

Universidade Estadual Paulista

Maria Pia Assumpção Bozelli

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO
CONVENCIONAL E
AGROFLORESTAL ORGÂNICO DO
LIMÃO TAHITI: UM ESTUDO
COMPARATIVO

Jaboticabal

2023

MARIA PIA ASSUMPÇÃO BOZELLI

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA
DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO
CONVENCIONAL E
AGROFLORESTAL ORGÂNICO DO
LIMÃO TAHITI: UM ESTUDO
COMPARATIVO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como
exigência parcial para obtenção do grau de
Mestre em Administração.

Área de Concentração: Gestão de Organizações
Agroindustriais

Orientador: Prof.^a Dra. Andréia Marize Rodrigues

Jaboticabal

2023

- B793a Bozelli, Maria Pia Assumpção
- Avaliação do ciclo de vida dos sistemas de produção convencional e agroflorestal orgânico do limão Tahiti: um estudo comparativo / Maria Pia Assumpção Bozelli. -- Jaboticabal, 2023
79 p.
- Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
- Orientadora: Andreia Marize Rodrigues
1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Agrofloresta. 3. Sistema de produção agrícola. 4. Limão Tahiti. 5. Impactos ambientais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO
CONVECCIONAL E AGROFLORESTAL ORGÂNICO DO LIMÃO THAITI: UM
ESTUDO COMPARATIVO

AUTORA: MARIA PIA ASSUMPÇÃO BOZELLI**ORIENTADORA: ANDREIA MARIZE RODRIGUES**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Administração, área:
Gestão de Organizações Agroindustriais pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. ANDREIA MARIZE RODRIGUES (Participação Virtual)
Departamento de Economia Administração e Educação / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br ANDREIA MARIZE RODRIGUES
Data: 13/07/2023 15:06:08-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MARCELO GIROTTI REBELATO (Participação Virtual)
Departamento de Economia Administração e Educação / FCAV UNESP Jaboticabal

Profa. Dra. ETHEL CRISTINA CHIARI DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Produção / UNIARA - Araraquara/SP

Documento assinado digitalmente
gov.br ETHEL CRISTINA CHIARI DA SILVA
Data: 12/07/2023 17:52:31-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jaboticabal, 25 de maio de 2023

“Há sem dúvida quem ame o infinito,
Há sem dúvida quem deseje o impossível,
Há sem dúvida quem não queira nada
Três tipos de idealistas, e eu nenhum deles:
Porque eu amo infinitamente o finito,
Porque eu desejo impossivelmente o possível,
Porque eu quero tudo, ou um pouco mais, se puder ser,
Ou até se não puder ser...”

Álvaro de Campos

Resumo

Objetivo

O objetivo geral deste trabalho consiste no estudo comparativo dos potenciais impactos ambientais em sistemas de produção convencional e agroflorestal orgânico do limão Tahiti, através da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Metodologia / Procedimentos de Pesquisa

A pesquisa possui orientação metodológica quantitativa, devido ao uso do método ACV pautado em ferramentas padronizadas e neutras. Esta pesquisa está organizada em cinco capítulos, a contar da Introdução. Para aplicação do método de ACV no sistema de produção convencional de agroflorestal orgânico do limão Tahiti, foi necessária a realização de revisão de literatura sobre os temas que permeiam o método de ACV, bem como levantamento bibliográfico sobre os sistemas de produção do limão Tahiti. O método ACV foi aplicado em quatro etapas, conforme previsto pela norma ISO 14040: definição dos objetivos e escopo, análise de inventários, avaliação dos impactos e interpretação. Para avaliação do inventário foi selecionado o método ReCiPe, que possui caráter combinativo entre abordagens de *midpoint* e *endpoint*, e compreende as categorias de Mudanças climáticas, Depleção do ozônio estratosférico, Acidificação terrestre, Eutrofização de água doce, Ecotoxicidade terrestre, Ecotoxicidade de água doce, Uso de terra agrícola, Depleção de recursos fósseis e Toxicidade humana. Para processamento dos dados foi utilizado o software GaBi.

Resultados e Discussões

Para a unidade funcional utilizada nesta pesquisa de 01 tonelada de limão Tahiti, o SAF orgânico apresenta menor impacto ambiental em oito, dentre as nove as categorias de impacto analisadas através do método ReCiPe de ACV. Apenas na categoria de Uso de terra agrícola, o SAF apresenta desempenho inferior ao sistema de produção convencional, em relação aos impactos ambientais causados. Em ambos os sistemas de produção, os processos produtivos que apresentaram maior impacto ambiental são os processos mecanizados, devido as emissões provenientes da combustão e produção de diesel, tratores e implementos agrícolas. O uso de fertilizantes sintéticos pelo sistema convencional apresentou impacto significativo nas categorias de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade terrestre. Em estudos futuros, recomenda-se a combinação do método de ACV, com modelagem financeira e análise de sequestro de carbono.

Implicações Gerenciais

A aplicação do ACV nos diferentes sistemas de produção permitiu a identificação dos pontos fortes e pontos fracos de cada um dos sistemas em relação ao impacto ambiental causado. Foi possível identificar quais são os processos que mais contribuem para as emissões no ar, na água e no solo em cada cadeia produtiva. Os resultados obtidos poderão contribuir para a tomada de decisão nos processos relacionados à cultura de citrus no estado de São Paulo.

Originalidade

A originalidade do estudo está relacionada à ausência de pesquisas em ACV que tenham explorado a comparação entre a agricultura convencional e agroflorestal orgânica do limão Tahiti no Brasil.

Palavras-chaves: ACV, limão Tahiti, lima ácida Tahiti, produção agrícola, orgânico, agroflorestal.

Abstract

Purpose

The general objective of this work consists in the comparative study of the potential environmental impacts in conventional production systems and organic agroforestry of Tahiti lemon, through the Life Cycle Assessment (LCA) tool.

Design/methodology

The research has a quantitative methodological orientation, due to the use of the LCA method based on standardized and neutral tools. This research is organized into five chapters, starting from the Introduction. For the application of the LCA in the conventional production system of organic agroforestry of the Tahiti lemon, it was necessary to complete the literature review method on the themes that permeate the LCA method, as well as a bibliographical survey on the production systems of the Tahiti lemon. The LCA method was applied in four stages, as provided for by the ISO 14040 standard: definition of objectives and scope, analysis of surveys, evaluation of effects and interpretation. To evaluate the inventory, the ReCiPe method was selected, which combines midpoint and endpoint approaches, and comprises the categories of Climate Change, Stratospheric Ozone Depletion, Terrestrial Acidification, Freshwater Eutrophication, Terrestrial Ecotoxicity, Water Ecotoxicity, Agricultural land use, Depletion of fossil resources and Human toxicity. For data processing, the GaBi software was used.

Findings and Discussions

For the functional unit used in this research of 01 ton of Tahiti lemon, the organic SAF has a lower environmental impact in eight, among the nine impact categories analyzed through the LCA ReCiPe method. Only in the category of Agricultural land use, the SAF has a lower performance than the conventional production system, in relation to the environmental impacts caused. In both production systems, the production processes that had the greatest environmental impact are the mechanized processes, due to emissions from the combustion and production of diesel, tractors and agricultural implements. The use of synthetic fertilizers by the conventional system had a significant impact on the Human Toxicity and Terrestrial Ecotoxicity categories. In future studies, it is recommended to combine the LCA method with financial modeling and carbon sequestration analysis

Management Implication

The application of the LCA in the different production systems allowed the identification of the strengths and weaknesses of each of the systems in relation to the environmental impact caused. It was possible to identify which are the processes that most contribute to emissions in the air, water and soil in each production chain. The results obtained may contribute to decision-making in processes related to citrus cultivation in the state of São Paulo.

Originality

The originality of the study is related to the absence of research in LCA that have explored the comparison between conventional and organic agroforestry agriculture of Tahiti lime in Brazil.

Keywords: LCA, Tahiti lime, persian lime, agricultural production, organic, agroforestry.

Lista de Abreviaturas

ABCV – Associação Brasileira de Ciclo de Vida

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

ADA – Avaliação de Impacto Ambiental

AICV – Avaliação do impacto do ciclo de vida

ALO – Uso de Terra Agrícola

CC – Mudanças climáticas

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBD – Instituto Biodinâmico de Desenvolvimento Rural

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia.

ICV – Inventário do Ciclo de Vida.

ILCD – Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos

FEC – Ecotoxicidade de Água Doce

FEU – Eutrofização de Água Doce

FD – Depleção de Recursos fósseis

GEE – Gases do efeito estufa

ha – Hectare

HT – Toxicidade Humana

ISO – *International Organization for Standardization* (Organização internacional para padronização)

LCA – *Life Cycle Assessment* (Avaliação do ciclo de vida)

LCC – *Life Cycle Cost* (Custo do ciclo de vida)

MIP – Manejo integrado de pragas

OD – Depleção do ozônio

ONG – Organização não governamental

PAG – Potencial de Aquecimento Global

SAF – Sistema Agroflorestal

SETAC – Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental

TA – Acidificação terrestre

TE – Ecotoxicidade Terrestre

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho

Lista de Figuras

Figura 1. Limão Tahiti.....	21
Figura 2. Estrutura da Avaliação de ciclo de vida.....	28
Figura 3. Categorias de impacto da ACV.....	32
Figura 4. Etapas da pesquisa.	39
Figura 5. Localização das propriedades produtoras de limão Tahiti.	40
Figura 6. Representação esquemática do processo produtivo do limão Tahiti.	41
Figura 7. Ilustração do pomar de limão convencional.....	43
Figura 8. Fluxograma da produção de limão Tahiti convencional.	44
Figura 9. Fases da evolução do SAF.....	46
Figura 10. Ilustração do talhão de SAF de limão Tahiti.....	48
Figura 11. Fluxograma do SAF de limão Tahiti.	50
Figura 12. Criação de fluxos no software GaBi.....	52
Figura 13. Criação de processos no software GaBi.....	53
Figura 14. Cálculo de balanço no software GaBi.....	54

Lista de Tabelas

Tabela 1. Área produtiva dos talhões da propriedade de SAF.....45

Tabela 2. Resultados da avaliação dos impactos do ciclo de vida para produção de 1 tonelada de limão Tahiti.....56

Lista de Quadros

Quadro 1. Exemplo dos conceitos ABNT.....	30
Quadro 2. Métodos de AICV e suas categorias de impacto de abrangência global.....	32
Quadro 3. Caracterização do talhão de SAF.....	47
Quadro 4. Comparativo das unidades produtoras.....	55

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos.....	17
1.2. Justificativas	17
1.3. Estrutura do trabalho.....	19
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1. O limão Tahiti.....	20
2.2. Aspectos da produção do limão Tahiti.....	21
2.3. Aspectos da produção agroflorestal.....	23
2.4. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)	24
2.4.1. O surgimento da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida.....	25
2.4.2. ACV: definição e etapas.....	27
2.4.3. Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	29
2.4.4. ACV na produção agrícola.....	34
2.4.5. ACV na produção agrícola orgânica.....	35
3. METODOLOGIA.....	38
3.1 Classificação da pesquisa.....	38
3.2 Etapas da pesquisa	38
3.2.1. Revisão bibliográfica.....	39
3.2.2. Levantamento dos dados de produção de limão Tahiti	40
3.2.3. Aplicação da metodologia de ACV	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1. Comparativo das unidades produtivas.....	55
4.2. Avaliação de impactos do ciclo de vida	56
4.3. Interpretação do ciclo de vida.....	60
4.3.1. Mudanças Climáticas	60
4.3.2. Depleção do ozônio estratosférico.....	61
4.3.3. Toxicidade Humana	61
4.3.4. Acidificação terrestre	62
4.3.5. Eutrofização de água doce.....	63
4.3.6. Ecotoxicidade terrestre	63
4.3.7. Ecotoxicidade de água doce.....	64
4.3.8. Uso da terra agrícola	64
4.3.9. Depleção de recursos fósseis.....	65

4.4. Implicações gerenciais.....	65
5. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS.....	72
APÊNDICES	77
Apêndice A - Inventário de entradas do sistema produtivo convencional.....	77
Apêndice B - Inventário de entradas do sistema produtivo agroflorestal orgânico.	79

1. INTRODUÇÃO

O setor agroalimentar é um dos setores econômicos com maior crescimento em todo o mundo; responsável por levar o alimento do campo até a mesa do consumidor, a agricultura percorreu um longo caminho de evolução e desenvolvimento, adotando recursos tecnológicos com o objetivo de aumentar a produtividade e atender a demanda da população. A prática milenar do cultivo agrícola, que teve início de forma simples com a agricultura de subsistência, atualmente constitui uma complexa cadeia de produção com papel fundamental na economia brasileira. Dominada por grandes empresas da agroindústria, envolve diversos agentes que atuam desde o início da produção rural até o transporte dos produtos para consumo interno e exportações.

Nas últimas quatro décadas, o Brasil deixou de ser um país importador de alimentos para se tornar um dos principais provedores do mundo, ainda com forte potencial para crescimento. A soma dos bens e serviços gerados pelo agronegócio em 2022 representaram 24,8% do PIB brasileiro (IBGE, 2022).

Um dos destaques do setor é a produção e exportação de frutas tropicais, principalmente as frutas cítricas: laranjas, tangerinas, limas e limões (PREVIDELI; ALMEIDA, 2020). A produção de citrus no Brasil está concentrada no chamado cinturão citrícola, que compreende diversos municípios do estado de São Paulo e alguns municípios do triângulo mineiro e sudoeste de Minas Gerais.

O limão Tahiti, objeto de estudo desta pesquisa, é a terceira fruta mais exportada pelo Brasil, tendo a União Europeia como principal destino. Com 1,5 milhão de toneladas produzidas em 2021, a fruta movimentou R\$ 1,7 bilhão no país (EMBRAPA, 2021). O estado de São Paulo é responsável por cerca de 74% da produção nacional total da fruta, e 55% das exportações. As unidades produtoras do estado de São Paulo estão concentradas nos municípios de Bebedouro, Matão, Limeira e Votuporanga, sendo 90% da área corresponde ao plantio de limão Tahiti e 9% de limão siciliano (FUNDECITRUS, 2020).

O ônus da grande representatividade do setor agroalimentar é o impacto ambiental gerado ao longo da cadeia produtiva. A agricultura para produção de alimentos está entre os setores que mais geram impactos ambientais devido à utilização de recursos naturais, a degradação dos solos, emissões de gases e geração de resíduos sólidos (BECCALI et al., 2010).

