

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

NATHÁLIA RAVANINI FISCHER

**ECONOMIA CIRCULAR APLICADA À INDÚSTRIA
CITRÍCOLA: VIABILIDADE ECONÔMICA E
AMBIENTAL DO USO DE COMPOSTAGEM**

BURI -SP
2025

NATHÁLIA RAVANINI FISCHER

**ECONOMIA CIRCULAR APLICADA À INDÚSTRIA CITRÍCOLA: VIABILIDADE
ECONÔMICA E AMBIENTAL DO USO DE COMPOSTAGEM**

Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Centro de Ciências da Natureza, da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel, em Engenharia Ambiental.

Orientador: Rafael de Oliveira Tiezzi
Coorientador: Rafael Miranda de Lima Carvalho

BURI-SP

FICHA CATALOGRÁFICA

Fischer, Nathália Ravanini

Economia Circular Aplicada à Indústria Citrícola: Viabilidade Econômica e Ambiental do Uso de Compostagem / Nathália Ravanini Fischer, Rafael Miranda de Lima Carvalho -- 2025.
39f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Rafael de Oliveira Tiezzi

Banca Examinadora: Anne Alessandra Cardoso Neves, Henrique Carmona Duval, Rafael de Oliveira Tiezzi

Bibliografia

1. Economia Circular. 2. Citricultura. 3. Compostagem. I. Fischer, Nathália Ravanini. II. Carvalho, Rafael Miranda de Lima. III. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR


Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS


Centro de Ciências da Natureza

Folha de aprovação


Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa Trabalho de Conclusão de Curso da candidata Nathália Ravanini Fischer, realizada em 17/11/2025:

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL DE OLIVEIRA TIEZZI**
Data: 26/11/2025 16:13:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael de Oliveira Tiezzi
Centro de Ciências da Natureza (CCN) – UFSCar – *Campus* Lagoa do Sino

Documento assinado digitalmente
 **ANNE ALESSANDRA CARDOSO NEVES**
Data: 26/11/2025 17:08:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Anne Alessandra Cardoso Neves
Centro de Ciências da Natureza (CCN) – UFSCar – *Campus* Lagoa do Sino

Documento assinado digitalmente
 **HENRIQUE CARMONA DUVAL**
Data: 26/11/2025 19:00:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Henrique Carmona Duval
Centro de Ciências da Natureza (CCN) – UFSCar – *Campus* Lagoa do Sino

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Gabriela Elias de Souza Ravanini e Daniel Marcos Fischer, que sempre foram meu porto seguro. A vocês, que estiveram ao meu lado em cada escolha, acreditando em mim, me apoiando quando decidi recomeçar, compreendendo meus sonhos e nunca medindo esforços para que eu pudesse realizá-los. Obrigada por sempre me darem força para continuar. Sem o amor e o cuidado de vocês, nada disso seria possível.

AGRADECIMENTO

Agradeço, antes de tudo, à minha família, que é e sempre será o alicerce da minha vida. À minha mãe e ao meu pai, por todo amor, apoio e incentivo, e por sempre acreditarem no meu potencial. Aos meus irmãos, Gabriel Ravanini Fischer e Júlia Lima Fischer, agradeço por fazerem parte da minha vida e por me inspirarem a ser alguém de quem vocês possam se orgulhar. Espero ser para vocês um exemplo de amor, coragem e determinação.

À minha avó, Maria Alcina de Souza Ravanini, e à minha madrasta e segunda mãe, Adriana De Lima Fischer, agradeço por todo o apoio, incentivo e amor que sempre me ofereceram. Vocês são exemplos vivos de força, coragem e generosidade, e foi com base no que aprendi com cada uma que caminhei com serenidade e determinação até aqui.

Ao meu parceiro de vida e coorientador, Rafael Miranda de Lima Carvalho, obrigada por estar ao meu lado nesta fase tão importante. Obrigada pelo amor, pela paciência e por acreditar em mim mesmo nos dias em que o cansaço parecia maior que a vontade. Por compartilhar comigo não só o conhecimento, mas também a vida, os sonhos e as conquistas.

Aos meus amigos de graduação Beatriz de Oliveira Costa, Daniela Pimenta, Giovanna Medina Razante, Milena Andrade Ferreira, Pedro Ramos Galvão e Priscila Mistro, meu sincero agradecimento por tornarem essa caminhada mais leve e repleta de boas lembranças. Por cada risada, cada conversa e cada apoio mútuo nas longas horas de estudo e nas incertezas do caminho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e profissional.

Este trabalho é um pedacinho de cada um de vocês.

RESUMO

A citricultura é uma das cadeias agroindustriais de maior relevância econômica no Brasil e no mundo, gerando aproximadamente 50 a 60% de resíduos sólidos e líquidos durante o processamento de frutas, principalmente na forma de cascas, bagaço e sementes. O manejo inadequado desses resíduos implica custos elevados de destinação e impactos ambientais significativos, como emissões de metano, acidificação do solo e contaminação hídrica. Este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade econômica e ambiental da compostagem de resíduos cítricos como fertilizante orgânico, inserida no contexto da economia circular e dos princípios ESG. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem mista (qualitativa e quantitativa), foi conduzida por meio de um trabalho teórico de origem exploratória com adaptação do modelo econômico de viabilidade de Culas, Anwar e Maraseni (2025), considerando produtividade média de 869 caixas de laranja por hectare, custo anual de fertilizantes minerais de R\$ 2.245,35/ha e aplicação teórica de 7 toneladas de composto orgânico por hectare. Os resultados demonstraram que a substituição parcial (25–75%) de fertilizantes minerais por composto cítrico proporcionou co-benefícios econômicos de R\$ 51,25 a R\$ 1.544,01 por hectare/ano, representando até 69% de economia sobre o custo de insumos convencionais, com maior retorno em solos de qualidade elevada. O composto apresentou relação C/N de 15:1, pH entre 3,5 e 4,0 e teores elevados de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e potássio, promovendo incremento da fertilidade, da capacidade de troca catiônica e da atividade microbiana do solo. Ambientalmente, observou-se potencial redução de até 35% nos custos de destinação de resíduos e mitigação das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo diretamente para os ODS 2, 12, 13 e 15. Conclui-se que a compostagem de bagaço cítrico é uma alternativa técnica, econômica e ambientalmente viável, fortalecendo a transição da citricultura brasileira para um modelo circular, regenerativo e de baixo carbono, em consonância com as diretrizes globais de sustentabilidade e governança ambiental.

Palavras-chave: economia circular; citricultura; compostagem; fertilizante orgânico; sustentabilidade; ESG.

ABSTRACT

Citrus farming is one of the most economically significant agro-industrial chains in Brazil and worldwide, generating approximately 50 to 60% of solid and liquid waste during fruit processing, mainly in the form of peels, pulp, and seeds. Inadequate management of this waste leads to high disposal costs and significant environmental impacts, such as methane emissions, soil acidification, and water contamination. This study aimed to investigate the economic and environmental feasibility of composting citrus waste as an organic fertilizer, within the context of the circular economy and ESG principles. The research, applied in nature and using a mixed (qualitative and quantitative) approach, was conducted through a theoretical exploratory study adapting the economic feasibility model of Culas, Anwar, and Maraseni (2025), considering an average productivity of 869 boxes of oranges per hectare, an annual mineral fertilizer cost of BRL 2,245.35/ha, and a theoretical application of 7 tons of organic compost per hectare. The results showed that the partial replacement (25–75%) of mineral fertilizers with citrus compost provided economic co-benefits ranging from BRL 51.25 to BRL 1,544.01 per hectare per year, representing up to 69% savings over the cost of conventional inputs, with greater returns observed in high-quality soils. The compost presented a C/N ratio of 15:1, pH between 3.5 and 4.0, and high levels of organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium, promoting improvements in soil fertility, cation exchange capacity, and microbial activity. Environmentally, the process showed potential to reduce waste disposal costs by up to 35% and mitigate greenhouse gas emissions, directly contributing to SDGs 2, 12, 13, and 15. It is concluded that citrus pulp composting is a technically, economically, and environmentally viable alternative, strengthening the transition of Brazilian citrus farming toward a circular, regenerative, and low-carbon model, aligned with global sustainability and environmental governance guidelines.

Keyword: circular economy; citrus industry; composting; organic fertilizer; sustainability; ESG.

LISTA DE SIGLAS

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
CitrusBR - Associação Nacional dos Exportadores de Sucos Cítricos
CSCC - Cadeias de Suprimentos Cítricas Circulares
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESG - Environmental, Social and Governance
FAO - Food and Agriculture Organization
IAC - Instituto Agronômico de Campinas
IEA - Instituto de Economia Agrícola
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU - Organização das Nações Unidas

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. HIPÓTESE.....	12
2.1. Hipótese Nula (H0).....	12
2.2. Hipótese Alternativa (H1).....	12
3. OBJETIVOS.....	13
3.1. Geral	13
3.2. Específicos	13
4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	13
4.1. Citricultura	13
4.1.1. <i>Importância Econômica da Citricultura Global</i>	13
4.1.2. <i>Importância Econômica da Citricultura Nacional</i>	14
4.1.3. <i>Problemática da Geração de Resíduos na Indústria Citrícola</i>	15
4.2. Economia Circular	16
4.2.1. <i>Definição do Conceito</i>	16
4.2.2. <i>Economia Circular na Citricultura</i>	19
4.3. Nutrição de plantas.....	21
4.3.1. <i>Importância da Nutrição de Plantas</i>	21
4.3.2. <i>Definição de Bioinsumo e Biofertilizante</i>	23
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
5.1. Tipo de pesquisa	24
5.2. Procedimentos metodológicos.....	25
5.3. Adaptação do modelo econômico.....	25
5.4. Cálculo da viabilidade econômica:.....	26
5.5. Limitações, Ética e Confiabilidade da Pesquisa.....	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
6.1. Viabilidade do uso de compostagem	27
6.2. Aplicação do modelo econômico	28
6.3. Indicadores ESG e ODS.....	31
6.4. Integração do modelo econômico com ESG.....	31
7. CONCLUSÕES.....	32
8. REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o crescimento das atividades produtivas tem aumentado muito o uso dos recursos naturais e a geração de resíduos no planeta. O modelo econômico tradicional, baseado em extrair, produzir, consumir e descartar, mostra-se cada vez mais insustentável. Essa forma de produção causa sérios problemas ambientais, como o acúmulo de lixo, a poluição do solo e da água e o aumento das emissões de gases que agravam as mudanças climáticas.

