158, de 3 de novembro de 1980. Dispõe sobre o lançamento de efluentes de destilarias em coleções hídricas. Diário Oficial da União, Brasília, 4 nov. 1980. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MI/PT0158-031180.PDF>. Acesso em: 20 julho de. 2025.

BRASIL. Portaria nº 323, de 29 de novembro de 1978. Proíbe o lançamento do vinhoto em coleções hídricas. Diário Oficial da União, Brasília, 30 nov. 1978. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MI/PT0158-031180.PDF>. Acesso em: 20 julho de. 2025.

BRASIL. Resolução CNRH nº 15, de 11 de janeiro de 2001. Estabelece diretrizes para a gestão integrada das águas. Diário Oficial da União, Brasília, 12 jan. 2001. Disponível em: <https://www.sema.df.gov.br/documents/d/sema-df/resolu-c3-a7-c3-a3o-cnrh-n-c2-ba-15-de-2001-pdf>. Acesso em: 20 julho de. 2025.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>. Acesso em: 20 julho de. 2025.

Capacitação ANA. Manejo e Cuidados no Uso da Vinhaça na Fertirrigação (4h). 2018. Disponível em: [https://capacitacao.ana.gov.br/images/curso\\_manejo\\_e\\_cuidados\\_no\\_uso\\_da\\_vinhaca\\_fertirrigacao/Manejo\\_de\\_vinhaca.pdf](https://capacitacao.ana.gov.br/images/curso_manejo_e_cuidados_no_uso_da_vinhaca_fertirrigacao/Manejo_de_vinhaca.pdf). Acesso em: 11 jun. 2025.

CARDOSO, E. N. L. Impactos da aplicação da vinhaça por longo período em solos de textura argilosa e arenosa. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do

Solo) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2021. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-17032009-084006/publico/Erich\\_Collicchio.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-17032009-084006/publico/Erich_Collicchio.pdf). Acesso em: 2 jun. 2025.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Norma Técnica P 4.231: Vinhaça – critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola. São Paulo: CETESB, 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/agronegocio/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/vinhaca1.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2015 Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 27 maio de. 2025. Acesso em: 2 jun. 2025.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar – 4º levantamento, safra 2024/25. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 02 jul. 2025.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

CORREIA, J. E.; CHRISTOFOLETTI, C. A.; ANSOAR-RODRÍGUEZ, Y.; GUEDES, T. A.; FONTANETTI, C. S. Comet assay and micronucleus tests on *Oreochromis niloticus* (Perciforme: Cichlidae) exposed to raw sugarcane vinasse and to physicochemical treated vinasse by pH adjustment with lime (CaO). *Chemosphere*, v. 173, p. 494-501, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.025> 0045-6535/© 2016 Published by Elsevier Ltd. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/312963985\\_Comet\\_assay\\_and\\_micronucleus\\_tests\\_on\\_Oreochromis\\_niloticus\\_Perciforme\\_Cichlidae\\_exposed\\_to\\_raw\\_sugarcane\\_vinasse\\_and\\_to\\_physicochemical\\_treated\\_vinasse\\_by\\_pH\\_adjustment\\_with\\_lime\\_CaO](https://www.researchgate.net/publication/312963985_Comet_assay_and_micronucleus_tests_on_Oreochromis_niloticus_Perciforme_Cichlidae_exposed_to_raw_sugarcane_vinasse_and_to_physicochemical_treated_vinasse_by_pH_adjustment_with_lime_CaO). Acesso em: 3 jun. 2025.

COSTA, A. G. da. *A aplicação da vinhaça no solo e seus impactos ambientais*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Doi: <http://hdl.handle.net/11449/216777>. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/216777>. Acesso em: 13 jun. 2025.

DIAS, E. E. C. Efeito da vinhaça na qualidade ambiental e na labilidade de fósforo em solo cultivado com cana de açúcar. 2022. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48392>. Acesso em: 3 jun. 2025.

EMBRAPA. Adubação – resíduos alternativos. Brasília: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao>. Acesso em: 21 maio 2025. Acesso em: 2 jun. 2025.

EMBRAPA. Cana-de-açúcar: produção, correção e adubação com resíduos alternativos. Brasília: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica>. Acesso em: 02 jul. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional – BEN 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FAOLEX. Decreto nº 323 de 29 de novembro de 1978. Disponível em: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FERNANDES, K. S.; OLIVEIRA, M. A. Contaminação do solo por vinhaça: uma revisão dos impactos causados pela fertirrigação. *Revista Contribuciones a las ciencias*, 2023. Doi: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.7-067>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/372212276\\_Contaminacao\\_do\\_solo\\_por\\_vinhaça\\_uma\\_revisao\\_dos\\_impactos\\_causados\\_pela\\_fertirrigacao](https://www.researchgate.net/publication/372212276_Contaminacao_do_solo_por_vinhaça_uma_revisao_dos_impactos_causados_pela_fertirrigacao). Acesso em: 21 maio 2025.