O crescimento populacional é um fator que contribui para a manutenção deste cenário. Para acompanhar o aumento da demanda por alimentos, consequência do

crescente número de consumidores, a produção agroindustrial adota diversos recursos para garantir a produtividade, como o uso de fertilizantes e defensivos sintéticos. Os fertilizantes sintéticos são compostos químicos que têm como objetivo melhorar a qualidade do solo; atuam na reposição dos nutrientes, auxiliando o desenvolvimento das culturas. Os defensivos sintéticos são produtos químicos que agem no controle de vetores e pragas que são capazes de comprometer os cultivos. A utilização de insumos agrícolas sintéticos é eficiente no seu propósito. No entanto, quando a utilização ultrapassa os limites desejáveis, são gerados impactos negativos importantes ao meio ambiente e ao consumidor (HALBERG et al., 2012). A intensificação das práticas agrícolas aumentou substancialmente o consumo de água e fertilizantes. A produção de fertilizantes contribui significativamente para o Potencial de Aquecimento Global (PAG), principalmente pelas emissões de gases do efeito estufa (BECCALI et al., 2009).

O consumo de alimentos tende a aumentar a cada ano, por consequência do aumento populacional. Segundo relatório publicado pela ONU no ano de 2019, estima-se que em 2050 a população atinja 9,6 bilhões de pessoas, provocando um aumento de 50% da demanda por alimentos. A estimativa de aumento populacional, e o consequente aumento da demanda por alimentos, representa um alerta para o meio ambiente, uma vez que a produção agrícola deverá ser intensificada. A ausência de medidas que minimizem os impactos ambientais causados pela agroindústria é capaz de arquitetar um cenário de esgotamento de recursos naturais, seja pela utilização destes como matéria-prima e insumos para produção, ou pela contaminação e emissão de gases (BECCALI, 2010).

O sistema de produção orgânico e o SAF – Sistema de produção agroflorestal, representam alternativas, já utilizadas pelos produtores, que têm como objetivo a redução dos impactos ambientais. O sistema de produção orgânico elimina o uso de fertilizantes e defensivos sintéticos, reutiliza resíduos de outros sistemas de produção como insumo e estimula práticas conservacionistas, garantindo a riqueza do solo através da preservação da biodiversidade (ORMOND et al., 2002; MEIER et al., 2015). O SAF consiste em um sistema agrícola integrado, por meio da combinação de culturas de duas ou mais espécies de plantas, podendo haver a integração com espécies animais.

O SAF orgânico conecta as práticas de um sistema orgânico convencional em monocultura, com o cultivo em consórcio de culturas agrícolas e diversas espécies florestais e animais. O SAF tem como objetivo a criação de um ambiente que seja capaz recuperar, de maneira autossuficiente, solos enfraquecidos por anos de monocultura extensiva, por este motivo o SAF também é chamado de agricultura regenerativa (NAIR, 2014).

Apesar do pequeno volume de produção, se comparado ao modelo de agricultura convencional, e da falta de estatísticas oficiais para o SAF, os benefícios dos sistemas orgânicos e agroflorestal ao meio ambiente, apesar de recentes, são claramente conhecidos. Contudo, não é possível afirmar que os impactos causados por estes sistemas de produção são reduzidos, em comparação aos impactos do sistema de produção convencional, com a ausência de um estudo de medição e análise de impactos. Uma das maneiras de identificar e medir os impactos é a utilização de ferramentas de ADA – Avaliações de Desempenho Ambiental. As ferramentas de medição possibilitam, de maneira geral, o mapeamento de todos os impactos ambientais causados em um sistema produtivo, com o objetivo de identificar e, posteriormente, elaborar ações que visam minimizar os possíveis danos causados.

A ACV - Avaliação do Ciclo de Vida é uma das ferramentas de ADA, definida pela ABNT NBR ISO 14040, que permite compilar e avaliar as entradas, saídas e impactos ambientais potenciais que permeiam um produto ao longo do seu ciclo de vida. É uma ferramenta quantitativa que contribui para a definição de indicadores que auxiliem na elucidação de tais questionamentos, dada a possibilidade de mensurar as entradas de materiais e saídas de emissões de um determinado sistema de produto relacionando-as com categorias de impacto ambiental (ABNT, 2009).

A aplicação da ACV é dividida em quatro etapas que consistem na definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. Na primeira etapa, de definição de objetivo e escopo, é realizada a seleção das categorias de impacto que serão avaliadas por meio da ferramenta. As categorias são divididas em dois grupos: categorias de ponto intermediário (*midpoint*) que representam indicadores de desempenho e as categorias de ponto final (*endpoint*) que representam os danos causados pelo processo produtivo do bem ou serviço (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). A etapa de cálculo dos impactos ambientais não está prevista na ISO 14040. Para isso, foram criados diferentes métodos específicos para as características e a realidade do local em que cada método foi desenvolvido e métodos de escopo global, permitindo a aplicação em diferentes locais (FINNVEDEN et al., 2009; MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Diante deste contexto, a presente pesquisa realiza um estudo comparativo dos potenciais impactos ambientais causados pela produção de limão Tahiti nos modelos convencional e agroflorestal orgânico, por meio da aplicação do método ReciPe de Avaliação de Ciclo de Vida. O método ReciPe consiste em uma metodologia de escopo global, que combina categorias *midpoint* e *endpoint* e compreende as categorias de

Mudanças climáticas, Depleção do ozônio estratosférico, Acidificação terrestre, Eutrofização de água doce, Ecotoxicidade terrestre, Ecotoxicidade de água doce, Uso de terra agrícola, Depleção de recursos fósseis e Toxicidade humana.

1.1. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho consiste no estudo comparativo dos potenciais impactos ambientais de dois sistemas de produção agrícola: sistema convencional e sistema agroflorestal orgânico do limão Tahiti, por meio da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida.

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Realizar levantamento bibliográfico sobre as metodologias de ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) existentes;
- b) Realizar levantamento bibliográfico sobre o limão Tahiti e os modelos de produção convencional e agroflorestal orgânico;
- c) Realizar o inventário quantitativo dos insumos e das emissões do sistema produtivo convencional e do agroflorestal orgânico;
- d) Realizar o cálculo dos impactos ambientais de cada sistema de acordo com categorias de impacto relevantes na produção de limão Tahiti tendo como unidade funcional 1 tonelada;
- e) Analisar os impactos ambientais de cada sistema de acordo com categorias de impacto na produção de limão Tahiti, utilizando como unidade funcional 1 tonelada.

1.2. Justificativas

Evidenciada a relevância da cultura de cítricos para a economia do Brasil, dentre eles o limão Tahiti, e considerando os impactos ambientais gerados pela agricultura, a realização deste estudo justifica-se pela necessidade de comparar os potenciais impactos ambientais ocasionados pelo sistema de produção convencional e sistema de produção agroflorestal orgânico do limão Tahiti. O estudo comparativo permite verificar a efetividade das práticas adotadas pela agricultura orgânica agroflorestal para reduzir os impactos ao meio ambiente.

A utilização de defensivos e fertilizantes sintéticos garante maiores ganhos e produtividades nas lavouras. A partir da década de 1950 notou-se um grande aumento na produtividade das culturas devido à redução de pragas e doenças através da utilização de pesticidas, fungicidas, entre outros defensivos agrícolas. Contudo, o uso de insumos

sintéticos na produção agrícola possui impacto negativo nos recursos naturais. Dessa forma, a agricultura orgânica surge como uma possível alternativa de contornar os danos causados ao meio ambiente, através da redução do uso de insumos sintéticos e utilização de práticas favoráveis ao meio ambiente (MONDELAERS et al., 2009).

Os benefícios conhecidos do consumo de produtos orgânicos são inúmeros, uma vez que a cultivo orgânico elimina o uso de produtos químicos nocivos para saúde humana. Entretanto, não é possível afirmar, sem estudos prévios, que a agricultura orgânica possui desempenho superior à agricultura convencional no que tange a sustentabilidade do sistema produtivo (ADEWALE et al., 2018; MEIER et al., 2015). Neste sentido, há oportunidades para o desenvolvimento de novos estudos que investiguem e comparem os impactos ambientais causados pelos diferentes modelos de produção.

Para a realização de estudos comparativos de potenciais impactos ambientais em diferentes sistemas de produção, a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida se apresenta adequada pelos seguintes fatores:

- a) Utilização de dados quantitativos;
- b) Possibilidade de levantamento de dados como insumos utilizados e potenciais emissões envolvidas em um sistema de produção;
- c) Possibilidade de medição dos impactos ambientais causados;
- d) Possibilidade de elaboração de um plano de ação para reduzir ou impedir que estes impactos ambientais ocorram;
- e) Reconhecimento internacional da ferramenta por fazer parte da série de normas ISO 14040 (ABNT, 2009).

Por fim, a ausência de pesquisas que explorem a comparação dos impactos ambientais potenciais causados pelos sistemas de produção convencional e agroflorestal orgânico do limão Tahiti no Brasil, contribui para a justificativa do presente trabalho. A existência de uma lacuna de estudos relacionados ao tema foi verificada através de buscas realizadas, no segundo semestre de 2021, nas bases de dados *Scopus*, *Emerald Insight* e *Web of Science* utilizando as palavras-chave “*life cycle assesement AND Tahiti lime*”, “*LCA AND Tahiti lime*”, “*LCA AND lime*”, “*LCA AND persian lime*”.

Apesar da ausência de estudos sobre o limão Tahiti, os resultados encontrados por meio das buscas realizadas permitiram verificar o investimento em pesquisas de ACV direcionadas para produções industriais e produções agrícolas convencionais, confirmando a existência de oportunidades de estudos direcionados para a produção agroflorestal orgânica.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, a contar desta introdução. O segundo capítulo apresenta a revisão teórica e de literatura dos temas necessários para a elaboração deste trabalho, desde o surgimento da cultura do limão Tahiti no Brasil, as características da fruta, os aspectos dos sistemas de produção convencional, aspectos do sistema agroflorestal orgânico, bem como as definições e os conceitos que permeiam a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida. O terceiro capítulo descreve o método utilizado para a realização da pesquisa e as etapas realizadas para a obtenção dos objetivos traçados neste estudo. O quarto capítulo é destinado a apresentação e discussão dos resultados obtidos na pesquisa. Por fim, o quinto capítulo conclui este trabalho com a apresentação das considerações finais que abrange os obstáculos encontrados, as possíveis limitações à pesquisa e as contribuições alcançadas para o tema.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção apresentará os fundamentos teóricos que serão utilizados na realização da Avaliação do Ciclo de Vida do sistema de produção convencional e agroflorestal orgânico do limão Tahiti. A revisão teórica e de literatura se inicia com um estudo sobre o surgimento da cultura do limão Tahiti no Brasil, bem como as características da fruta, seguido dos aspectos do sistema de produção convencional e agroflorestal orgânico. Em seguida, são investigadas as etapas de produção do limão convencional e do limão agroflorestal orgânico. Finalizada a revisão teórica do limão Tahiti e os respectivos modelos de produção agrícola, inicia-se a revisão teórica de conceitos relacionados à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), bem como dos principais temas a serem observados quando é realizado um estudo de ACV em sistemas agrícolas.

2.1. O limão Tahiti

O limão Tahiti é uma fruta tropical de um grupo de Citrus, considerada uma variedade cítrica americana. Admite-se que o cultivo se iniciou no estado da Califórnia, nos Estados Unidos, por volta de 1870, a partir de sementes originárias do Tahiti, por isso a denominação. Apesar do nome, como assim é conhecido, o fruto não é um limão verdadeiro, mas sim uma lima ácida de nome científico *Citrus Latifolia Tanaka* (BARROS, S. D. et al., 1991).

A limeira ácida Tahiti é uma planta de rápido crescimento e médio porte com altura que varia entre quatro e seis metros. A árvore frutifica a partir do segundo ano de plantio, e apresenta produção significativa já no terceiro ano. Assim como as demais plantas cítricas, o limoeiro adapta-se a diversos tipos de solo, desde os mais arenosos aos solos mais argilosos. Contudo, os solos leves, arejados, profundos, e sem impedimentos são mais favoráveis para o cultivo desta espécie, enquanto os solos mais argilosos facilitam o aparecimento de doenças. A limeira possui tronco reto copa densa e arredondada com folhagem verde de tamanho médio. As flores também são de tamanho médio e apresentam cinco pétalas em média e florescem durante todo o ano, principalmente nos meses de setembro e outubro (COELHO et al., 1993).

Os frutos, conforme ilustrados na figura 1, são de tamanho médio, ovais, oblongos ou levemente elípticos, praticamente desprovidos de semente e monotípicos, isto é, apresentam pouca variação independente da área de produção, isto se deve à baixa variação morfológica. A casca da lima ácida Tahiti é fina, com aspecto mais rugoso coloração amarela pálida durante a etapa de maturação e coloração verde-escura e casca

com aspecto mais liso quando no estágio de maturação ideal. A coloração e a textura da casca são fatores importantes para a comercialização. Frutas com a casca rugosa, por exemplo, indica qualidade inferior, uma vez que o ponto ideal de maturidade não foi atingido e a fruta terá baixa quantidade de suco (GAYET et al., 1995). O peso médio do limão Tahiti é de aproximadamente cento e setenta gramas, sendo o suco responsável por cinquenta por cento deste peso. A fruta apresenta alto teor de ácido ascórbico, conhecido como vitamina C (MENDONÇA et al., 2006).

Figura 1. Limão Tahiti.



Fonte: Embrapa. Foto: Orlando Passos.

A produtividade dos pomares varia de acordo com a fase da produção, a idade da planta, o clima, a irrigação, entre outros fatores. Segundo Vieira (1991), de maneira geral, a irrigação aumenta a produtividade e a qualidade dos frutos, garantindo maior tamanho e peso, coloração acentuada e maior quantidade de óleo na casca. Para a realização do manejo correto e garantia das condições favoráveis ao aumento da produtividade é necessário o conhecimento da fenologia do limão Tahiti. A fruta tropical atinge crescimento máximo em temperaturas entre 25°C e 31°C e seu crescimento é paralisado em temperaturas próximas a 12°C (COELHO et al., 1993).

2.2. Aspectos da produção do limão Tahiti

O primeiro passo para dar início à cultura do limão Tahiti é a escolha do local. O local do plantio é fundamental para garantia da qualidade e produtividade da fruta. Após

a escolha do local, o primeiro passo para o plantio consiste na roçagem da área, em seguida, é feita a destoca e o enleiramento do mato. A chamada destoca é o procedimento de retirada dos resquícios das plantas cultivadas anteriormente e o enleiramento consiste no processo de amontoar o material retirado do local de plantio. Estes procedimentos devem ser realizados com cerca de quatro meses de antecedência. O próximo passo consiste em arar o solo e distribuir o calcário. Para isso, é necessário a realização da calagem, processo de medir a quantidade necessária de calcário para suprir as necessidades de cálcio e magnésio e reduzir o alumínio. Posteriormente, deverá ser feita a divisão do terreno. No estado de São Paulo, por se tratar de pomares comerciais e de grande porte, recomenda-se um espaçamento de 8m x 6m, com o objetivo de favorecer a circulação de ar e a iluminação do pomar na fase adulta. Em pomares extensos, recomenda-se a divisão da área em talhões de 10 a 20 mil plantas, subdivididos em quadras de 3 a 5 mil plantas, para facilitar o trânsito de caminhões (COELHO et al., 1998).