Diante disso, cresce no mundo a busca por novos modelos de desenvolvimento que consigam unir produção, eficiência e cuidado com o meio ambiente. É nesse cenário que ganha destaque a economia circular, que propõe o reaproveitamento de materiais e resíduos dentro dos ciclos produtivos, reduzindo desperdícios e promovendo a sustentabilidade.

A agricultura tem papel essencial nesse desafio. Além de garantir a segurança alimentar, ela movimenta a economia e gera milhões de empregos, mas também é uma das atividades que mais impactam o meio ambiente. O uso excessivo de fertilizantes químicos e o descarte incorreto de resíduos agrícolas provocam contaminação, empobrecimento dos solos e emissão de gases poluentes. Por isso, torna-se cada vez mais importante buscar formas de produção mais equilibradas, que utilizem melhor os recursos e aproveitem os resíduos gerados nas etapas produtivas.

Entre as cadeias agroindustriais, a citricultura ocupa um lugar de destaque no Brasil e no mundo. O país é um dos maiores produtores e exportadores de suco de laranja, o que garante grande importância econômica e social ao setor. Porém, o processamento das frutas gera uma grande quantidade de resíduos, como cascas, bagaço, sementes e águas residuais, que representam até 60% da massa total da fruta. Quando esses materiais não são aproveitados de forma correta, acabam causando impactos ambientais e custos extras para as indústrias. Isso mostra que o problema dos resíduos na citricultura vai além da simples destinação: é também uma questão de eficiência e sustentabilidade.

Nesse contexto, a economia circular surge como uma alternativa importante, pois permite transformar os resíduos gerados em novos recursos úteis. Uma das formas mais promissoras de aplicar esse conceito é por meio da compostagem, um processo biológico que transforma materiais orgânicos em adubo natural rico em nutrientes. No caso da citricultura, a compostagem do bagaço e da casca da laranja pode substituir parte dos fertilizantes químicos usados nas plantações, reduzir custos e melhorar a qualidade do solo. Além disso, essa prática ajuda a diminuir o volume de resíduos enviados para aterros e as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para os objetivos globais de sustentabilidade e proteção ambiental.

Além de reduzir impactos ambientais, a compostagem também traz ganhos econômicos e sociais, como a diminuição dos gastos com destinação de resíduos e a possibilidade de criar novos produtos com valor agregado. Assim, trata-se de uma alternativa que une inovação, sustentabilidade e eficiência na produção agrícola, alinhada aos princípios ESG (*Environmental, Social and Governance*) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU).

Dessa forma, o problema central deste trabalho está em avaliar se a compostagem dos resíduos cítricos é realmente viável do ponto de vista econômico e ambiental. A proposta é mostrar que um resíduo agroindustrial (antes visto apenas como um problema) pode se tornar um recurso útil e benéfico para o produtor, para o meio ambiente e para a sociedade. A análise busca compreender como o reaproveitamento do bagaço e da casca da laranja, dentro dos princípios da economia circular, pode transformar um passivo ambiental em um ativo produtivo, reduzindo custos e impactos. Dessa forma, pretende-se demonstrar que é possível unir rentabilidade e sustentabilidade na citricultura, contribuindo para o fortalecimento de práticas agrícolas mais regenerativas, eficientes e alinhadas à transição para modelos produtivos de baixo impacto.

A partir dessa análise, este estudo busca contribuir com informações que apoiem a adoção de práticas mais sustentáveis na cadeia cítrica brasileira.

2. HIPÓTESE

2.1. Hipótese Nula (H0)

A compostagem do bagaço cítrico não apresenta viabilidade econômica ou ambiental significativa quando comparada aos métodos convencionais de destinação de resíduos (como aterros, ração animal ou queima), não resultando em benefícios mensuráveis em termos de custo, eficiência nutricional do composto ou redução de impacto ambiental.

2.2. Hipótese Alternativa (H1)

A compostagem do bagaço cítrico é economicamente e ambientalmente viável, constituindo uma alternativa sustentável que reduz custos de descarte industrial, gera insumos agrícolas de valor agregado (biofertilizantes) e diminui impactos ambientais, promovendo alinhamento com os ODS da ONU e os preceitos ESG de gestão ambiental e responsabilidade corporativa.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Investigar a viabilidade econômica e ambiental da utilização de resíduos de cascas de citros como fertilizante orgânico, inserindo conceitos de economia circular, ESG e ODS, ao levar em consideração os impactos na produtividade e qualidade do solo.

3.2. Específicos

- Quantificar a geração anual de resíduos cítricos e avaliar seus impactos ambientais.
- Analisar a eficiência agrônômica da compostagem de resíduos de citros como fertilizante orgânico em comparação com fertilizantes químicos.
- Avaliar a viabilidade econômica da substituição parcial ou total de fertilizantes químicos por fertilizantes orgânicos derivados de resíduos cítricos.
- Integrar conceitos de ESG, ODS e economia circular, verificando o potencial de redução de impacto ambiental e geração de valor agregado.
- Propor diretrizes práticas para implementação de sistemas de fertilização orgânica a partir de resíduos cítricos na citricultura.

4. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

4.1. Citricultura

4.1.1. Importância Econômica da Citricultura Global

A citricultura ocupa posição de destaque no panorama agrícola global, sendo essa cultura, cultivada em mais de 140 países e apresentando crescimento constante ao longo das últimas décadas. Segundo relatos recentes, a produção mundial de frutas cítricas ultrapassou 130 milhões de toneladas no ciclo 2024/2025. Entre as espécies de citros, a laranja representa aproximadamente 45–50 % da produção global, seguida por tangerinas e limões (FAO, 2021; WORLD CITRUS ORGANIZATION, 2025; BENITEZ et al., 2025).

A relevância econômica global também se reflete nos fluxos comerciais e no papel estratégico de países como China, Índia, México, Brasil e Estados Unidos, que respondem por parcela significativa da produção mundial. Por exemplo, no ciclo de 2020, a China produziu 46,67 milhões de toneladas, o Brasil 18,88 milhões, a Índia 14,31 milhões, o México 8,82 milhões e a Espanha 6,7 milhões, juntos, esses países

representavam quase dois terços da produção global (BARBOSA et al., 2021; KAUR et al., 2025).

Do total de cítricos produzidos, estima-se que cerca de 20 a 30 % sejam destinados à indústria de processamento incluindo sucos concentrados e óleos essenciais (ZEMA et al., 2018; KUMAR et al., 2025). Essa parcela de fruta processada contribui para geração de valor agregado e para intensificação do uso industrial da cadeia citrícola (PATSALOU et al., 2020; KAUR et al., 2025).

Além desses aspectos de volume, cabe destacar que a citricultura mobiliza cadeias industriais extensas (insumos agrícolas, transporte, processamento, comercialização) e que sua expansão acompanha a demanda por cítricos in natura e por derivados (como suco, óleos, produtos aromáticos) (YUSUF et al., 2025).

Em muitos casos, os resíduos dessas cadeias vêm sendo reconhecidos como potenciais insumos em modelos de economia circular (CHAKRAVARTY et al., 2023; KHRUENGSAI et al., 2023; BENITEZ et al., 2025; YUSUF et al., 2025).

4.1.2. Importância Econômica da Citricultura Nacional

No Brasil, a citricultura é uma das culturas frutíferas de maior expressão, com forte integração com a indústria de suco de laranja. Estima-se que a safra 2025/2026 abranja cerca de 600 mil hectares destinados a variedades cítricas para suco, óleo essencial e consumo in natura (USDA, 2021; CHHIKARA et al., 2018; KRUG et al., 2023). Embora os números exatos variem segundo fontes e ano, historicamente o Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de laranja, com volumes anuais da ordem de dezenas de milhões de toneladas. Por exemplo, em 2020, o Brasil produziu cerca de 18,88 milhões de toneladas de cítricos (BARBOSA et al., 2021; KAUR et al., 2025).

A industrialização da citricultura brasileira concentra-se largamente em suco de laranja concentrado, o qual é exportado para diversos mercados. Isso faz com que o Brasil possua relevante participação no comércio internacional de suco (concentrado e reconstituído). Os impactos econômicos diretos envolvem geração de emprego em fazendas e indústrias, receitas de exportação, demandas por insumos agrícolas, logística e infraestrutura (FAOSTAT, 2017; SATARI et al., 2018; SHARMA et al., 2017; 2018; ZEMA et al., 2018).

No contexto nacional, a gestão dos resíduos da citricultura e da indústria de suco também representa um custo e um desafio ambiental, tema que se torna mais relevante com as exigências de ESG e com normas ambientais mais rígidas (por

exemplo, normas de descarte, emissões, uso de recursos). Assim, o aproveitamento de subprodutos e resíduos ganha relevância não apenas ambiental, mas como estratégia para reduzir custos de descarte e agregar valor na cadeia citrícola brasileira (YADAV et al., 2022; BENITEZ et al., 2025).

4.1.3. Problemática da Geração de Resíduos na Indústria Cítrica

O processamento de frutas cítricas gera volumes expressivos de resíduos, estima-se que 50 % a 60 % da massa da fruta processada se torne resíduo, na forma de casca, sementes, bagaço residual, polpa residual e águas residuais. A casca é frequentemente a fração dominante, variando entre 40 % e 70 % do peso da fruta processada, dependendo da cultura cítrica, cultivar e tecnologia de processamento (SATARI AND KARIMI, 2018). Além disso, outros componentes como as sementes (cerca de 2-5 % em alguns casos), resíduos de polpa e águas residuais também contribuem para o volume total de resíduos (BAMPIDIS AND ROBINSON, 2006; CALABRÒ et al., 2016; MAHATO et al., 2018; SHARMA et al., 2018; ZEMA et al., 2018), como é ilustrado na imagem 1.