FIALHO, M. L. et al. O impacto da vinhaça produzida pela cana-de-açúcar na produção de etanol – poluição ambiental. *Revista Agroecológica, Jales*, v. 10, n. 1, p. 1–13, 2019. ISSN: 2177-3645. Disponível em: [https://uniesp.edu.br/sites/\\_biblioteca/revistas/20190312105011.pdf](https://uniesp.edu.br/sites/_biblioteca/revistas/20190312105011.pdf). Acesso em: 21 jul 2025.

FUESS, L. T. et al. 2021. Towards a circular and sustainable sugarcane bioenergy industry in Brazil: a review of environmental assessment tools applied to biorefinery systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 278, p. 1–17, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123832. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/323443015\\_Sustainability\\_of\\_sugarcane\\_production\\_in\\_Brazil\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/323443015_Sustainability_of_sugarcane_production_in_Brazil_A_review). Acesso em: 21 jul 2025.

FUESS, L. T.; RODRIGUES, I. J.; GARCIA, M. L. *Fertirrigação com vinhaça de cana-de-açúcar: prevendo potenciais impactos sobre os recursos hídricos e de solo por meio da caracterização da vinhaça*. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 52, n. 11, p. 1063–1072, 2017. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1338892>. Disponível em: [Fuess\\_et\\_al\\_2021-JCLEPRO-compactado.pdf](https://www.researchgate.net/publication/323443015_Sustainability_of_sugarcane_production_in_Brazil_A_review). Acesso em: 15 jul 2025.

GASPAROTTO, F. et al. Setor sucroenergético e estratégias microbiológicas para mitigação dos impactos ambientais da aplicação da vinhaça. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 10, n. 1, p. 240–255, 2019. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2019.001.0020. Disponível em: (PDF) Setor sucroenergético e estratégias microbiológicas para mitigação dos impactos ambientais da aplicação da vinhaça. Acesso em: 15 jul 2025.

GILIO, L.; RENNÓ CASTRO, N. Avaliação dos impactos ambientais da aplicação da vinhaça por meio de fertirrigação. *Revista de Estudos Ambientais*, v. 19, n. 1, p. 45–58, 2017. DOI:10.1002/bbb.1829. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/320718077\\_Economic\\_environmental\\_and](https://www.researchgate.net/publication/320718077_Economic_environmental_and)

\_social\_impacts\_of\_different\_sugarcane\_production\_systems. Acesso em: 15 jul 2025.

HILGEMBERG SOTTOMAIOR, C. Resíduos da indústria sucroalcooleira: usos e implicações ambientais. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 12, n. 3, p. 119–128, 2017. Disponível em: <http://www.revistaeea.org/artigo.php?idartigo=2548>. Acesso em: 12 ago 2025.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. *Fundamentos de metodologia científica*. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017. Livro. ISBN 978-85-97-0100. 8. ed., 2. reimpr. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/187717?guid=1684022408405&returnUrl=%2Fresultado%2Flistar%3Fguid%3D1684022408405%26quantidadePaginas%3D1%26codigoRegistro%3D187717%23187717&i=71>. Acesso em: 15 jul 2025.

LANCE, Leandro Renato Giunzioni; STOLF, Rubismar; BUFON, Vinícius Bof; BOSCHI, Raquel Stucchi; SOUZA, Claudinei Fonseca. Fertirrigação com vinhaça na cana-de-açúcar: avaliação do desenvolvimento inicial, condutividade elétrica e teor de potássio no solo. *Irriga*, Botucatu, v.28, n.4, p.805–820, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n4p805-820. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4753>. Acesso em: 25 jul. 2025.

LIMA, A. P. S. et al. Matéria orgânica e acidez em um latossolo vermelho cultivado com sorgo sacarino sob níveis de vinhaça / Organic matter and acidity in an soil cultivated with sweet sorghum under levels of vinasse. Doi: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-359>. *Revista Brasileira de Desenvolvimento*, v. 6, n. 4, p. 24143–24155, 2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/15148>. Acesso em: 12 ago. 2025.

LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL. *Biotecnologia industrial*. 2 ed. São Paulo: Edgar Blücher, p. 682–698, 2019. Editora Edgars Blucher LTDa. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/biotecnologia-industrial-vol-2-valter-borzani-1-ed-pt/29854802>. Acesso em: 12 ago. 2025.

LOPES, IM, PINHEIRO, EFM, LIMA, E, CEDDJA, MB, CAMPOS, DV, & ALVES, BJR (2017) Emissões de N2O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça. *Revista Virtual de Química*.ISSN 1984-6835. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1080491/1/2017039.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2025.

MACHADO, L. A. et al. Dinâmica de fósforo e impactos ambientais da fertirrigação com vinhaça. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 44, e018920, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/xVPpQwhd8Vt9GKPQTTB8gxp/>. Acesso em: 13 jun. 2025.

MOREIRA, J.; ZAIAT, M. *Avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção de biogás a partir da vinhaça*. *Cadernos EBAPE.BR*, v. 14, n. esp., p. 682–698, 2016.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cebape/a/tSNxzJZmTVbMQPqNfX3KcGM/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

OLIVEIRA, L. R. A. et al. Perdas de nutrientes e impactos na água subterrânea em solos fertirrigados com vinhaça. *Revista Ciência Agrícola*, v. 39, n. 2, p. 112–120, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cebape/a/tSNxzJZmTVbMQPqNfX3KcGM/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, 16 maio 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 7 jul. 2025.