Após realizada a divisão do pomar, deverão ser feitas as covas para o plantio. Estas deverão medir entre 40 e 50cm e o plantio sempre realizado com solo molhado, preferencialmente em dias nublados. A muda deve ser colocada com o colo um pouco acima do nível do solo e as raízes deverão permanecer conforme no viveiro. O espaço entre as raízes deverá ser preenchido com terra comprimida para evitar a criação de bolsa de ar. Após o plantio, deve ser feita uma espécie de bacia ao redor da muda para a manutenção da água no local, recomenda-se cerca de 20 litros de água. Por fim, a cova deverá ser coberta com palha ou capim seco. Se necessário, a muda poderá ser amarrada em uma estaca para ficar mais segura (COELHO et al., 1998).

A irrigação é etapa fundamental para garantia da produtividade do pomar, uma vez que a irregularidade das chuvas por todo o país pode ocasionar déficit hídrico em algumas épocas. Os métodos de irrigação mais utilizados são o de micro aspersão e gotejamento. No modelo de micro aspersão não é possível garantir a distribuição uniforme da água, já o método de gotejamento garante alta eficiência por permitir o controle da umidade e aeração do solo. Além disso, o gotejamento evita o escoamento da água reduzindo a ocorrência de possíveis erosões. Geralmente são instalados dois gotejadores no início do plantio e quatro na fase adulta. O consumo anual de água pelas plantas cítricas varia de 600 a 1200 milímetros. No Estado de São Paulo o consumo de água aproxima-se de 3 milímetros por dia em pomares irrigados e de 1,5 milímetros por dia em pomares não irrigados.

A nutrição é um fator determinante de produtividade de um pomar de citrus. Para garantir a nutrição adequada, deverão ser observados os fatores relacionados ao clima e

solo, com o objetivo de entender as reais necessidades do pomar (Magalhães, 1997). Segundo Koller (2008), as plantas nutridas corretamente são mais resistentes ao ataque de doenças e pragas. As exigências nutricionais do limão Tahiti são semelhantes às outras espécies cítricas. São considerados elementos essenciais o carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S), zinco (Zn), boro (B), manganês (Mn), cobre (Cu), ferro (Fe), molibdênio (Mo), cloro (Cl) e sódio (Na). Dentre os dezessete, oito deles devem receber maior atenção: N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn e B. Para garantir que as melhores decisões sejam tomadas em relação à nutrição do pomar, o produtor deverá considerar as condições de irrigação do plantio. Na cultura do limão Tahiti, a deficiência de zinco e manganês poderão ser corrigidas através de duas pulverizações foliares anuais de solução contendo 250 gramas de sulfato de zinco e 250 gramas de sulfato de manganês, neutralizada com 250 gramas de cal, diluídos em 100 litros de água. É necessário que seja realizada análise foliar periodicamente, uma vez que esta permite saber, de forma precisa, as necessidades nutricionais da planta, evitando o uso desnecessário de fertilizantes sintéticos (COELHO et al., 1998).

Para garantir a produtividade do pomar de limão Tahiti, além do plantio correto, garantindo a boa qualidade da muda, realizando a correção do solo e respeitando os espaçamentos do terreno, é necessário realizar o manejo de pragas e doenças. Além das perdas provocadas por pragas e doenças, estas reduzem a qualidade do fruto e, portanto, prejudicam os custos de produção e dificultando as exportações, uma vez que não atendem exigências fitossanitárias dos países importadores. O controle de pragas e doenças pode ser feito através do manejo integrado de pragas (MIP) ou através de controle químico, que deve ser evitado devido aos riscos trazidos pelo uso de agrotóxicos (MATTOS JUNIOR et al, 2003.)

As principais pragas do limão Tahiti são: ácaro branco, ácaro da ferrugem, cigarrinhas, larva minadora, ortézia, pulgões, psílídeos, cochonilhas escama-farinha e parlatoria, gomose, podridão floral dos citros, cancro do tronco, mancha graxa, tristeza, exocorte, declínio e os inimigos naturais, joaninhas, bicho lixeiro e o fungo *Aschersonia* (SANTOS FILHO et al., 2009).

2.3. Aspectos da produção agroflorestal

A agrofloresta consiste em uma prática de cultivar espécies de árvores e/ou animais em combinações interativas que preveem uma série de benefícios para o meio

ambiente. Os sistemas agroflorestais são mundialmente conhecidos como uma abordagem integrada para o uso sustentável da terra (NAIR et al., 2010).

A prática de cultivar árvores em consórcio com culturas agrícolas é utilizada em todo o mundo há muitos séculos nos modelos de agricultura de subsistência (NAIR et al., 2010). Segundo Muller (2016), a agrofloresta é um termo criado para um modelo de agricultura de subsistência já existente, desenvolvido há milhares de anos atrás pelos povos indígenas. A motivação para um novo olhar sobre as antigas práticas surgiu na década de 1970 com a Revolução Verde.

Através da otimização do uso da terra, os SAFs atuam na preservação da biodiversidade local, na regulação do ciclo hidrológico, na conservação do solo através da ciclagem de nutrientes, mantendo a fertilidade da terra e evitando erosões e assoreamentos (MICOLLIS et al., 2016). Segundo Molua (2005), o cultivo em formato de agrofloresta compreende o uso sustentável de recursos naturais e a otimização do uso da terra através da diversificação de espécies plantadas, o que relaciona o sistema ao aumento de renda, principalmente nos casos de agricultura de subsistência.

O desempenho de um SAF depende da composição do consórcio. Na maioria das vezes são necessárias diversas tentativas para encontrar um ponto ótimo de produção. O desenvolvimento das culturas depende das escolhas das espécies e, por isso, é necessário conhecimento técnico para implantação de um SAF. Além da escolha das espécies que irão compor o SAF, é necessário avaliar os aspectos econômicos, que estão relacionados à produtividade e aos aspectos de qualidade das colheitas, que está associada ao consumo, devido às exigências do cliente final. Os SAFs podem apresentar diversos graus de complexidade; quanto maior a quantidade de espécies envolvidas na composição do arranjo, maior a semelhança com as florestas e maior é a complexidade do sistema (SCHROTH et al., 2004).

O cultivo em SAF foi incentivado pelo novo código florestal Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, que prevê o cultivo de espécies exploráveis em consórcio com espécies nativas em reservas legais e áreas de preservação permanente, desde que a exploração não comprometa a biodiversidade do ecossistema (NAIR, 2007).

2.4. Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Os meios de produção, o consumo e o crescente aumento da população geram impactos negativos ao meio ambiente que, se não mitigados, podem ocasionar o esgotamento de recursos naturais, agravamento do efeito estufa, entre outros problemas ambientais irreversíveis. Diante deste cenário, surge a necessidade de técnicas e

ferramentas de mapeamento dos potenciais impactos causados por processos e produtos, com o objetivo de reduzir ou eliminar os impactos relacionados a cada atividade. A ACV é um método que permite quantificar estes impactos, facilitando a tomada de decisão dos produtores através de números (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Neste capítulo, será abordado o surgimento da ACV, os motivos que levaram o desenvolvimento dessa técnica e sua padronização. Em seguida é descrita a definição dada para esta metodologia e seu desenvolvimento em etapas definidas pela ABNT. Como forma de complementar o embasamento deste estudo, são abordadas algumas implicações acerca da utilização da ACV na agricultura, bem como as desvantagens e limitações desta ferramenta.

2.4.1. O surgimento da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida

Estudos relacionados ao método de Avaliação do Ciclo de vida surgiram no Estados Unidos e na Europa no final da década de 1960 e início da década de 1970. A ferramenta de ACV era utilizada por consultores ambientais e tinha como objetivo inicial realizar avaliações do desempenho ambiental de produtos. A denominação histórica utilizada para estudos de ciclos de vida ambiental é recurso e análise de perfil ambiental (REPA - Resource and Environmental Profile Analysis). O termo ACV foi utilizado somente na década de 1990 (HUNT; FRANKLIN, 1996). Os primeiros estudos surgiram a partir da necessidade de investigar o uso de energia. Para isso, era necessário quantificar o consumo de matérias-primas, combustíveis e resíduos sólidos gerados. Estes estudos eram chamados de análise de energia (*energy analysis*) análise de recurso (*resource analysis*) ou análise de perfil ambiental (*environmental profile analysis*) (KNIGHT et al., 1996).

Segundo Knight (1996), a motivação para estudos que investigassem os impactos ambientais gerados por um processo produtivo está relacionada à crise do petróleo da década de 1960 e ao expressivo aumento da população mundial. Neste cenário surgiram os primeiros sinais de escassez de combustíveis fósseis e recursos minerais, como também houve uma certa pressão da sociedade que notou os impactos da poluição gerada pela indústria.

Segundo Hunt e Franklin (1996), os primeiros estudos sobre impactos ambientais surgiram do interesse das empresas em reduzir seus custos. Os autores afirmam que as primeiras pesquisas eram encomendadas por empresas interessadas em reduzir o desperdício dos sistemas de produção, principalmente da produção de embalagens. Os resultados relacionados aos impactos ambientais eram apenas um bônus de uma pesquisa

que tinha como principal objetivo, para as empresas, a redução de custos através do mapeamento do uso de matérias-primas e insumos.

Em 1969, a Coca-Cola Company encomendou uma pesquisa com o objetivo de analisar uma série de questões em relação às suas embalagens; a empresa estava investigando a possibilidade de envasar seu produto em latas de alumínio e garrafas plásticas, algo revolucionário para a época, visto que a empresa utilizava garrafas retornáveis feitas de vidro e o plástico era considerado o vilão do meio ambiente. O estudo foi desenvolvido por Harry E. Teasley Jr., que gerenciava esta função dentro da empresa. O pesquisador buscou quantificar os impactos energéticos materiais e ambientais do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima até o descarte do produto consumido. Dessa forma, pode-se dizer que o esquema analítico formal, que mais tarde foi nomeado de Avaliação do ciclo de vida foi concebido pela primeira vez por Teasley (HUNT; FRANKLIN, 1996).

Os primeiros estudos de ACV apresentaram grande discrepância entre os resultados obtidos de avaliações realizadas entre produtos semelhantes. Como não havia critérios claros e padronização do método, as pesquisas foram induzidas pelas empresas, com o objetivo de não apresentar os reais impactos ambientais causados por seus produtos. Dessa forma, os resultados não confiáveis eram utilizados para promover os produtos e realçar suas qualidades em termos ambientais, uma vez que, de certa forma, estavam amparados por metodologia científica (CHECHEBE, 2002).

Diante deste cenário, houve uma mobilização de agentes do meio acadêmico, com o objetivo de tornar a Avaliação do ciclo de vida uma metodologia ambiental harmônica, padronizada e confiável. Esta mobilização, aliada a fortes pressões de organizações ambientais e do próprio mercado consumidor, que estava cada vez mais interessado em conhecer os impactos ambientais dos produtos consumidos, contribuíram para a criação de estrutura e parâmetros para a ACV. As primeiras padronizações do método foram feitas pela ONG SETAC – Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental, resultando no Código de Prática, um documento descreve uma estrutura processual e recomendações metodológicas para o ACV. Os parâmetros criados pela SETAC foram utilizados para a criação das normas da ISO – *International Organization for Standardization*, que significa Organização internacional de normalização. As normas internacionais foram desenvolvidas e aceitas no final da década de 1990, estabelecendo a ISO 14040.

Apesar da padronização e criação das normas, muitos problemas metodológicos permaneciam sem solução, o que despertou o interesse do mundo acadêmico. O desenvolvimento da metodologia ACV e estudos baseados na metodologia ACV

tornaram-se tópicos acadêmicos amplamente difundidos e o volume de pesquisas de ACV teve rápido crescimento desde o início da década de 1990 (RUSSEL et al., 2005).

2.4.2. ACV: definição e etapas

A ACV padronizada pela série de normas ISO14040 é definida como “a compilação e avaliação das entradas, das saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produção ao longo de seu ciclo de vida”. O conceito de ciclo de vida foi estendido para além de um simples método de comparação produtos e atualmente é visto como um componente essencial para alcançar objetivos mais amplos, como a sustentabilidade (CURRAN, 1999).

A ACV é uma ferramenta utilizada para avaliar os possíveis impactos ambientais gerados por um produto ou processo ao longo do seu ciclo de vida parcial ou total. A ferramenta de ACV permite analisar os potenciais impactos desde o início do processo produtivo até sua disposição final, ou seja, desde os primeiros insumos utilizados até os resíduos finais, que podem ou não ser reciclados. Os impactos identificados ao longo do ciclo de vida de um produto podem ser classificados em diferentes categorias. A classificação dos impactos permite a escolha de ferramentas e tecnologias mais adequadas para cada processo produtivo (BALKEMA et al., 2002).

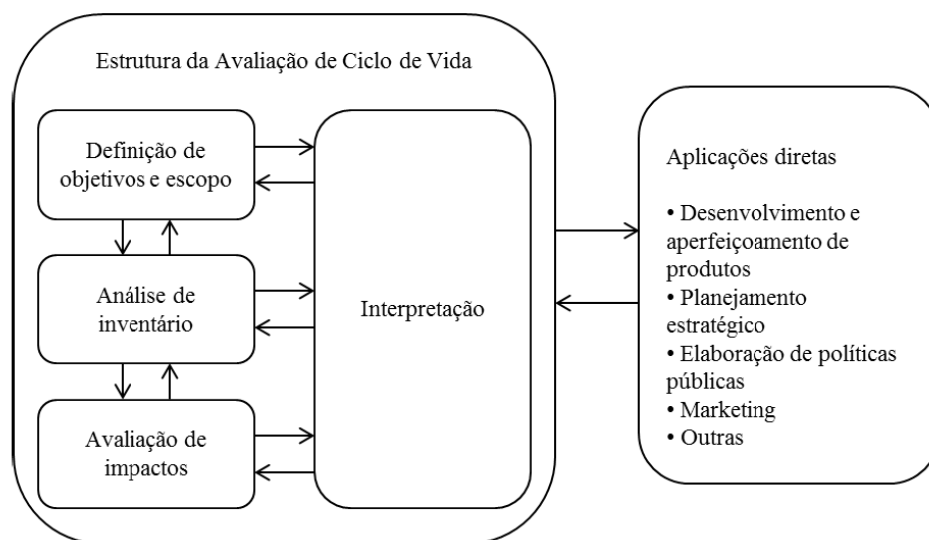
De acordo com a ISO 14040, a Avaliação do Ciclo de Vida deve ser estruturada em quatro fases interativas; os resultados de uma fase são utilizados na próxima fase e assim por diante. As fases poderão ser revisitadas, de acordo com a necessidade e evolução da pesquisa. A Figura 2 apresenta a estrutura das fases (ABNT, 2009).