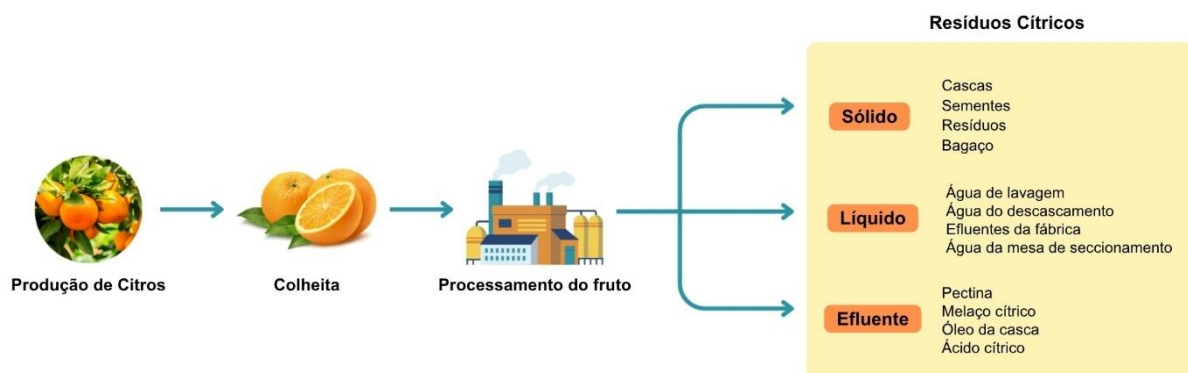


Imagem 1: Fluxo esquemático da cadeia produtiva de citros e geração de resíduos cítricos.

O diagrama apresenta as etapas de produção, colheita e processamento do fruto, evidenciando os principais tipos de resíduos gerados no processo industrial. Os resíduos sólidos incluem cascas, sementes e bagaço; os líquidos abrangem águas de lavagem, descascamento e efluentes industriais; e os efluentes compreendem subprodutos de valor agregado, como pectina, melaço cítrico, óleo essencial da casca e ácido cítrico.

O descarte inadequado de resíduos orgânicos pode gerar sérios impactos ambientais. A decomposição anaeróbica desses materiais em aterros libera gases de efeito estufa, como metano e dióxido de carbono, contribuindo para o aquecimento

global. Além disso, as frações líquidas residuais apresentam alta carga orgânica e compostos tóxicos, capazes de contaminar o solo e a água, provocando eutrofização e degradação ambiental (TORRISI et al., 2021; ZEMA et al., 2018; CALABRÒ, 2018).

Os resíduos cítricos, por sua acidez e elevada umidade, dificultam a disposição adequada e podem afetar a microbiota local. O descarte desordenado também favorece o desequilíbrio ecológico e a proliferação de pragas, enquanto o manejo incorreto acarreta custos adicionais às indústrias, principalmente com tratamento e transporte (YADAV et al., 2022).

Esses impactos ambientais e econômicos tornam claro que a gestão de resíduos na indústria cítrica não pode ser apenas um problema de destinação final, mas um desafio estratégico para transformar resíduos em oportunidades, especialmente dentro de modelos de economia circular e biorrefinarias (YADAV et al., 2022; KAUR et al., 2025; BENITEZ et al., 2025).

4.2. Economia Circular

4.2.1. Definição do Conceito

A economia circular emerge como uma alternativa ao modelo linear tradicional “extrair-produzir-descartar”, buscando manter os materiais em uso pelo maior tempo possível, reduzir a geração de resíduos e regenerar os sistemas naturais. Segundo Kirchherr et al. (2023), o conceito de circularidade é definido de múltiplas maneiras e tem sido aplicado em diferentes níveis (produto, empresa, território) conforme o contexto.

O relatório *Circularity Gap Report 2025* evidencia que apenas cerca de 6,9 % dos materiais que entram na economia global provêm de fontes secundárias, o que revela o quão distante estamos de um modelo efetivamente circular. Além disso, na União Europeia e em políticas globais, a economia circular é promovida como um conjunto de estratégias, como a reciclagem, remanufatura, reutilização, recuperação de materiais e ecodesign, para minimizar impactos ambientais e desvincular crescimento econômico da intensidade no uso de recursos naturais. (EUROPEAN COMMISSION, 2025)

A economia circular pode ser compreendida como um paradigma sistêmico que busca reestruturar os processos produtivos e de consumo, promovendo o uso eficiente de recursos e a minimização dos impactos ambientais. Diferentemente do modelo linear de produção, baseado na extração, uso e descarte, a economia circular

propõe a manutenção do valor dos materiais e produtos pelo maior tempo possível, por meio da regeneração, reutilização e reciclagem. Fundamenta-se em três princípios centrais: a eliminação de resíduos e poluição desde a concepção dos produtos (*design out waste*), a manutenção e regeneração de produtos e materiais, e a regeneração dos sistemas naturais, de modo a restabelecer o equilíbrio entre atividade econômica e sustentabilidade ambiental (BENITEZ et al., 2025).

Esses princípios se conectam diretamente à proposta deste trabalho, que busca investigar a viabilidade econômica e ambiental da utilização de resíduos de cascas de citros como fertilizante orgânico, ao inserir os conceitos de economia circular, ESG e ODS. Nesse contexto, a valorização dos resíduos agrícolas, como as cascas de citros, representa uma oportunidade de transformar um passivo ambiental em um recurso produtivo, reduzindo os custos e impactos do descarte convencional, além de promover a eficiência na gestão de recursos e o fortalecimento de práticas sustentáveis na cadeia citrícola (LENTON et al., 2022; FLOR et al., 2025)

O modelo ilustrado na Imagem 2, referente à *Island Circular Economy*, demonstra de forma didática as etapas necessárias para a implementação de sistemas circulares em diferentes contextos produtivos. No Passo 1, destacam-se os recursos cítricos: energia, alimentos/biomassa, plásticos e água, que representam a base para qualquer estratégia circular. No caso específico deste estudo, os resíduos de citros inserem-se nesse grupo como recursos biológicos de alto potencial, passíveis de reaproveitamento em processos de compostagem ou produção de fertilizantes orgânicos (FLOR et al., 2025).

O Passo 2 aborda os limites planetários e seus impactos, como mudanças climáticas, integridade da biosfera e uso de recursos naturais. Essa etapa reflete a importância de reduzir os impactos ambientais associados à produção agrícola e ao descarte inadequado de resíduos, fortalecendo o compromisso com os princípios de sustentabilidade e ESG (FLOR et al., 2025).

No Passo 3, a ênfase recai sobre a criação de condições facilitadoras, como custos, infraestrutura, acessibilidade e capacidade local, fatores diretamente relacionados à viabilidade econômica e operacional da adoção de práticas circulares na agricultura. Em seguida, o Passo 4 propõe o fortalecimento dos ciclos de retroalimentação, por meio de redes sociais, aprendizado contínuo e coevolução, o que se conecta à necessidade de difusão de conhecimento técnico e de incentivo à adoção de tecnologias sustentáveis por produtores rurais (FLOR et al., 2025).

Por fim, o Passo 5 representa o acionamento do sistema, momento em que os princípios, recursos e condições previamente estabelecidos se integram para viabilizar a transição para um modelo circular efetivo. Dessa forma, a aplicação dos conceitos de economia circular à gestão dos resíduos cítricos possibilita não apenas a redução de impactos ambientais, mas também a geração de valor agregado e de benefícios sociais e econômicos, contribuindo para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e para a consolidação de um modelo agrícola mais sustentável e resiliente (FLOR et al., 2025).

Essa conceituação fundamenta o entendimento de como resíduos agrícolas, como os provenientes da citricultura, podem ser integrados a ciclos produtivos fechados em lugar de serem simplesmente descartados.

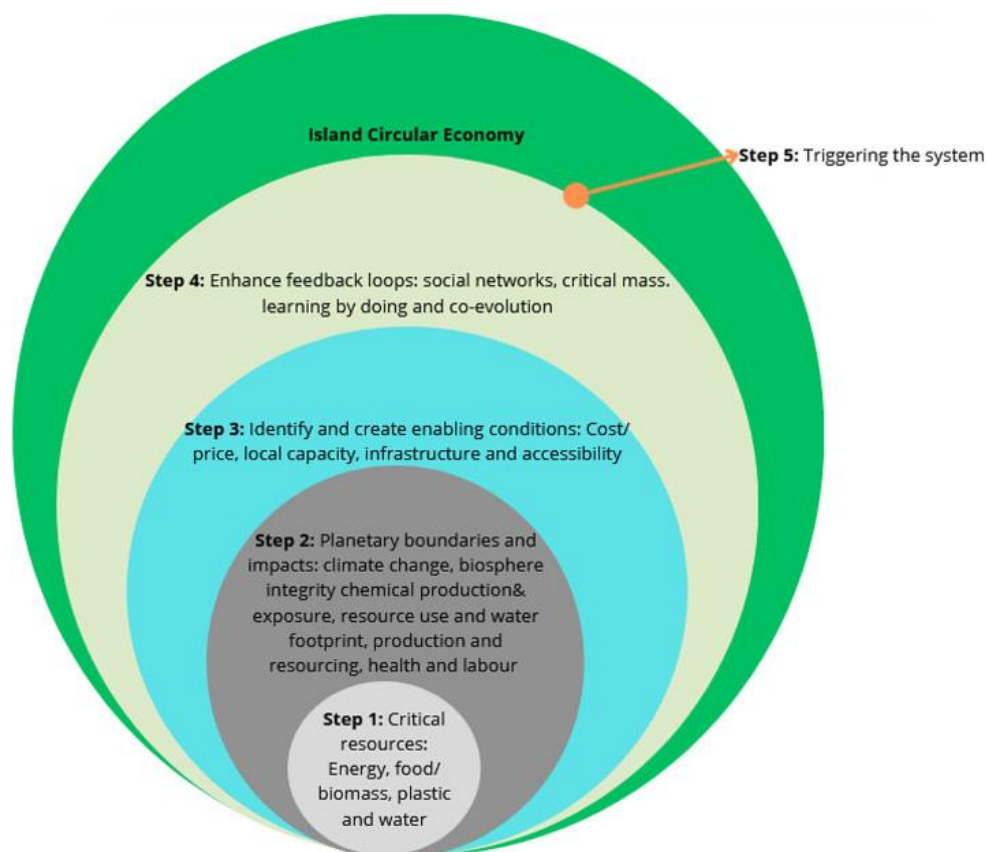


Imagem 2: Estrutura conceitual da Economia Circular em ilhas (*Island Circular Economy*).