ROSA, L. O. et al. Valorização dos resíduos orgânicos do setor de hortifrutigranjeiro pelo processo de compostagem doméstica. *Semioses*, v. 13, n. 2, p. 1–12, 2019. DOI:10.15202/1981996x.2019v13n2p1. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/345441311\\_VALORIZACAO\\_DOS\\_RESIDUOS\\_ORGANICOS\\_DO\\_SETOR\\_DE\\_HORTIFRUTIGRANJEIRO\\_PELO\\_PROCESSO\\_DE\\_COMPOSTAGEM\\_DOMESTICA](https://www.researchgate.net/publication/345441311_VALORIZACAO_DOS_RESIDUOS_ORGANICOS_DO_SETOR_DE_HORTIFRUTIGRANJEIRO_PELO_PROCESSO_DE_COMPOSTAGEM_DOMESTICA). Acesso em: 7 jul. 2025.

SEABRA, R. B. O. *Efeitos da aplicação contínua de vinhaça no solo e nas propriedades físico-hídricas de um Latossolo Amarelo*. 2018. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018. Acesso em: 7 jul. 2025.

SILVA, Ana Paula; SOUZA, Eduardo. A agroindústria canavieira e a formação das políticas públicas no Brasil. *Revista GeoPantanal*, v. 15, n. 1, p. 50–67, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/GeoPantanal/article/view/10497>. Acesso em: jul. 2025.

SILVA, G. S. P. L.; Silva, F. C.; Alves, B. J. R.; Berton, R. S.; Marchiori, L. F. S.; Silveira, F. G. (2019). *Efeitos da aplicação de vinhaça “in natura” ou concentrada associado ao N-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente*. *Holos Environment*, 19(1), 1–21. DOI: 10.14295/holos.v19i1.12212. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1106906/1/APEfeitosaplicacaoHolos.pdf>. Acesso em: 04 julho de. 2025.

SILVA, Fabíola Marques. Avaliação da produção de etanol de segunda geração a partir do bagaço da cana-de-açúcar. 2022. 95 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Bioenergia) – Universidade de Uberaba, Uberaba, 2022. Disponível em: [https://dspace.uniube.br/bitstream/123456789/1685/1/10\\_11%20FORMATADA%20DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_VERS%C3%83O\\_%20%28002%29%20%281%29%20%28002%29%20%283%29%20%281%29.pdf](https://dspace.uniube.br/bitstream/123456789/1685/1/10_11%20FORMATADA%20DISSERTA%C3%87%C3%83O_VERS%C3%83O_%20%28002%29%20%281%29%20%28002%29%20%283%29%20%281%29.pdf). Acesso em: 28 jul. 2025.

SILVA, J.L. (2017) Desenvolvimento de detectores nanoestruturados de óxidos metálicos em grafeno para detecção eletroquímica de aminoácidos em vinhaça de cana-de-açúcar utilizando cromatografia líquida de alta eficiência. Tese de Doutorado. Instituto de Química, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/de955c01-1706-4742-8bca-b3c9580462ff>. Acesso em: 27 maio de. 2025.

SPINELLI, J. H. et al. Impactos ambientais oriundos do descarte incorreto da vinhaça. In: BARRETO, D. F. (Org.) Ciências Agrárias: Debates emblemáticos e situação perene – Volume 2. São Paulo: Atena Editora, 2022. p. 59–70. ISBN: 978-65-250-2262-0. DOI:10.22533/at.ed.2962324086. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/impactos-ambientais-oriundos-do-descarte-incorreto-da-vinhaca>. Acesso em: 27 maio de. 2025.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. Histórico de produção e moagem.2022. Disponível em: <https://unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2>. Acesso em: 27 maio de. 2025.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Indicadores e dados do setor. 2023. Disponível em: <https://www.unica.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

VENDRUSCOLO, P. E. et al. Efeitos do biochar, culturas de cobertura e lodo de esgoto nos atributos físicos do solo. Ciência del Suelo, v. 36, n. 1, p. 1–10, 2018. ISSN 1850-2067. Disponível em: [https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1850-20672018000100001](https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672018000100001). Acesso em: 10 jun. 2025.

WISSMANN, A.; SHIKIDA, F. A. Impactos econômicos, sociais e ambientais da agroindústria canavieira: uma análise crítica. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 55, n. 2, p. 237–254, 2017. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/frontereiracidania/article/view/2178>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ZANINI RENK. Produção de etanol no Brasil e aproveitamento dos resíduos. 2023. Disponível em: <https://zaninirenk.com.br/producao-de-etanol-no-brasil-e-aproveitamento-dos-residuos>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ZILS, C. A. Estoque de carbono em solo segundo os componentes da paisagem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 1, p. 150–158, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1036784/1/Estoquesdecarbonosolo.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.