A primeira fase, nomeada Definição de objetivos e escopo, consiste no planejamento das etapas que serão executadas ao longo ACV. Nesta fase, devem ser definidos os objetivos do estudo, o público-alvo, que determina o direcionamento da comunicação dos resultados, bem como a justificativa para a realização da ACV. Os resultados de uma ACV podem apresentar informações úteis para uma série de processos de tomadas de decisão (ABNT, 2009).

No momento de definição do escopo da ACV, os seguintes itens devem ser considerados : 1) as funções do sistema de produto; 2) a unidade funcional; 3) o sistema de produto a ser estudado; 4) as fronteiras do sistema de produto; 5) os procedimentos de alocação; 6) os tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada; 7) os requisitos de dados; 8) suposições; 9) limitações; 10) requisitos de qualidade dos dados iniciais; 11) tipo de análise crítica, se aplicável; 11) tipo e formato do relatório requerido para o estudo. A descrição clara dos itens listados

garante que a extensão, a profundidade e o grau de detalhe do estudo sejam adequados e suficientes para atender os objetivos do estudo a ser realizado. Contudo, a ACV é uma ferramenta interativa, sendo assim, o escopo pode sofrer alterações durante a coleta de dados e condução do estudo (ABNT, 2009).

Figura 2. Estrutura da Avaliação de ciclo de vida



Fonte: ABNT (2009).

Dentre os itens a serem considerados na etapa de definição de objetivos e escopo, Finnveden et al., (2009), destacam o sistema de produto, a unidade funcional e as fronteiras do sistema como os mais importantes. O sistema de produto é o conjunto de processos elementares que desempenham uma ou mais funções definidas e que modelam o ciclo de vida do produto. A unidade funcional é uma medida quantitativa da função de um produto ou do desempenho de um sistema de produto. E as fronteiras consistem no estabelecimento de limites entre o sistema produtivo e o meio ambiente, a diferenciação entre os processos significantes e aqueles que poderão ser desprezados, a definição de espaços geográficos e de tempo, dentre outras definições. Durante o andamento do estudo de ACV, se o pesquisador considerar que as fronteiras estabelecidas estão desconsiderando dados importantes para o trabalho, recomenda-se que os objetivos e o escopo sejam revisados (ABNT, 2009).

A segunda etapa da ACV consiste na Análise de inventário. Nesta etapa são realizadas as coletas de dados com o objetivo de quantificar as entradas e saídas do sistema de produção do produto avaliado (ABNT, 2009). As matérias-primas e os

insumos representam as entradas do sistema e os produtos, subprodutos e resíduos são as saídas. É importante que as entradas e saídas estejam relacionadas à unidade funcional já definida (BAUMANN; TILLMAN, 2004; FINNVEDEN et al., 2009).

A coleta de dados frequentemente representa uma das etapas mais morosas e complexas da ACV, uma vez que, na maioria das vezes os dados não estão reunidos em uma única fonte. Os dados podem ser de origem primária ou secundária, isto é, podem ser coletados in loco ou através de estudos já publicados sobre o tema. Ademais, existem bases de dados que disponibilizam dados que independem da cadeia produtiva, podendo ser utilizados em diversos estudos como o consumo de combustível de veículos e extração de matéria-prima (FINNVEDEN et al., 2009). Segundo Roy et al., (2009), os softwares desenvolvidos para realização de um estudo de ACV possuem esses tipos de dados mais gerais em sua base de dados.

Após a etapa e análise de inventário, a pesquisa deverá avançar para a etapa de Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). Nesta etapa, os dados coletados na etapa anterior são associados às categorias de impacto, aos indicadores de categoria e aos modelos de caracterização. A AICV tem como objetivo a avaliação da relevância dos potenciais impactos ambientais. Esta avaliação é necessária para a realização da próxima etapa, que consiste na interpretação dos dados (FINNVEDEN et al., 2009; ABNT, 2009).

Na etapa de AICV são realizados três processos: classificação, a caracterização e avaliação ou ponderação. A classificação consiste no agrupamento dos dados obtidos no inventário em categorias de impacto. No processo de caracterização, os dados agrupados são relacionados com os potenciais impactos ambientais. Por fim, a avaliação ou ponderação que consiste na possível agregação dos resultados, que pode ocorrer em casos muito específicos e tem como objetivo identificar a importância relativa de cada um deles (ROY et al., 2009; ABNT, 2009).

A última fase da ACV reúne os resultados obtidos nas fases anteriores. Nesta fase é realizada a interpretação dos resultados de acordo com os objetivos e o escopo definidos no início da ACV. Visando a agregação de valor aos estudos de ACV, na etapa de conclusão, espera-se que sejam feitas recomendações aos tomadores de decisão ou ao público-alvo definido na primeira fase. É importante ressaltar que as fases são interativas, podendo ser revisitadas sempre que o pesquisador julgar necessário (ABNT, 2009).

2.4.3. Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Uma das etapas do método de Avaliação do ciclo de vida é a Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV). Nesta etapa, é avaliada a significância dos potenciais impactos ambientais. Para isso, são utilizados os resultados obtidos através da análise de inventário. A escolha dos impactos que serão analisados, o nível de detalhe e a metodologia que será utilizada dependem do objetivo e do escopo definidos para a pesquisa. Esta etapa permite uma análise crítica objetivo e do escopo. Neste momento é possível verificar se os objetivos e foram alcançados ou se serão necessárias modificações (ABNT, 2009).

O primeiro passo da AICV consiste na seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização. A escolha das categorias de impacto define quais conjuntos de questões ambientais estão relacionados às definições de objetivo e escopo. Os indicadores representam os impactos ambientais de cada categoria de forma quantitativa e os modelos de caracterização permitem relacionar os resultados do inventário com os indicadores de categoria (ABNT, 2009).

Realizada a seleção das categorias, deverá ser feita a etapa de classificação. Na classificação, os resultados do inventário são relacionados com as categorias de impacto. Pode acontecer de um mesmo impacto ambiental ser alocado em mais de uma categoria e somente na próxima fase, de caracterização, é que será medida a participação de cada impacto dentro da categoria, resultando em uma base de comparação entre as diversas categorias. O Quadro 1 exemplifica estes conceitos permitindo uma melhor visualização da aplicação de ACV (ABNT, 2009).

Quadro 1. Exemplo dos conceitos ABNT.

Termo	Exemplo
Categoria de impacto	Mudança climática
Resultado da ICV	Quantidade de gás metano por unidade funcional (kg)
Modelo de caracterização	Modelo da linha de base para 100 anos do Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC)
Indicador de categoria	Forçamento radioativo infravermelho (W/m ²)
Fator de caracterização	Potencial de aquecimento global (kg CO ₂ equivalente / kg gás)
Resultado do indicador de categoria	Kg CO ₂ equivalente / unidade funcional
Pontos finais da categoria	Recifes de coral, florestas, plantações
Relevância ambiental	O forçamento radioativo infravermelho representa os efeitos potenciais sobre o clima, dependendo da adsorção cumulativa de calor pela atmosfera causada por emissões e da distribuição da adsorção do calor ao longo do tempo

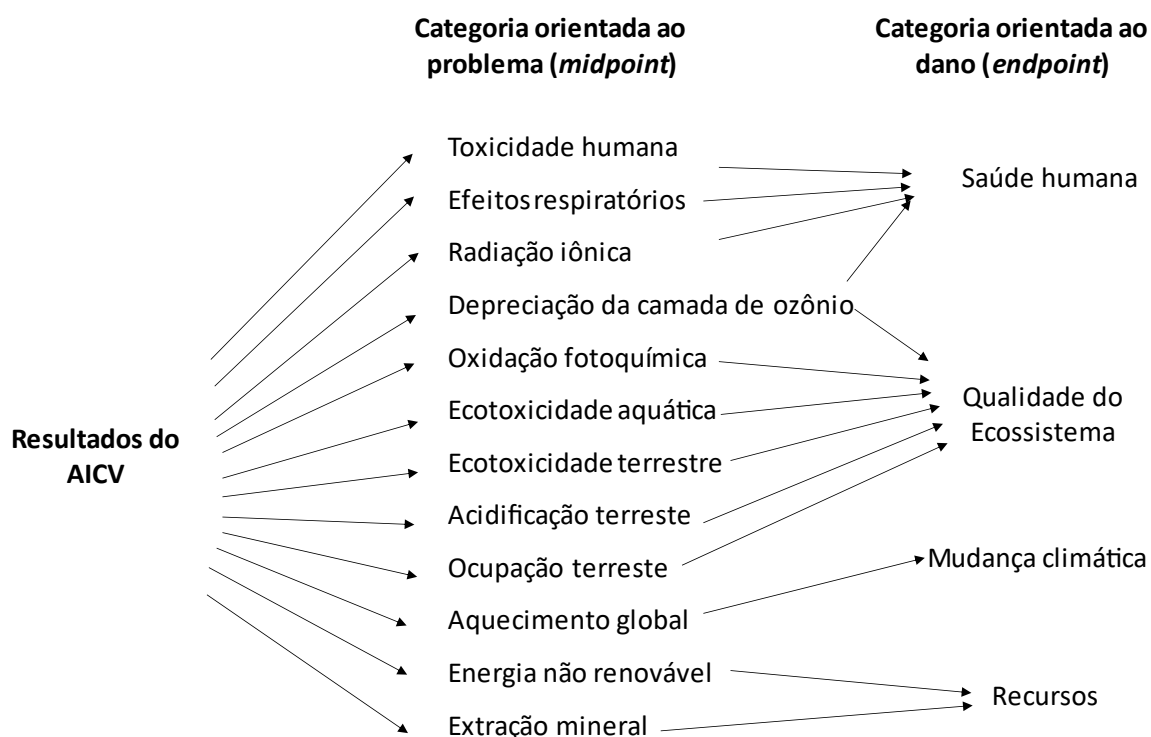
Fonte: ABNT (2009).

A etapa de cálculos da ACV não é detalhada pelas normas da ISO 14040. Para isso, foram criados diversos métodos que tem como objetivo a traduzir o impacto potencial das substâncias emitidas através de um procedimento consistente que permite atingir resultados comparáveis entre as diversas categorias de impacto (FINNVEDEN et al., 2009; MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

De acordo com o nível de avaliação dos potenciais impactos, as categorias de impacto podem ser divididas em dois diferentes grupos: as chamadas categorias de ponto intermediário (*midpoint*) e as categorias de ponto final (*endpoint*) (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). Segundo Cavalett et al. (2013), as categorias de ponto intermediário não representam o potencial impacto ambiental, mas funcionam como indicadores. Como exemplo de categoria *midpoint* está a toxicidade humana, a eutrofização e as mudanças climáticas. As categorias de ponto final são as categorias que representam os danos diretos relacionados à saúde humana, ao meio ambiente ou aos recursos naturais. A modelagem destas categorias apresenta uma alta complexidade. Como exemplos de categorias de impacto de *endpoint* está a expectativa de vida, o consumo de recursos naturais e a parcela de extinção de espécies (CAVALETT et al., 2013). A Figura 3 apresenta uma esquematização das categorias de *midpoint* e *endpoint*.

Os métodos desenvolvidos para AICV foram criados de acordo as características locais e a realidade de cada país de origem. Dessa forma, não é recomendada a aplicação do método em outras localidades de diferentes realidades, uma vez que os resultados poderão ser distorcidos. Com o objetivo de suprir esta lacuna, foram criados métodos que compreendem dados globais e, por isso, podem ser utilizados em diferentes lugares em todo o mundo, como por exemplo o USETox, EDIP97, EPS 2000, CML 2002 e IMPACT World+ (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). O Quadro 2 apresenta os métodos de AICV de alcance global e as categorias de impacto tradicionais e diferenciadas, quando houver, de cada método.

Diferentes métodos oferecem diferentes resultados. A escolha do método de AICV mais adequado é fundamental para garantir que os resultados do estudo sejam consistentes e condizentes com a realidade. Métodos diferentes podem oferecer resultados diferentes. Para isso, a seleção do método de AICV deverá ser realizada de forma cuidadosa, de acordo com o objetivo e o escopo da análise (CAVALETT et al., 2013; MENDES; BUENO; OMETTO, 2016).

Figura 3. Categorias de impacto da ACV.

Fonte: Adaptado de Ecoinvent (2010).

Quadro 2. Métodos de AICV e suas categorias de impacto de abrangência global.

Método	Nível de avaliação de impacto	Categorias de impacto tradicionais	Categorias de impacto diferenciadas
CML 2002	Ponto intermediário	Depleção de recursos abióticos	Perda de função de suporte à vida
		Depleção de recursos bióticos	Perda de biodiversidade
		Uso da terra	Ecotoxicidade em água doce (sedimentos)
		Mudança climática	Ecotoxicidade marinha (sedimentos)
		Depleção do ozônio estratosférico	Impactos da radiação ionizante
		Toxicidade humana	Mau cheiro do ar
		Ecotoxicidade aquática (água doce)	Barulho
		Ecotoxicidade aquática (marinha)	Calor residual
		Ecotoxicidade terrestre	Acidentes

		Eutrofização	Letais
			Não letais
			Dessecação
			Mau cheiro da água
EDIP 1997	Ponto final	Aquecimento global	Ambiente de trabalho
		Depleção de ozônio	
		Acidificação	
		Enriquecimento de nutrientes	
		Formação de ozônio fotoquímico	
		Toxicidade humana	
		Ecotoxicidade	
		Consumo de recursos	
USEtox	Ponto intermediário	Toxicidade humana	
		Ecotoxicidade de água doce	
IMPACT World+	Combinado	Toxicidade humana	
		Oxidação fotoquímica	
		Depleção da camada de ozônio	
		Aquecimento global	
		Ecotoxicidade	
		Acidificação	
		Eutrofização	
		Uso da água	
		Uso da terra	
		Uso de recursos	
ReCiPe	Combinado	Mudança climática	
		Depleção de ozônio	
		Esgotamento de recursos fósseis	
		Esgotamento de recursos minerais	
		Esgotamento de recursos de água doce	
EPS 2000	Ponto final	Saúde humana	Expectativa de vida
		Consumo de recursos naturais	Morbidade grave e sofrimento
		Esgotamento de reservas de elementos	Morbidade
		Esgotamento de reservas fósseis (gás)	Incômodo grave
		Esgotamento de reservas fósseis (petróleo)	Incômodo
		Esgotamento de reservas fósseis (carvão)	Ambiente natural
		Esgotamento de reservas minerais	Capacidade de produção agrícola
			Capacidade de produção de madeira

			Capacidade de produção de peixe e carne
			Capacidade de cátions de base
			Capacidade de produção de água potável

Fonte: adaptado de MENDES; BUENO; OMETTO (2016).