O diagrama representa a transição sistêmica em cinco etapas: (1) identificação dos recursos críticos, como energia, alimentos/biomassa, plásticos e água; (2) consideração dos limites planetários e impactos, incluindo mudanças climáticas, integridade da biosfera, uso de recursos e saúde; (3) criação de condições habilitadoras, como custo, capacidade local, infraestrutura e acessibilidade; (4) fortalecimento dos circuitos de retroalimentação por meio de redes sociais, massa

crítica e aprendizado coletivo; e (5) acionamento do sistema circular. O modelo ilustra a progressão em direção a uma economia circular insular integrada e resiliente.

4.2.2. Economia Circular na Citricultura

A citricultura, como toda atividade agroindustrial, gera grandes volumes de resíduos durante as fases de colheita, beneficiamento e industrialização. Nesse cenário, o modelo de economia circular oferece uma rota para transformar o passivo (resíduos) em oportunidades (matéria-prima para novos processos) (MIRABELLA et al., 2014; SCARLAT et al., 2015; OLDFIELD et al., 2016; YADAV et al., 2022).

Com base na literatura recente sobre a aplicação da economia circular à citricultura, diferentes estudos destacam ações voltadas à valorização de resíduos cítricos por meio de biorrefinarias, bioprocessos e compostagem. Essas abordagens evidenciam o potencial de conversão de resíduos em insumos úteis, como energia, fertilizantes e biofertilizantes, além de apontarem desafios técnicos, regulatórios e de aceitação (KUMAR et al., 2025). A Tabela 1 resume as principais estratégias identificadas, seus respectivos autores e observações sobre cada pesquisa.

Tabela 1: Estratégias circulares aplicadas à gestão e valorização de resíduos cítricos.

Ação / Estratégia Circular (Resíduos Cítricos)	Autores / Ano	Observações / Enfoque
Biorrefinarias para gerar energia, químicos e fertilizantes	Mirabella et al. (2014); Scarlat et al. (2015); Oldfield et al. (2016)	Valor agregado; integração de cadeias; desafios técnicos
Valorização microbiana de resíduos cítricos (biowaste)	Stavarakakis et al (2025); Medina-Herrera et al. (2024)	Apoio da UE; regulação; necessidade de padronização
Conversão de resíduos em fertilizantes orgânicos	Ansar et al (2025)	Barreiras de segurança e aceitação; inovação tecnológica
Compostagem de resíduos biodegradáveis	Kumar et al. (2025)	Benefícios econômicos; desafios operacionais
Produção de insumos internos (biofertilizantes, energia)	Wagh et al (2024)	Competitividade; metas ESG; falta de métricas práticas

A tabela apresenta diferentes abordagens tecnológicas e operacionais voltadas à transição para sistemas circulares na cadeia de processamento de citros. As ações incluem o uso de biorrefinarias para geração de energia e produtos

químicos, valorização microbiana de biorresíduos cítricos, conversão em fertilizantes orgânicos, compostagem e produção de insumos internos. São também destacados os principais autores, anos de publicação e enfoques analíticos associados, como desafios técnicos, barreiras regulatórias, inovação e alinhamento com metas ESG.

Essas etapas permitem que uma usina citrícola não apenas produza suco e derivados, mas também insumos agrícolas (fertilizantes orgânicos) ou energia interna, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais. (SONG et al., 2022; YANG et al., 2020). Entretanto, a transposição da teoria para a prática enfrenta desafios: variabilidade da matéria-prima, escala econômica, viabilidade tecnológica, logística de tratamento e mercados para subprodutos. Estudos de valorização de resíduos agrícolas enfatizam que o sucesso da economia circular depende da sinergia entre tecnologias, incentivos institucionais e modelos de negócio integrados (YANG et al., 2025).

Dentro do escopo da economia circular, a utilização de resíduos agrícolas como biofertilizantes (compostos, bioestabilizados, compostagens enriquecidas) é uma das rotas mais tangíveis e de menor barreira tecnológica, permitindo fechar o ciclo de nutrientes, como indica a tabela 1 (LUCIA et al., 2022; MIR-TUTUSAUS et al., 2018; BENITEZ et al., 2025). Resíduos cítricos contêm nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, matéria orgânica) e uma rica carga microbiana que, após estabilização (compostagem, vermicompostagem etc.), podem propiciar melhorias de fertilidade do solo, retenção de água, biodiversidade microbiana e sequestro de carbono no solo (ZEMA et al., 2018).

De fato, resíduos cítricos compostados ajudam no crescimento vegetal, mobilidade de nutrientes e incremento da matéria orgânica do solo quando aplicados de maneira adequada e após maturação (KAUR et al., 2025). Focando na necessidade de uma agricultura mais sustentável, é absolutamente urgente mitigar as emissões de CO₂ derivadas da agricultura convencional e aumentar a produção primária líquida (NPP) por meio do aporte adicional de carbono ao solo (FERLITO et al., 2020; ROCCUZZO et al., 2018), que pode ser feito a partir de Cadeias de Suprimentos Cítricas Circulares (CSCC) (YUSUF et al., 2025).

CSCC focam em produtos principais, subprodutos e resíduos, podendo incluir diversos ciclos interconectados para recuperar materiais e energia, fornecendo valor econômico, ambiental e social (LAVELLI, 2021). Além disso, promover CCSCs ajuda a alcançar os ODS da ONU, especialmente o ODS 12, que busca um modelo de

produção e consumo mais sustentável e circular (YUSUF et al., 2025).

4.3. Nutrição de plantas

4.3.1. Importância da Nutrição de Plantas

A nutrição de plantas é um dos pilares fundamentais para garantir produtividade, qualidade e sustentabilidade nas culturas agrícolas. Sem suprimento adequado de nutrientes essenciais, as plantas não conseguem desenvolver seus processos metabólicos, fisiológicos e bioquímicos com eficiência, resultando em estresse, menor biomassa e queda de rendimento. (MARCHANT et al., 2013; COLAÇO et al., 2020).

Os nutrientes essenciais são tradicionalmente classificados em macronutrientes (exigidos em maiores quantidades) e micronutrientes (em quantidades menores). Entre os macronutrientes primários destacam-se o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), responsáveis por funções vitais como síntese de proteínas, metabolismo energético e equilíbrio osmótico. Macronutrientes secundários como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) também são indispensáveis para a integridade celular, ativação enzimática e estrutura de tecidos (TAIZ et al., 2017). Os micronutrientes (boro, zinco, cobre, ferro, manganês, molibdênio, cloro e níquel) são necessários em quantidades reduzidas, mas são vitais para reações enzimáticas, transporte de elétrons, síntese de hormônios e regulação redox. (KRUG et al., 2023).

Do ponto de vista agrônomo, a carência ou o excesso de um desses elementos pode provocar desequilíbrios nutricionais, deficiências visíveis (clorose, necrose, deformações) ou até toxicidades. Além disso, práticas agrícolas convencionais intensivas podem esgotar os estoques de nutrientes do solo ou causar lixiviação, aumentando a dependência de insumos externos sintéticos. (ZHANG et al., 2024; YANG et al., 2025).

Em cenários de mudança climática, a nutrição adequada se torna ainda mais crítica. Estratégias que promovem o aporte adicional de carbono ao solo, como adição de matéria orgânica ou uso de resíduos organominerais, ajudam a mitigar emissões de CO₂ da agricultura convencional. Essas práticas contribuem para melhorar a fertilidade do solo e conferir ao solo maior resiliência frente aos estresses ambientais (FERLITO et al., 2020; ROCCUZZO et al., 2018)

O bagaço de citros é rico em matéria orgânica e abundante em nitrogênio,

fósforo, potássio e outros nutrientes essenciais para as plantas, podendo ser compostado para fazer fertilizante orgânico, que serve ao duplo propósito de nutrir plantas e melhorar o solo. A compostagem do bagaço de citros, associada a resíduos agropecuários, como esterco, é frequentemente realizada por fermentação microbiana aeróbica (YANG et al., 2021; HU et al., 2025). Lan Ziping (2019) utilizou esterco misto de porco e vaca como fonte microbiana para a produção de fertilizante orgânico a partir da compostagem do bagaço de citros.

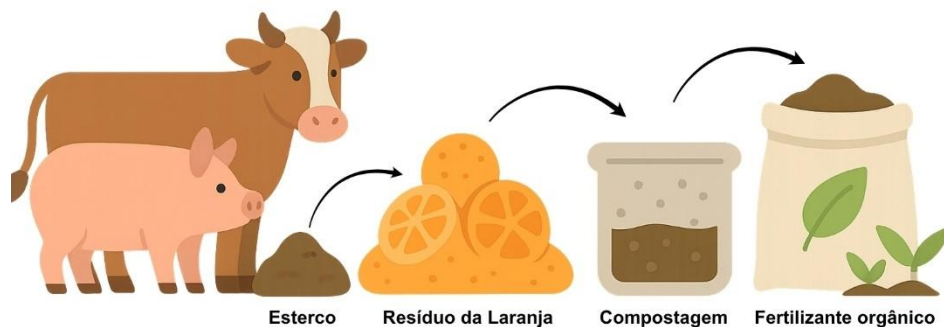


Imagem 3: Esquema simplificado do processo de compostagem de resíduos cítricos para obtenção de fertilizantes orgânicos.

A ilustração demonstra a integração entre resíduos agropecuários (esterco) e resíduos industriais da citricultura, que, por meio do processo biológico de compostagem, originam um fertilizante orgânico rico em nutrientes. Essa abordagem reflete um modelo de economia circular aplicado ao reaproveitamento de subprodutos agroindustriais.

No caso específico de resíduos cítricos, é importante considerar a presença de compostos bioativos, como flavonoides e ácidos fenólicos, que podem ter efeitos fitotóxicos nas fases iniciais de aplicação, exigindo uma maturação adequada do composto. Além disso, deve-se atentar para a acidez natural desses resíduos e o risco de acidificação do solo, caso não sejam devidamente balanceados (CALABRÒ et al., 2017; ZEMA et al., 2018; SHARMA et al., 2018; HOSSEINI et al., 2016; MAHATO et al., 2021).

Outro fator relevante é a proporção de carbono e nitrogênio (C/N), que precisam ser favoráveis ao processo microbiológico de compostagem. Por fim, há a necessidade de realizar a mistura, ou co-compostagem, com materiais “verdes” ou resíduos ricos em nitrogênio, ou ainda com materiais estruturantes, a fim de equilibrar o processo (SILES et al., 2016; WADHWA; BAKSHI, 2013; MARTÍNEZ et al., 2025).

Em resumo, no contexto de um modelo de economia circular aplicado à citricultura, assegurar uma nutrição vegetal eficiente e sustentável é essencial para garantir que os insumos circulares (como compostos ou biofertilizantes) cumpram efetivamente sua função agrônômica sem comprometer a produtividade. (FERLITO et al., 2020; ROCCUZZO et al., 2018; LAVELLI, 2021; CINARDI et al., 2025)

4.3.2. *Definição de Bioinsumo e Biofertilizante*

O termo *bioinsumo* é amplamente utilizado para designar insumos agrícolas de origem biológica, ou seja, produzidos a partir de organismos vivos ou processos biológicos, que promovem fertilidade, controle biológico, bioestimulantes ou manejo sustentável. Em muitos casos, bioinsumos englobam biofertilizantes, inoculantes microbianos, bioestimulantes (como hormônios naturais ou extratos vegetais) e agentes de biocontrole. No Brasil, há iniciativas para regulamentação e fomento ao uso de bioinsumos como parte do Programa Nacional de Bioinsumos e ações ligadas à bioeconomia e à agricultura sustentável (FAO, 2020; EMBRAPA, 2021; MAPA, 2020).

O biofertilizante é um tipo específico de bioinsumo que contém microrganismos vivos capazes de fixar, mobilizar ou disponibilizar nutrientes no solo ou na rizosfera das plantas, promovendo aumento da eficiência nutricional e da saúde do sistema radicular. O biofertilizante líquido pode conter nitrogênio, fósforo, entre outros nutrientes essenciais, e pode agir tanto como fertilizante quanto como agente de estímulo biológico. (EMBRAPA, 2021)

No glossário governamental brasileiro, biofertilizante é definido como um adubo vivo, composto por microrganismos que favorecem o controle de pragas, doenças e a disponibilidade de minerais para as plantas (BRASIL, 2021). Em resumo, enquanto todo biofertilizante é um bioinsumo, nem todo bioinsumo é biofertilizante (EMBRAPA, 2021; FAO, 2020), como é ilustrado na imagem 4.

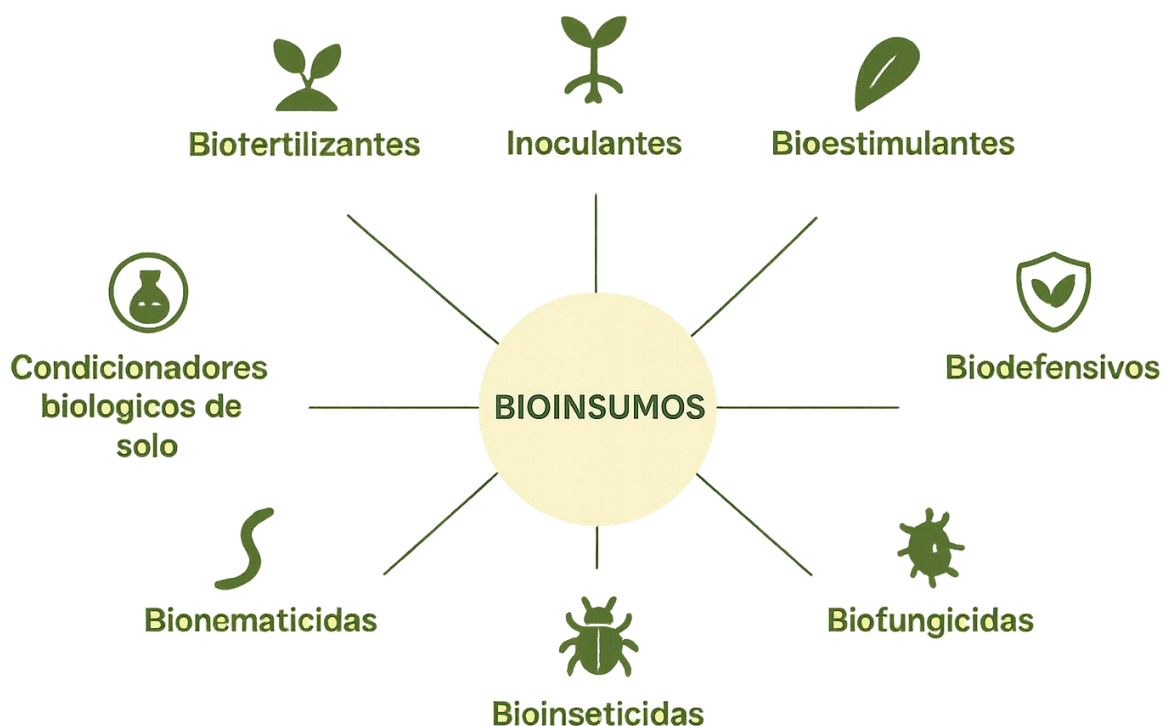


Imagem 4: Principais categorias de bioinsumos utilizados na agricultura sustentável.

O diagrama apresenta os diferentes grupos de insumos biológicos empregados para o manejo integrado e regenerativo dos sistemas agrícolas, incluindo biofertilizantes, inoculantes, bioestimulantes, biodefensivos, biofungicidas, bioinseticidas, bionemáticas e condicionadores biológicos de solo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Tipo de pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza qualitativa e quantitativa, com abordagem teórica de caráter exploratório

A pesquisa aplicada busca gerar conhecimento para aplicação prática e direcionada à solução de problemas específicos. Neste caso, o problema refere-se à avaliação da viabilidade econômica do uso de resíduos da indústria de suco como fertilizante orgânico em culturas cítricas.

A abordagem é qualitativa, pois busca compreender relações conceituais entre variáveis agrônomicas, ambientais e econômicas; e quantitativa, na medida em que utiliza dados secundários numéricos provenientes da literatura científica e de fontes institucionais para estimar custos, benefícios e impactos potenciais.

5.2. Procedimentos metodológicos

A pesquisa será conduzida em duas etapas principais: (1) referencial teórico exploratório e (2) adaptação e aplicação teórica do modelo econômico de viabilidade.

O referencial teórico exploratório terá caráter investigativo, com o objetivo de reunir, analisar e sintetizar informações relevantes sobre o uso de fertilizantes orgânicos e resíduos agroindustriais na agricultura, as características químicas e agronômicas dos resíduos cítricos (bagaço, casca e polpa), os efeitos dos resíduos cítricos no solo e na produtividade de culturas, além do modelo econômico de análise de viabilidade de fertilizantes orgânicos, conforme as equações apresentadas no estudo base.

As fontes de pesquisa incluirão artigos científicos indexados nas bases Scopus, ScienceDirect e SciELO, utilizando palavras-chave como *Organic Compound*, *Fertilizer in citrus*, *Citrus in Brazil* e *Citrus organic residues*. Também serão utilizados relatórios técnicos e publicações de instituições como Embrapa, IAC e FAO, normas técnicas como AS4454 e AS3743 (quando aplicáveis), além de livros e teses sobre economia agrícola, fertilidade do solo e gestão de resíduos orgânicos.

Os critérios de seleção envolverão a apresentação de dados sobre composição química e potencial agronômico dos resíduos cítricos, a avaliação do impacto do uso de fertilizantes orgânicos em solos e culturas tropicais e a inclusão de informações sobre custos de produção, preços agrícolas e eficiência econômica.

5.3. Adaptação do modelo econômico

O modelo econômico proposto por Culas; Anwar; Maraseni (2025) será adaptado para o contexto das culturas cítricas.

O modelo original avalia a viabilidade do uso de fertilizantes orgânicos com base na maximização da renda líquida do produtor (Π_t), considerando custos e benefícios ao longo do tempo.

Para a adaptação, foram definidas variáveis:

- Y_t – produtividade média das culturas cítricas (t/ha);
- F_t – custo e dose de fertilizantes inorgânicos (N, P, K);
- C_t – custo e quantidade de resíduos cítricos aplicados (matéria orgânica);
- S_t – qualidade do solo (indicada por teor de carbono orgânico e nutrientes);

- Z_t – co-benefícios econômicos e ambientais (redução de custos, sequestro de carbono, reciclagem de resíduos);
- p - preço da caixa de citros;
- r - taxa de desconto;
- t - índice de tempo;
- j - fator de monetização de carbono.

A coleta de dados secundários envolverá informações sobre os custos médios de fertilizantes químicos e orgânicos, com base em fontes como Embrapa e IEA, além dos preços de venda da laranja e da produtividade média, obtidos a partir de dados da CitrusBR e Cepea. Também serão considerados os teores médios de nutrientes e de carbono presentes nos resíduos cítricos, compilados a partir de artigos científicos e relatórios técnicos.