2.4.4. ACV na produção agrícola

O método do ACV tem sido cada vez mais utilizado para estudar os impactos da produção agrícola; a complexidade das interações entre as diversas partes interessadas une os esforços para medir os impactos ambientais. A agricultura é reconhecida como a atividade mais volátil do setor econômico primário, devido à dependência de condições meteorológicas incertas e preços de commodities que impedem previsões para próximos anos (MUFLIKH et al. 2021, apud DESIDERIO et al., 2022). As etapas mais críticas das cadeias produtivas são as orientadas para o capital por meio da integração vertical e, portanto, sob o controle de empresas (Folke et al., 2019). Apesar do conhecimento do papel da cadeia agroalimentar na sociedade, a criação de uma estrutura para entender a sustentabilidade social carece de estudos (DESIDERIO et al., 2022).

Um dos principais alertas voltados para a produção agrícola é a importante contribuição do setor para a emissão dos GEE – gases do efeito estufa, são eles: CO₂, CH₄, N₂O e outros (BOSCO et al., 2013). Estes gases são responsáveis pela absorção de parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, contribuindo para o aquecimento global (IPCC, 2014). Sendo assim, quantificar a emissão de gases de um processo agrícola é uma etapa fundamental para a elaboração de políticas ambientais. Através da quantificação de emissões é possível mitigar os danos, além de permitir a antecipação dos produtores em relação às futuras legislações e regulamentações que visam reduzir as emissões. O desenvolvimento de iniciativas em prol do meio ambiente permite que os produtores agrícolas penetrem em determinados mercados que possuem uma exigência mais elevada em relação aos critérios ambientais (CLAUDINO; TALAMINI, 2012).

Enquanto o método de ACV pode ser eficiente na quantificação de emissão de GEE, autores afirmam que, para alguns casos, a ferramenta não é capaz de retratar a realidade da produção agrícola. Acrescentam ainda, que os métodos existentes não são eficientes em estudos comparativos, uma vez que não abordam temas como erosão do solo, diminuição da fertilidade do solo e redução da biodiversidade não são abordados de

forma suficiente pelos métodos existentes e, portanto, a intensificação das práticas agrícolas não reflete os impactos reais causados (MEIER et al., 2015; NOTARNICOLA, 2017).

A restrição do local da produção também representa um desafio da aplicação da ACV na agricultura. Ao restringir o local a ser estudado, a mensuração dos impactos causados pela aplicação de defensivos e por mudanças no uso da terra é prejudicada (NOTARNICOLA et al., 2017). Outro ponto de atenção está na utilização de fatores de emissão como os estabelecidos pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), uma vez que os valores estimados não são precisos.

As condições específicas de solo e clima influenciam diretamente nas emissões e nos impactos da produção agrícola. O clima e a fisiologia da planta determinam a capacidade de absorção de nutrientes. Dessa forma, a variável solo deve ser inserida de maneira adequada aos estudos de ACV, considerando as emissões brutas de carbono, desconsiderando variações no estoque e contabilizando o processo de sequestro de carbono no solo. A emissão e o sequestro de carbono são muitas vezes desconsiderados devido à falta de metodologia padronizada para sua aplicação (ADEWALE et al., 2018).

Segundo Nortanicola (2017), um estudo de ACV na agricultura também deve considerar a definição de tempo e espaço a ser analisado. Os períodos de safra e as condições de clima e solo podem causar divergências nos resultados obtidos. Em um estudo comparativo, desconsiderar as diferenças de clima e época da produção trarão resultados inconsistentes. Para Adewale et al. (2018) a definição correta das fronteiras para uma ACV é fundamental, uma vez que a exclusão de itens como a manufatura das máquinas agrícolas ou o balanço de carbono do solo podem levar a distorções consideráveis nos resultados.

2.4.5. ACV na produção agrícola orgânica

O sistema de produção orgânico tem como um dos principais objetivos a redução dos impactos ao meio ambiente. Para isso, são adotadas diversas práticas como o manejo mínimo e conservação do solo, a preservação da água, o que contribui para o aumento da biomassa presente no solo, preserva a biodiversidade e a estrutura, e beneficia o processo de sequestro de carbono.

A produção orgânica também contribui para a redução da emissão de GEE por diversos motivos. A redução do uso de energia e a preservação do solo possibilitando maior estoque de carbono são dois fatores que reduzem a emissão de gases. A adubação

é feita de forma natural, já que não é permitido o uso de fontes sintéticas de adubos e fertilizantes. Além de preservar os solos e os rios para onde a água escoar, a não utilização de sintéticos também reduz a emissão de gases do efeito estufa, uma vez que a energia que seria utilizada na produção de fertilizantes sintéticos à base de nitrogênio é poupada através do cultivo de leguminosas que cumprem o papel da fixação de nitrogênio (ADEWALE et al., 2016; ADEWALE et al., 2018).

Apesar de todos os benefícios já conhecidos, não seria viável converter toda a produção agrícola convencional em orgânica. Contudo, os estudos voltados para área são fundamentais para que práticas mais sustentáveis na agricultura sejam cada vez mais desenvolvidas. Os estudos permitem a identificação de oportunidades de melhoria em termos de redução da emissão de gases de efeito estufa, conservação de solos e manutenção da biodiversidade, em diversas etapas da produção agrícola. Essas práticas podem ser replicadas para o modelo convencional (ADEWALE et al., 2018).

Um estudo de ACV, quando desenvolvido em um produto orgânico, espera-se que os resultados apresentem impactos ambientais reduzidos, se comparado ao sistema convencional de produção. No entanto, não há um consenso de que a produção orgânica é mais favorável ao meio ambiente. Em contrapartida, algumas inconsistências do método de ACV dificultam a obtenção de dados precisos. Com isso, os estudos de ACV na produção orgânica são prejudicados, pela falta de subsídio dos produtores, das empresas ou do governo. (LEE, CHOE, PARK, 2015; MEIER et al., 2015; ADEWALE et al., 2018).

Devido à existência de diversos métodos de desenvolvimento de uma Avaliação de ciclo de vida, estudos de ACV que comparam a produção convencional e a orgânica apresentam resultados muito divergentes. Meier et al. (2015) desenvolveram mais de trinta estudos de ACV que comparam o método convencional e o orgânico. Os resultados apresentam divergências por diversos motivos. A diferença na quantidade e no tamanho da propriedade analisada, o nível de tecnologia empregado na produção, o clima, a interpretação dos resultados, estão entre os motivos da divergência de resultados.

Como forma de reduzir a divergência, os autores recomendam que seja considerado o maior número possível de fatores, respeitando as fronteiras de sistema, para que seja possível identificar as diferenças entre os sistemas. Além disso, um fator fundamental é a garantia da utilização da mesma unidade de medida para comparação, seja para medir a área de produção ou a massa de produto. É importante considerar que o sistema orgânico apresenta produtividade reduzida e, por isso, pode haver variação na

produção por área. Este resultado influencia na comparação de unidade de área (MEIER et al., 2015; ADEWALE et al., 2018).

Além de fatores como unidade de medida, condições de clima e solo, produtividade e tecnologia empregada, é possível que a aplicação da ACV na produção orgânica encontre um desafio devido a rotação de cultura e a adubação verde. Para que os resultados sejam os mais consistentes possíveis, é necessário estudar os números de diversos anos com o objetivo de completar o ciclo agrônomo de cada cultura, o que aumenta a complexidade da coleta e análise de dados das pesquisas. Por este motivo, diversos estudos são desenvolvidos durante um único período de safra (ADEWALE et al., 2018).

A medição dos insumos também é mais complexa em sistemas de produção orgânica, uma vez que os insumos utilizados são de reaproveitamento, ou seja, são resíduos ou materiais produzidos na própria propriedade agrícola. Sendo assim, não é possível utilizar inventários padrões; a análise de dados de insumos orgânicos deve ser realizada separadamente. Por se tratar de insumos de reaproveitamento, muitos autores desconsideram a carga ambiental de insumos orgânicos, calculando apenas os impactos causados pelo transporte, processamento e manejo. Neste caso, deve-se considerar a possibilidade de não utilização destes resíduos e os impactos causados pelo descarte dos mesmos (ADEWALE et al., 2018).

Por fim, foi identificado na literatura já publicada sobre o tema, um ponto de atenção quanto à aplicação da ACV na produção orgânica, que está relacionado à forma de aplicação dos insumos. Apesar da utilização de insumos de reaproveitamento, existe a possibilidade de impactos negativos devido a forma de aplicação. Atualmente, existem certificações orgânicas que necessitam que diversas exigências sejam cumpridas pelos produtores e empresas, além das auditorias realizadas periodicamente. Dessa forma, os pesquisadores da área sugerem a utilização desses dados para a realização dos cálculos de ACV, uma vez que já passaram por análise prévia (ADEWALE et al., 2018).

3. METODOLOGIA

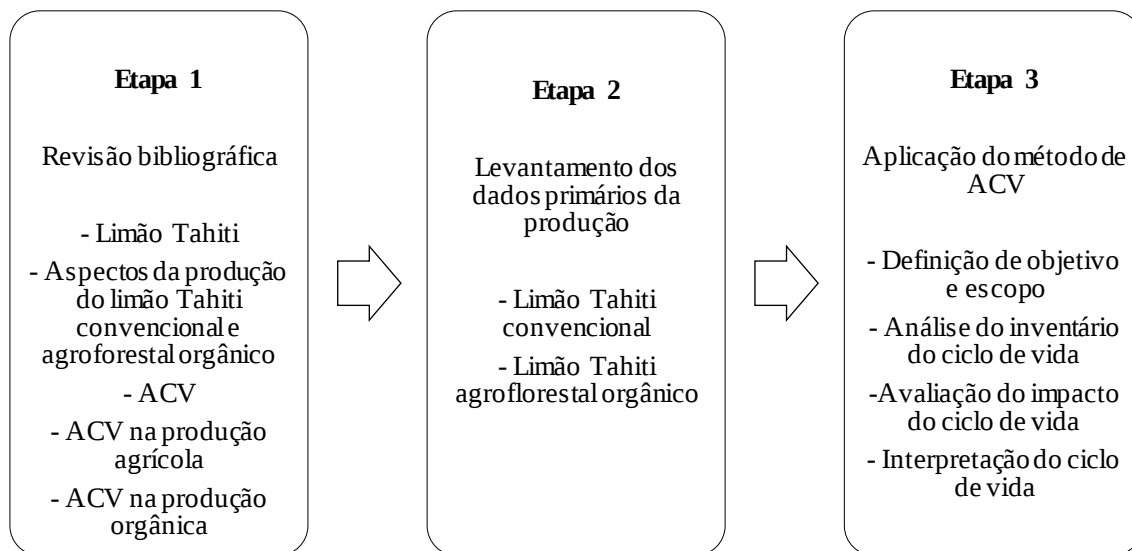
Esta seção apresenta a classificação da pesquisa e os procedimentos metodológicos adotados para que sejam cumpridos os objetivos definidos.

3.1 Classificação da pesquisa

Para a realização da presente pesquisa foi utilizada a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida. A ACV é uma ferramenta utilizada avaliar os recursos utilizados e os potenciais impactos ambientais causados ao longo do ciclo de vida de um produto. Desde a aquisição da matéria-prima, passando pela fase de produção, fase de uso e gestão de resíduos (ABNT, 2009). Os dados utilizados na ACV são mensuráveis e, portanto, este trabalho possui abordagem quantitativa, pautada na objetividade, na coleta de dados e na utilização de ferramentas padronizadas e neutras (SILVEIRA; CÓRDOVA, 2009; FONSECA, 2002).

3.2 Etapas da pesquisa

A presente pesquisa foi desenvolvida em três etapas esquematizadas na Figura 4, que serão descritas neste capítulo. A primeira etapa, de caráter qualitativo e exploratório, consiste na realização de revisão bibliográfica dos assuntos pertinentes ao desenvolvimento do estudo comparativo de ACV do limão Tahiti convencional e agroflorestal orgânico. A segunda etapa consiste no levantamento de dados primários dos sistemas convencional e agroflorestal orgânico do limão Tahiti. A terceira e última etapa consiste na aplicação do método escolhido para a avaliação dos potenciais impactos ambientais da produção de limão Tahiti.

Figura 4. Etapas da pesquisa.

Fonte: elaboração própria.

3.2.1. Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica inicia-se com o levantamento de dados a respeito do produto analisado, a lima ácida Tahiti ou limão Tahiti, como é popularmente conhecido. Além das características da fruta, foi realizado um levantamento dos aspectos dos sistemas de produção convencional e agroflorestal orgânico, de estudos já publicados na literatura. Esta etapa foi importante para identificar as operações e insumos envolvidos no sistema de produção do limão Tahiti como forma de auxiliar a coleta de dados junto aos produtores.

Finalizada a etapa de levantamento de dados relacionados à produção de limão Tahiti, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o método ACV, do surgimento da metodologia à sua aplicação, bem como os diferentes tipos de avaliação desenvolvidos. Este levantamento buscou a obtenção de maior familiaridade com os conceitos envolvidos, as etapas necessárias para aplicação do método, bem como as dificuldades, limitações e desafios identificados por pesquisadores da área durante a condução de estudos que envolvem a produção agrícola. A revisão de literatura sobre a ferramenta de ACV foi fundamental para a escolha de um método que estivesse de acordo com as normas brasileiras e que se apresentasse como o mais adequado aos objetivos deste estudo. Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados no capítulo 2.