A partir desses dados, serão formulados cenários teóricos para avaliar diferentes níveis de substituição entre fertilizantes inorgânicos e resíduos cítricos.

- Cenário 1: 25% fertilização inorgânica (convencional);
- Cenário 2: 50% substituição por resíduos cítricos compostados;
- Cenário 3: 75% fertilização orgânica (resíduos cítricos tratados).

5.4. Cálculo da viabilidade econômica:

A viabilidade econômica será calculada por meio da:

Aplicação teórica do modelo de maximização da renda líquida:

$$\text{Max } \Pi_t = [p \cdot Y_t - q(F_t, C_t)]$$

Estimativa do Valor Presente Líquido (VPL) dos lucros, conforme a Equação:

$$\text{VPL} = \sum [1/(1+r)^t] \cdot \Pi_t$$

Consideração dos co-benefícios ambientais (Z_t) conforme a Equação:

$$Z_{t+1} = j(C_{t+1} - C_t)$$

Após essa etapa, será realizada uma análise comparativa entre os cenários, discutindo-se a relação entre:

- Produtividade, custos e benefícios ambientais;
- Viabilidade econômica e ecológica do uso de resíduos cítricos como

fertilizante orgânico.

5.5. Limitações, Ética e Confiabilidade da Pesquisa

A metodologia apresenta limitações decorrentes do uso de dados secundários, sujeitos a variações regionais ou sazonais. A ausência de experimentação *in loco* restringe a precisão dos resultados quantitativos, e o modelo adotado oferece uma avaliação teórica e comparativa, e não empírica, o que implica que os resultados devem ser interpretados como tendências, e não valores absolutos.

No que se refere à ética e confiabilidade, por tratar-se de uma pesquisa bibliográfica, este estudo não envolve experimentação com seres humanos, animais ou coleta de dados primários, o que dispensa aprovação ética formal. Todas as fontes de informação serão devidamente citadas de acordo com as normas da ABNT (NBR 10520), assegurando a integridade e a confiabilidade dos dados utilizados.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Viabilidade do uso de compostagem

Os resultados encontrados na literatura, evidenciam que a compostagem do bagaço cítrico apresenta elevado potencial de aproveitamento agrônomo, econômico e ambiental. A caracterização físico-química dos resíduos indica composição média de 60 % de casca, 25 % de bagaço e 15 % de sementes e polpa residual, com umidade superior a 80 % e pH entre 3,5 e 4,0, valores encontrados por Siles et al. (2016) e Intrigliolo et al. (2005).

Durante o processo de compostagem, há uma redução progressiva da umidade e estabilização da relação C/N, alcançando valores próximos de 15:1 ao final do processo, o que indica maturidade adequada. Além disso, também há a redução significativa de odores, aumento de temperatura nas fases termofílicas (acima de 60 °C) e estabilidade biológica na fase de resfriamento, o que é relatado por Bernal-Vicente et al. (2008).

O composto orgânico apresenta teores expressivos de matéria orgânica, nitrogênio total, fósforo e potássio, além de micronutrientes como ferro, manganês e zinco. Ensaios agrônômicos demonstraram incremento na biomassa vegetal e na produtividade de mudas cítricas quando o composto substituiu parcialmente fertilizantes químicos, resultado também relatado por Guerrero et al. (1995).

Do ponto de vista econômico, estima-se redução de até 35 % nos custos de

destinação de resíduos quando comparada à disposição convencional (aterro ou incineração), além de potencial receita com comercialização do composto orgânico. Além disso, o uso do composto orgânico auxilia o processo do sequestro de carbono no solo e a redução das emissões potenciais de metano (CH₄), conforme apontam Davamani et al. (2022) e De Souza Junior et al. (2025).

Esses resultados indicam que a compostagem do bagaço cítrico representa uma alternativa viável de valorização de resíduos agroindustriais, alinhada aos princípios da economia circular e às metas de ESG. Além disso, esses achados validam o uso do composto cítrico como biofertilizante natural, apto a substituir parcialmente os adubos minerais sem comprometer a produtividade.

6.2. Aplicação do modelo econômico

Nesta seção são apresentados os resultados da modelagem do co-benefício econômico anual por hectare (Z) (Apêndice A), referente à substituição parcial de fertilizantes minerais (NPK) por resíduo cítrico orgânico em pomares de laranja, considerando diferentes níveis de qualidade do solo (baixa, média e elevada). Os parâmetros utilizados basearam-se nas seguintes referências empíricas: produtividade média estimada de 869 caixas por hectare, segundo o Fundecitrus para a safra 2025/26 no cinturão citrícola paulista; preço médio da caixa de R\$ 50, conforme relatórios de preço do mercado citrícola de outubro de 2025 (CEPEA/Esalq, 2025); e custo médio anual de fertilizantes minerais (NPK) de R\$ 2.245,35 por hectare, conforme o boletim *Especial Citros* do CEPEA/Esalq (maio de 2025). O custo do composto orgânico derivado de resíduo cítrico foi definido na faixa de R\$ 20,00 a R\$ 72,87 por tonelada, com base nos valores públicos da SLU-DF (2024), e a dose de aplicação foi estimada em 7 t ha⁻¹ ano⁻¹, conforme benchmark técnico para citros.

Os cálculos de Z consideraram que a eficiência da substituição dos fertilizantes minerais por composto orgânico varia com a qualidade do solo. Assim, foi introduzido um fator de eficiência (e), representando o potencial agrônômico do solo em reter e mineralizar nutrientes. Foram adotados os valores $e = 0,60$ para solo de baixa qualidade, $e = 0,80$ para solo de qualidade média e $e = 1,00$ para solo de alta qualidade.

Tabela 2: Resultados do cobenefício económico Z (R\$/ha·ano) segundo qualidade do solo e custo do resíduo

Qualidade do Solo	Substituição (%)	Resíduo a R\$ 20/t	Resíduo a R\$ 72,87/t
<i>Baixa (0,60)</i>	25%	196,80	-173,29
	50%	533,60	163,51
	75%	870,41	500,32
<i>Média (0,80)</i>	25%	309,07	-61,02
	50%	758,14	388,05
	75%	1207,21	837,12
<i>Alta (1,00)</i>	25%	421,34	51,25
	50%	982,67	612,58
	75%	1.544,01	1.173,92

Os resultados demonstram que a substituição parcial de fertilizantes minerais por composto cítrico apresenta ganhos econômicos progressivos à medida que aumentam a qualidade do solo e o nível de substituição. Em solos de baixa fertilidade, Z varia de -R\$ 173,29 a R\$ 870,41 por hectare, revelando que, quando o composto é caro e aplicado em pequena proporção (25 %), o custo do insumo supera a economia obtida com a redução de NPK, tornando a prática economicamente desfavorável. Contudo, a partir de 50 % de substituição, o saldo torna-se positivo, indicando viabilidade econômica mesmo em condições menos férteis.

Em solos de qualidade média, o co-benefício situa-se entre -R\$ 61,02 e R\$ 1 207,21 por hectare, mostrando que a eficiência agrônômica superior compensa parcialmente o custo mais elevado do composto. Já em solos de alta qualidade, os benefícios alcançam de R\$ 51,25 a R\$ 1 544,01 por hectare, correspondendo a uma economia potencial de até 69 % nos custos de fertilização com NPK ($C_{npk} = R\$ 2 245,35/ha$).

Embora esses valores representem apenas de 1 % a 3,6 % da receita bruta por hectare (estimada em R\$ 43 450,00 com base na produtividade média de 869 caixas/ha × R\$ 50/cx), sua relevância reside na redução dos custos variáveis agrícolas e na diversificação de fontes de insumos, elementos que ampliam a resiliência econômica das propriedades e reduzem a dependência de fertilizantes minerais importados.

A variação de Z conforme a qualidade do solo confirma que sistemas agrícolas com maior estoque de matéria orgânica, melhor estrutura física e ciclagem ativa de nutrientes permitem substituições mais eficientes, resultado coerente Quaggio e colaboradores do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) (2022) com o boletim 100. O efeito sinérgico entre a qualidade do solo e o uso de compostos orgânicos está amplamente descrito na literatura, que destaca a liberação gradual de nitrogênio e a maior biodisponibilidade de fósforo e potássio em compostos bem estabilizados. Assim, solos mais férteis não apenas reduzem custos de fertilização, mas também asseguram produtividade estável e maior resiliência frente a estresses climáticos.

A variabilidade do custo do composto é um fator crítico na determinação de Z . A faixa entre R\$ 20,00 e R\$ 72,87 por tonelada reflete diferenças logísticas e operacionais, podendo o transporte representar até 45 % do valor final do insumo (SLU-DF, 2024). Em regiões com acesso local a resíduos cítricos, por exemplo, parcerias entre indústrias de suco e pomares vizinhos, o co-benefício econômico é substancialmente ampliado. Por outro lado, em situações de longas distâncias ou baixa fertilidade, a compostagem se torna menos competitiva.

Do ponto de vista ambiental e sistêmico, a incorporação de compostos cítricos contribui para a redução da dependência de fertilizantes minerais importados e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à sua produção, além de promover a reciclagem de resíduos agroindustriais, mitigando passivos ambientais. Essa prática reforça os princípios da economia circular, integrando agroindústria e agricultura em ciclos de nutrientes fechados e sustentáveis.

Sob a ótica econômica e de governança, os resultados evidenciam que a compostagem apresenta vantagem competitiva frente aos métodos convencionais de descarte, sobretudo quando considerados custos de transporte e taxas de disposição. Além disso, o composto pode gerar receita adicional ao ser comercializado como biofertilizante certificado, fortalecendo modelos de negócio sustentáveis.