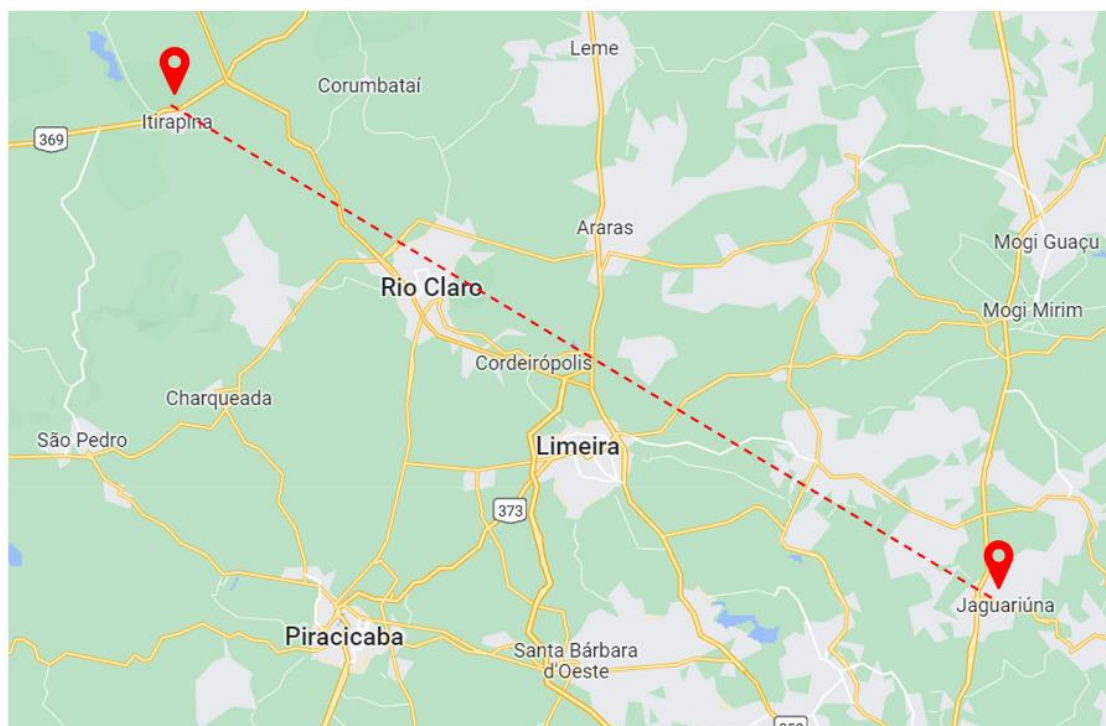
3.2.2. Levantamento dos dados de produção de limão Tahiti

Realizada a revisão bibliográfica, o estudo prosseguiu para a segunda etapa, que consiste no levantamento dos dados de produção. Os dados do limão convencional e agroflorestal orgânico foram coletados junto aos produtores e, portanto, são dados primários.

A área de produção agroflorestal está localizada no município de Itirapina-SP, centro-leste do estado de São Paulo. A área produtiva de limão convencional está localizada no município de Jaguariúna-SP, a uma distância de aproximadamente 130 km de Itirapina-SP, conforme ilustrado na Figura 5, o que assegura a pouca variabilidade nas condições de clima e solo.

Segundo Adewale et al., (2018), a definição das áreas produtivas em que os dados serão coletados é uma importante etapa da ACV, uma vez que pode interferir diretamente nos resultados do estudo e, quando divergentes em características de clima e solo, poderão apresentar resultados inconsistentes.

Figura 5. Localização das propriedades produtoras de limão Tahiti.



Fonte: Google Maps

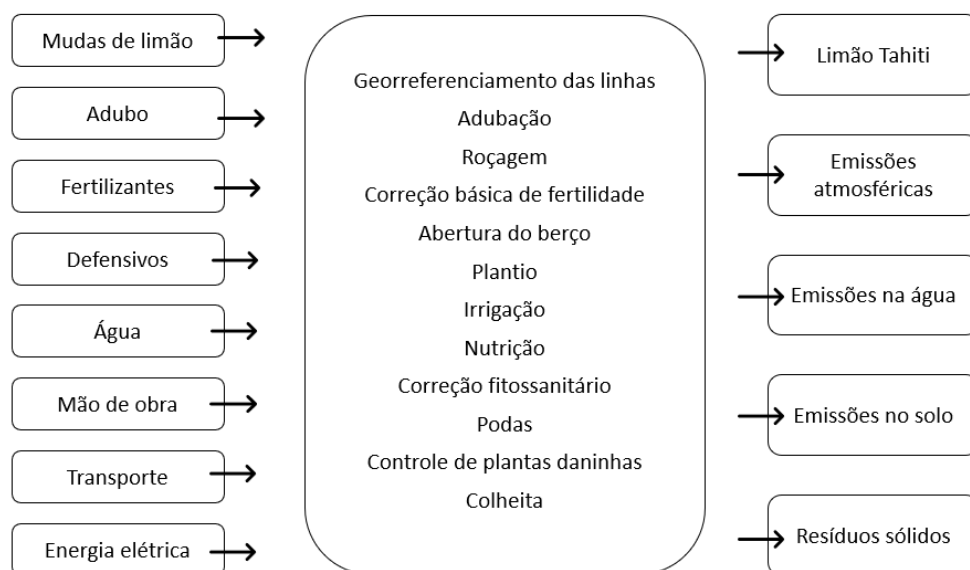
Para a coleta de dados de produção convencional do limão foram utilizados dois instrumentos, a entrevista e o questionário. O questionário foi elaborado em formato de tabela com 13 perguntas abertas, sendo em sua grande maioria dados quantitativos.

Para a coleta de dados do sistema agroflorestal orgânico, foi realizada visita presencial na área produtiva. Além da entrevista realizada no local, o produtor SAF realiza acompanhamento mais próximo e detalhado dos potenciais impactos ambientais causados pela produção e, portanto, havia os dados organizados em planilha semelhante ao modelo de inventário elaborado para a realização desta pesquisa.

Os dados faltantes e as dúvidas que surgiram ao longo da aplicação do método de ACV foram consultados em entrevistas remotas com os engenheiros agrônomos responsáveis pelas respectivas produções. O formato de coleta de dados atendeu às necessidades da presente pesquisa. Segundo Gil (2008), a vantagem do modelo de entrevista é garantir que todas as informações serão coletadas devido à estruturação do modelo, contudo, permitir que entrevistado discorra livremente sobre o tema.

Os fundamentos da revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa e os dados e informações coletadas nas interações com os produtores, possibilitaram a elaboração de uma representação esquemática do processo produtivo do limão, contribuindo para a realização das próximas etapas desta pesquisa. A Figura 6 apresenta as entradas, os macroprocessos e as saídas do sistema de produção do limão Tahiti.

Figura 6. Representação esquemática do processo produtivo do limão Tahiti.



Fonte: elaboração própria.

As etapas da cadeia produtiva dos dois sistemas de produção estudados se assemelham e, portanto, foi possível reunir as informações do processo em uma única representação esquemática. Contudo, as características dos insumos utilizados e o formato com que os macroprocessos são desenvolvidos diferem ou variam de um processo para outro.

3.2.2.1. A unidade produtora de limão Tahiti convencional

A unidade produtora de limão convencional possui uma área produtiva de aproximadamente 30(ha) hectares. Os produtores iniciaram a produção para comercialização do limão Tahiti no ano de 2008. Segundo os produtores, o preparo da área para plantio inicia-se aproximadamente quatro meses antes do plantio. A primeira etapa foi a coleta de material do solo para verificação da necessidade de correção de fertilidade. Após a análise do solo, os produtores realizaram a aração do solo com a utilização de arados, ferramenta agrícola que possui a função de lavrar o solo com a ajuda de um trator.

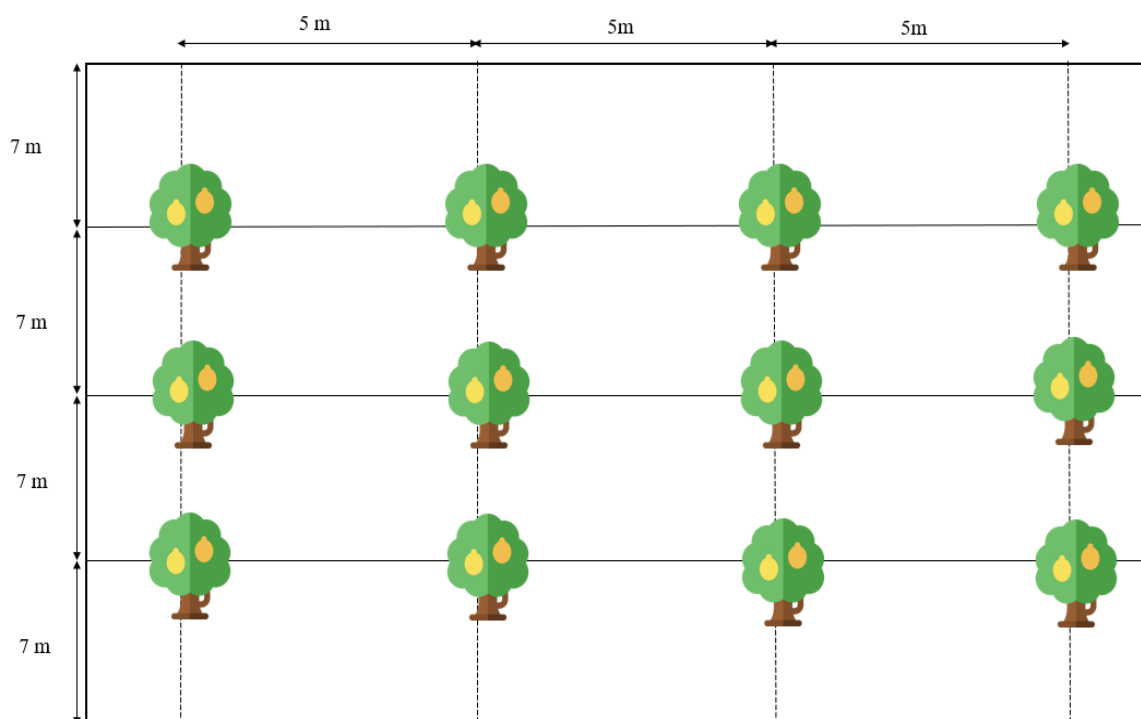
Após a aração, é realizada a análise de solo para verificar a necessidade de correção. Nesta etapa são aplicadas substâncias como calcário, fósforo e potássio. A etapa seguinte consiste na etapa de gradagem ou gradeamento do solo. Para esta etapa, é utilizada máquina niveladora com discos que possuem a função de eliminar torrões de terra e deixar a terra mais plana para a etapa de plantio. A gradagem é realizada duas vezes logo após a aração, garantindo a incorporação do calcário, e antes da marcação das covas.

Na etapa de marcação das covas, foi utilizado o espaçamento de 6mx3,5m. Antes do início o plantio, foi aplicado defensivos para controle de plantas daninhas e formigas que poderiam prejudicar o crescimento das mudas. As covas foram abertas manualmente e adubadas com adubo orgânico. Após o plantio das mudas, foi realizada a irrigação localizada. Finalizada a irrigação, foi realizada a cobertura do solo com um composto orgânico de palha, gravetos e pedaços de madeira. A Figura 7 ilustra a disposição do pomar de limão convencional analisado nesta pesquisa.

Durante o primeiro ano de cultivo, foi realizada a irrigação localizada, que ocorre com maior frequência, porém em menor volume de água. Segundo os produtores, a necessidade de água é maior no início da produção e, portanto, é necessário garantir a manutenção de um solo úmido. Após o desenvolvimento das mudas, foi implantado um sistema de irrigação de gotejamento, que consiste na instalação de mangueiras que percorrem as fileiras de plantas e despejam a água em cada pé de limão por gotejamento.

A quantidade de água utilizada na irrigação por gotejamento varia de acordo com a necessidade do pomar, que deve ser avaliada pelos produtores. Na área total, são despejados em média 32 m³ por hora. O controle é feito através de bomba d'água e, por isso, é necessário calcular a quantidade de água e energia elétrica utilizadas no processo.

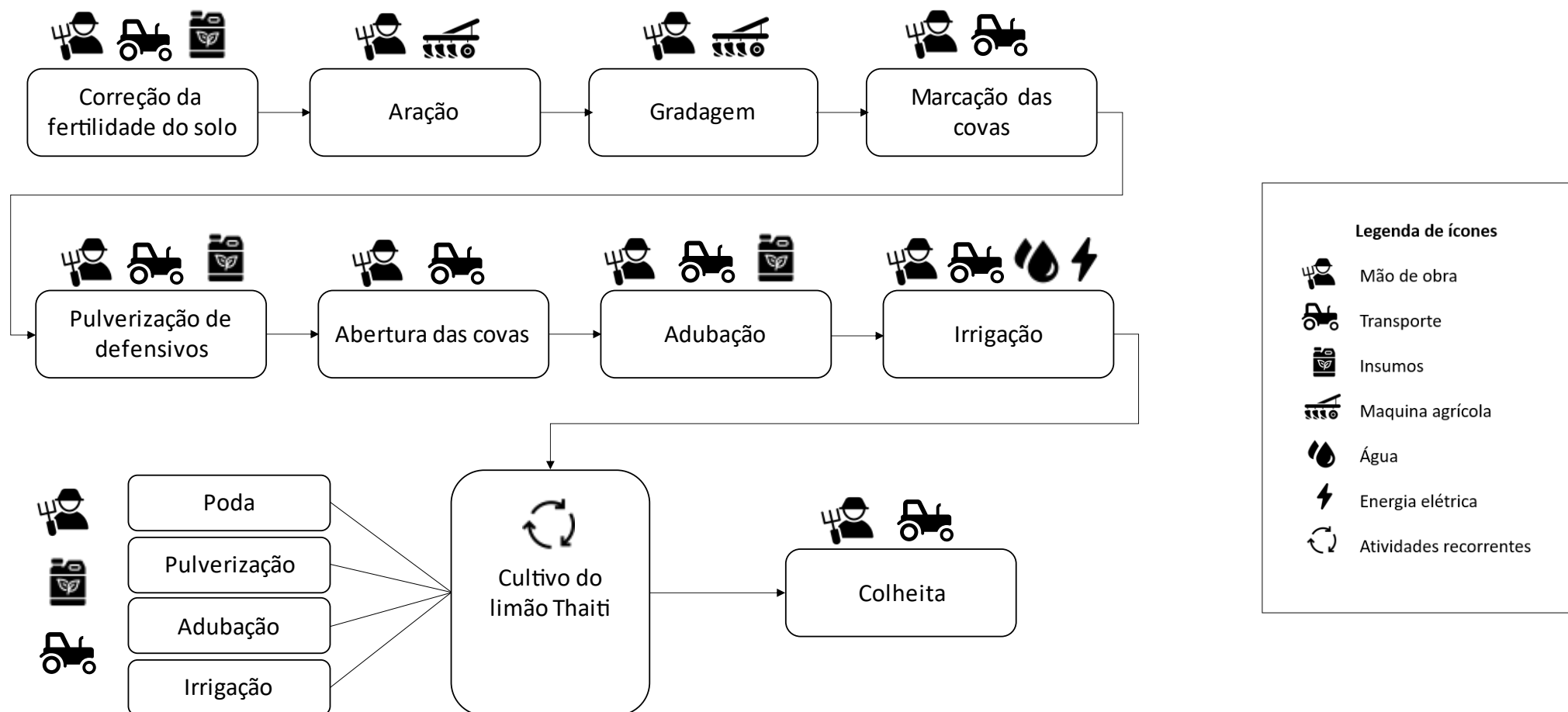
Figura 7. Ilustração do pomar de limão convencional.



Fonte: elaboração própria.

No pomar adulto, com aproximadamente três anos, são realizadas atividades de rotina como a poda manual, a adubação e a pulverização com defensivos. Nestas etapas, deverão ser contabilizados, além dos insumos utilizados, os impactos causados pelas máquinas utilizadas para locomoção dos funcionários. A partir das informações coletadas, foi possível elaborar uma representação esquemática do processo produtivo de limão Tahiti convencional da unidade estudada. A Figura 8 apresenta a esquematização do processo.