Por fim, reconhece-se que ainda persistem barreiras operacionais e regulatórias para a adoção em larga escala, como a variabilidade da matéria-prima, a falta de padronização de processos e a ausência de incentivos fiscais. A literatura reforça que o êxito da economia circular na agroindústria depende da integração entre inovação tecnológica, políticas públicas e modelos empresariais sustentáveis (MEHMOOD et al., 2021; MIRABELLA et al., 2014; SCARLAT et al., 2015).

6.3. Indicadores ESG e ODS

Além dos impactos econômicos e ambientais diretos, os resultados dialogam com os ODS propostos pela Agenda 2030 da ONU, evidenciando a convergência entre inovação agrícola e compromissos globais de sustentabilidade. O uso de resíduos cítricos compostados contribui para o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao incentivar práticas agrícolas de alta produtividade e baixo impacto ambiental; para o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao reaproveitar subprodutos do processamento de sucos; para o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao reduzir emissões de CO₂ ligadas à produção de fertilizantes químicos; e para o ODS 15 (Vida Terrestre), ao favorecer a recuperação de solos degradados e a conservação da biodiversidade edáfica.

A compostagem do bagaço cítrico representa uma rota tecnológica eficiente para minimizar a carga poluidora da indústria citrícola. Além de reduzir a demanda bioquímica e química de oxigênio (DBO e DQO) das águas residuais, o processo permite o reaproveitamento integral da matéria orgânica, inserindo-a novamente no ciclo produtivo.

Segundo Cinardi et al. (2025), a aplicação do modelo de biorrefinaria a resíduos cítricos possibilita a recuperação simultânea de energia (biogás) e nutrientes, contribuindo para o fechamento do ciclo de carbono e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Essa integração tecnológica, segundo Davamani et al. (2022), posiciona a compostagem como um pilar estratégico da bioeconomia circular.

6.4. Integração do modelo econômico com ESG

Sob a ótica dos critérios ESG, a adoção de compostos cítricos como insumo agrícola traduz-se em uma prática de elevada governança ambiental (E), com benefícios sociais associados à geração de emprego regional, ao fortalecimento da agroindústria local e à valorização de cadeias produtivas de baixo impacto. No aspecto de governança (G), o uso de indicadores de desempenho ambiental e rastreabilidade da produção fortalece a transparência e a competitividade das propriedades rurais, especialmente diante de mercados que exigem certificações de sustentabilidade. Essa integração entre ODS e ESG confere às propriedades cítricas uma vantagem estratégica, ampliando seu acesso a créditos verdes, programas de incentivo fiscal sustentável e mercados internacionais comprometidos

com cadeias produtivas éticas e rastreáveis.

Portanto, além do benefício econômico calculado, o uso estratégico de resíduos cítricos reforça a licença social e ambiental para operar, hoje um ativo essencial à perenidade econômica e reputacional do agronegócio brasileiro. Empresas e produtores que adotam práticas de manejo regenerativo tendem a conquistar maior legitimidade perante consumidores e investidores, ao mesmo tempo em que contribuem para o cumprimento das metas de neutralidade de carbono e de proteção dos recursos naturais.

Por fim, embora os resultados aqui apresentados se baseiem em dados secundários e em parâmetros teóricos, eles oferecem uma base robusta para a formulação de hipóteses em estudos futuros, incluindo a necessidade de validação experimental da eficiência de substituição (25 % – 75 %) e a inclusão de variáveis adicionais, como custos de transporte, aplicação e idade dos pomares. Também se recomenda o uso de modelos dinâmicos, como o APSIM (Agricultural Production Systems Simulator), para estimar os efeitos de longo prazo do uso de compostos orgânicos sobre a produtividade e a qualidade do solo.

Em síntese, o co-benefício Z, quando reinterpretado sob a ótica dos ODS e do ESG, transcende o valor monetário isolado. Ele representa um avanço rumo a uma citricultura regenerativa e responsável, capaz de equilibrar rentabilidade, conservação dos recursos naturais e bem-estar coletivo. O uso de resíduos cítricos compostados mostra-se, assim, não apenas economicamente viável e ambientalmente desejável, mas também institucionalmente alinhado às metas globais de sustentabilidade, consolidando-se como uma estratégia de transição agroecológica e de fortalecimento da competitividade da citricultura brasileira.

7. CONCLUSÕES

A compostagem do bagaço cítrico mostrou-se uma rota tecnicamente viável, economicamente vantajosa e ambientalmente sustentável para a valorização de resíduos agroindustriais, configurando-se como um vetor estratégico da bioeconomia circular na citricultura. O processo permite transformar passivos ambientais em biofertilizantes de elevado teor de matéria orgânica e nutrientes essenciais (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Zn), promovendo o aumento da fertilidade do solo, da capacidade de troca catiônica e da atividade microbiana.

A análise econômica evidenciou redução significativa dos custos de destinação

e fertilização, bem como potencial de geração de receita por meio da comercialização do composto, reforçando a viabilidade financeira da prática. Esses resultados confirmam a hipótese alternativa (H_1), segundo a qual a compostagem do bagaço cítrico é economicamente e ambientalmente viável, e refutam a hipótese nula (H_0) de ausência de ganhos frente às rotas convencionais de descarte.

Sob a ótica dos critérios ESG e dos ODS 2, 12, 13 e 15, a compostagem contribui para cadeias produtivas mais circulares, resilientes e de baixo impacto climático, fortalecendo a governança ambiental e a competitividade da citricultura brasileira. Para consolidar sua aplicação em escala industrial, recomenda-se o avanço em políticas públicas integradas, certificação de qualidade e incentivos fiscais, bem como a realização de ensaios de campo de longo prazo e análises de ciclo de vida (ACV), que permitam mensurar de forma precisa os benefícios ambientais e econômicos.

Em síntese, a compostagem do bagaço cítrico representa uma solução de engenharia ambiental regenerativa, capaz de equilibrar rentabilidade, sustentabilidade e inovação tecnológica, posicionando-se como um pilar promissor da transição para sistemas agrícolas circulares e climaticamente inteligentes.

8. REFERÊNCIAS

- BAMPIDIS, V.A; ROBINSON, P.H. Citrus by-products as ruminant feeds: A review. **Anim. Feed Sci. Technol.** v. 128, p. 175–217, 2006.
- BENITEZ, S. F. et al. A step into circular economy: Mycoaugmentation strategy for citrus wastewater management and value-added biocompound production. **Journal of Cleaner Production.** v. 520, 2025.
- BERNAL-VICENTE, A. et al. Citrus compost and its water extract for cultivation of melon plants in greenhouse nurseries. Evaluation of nutriactive and biocontrol effects. **Bioresour. Technol.** v. 99, p. 8722–8728, 2008.
- BRASIL. Glossário de Termos Oficiais – Bioinsumos e Biofertilizantes. **Ministério da Agricultura e Pecuária**, 2021.
- CALABRÒ, P. et al. Effect of the concentration of essential oil on orange peel waste biomethanization: Preliminary batch results. **Waste Manage.** v. 48, p. 440–447, 2016.
- CINARDI, G. et al. Integrated biorefinery approach to valorize citrus waste within circular economy principles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 192, p. 113095, 2025.
- CHAKRAVARTY, I.; PARMAR, V.M; MANDAVGANE, S.A. Current trends in essential oil (EO) production. **Biomass Conversion and Biorefinery.** v. 17, p. 15311–15334, 2023.
- CHHIKARA, N. et al. Citrus medica: nutritional, phytochemical composition and health benefits—a review. **Food Funct.** v.9, p. 1978–1992, 2018.

COLAÇO, A. F. et al. Economic viability, energy and nutrient balances of site-specific fertilisation for citrus. **Biosystems Engineering**. v. 200, p. 138–156, 2020.

CULAS, Richard J. et al. A framework for evaluating benefits of organic fertilizer use in agriculture. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 19, 2025.

DAVAMANI, V. et al. Phytolith-occluded carbon sequestration potential of oil palm plantation in Tamil Nadu. **ACS Omega**. v.7, p. 2809–2820, 2022.

DELOITTE. Circularity Gap Report 2025. **Deloitte Global**, 2025.

DE SOUZA JUNIOR, J. P et al. Mitigating abiotic stress in citrus: the role of silicon for enhanced productivity and quality. **Plant Stress Elsevier B.V.**, 2025.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Recomendações técnicas para produção e uso de biofertilizantes. **Embrapa Meio Ambiente**, 2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Biofertilizantes e eficiência nutricional em sistemas agroecológicos. **Embrapa Meio Ambiente**, 2022.

EUROPEAN COMMISSION. Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. **Brussels: European Commission**, 2025.

FAO. The Statistics Division, Citrus Fruit Statistical Bulletin, 2020.

FAO. The Statistics Division, Citrus Fruit Statistical Bulletin, 2021.

FAOSTAT, 2017. Citrus fruit fresh and preprocessed. **Statistical Bulletin**, 2016.

FERLITO, F. et al. Evaluation of conifer wood biochar as growing media component for citrus nursery. **Appl. Sci**. v. 10, p. 2–12, 2020

FLOR, D. et al. Identifying positive tipping points for a circular economy transition: A systematic analysis at an island scale. **Journal of Cleaner Production Elsevier Ltd**, 2025.

GUERRERO, C.C. et al. Re-use of industrial orange wastes as organic fertilizers. **Bioresour Technol**. v. 53, p. 43–51, 1995.

HU, Yuan *et al.* Status quo and trend of development of comprehensive resource utilization of citrus by-products. **Journal of Future Foods**, 2025.

HOSSEINI, S. S. et al. Valorization of citrus waste for biofertilizer production. **Journal of Environmental Management**, v. 165, p. 277–284, 2016.

INTRIGLILOLO, F. et al. Production of a quality compost from agroindustrial wastes. **Geophys Res. Abs**. 2005.

KAUR, S. et al. From citrus waste to value-added products: Exploring biochemical routes for sustainable valorization. **Process Biochemistry**. v. 158, p. 81–98, 2025.

KAUR, S. et al. Exploring the bioactive potential of citrus reticulata pomace: extraction, characterization, and applications, **Food Humanit**. 2025.