Figura 8. Fluxograma da produção de limão Tahiti convencional.



Fonte: elaboração própria.

3.2.2.2. A unidade produtora do limão Tahiti agroflorestal orgânico

A empresa responsável pela produção orgânica é certificada como Empresa B, isto é, a empresa pertence ao Sistema B, comunidade global de organizações que buscam o desenvolvimento socioambiental, além do econômico. Os limões produzidos na propriedade possuem o selo Orgânico Brasil, com a certificação realizada pelo IBD – Instituto Biodinâmico de Desenvolvimento Rural.

Atualmente, a unidade possui 50,27 (ha) hectares de área produtiva de limão agroflorestal orgânico, divididos em 05 talhões. A Tabela 1 apresenta o tamanho da área produtiva (em hectares) de cada talhão.

Tabela 1. Área produtiva dos talhões da propriedade de SAF.

TALHÃO	ÁREA (HA)
TA05	6,38
TA06	5,1
TA07	7,77
TA08	21,05
TA09	9,97
TOTAL	50,27

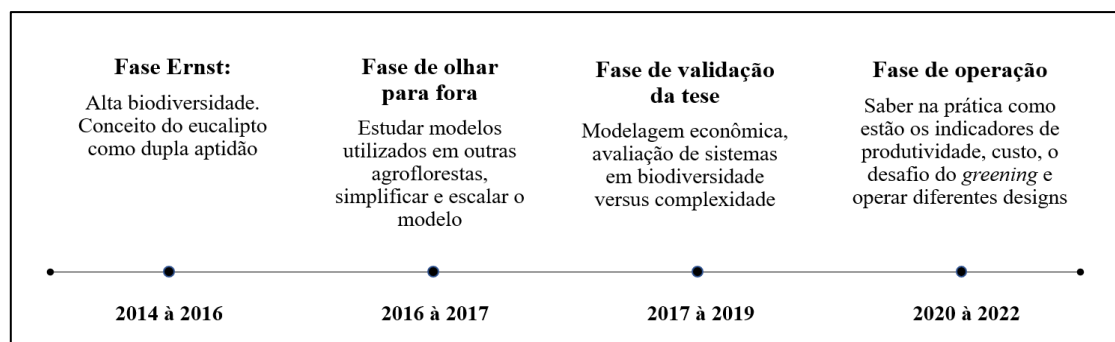
Fonte: elaboração própria.

Os primeiros experimentos de produção de limão agroflorestal orgânico na unidade tiveram início no ano de 2012 e desde então a produção está evoluindo com o objetivo de alcançar um modelo escalável e rentável, mantendo o conceito de regeneração através da estratificação das espécies que compõem o sistema. A evolução do SAF é dividida em quatro fases, ilustradas na linha do tempo da Figura 9.

A fase Ernst, com duração de aproximadamente dois anos, foi assim denominada devido ao *Ernst Götsch*, precursor da agroflorestal no Brasil e no mundo. Esta primeira fase é caracterizada pela implantação de um design robusto de agrofloresta, com grande quantidade de espécies sendo cultivadas em consórcio com espécies frutíferas como manga, jaboticaba e espécies de citros. Conforme discorrido na revisão de literatura realizada na presente pesquisa, os benefícios da alta biodiversidade em um cultivo agrícola são inúmeros, como a preservação e regeneração do solo, a conservação da água

e o sequestro de carbono. Contudo, através do conhecimento empírico, os produtores puderam observar determinadas desvantagens, como o aumento da complexidade e dos custos de manejo, fatores que poderiam inviabilizar o modelo de produção.

Figura 9. Fases da evolução do SAF.



Fonte: elaboração própria.

Através da experiência adquirida com os designs implantados anteriormente, os produtores observaram que havia redundância no modelo de produção e optaram por manter apenas uma espécie frutífera em consórcio com as demais espécies. O limão Tahiti foi escolhido para dar continuidade ao modelo. Dessa forma, foi possível manter os benefícios de um SAF através da biodiversidade funcional de ocupação de funções sistêmicas, com um formato simplificado, reduzindo a quantidade de espécies e a redundância do design. Neste segundo momento, com o conhecimento adquirido e com pesquisas de mercado, inicia-se a fase de olhar para fora. Nesta fase, foi desenvolvido um design simplificado, composto por cinco espécies: Eucalipto, Campim-mombaça, Mogno, Banana e Limão Tahiti. O novo design eliminou a redundância do processo, mas ainda não atingiu as expectativas dos produtores em relação ao equilíbrio entre complexidade do modelo, manutenção da biodiversidade e sequestro de carbono.

Os aproximadamente três anos de produção do limão em SAF possibilitaram a elaboração de uma modelagem econômica que permitisse produzir o limão em consórcio, proporcionando os benefícios do sistema agroflorestal e de forma economicamente mais atrativa. Nesta fase, com início no ano de 2017, foi desenvolvido um design intermediário, implementado no Talhão 08. Devido à idade da produção, ao tamanho da área produtiva e à atração de investidores, o Talhão 08, atualmente, representa o principal design da unidade produtora. Por estes motivos, e pela consolidação dos dados de produção, o TA08 foi o talhão utilizado para a realização da presente pesquisa.

Na fase mais recente, iniciada no ano de 2020, foi desenvolvido um novo design, com base nas oportunidades de melhoria dos designs anteriores. Nesta fase, iniciam-se as análises dos indicadores com o objetivo de encontrar um ponto ótimo de produção.

O design do talhão utilizado para a coleta de dados, o TA08, possui o limão Tahiti (*Citrus latifolia*) como a espécie de citros cultivada para a comercialização e consumo humano. Além do limão, são cultivadas três espécies de árvores madeiráveis, o Mogno africano (*Khaya ivorensis*), o Cedro-australiano (*Toona ciliata*), e o Ipê-Felpudo (*Zeyheria tuberculosa*). Essas três espécies atuam no processo de sombreamento do limão e serão comercializadas no momento de erradicação do talhão, que deverá ocorrer entre 15 e 20 anos após implantado. As demais espécies foram selecionadas de acordo com suas funcionalidades no SAF. O Quadro 3 apresenta a matriz de diversidade funcional do talhão.

Quadro 3. Caracterização do talhão de SAF.

Função	Espécie
Produção de alimento (consumo humano)	Limão
Produção de madeira (comercialização)	Mogno, cedro, ipê-felpudo
Produção de biomassa com média fixação de Nitrogênio	Mombaça, gliricídia, ingá, guandu
Produção de biomassa com alta fixação de Nitrogênio	Eucalipto
Atração de inimigos naturais	Banana (bordadura)
Atração de polinizadores	Guapuruvu, gliricídia, ingá
Proteção do solo	Mombaça
Sombreamento do limão no 1º, 2º e 3º ano	Guapuruvú, cedro, eucalipto, gengibre
Sombreamento do limão a partir do 3º ano	Guapuruvú, Mogno, cedro, ipê-felpudo, eucalipto, gliricídia, ingá
Ciclagem de nutrientes	Eucalipto, gliricídia
Fixação biológica de N	Gliricídia

Fonte: elaboração própria.

Nos três primeiros anos, houve o cultivo do Gengibre (*Zingiber officinale*) em consórcio com as outras espécies, com a principal função de sombreamento do limão. O gengibre é uma herbácea de porte médio, com altura que varia de um a dois metros. Por questões de permeabilidade de sol no sistema, os produtores optaram por mantê-lo somente nos três primeiros anos.

As espécies de árvores Eucalipto (*Eucalyptus*), Guapuruvu (*Schizolobium Parahyba*), Ingá (*Inga edulis*), Gliricídia (*Gliricidia sepium*) e Eritrina (*Erythrina crista-galli*) também possuem a função de sombreamento, no entanto, permanecem nos próximos anos da agrofloresta, devido ao porte das árvores e às outras funções que desempenham dentro do modelo, como a produção de biomassa, a atração de polinizadores e a ciclagem de nutrientes. A Figura 10 ilustra e sistematiza o design do TA08.

Figura 10. Ilustração do talhão de SAF de limão Tahiti.



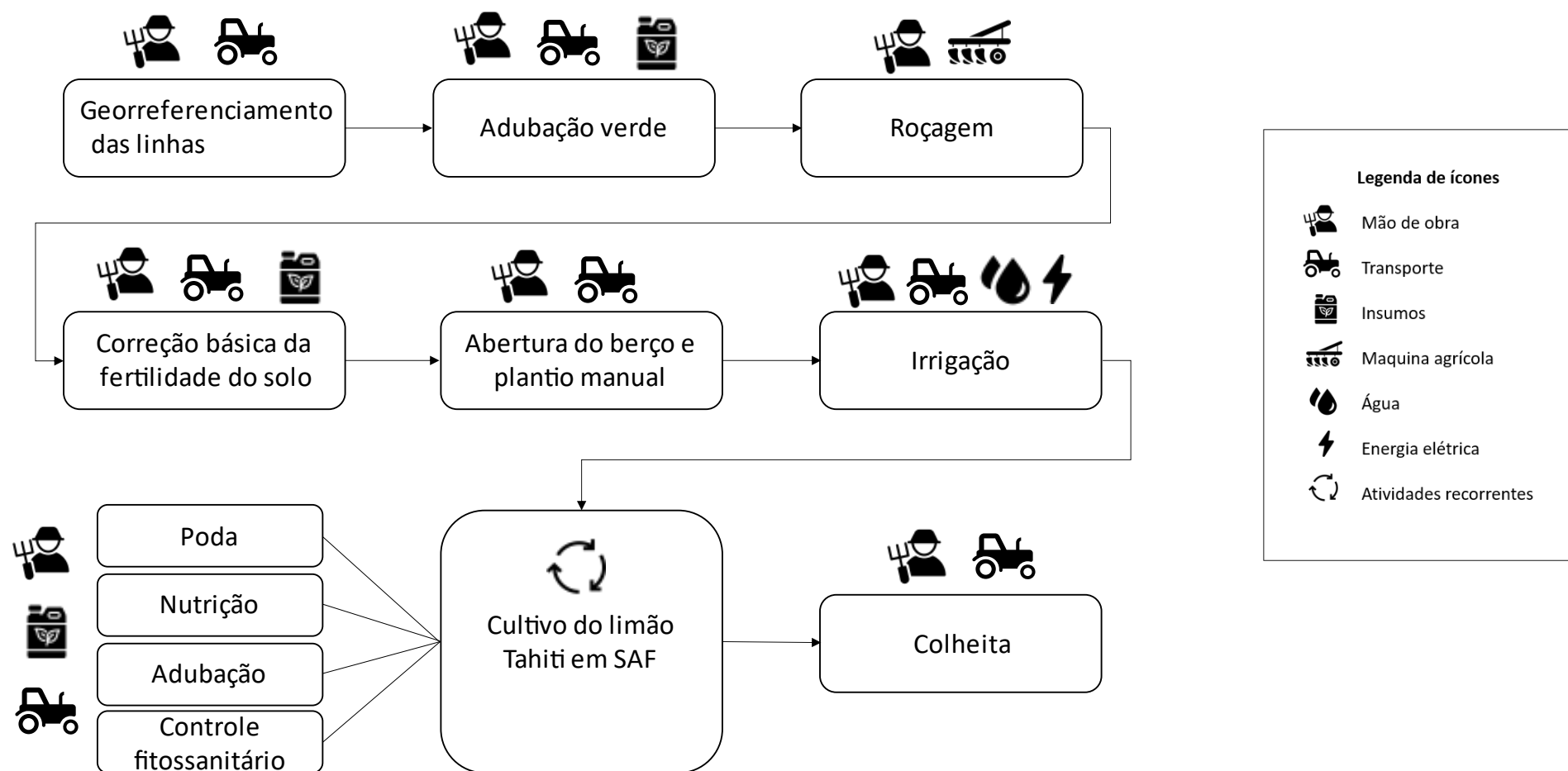
Fonte: elaboração própria.

O Capim-mombaça (*Megathyrsus maximus*) também é utilizado no consórcio de espécies do TA08. A mombaça é uma gramínea que forma touceiras com até um metro e meio de altura e atua na cobertura do solo, auxiliando na manutenção da umidade, controle do pH, contribuindo para a fertilidade do solo, além de servir como uma excelente fonte de matéria orgânica.

E por fim, nas laterais do talhão, são cultivadas as bananeiras, compondo o que os produtores chamam de bordadura. Além do exercer o papel de quebra vento da plantação, a Banana (*Musa spp.*) atua na atração e hospedagem dos ácaros que predam os ácaros que atacam o limão e, portanto, funciona como um hospedeiro para controle biológico de pragas.

Com base informações coletadas junto aos produtores, foi possível elaborar uma representação esquemática do processo produtivo de limão Tahiti agroflorestal orgânico do talhão analisado nesta pesquisa. A Figura 11 apresenta a esquematização do processo.

Figura 11. Fluxograma do SAF de limão Tahiti.



Fonte: elaboração própria.

3.2.3. Aplicação da metodologia de ACV

Finalizadas as fases de revisão de literatura e coleta de dados de produção, iniciou-se a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida em quatro fases preconizadas pela ISO 14040:2016, sendo: 1) definição de objetivo e escopo, 2) análise do inventário do ciclo de vida, 3) avaliação do impacto do ciclo de vida e 4) interpretação do ciclo de vida.

3.2.3.1. Definição de objetivo e escopo

O objetivo e escopo da ACV foram definidos com base na revisão de literatura realizada na primeira etapa da presente pesquisa, em entrevistas com especialistas e com os produtores de limão Tahiti. Os especialistas abordados foram os agrônomos responsáveis pelas respectivas unidades produtivas, dois funcionários da produção e uma doutoranda da Universidade de São Paulo, do campus de Pirassununga-SP, que atua na área de ACV.

Com base no conjunto de informações reunidas, foram definidos os objetivos apresentados na seção 1.1. Na etapa de definição do escopo, é necessário determinar a unidade funcional, a alocação, as fronteiras do sistema. As duas unidades produtoras estudadas têm como objetivo a produção de limão Tahiti para comercialização, dessa forma, a unidade funcional definida foi de 1 tonelada e a alocação foi definida por massa.

Em relação às fronteiras do sistema, foi definida a aplicação do estudo comparativo de ACV parcial e atribucional, abrangendo do berço à porteira. A escolha do ACV parcial se justifica pela ausência de pesquisas relacionadas ao tema, conforme citado na seção 1.2., o que demonstra a importância de iniciar a ACV da fase agrícola do limão Tahiti. A modelagem atribucional se justifica pela adequação à pesquisa, uma vez que possibilita identificar o comportamento dos elementos ambientais ao longo da cadeia produtiva, dentro de um período (WEIDEMA et al., 2018).