KIRCHHERR, J. et al. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. **Resources, Conservation and Recycling Elsevier B.V.**, 2023.

KHRUENGSAI, S. et al. Optimization of enzyme-assisted microwave extraction of zanthoxylum limonella essential oil using response surface methodology. **Sci. Rep**. v. 13, 2023.

KRUG, A. V. et al. Proposition of critical levels of nutrients in citrus leaves, grown in a subtropical climate, for fresh market fruit production. **Scientia Horticulturae**. v. 317, 2023.

- KUMAR, H. et al. Applications of citrus peels valorisation in circular bioeconomy. **Journal of Agriculture and Food Research**. 2025.
- LAVELLI, V. Circular food supply chains – impact on value addition and safety. **Trends Food Sci. Technol.** v. 114, p. 323–332, 2021
- LAVELLI, V. Circular food supply chains (CFSC): A literature review focusing on citrus by-products management. **Trends in Food Science & Technology**. v. 116, p. 593–604, 2021.
- LENTON, T.M. et al. Operationalising positive tipping points towards global sustainability. **Glob. Sustain.** v.5, 2022
- LUCIA, C. et al. Challenges and opportunities for citrus wastewater management and valorisation: a review. **J. Environ. Manag.** v. 321, 2022.
- MAHATO, N., Citrus waste derived nutra-pharmaceuticals for health benefits: Current trends and future perspectives. **J. Funct. Foods**, v. 40, p. 307–316, 2018.
- MAHATO, S. et al. Circular bioeconomy and valorization of agro-industrial residues: challenges and prospects. **Waste Management**. v. 120, p. 619–631, 2021.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Decreto nº 10.375, de 26 de maio de 2020. Institui o Programa Nacional de Bioinsumos. **Diário Oficial da União**, 2020.
- MARCHANT, B. P. The economics of precision agriculture. In Precision agriculture for sustainability and environmental protection, p. 191-204, 2013.
- MARTÍNEZ, P. et al. Biodegradable waste in compost production: a review of its economic benefits and challenges. **Circular Economy and Sustainability**, v. 5, n. 2, p. 112–127, 2025.
- MEHMOOD, A. Drivers and barriers towards circular economy in agri-food supply chain: a review. **Business Strategy & Development**, v. 4, p. 465–481, 2021.
- MIRABELLA, N. Current options for the valorization of food manufacturing waste: a review. **J. Clean. Prod.** v. 65, p. 28–41, 2014.
- MIR-TUTUSAUS, J.A. Can white-rot fungi be a real wastewater treatment alternative for organic micropollutants removal? A review. **Water Res**, v. 138, p. 137–151, 2018.
- OLDFIELD, T.L. An environmental analysis of options for utilising wasted food and food residue. **J. Environ. Manag**, v. 183, p. 826–835, 2016.
- PATSALOU, Maria et al. A biorefinery for conversion of citrus peel waste into essential oils, pectin, fertilizer and succinic acid via different fermentation strategies. **Waste Management**. v. 113, p. 469–477, 2020.
- QUAGGIO, J.A. et al. **Citros**. In: H. CANTARELLA, J.A. QUAGGIO, D. MATTOS JR., R.M. BOARETTO, RAIJ, B. van. (Ed.). **Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 1ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2022, p. 187-198.
- ROCCUZZO, G. Conifer wood biochar as growing medium for citrus nursery. **Acta Hortic.** v. 17, 317–325, 2018.
- ROCCUZZO, G. et al. Carbon budget in Mediterranean citrus orchards: The role of organic amendments. **European Journal of Agronomy**, v. 99, p. 212–221, 2018.
- SATARI, B., Karimi, K. Citrus processing wastes: Environmental impacts, recent

advances, and future perspectives in total valorization. **Resour. Conserv. Recycl.**, v. 129, p. 153–167, 2018.

SATARI, B. Co-production of fungal biomass derived constituents and ethanol from citruswastes free sugars without auxiliary nutrients in airlift bioreactor. **Int. J. Mol. Sci.**, v. 17, 2018.

SCARLAT, N. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European union: An overview from national renewable energy action plans and progress reports. **Renew. Sustain. Energy Rev**, v. 51, p. 969–985, 2015.

SILES, J.A. Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting technologies. **Bioresour. Technol.**, v. 211, p. 173–182, 2016.

SILES, J. A. et al. Anaerobic digestion and composting of citrus waste: a review. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 38–49, 2016.

SHARMA, K., Mahato, N., Cho, M.H. Converting citrus wastes into value-added products: Economic and environmentally friendly approaches. **Nutrition**, v. 34, p. 29–46, 2017.

SHARMA, K. Extraction, characterization and biological activity of citrus flavonoids. **Rev. Chem. Eng**, 2018.

TAIZ, L. et al. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TORRISI, B. et al. Physico-chemical and multielemental traits of anaerobic digestate from Mediterranean agro-industrial wastes and assessment as fertiliser for citrus nurseries. **Waste Management**, v. 131, p. 201–213, 2021.

USDA. Citrus: World Markets and Trade. **World citrus organization**, 2025.

USDA. Citrus: World Markets and Trade. United States Department of Agriculture. **Foreign Agricultural Service**, 2021.

WADHWA, M.; BAKSHI, M. P. S. Utilization of fruit and vegetable wastes as livestock feed and as substrates for generation of other value-added products. **FAO Publication**, 2013.

YADAV, V.; SARKER, Shamimul; et al. Integrated biorefinery approach to valorize citrus waste: A sustainable route towards circular bioeconomy. **Chemosphere**, v. 297, p. 133-947, 2022.

YANG, S. et al. Status quo of comprehensive utilization and development trend of citrus by-product resources, **J. Food Sci. Technol.** v. 39, 2021.

YANG, Z. et al. Organic fertilizer substitution synergistically improves the fruit-soil-bacteria system in Newhall navel orange under long-term management. **Scientia Horticulturae**. v. 350, 2025.

YANG, Q.L. et al. Combined application of organic and inorganic fertilizers mitigates ammonia and nitrous oxide emissions in a maize field. **Nutr. Cycl. Agroecosys**. v. 117, p. 13–27, 2020.

YUSUF, H. et al. Barriers to implementing circular citrus supply chains: A systematic literature review. **Journal of Environmental Management**. v. 373, 2025.

ZHANG, Y. et al. Organic waste compost improves carbon fractions and microbial activity in citrus orchards. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 361, p. 108–116, 2024.

ZEMA, D.A. et al. Anaerobic digestion of orange peel in a semi-continuous pilot plant: an environmentally sound way of citrus waste management in agroecosystems. **Sci. Total Environ.** v. 630, p. 401-408, 2018.

ZIPING, L. et al. Aerobic fermentation process of citrus pulp mixed with straw, **Jiangsu Agricultural Sciences.** v.44, p. 491-493, 2019.

APÊNDICE A - Cálculos do modelo econômico

A.1. Parâmetros e fontes utilizados

Produtividade média (safra 2025/26): $Y_t = 869$ caixas/ha — Fundecitrus (Estimativa 2025/26).

Preço da caixa (out/2025): $p = R\$ 50,00/cx$ — CEPEA/ESALQ (cotações de outubro/2025).

Custo anual com fertilizantes minerais (linha "Fertilizantes"): $C_{npk,base} = R\$ 2.245,35/ha$ — HF Brasil/CEPEA, Especial Citros (mai/2025).

Custo do resíduo orgânico (composto público): $R\$ 20,00/t$ (produtor rural) e $R\$ 72,87/t$ (particular) — SLU/DF (tabela pública).

Dose anual de resíduo para citros: $7 t/ha \cdot ano$ — benchmark técnico ($\approx 3 t/acre$) para citros.

Base metodológica e diagnósticos de solo: IAC (Boletim 100) e Embrapa Solos (métodos e faixas de interpretação).

A.2. Receita bruta no período t

$$p \cdot Y_t = R\$ 50,00 \times 869 = R\$ 43.450,00/ha$$

A.3. Custo de adubação no cenário base (sem resíduo)

$$q(F_t, C_t)_{base} = C_{npk,base} = R\$ 2.245,35/ha$$

$$\text{Lucro parcial (receita - adubação)} = 43.450,00 - 2.245,35 = R\$ 41.204,65/ha$$

A.4. Custo do resíduo por hectare

$$C_{resíduo} = \text{dose} \times \text{preço resíduo}$$

$$\text{Resíduo "barato": } 7 \times R\$ 20,00 = R\$ 140,00/ha$$

$$\text{Resíduo "caro": } 7 \times R\$ 72,87 = R\$ 510,09/ha$$

A.5. Substituição parcial de NPK por resíduo (função de S_t)

Definindo s como a fração do custo NPK substituída pelo orgânico, variando com a qualidade do solo

S_t :

O co-benefício econômico foi calculado conforme a equação:

$$Z = s \cdot C_{npk,base} - C_{resíduo}$$

A.6. Valor Presente Líquido (VPL)

$$NPV = \sum [\Pi_t / (1 + r)^t]$$

$$\Delta NPV = Z \times [(1 - (1 + r)^{-n}) / r]$$

Exemplo: $r = 8\%$ a.a., $n = 5$ anos \rightarrow fator $\approx 3,9925$

$$Z = R\$ 1.544,01 \rightarrow \Delta NPV \approx R\$ 6.167,30/ha$$

A.7. Referências das variáveis

Fundecitrus — Estimativa da Safra 2025/26: produtividade média 869 cx/ha.

CEPEA/ESALQ — cotações da caixa de laranja (out/2025 $\approx R\$ 50/cx$).

HF Brasil/CEPEA — Especial Citros (mai/2025): custo 'Fertilizantes' $R\$ 2.245,35/ha$.

SLU/DF — Tabela pública de composto: R\$ 20/t (produtor) e R\$ 72,87/t (particular).

IAC — Boletim 100; Embrapa Solos — recomendações e métodos de análise.

Benchmark técnico (UF/IFAS): 7 t/ha·ano de composto para citros.