3.2.3.2. Análise do inventário do ciclo de vida

Na etapa de AICV foram realizados os cálculos dos dados coletados na primeira fase do ACV para enquadramento na unidade funcional definida previamente de 1 tonelada de limão Tahiti. Para os dados que não foram possíveis de serem coletados de fonte primária, por falta de conhecimento do produtor, foi utilizada fonte secundária. Os dados secundários são provenientes da base de dados Ecoinvent versão 3.8.

O método utilizado foi de alocação por massa, de acordo com a unidade funcional definida previamente, de 1 tonelada de limão Tahiti.

3.2.3.3. Avaliação do impacto do ciclo de vida

Considerando a cadeia produtiva avaliada e com base na revisão bibliográfica realizada na primeira etapa desta pesquisa, o método escolhido para a realização da AICV foi o ReCiPe. O método ReCiPe é um método combinado que compreende dezoito indicadores de *midpont* e três indicadores de *endpoint*. Para a realização desta pesquisa foram selecionadas as categorias que possuem relevância para a produção de limão Tahiti no Brasil, descritas a seguir.

- a) Mudanças climáticas;
- b) Depleção do ozônio estratosférico;
- c) Toxicidade humana;
- d) Acidificação terrestre;
- e) Eutrofização de água doce;
- f) Ecotoxicidade terrestre;
- g) Ecotoxicidade de água doce;
- h) Uso de terra agrícola;
- i) Depleção de recursos fósseis.

Para o cálculo do balanço de ACV foi utilizado o software GaBi Professional versão 5, através de acesso disponibilizado pela Universidade de São Paulo, campus de Pirassununga-SP. O GaBi é um dos principais softwares de AICV, reconhecido pela qualidade e volume de dados disponibilizados. O processamento dos dados inventariados no software GaBi inicia-se com a criação de uma nova base de dados dentro do software que irá armazenar todos os processos. Dentro da base de dados criada, foi necessário elaborar um plano para cada sistema de produção conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12. Criação de fluxos no software GaBi.

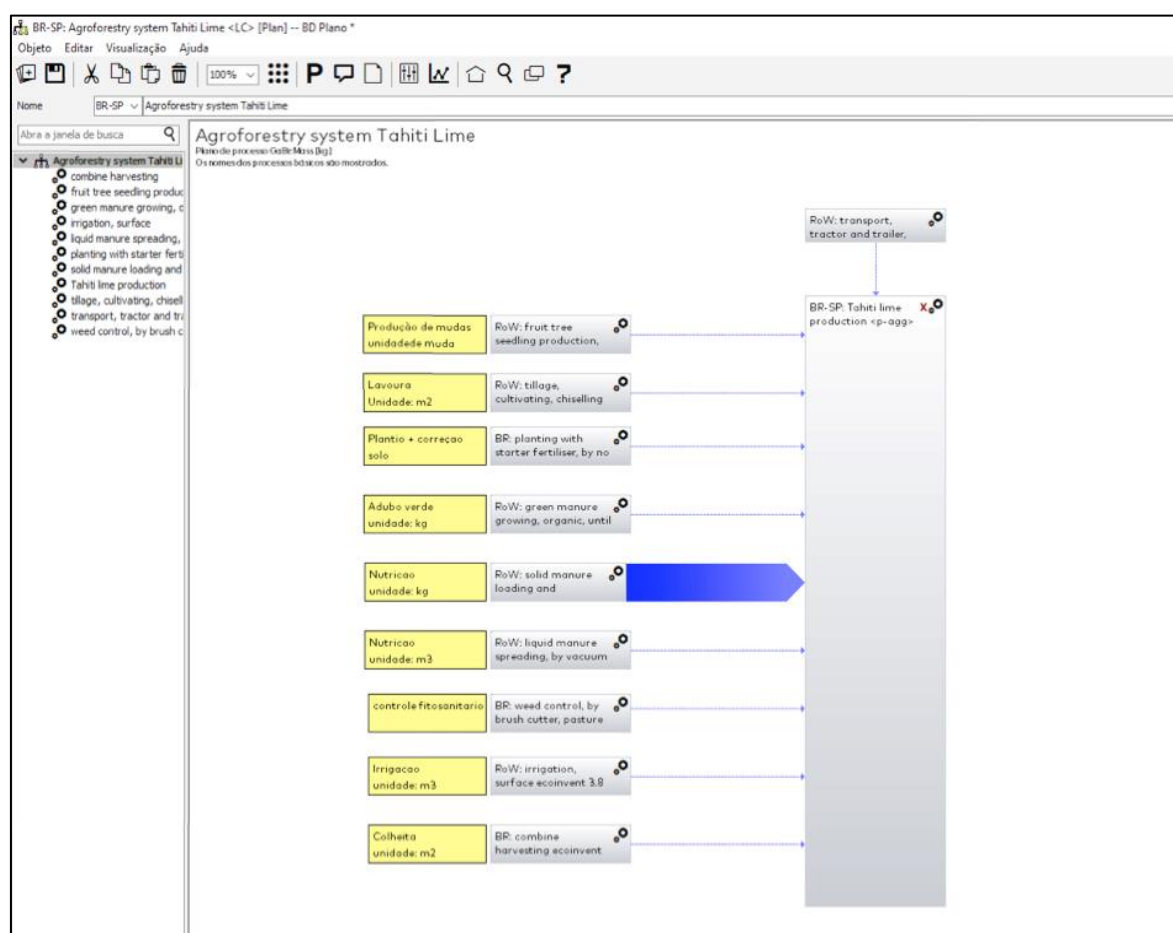


Fonte: GaBi.

Todos os insumos utilizados nos sistemas de produção do limão Tahiti foram pesquisados na base de dados Ecoinvent, em dados brasileiros ou globais para identificar as respectivas saídas. A base de dados disponibiliza o inventário das substâncias e processos de cada nação ou globais, formulados e revisados por pesquisadores. Os dados utilizados estão apresentados na seção de Apêndices. Através do inventário da base de dados é possível identificar quais emissões são geradas por cada insumo ou serviço realizado no processo produtivo. Como exemplo, pode-se verificar que o diesel utilizado no transporte agrícola emite Cádmio, Chumbo e Zinco no solo, e 18 tipos de emissões no ar. Com as quantidades específicas de cada processo produtivo, é possível calcular, através do software GaBi, os impactos ambientais de cada um deles.

Os processos foram criados individualmente desde a etapa de preparação do solo ao transporte do limão até a porteira, conforma ilustrado na Figura 13.

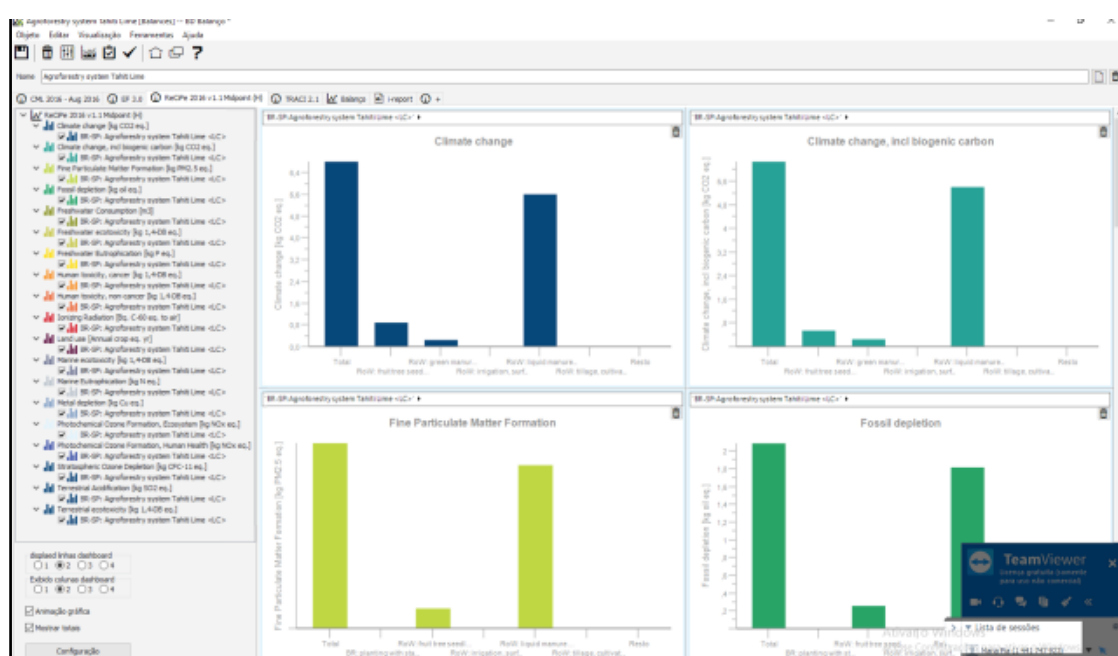
Figura 13. Criação de processos no software GaBi.



Fonte: GaBi.

Os dados quantitativos das entradas dos processos produtivos foram inseridos de acordo com os inventários elaborados a partir dos dados primários de produção e calculados para a unidade funcional de 01 tonelada de limão Tahiti. Após elaborado o fluxograma completo para cada sistema de produção, é necessário calcular os balanços e selecionar o método ReCiPe de avaliação, conforme ilustrado na Figura 14. Os resultados desta etapa estão demonstrados no capítulo 4.

Figura 14. Cálculo de balanço no software GaBi.



Fonte: GaBi.

3.2.3.4. Interpretação do ciclo de vida

Na etapa final da Avaliação do Ciclo de Vida, os resultados obtidos na etapa de AICV foram sintetizados para a elaboração dos resultados da presente pesquisa. Os impactos ambientais foram avaliados para cada sistema de produção de acordo com as categorias de impacto relevantes na produção de limão Tahiti. Nesta etapa buscou-se identificar os pontos significativos do estudo, verificar a consistência e integridade dos resultados, e identificar as limitações e recomendações da pesquisa. Os resultados obtidos nesta etapa estão apresentados nos capítulos 4 e 5.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A ACV é composta por quatro etapas. Os resultados da primeira etapa, que consiste na definição do objetivo e escopo, foi apresentado no capítulo 3. Este capítulo irá apresentar os resultados das demais etapas da ACV, que consistem na análise de inventário, avaliação do impacto do ciclo de vida e interpretação do ciclo de vida.

Conforme proposto na norma ISO 14040, para a viabilização deste estudo, foram adotadas algumas premissas, avaliadas junto aos especialistas e produtores. As premissas adotadas foram as seguintes:

- a) As bananeiras utilizadas para a criação da bordadura no SAF foram plantadas a partir de mudas cultivadas na própria fazenda. Não é realizado nenhum tipo de adubação, fertilização ou irrigação nesta área. As bananas produzidas no talhão não são colhidas para comercialização, uma vez que a bananeira atua como controle biológico do SAF de limão Tahiti. Portanto, as cargas ambientais dessa cultura foram desconsideradas.
- b) As máquinas agrícolas utilizadas na fazenda de SAF foram desenvolvidas especificamente para este sistema e, portanto, não estão incluídas nas bases de dados utilizadas para a construção do inventário. Dessa forma, optou-se pela utilização de máquina semelhante, mantendo a quantidade de Diesel e óleo lubrificante disponibilizados pelos produtores.
- c) No SAF são utilizados agentes biológicos no controle de pragas. Contudo, devido a pequena quantidade utilizada, a carga ambiental para estes agentes foi desprezada.

4.1. Comparativo das unidades produtivas

As etapas de produção e os insumos utilizados nos dois sistemas produtivos analisados são consideravelmente distintos, impossibilitando a realização de uma análise diretamente comparativa de cada insumo. Contudo, o Quadro 4 apresenta as principais características das unidades produtivas que serão úteis para a análise dos resultados.

Quadro 4. Comparativo das unidades produtoras.

Sistema de produção	Convencional	SAF
Área produtiva (ha)	30	21,05
Produção anual de 2021 (t)	840	130
Produtividade (t/ha)	26,88	6,17

Irrigação	Sim	Não
Uso de defensivos	Sim	Não
Tipo de fertilizantes	Orgânicos e sintéticos	Orgânicos
Funcionários fixos	10	4

Fonte: elaboração própria.

As propriedades analisadas são propriedades de porte médio considerando a quantidade de hectares destinadas ao cultivo de limão Tahiti, objeto deste estudo. O sistema convencional de produção se apresenta produtividade de aproximadamente 27 toneladas de limão por hectare e, portanto, enquadra-se na produtividade média de limão do estado de São Paulo, segundo a EMBRAPA. A produtividade do SAF representa apenas 15% da produção convencional utilizada para fins comparativos. O fator da produtividade influencia nos resultados da ACV apresentados a seguir, assim como o uso de irrigação, defensivos e fertilizantes.

4.2. Avaliação de impactos do ciclo de vida

Os dados de inventário obtidos na etapa anterior da ACV, foram utilizados para o cálculo do balanço dos impactos potenciais nas categorias pré-definidas. Os valores obtidos para 1 tonelada de limão Tahiti estão apresentados na Tabela 2. A coluna 5 da tabela apresenta a variação percentual entre os resultados da lavoura orgânica e da convencional.

Tabela 2. Resultados da avaliação dos impactos do ciclo de vida para produção de 1 tonelada de limão Tahiti.

Categorias de impacto	Unidade	Convencional	SAF	Variação (%)
Mudanças climáticas (CC)	kg CO ₂ eq	22,77	14,62	36%
Depleção de ozônio (OD)	kg CFC-11	2,89E-06	1,91E-06	22%
Toxicidade humana (HT)	kg 1,4-DB eq	3,401	1,601	53%
Acidificação terrestre (TA)	kg SO ₂ eq	0,112	0,0474	58%
Eutrofização de água doce (FEU)	kg P eq	0,0027	0,0011	59%
Ecotoxicidade terrestre (TE)	kg 1,4-DB eq	0,0052	0,0028	46%
Ecotoxicidade de água doce (FEC)	kg 1,4-DB eq	0,0607	0,0227	63%

Uso de terra agrícola (ALO)	m²a	0,0728	0,0982	-35%
Depleção de recursos fósseis (FD)	kg oil eq	7,45	6,12	18%

Fonte: elaboração própria.

Os resultados do ICV despontam a performance superior do SAF em comparação ao sistema convencional, com exceção da categoria de uso de terra agrícola, que está fortemente ligada à produtividade do SAF. Contudo, as considerações de cada resultado serão discutidas por categoria de impacto na próxima etapa de interpretação do ciclo de vida.

O Gráfico 1 apresenta a porcentagem de contribuição das principais fontes de emissão para cada uma das nove categorias de impacto analisadas. As fontes de emissão com maior representatividade são as aplicações de fertilizante sintéticos e as emissões geradas pelos processos produtivos mecanizados. As emissões provenientes da mecanização dos processos foram identificadas em todas as nove categorias de impacto analisadas. As emissões causadas pelo uso de fertilizantes impactam as categorias de HT (Toxicidade Humana); e TE (Ecotoxicidade Terrestre).

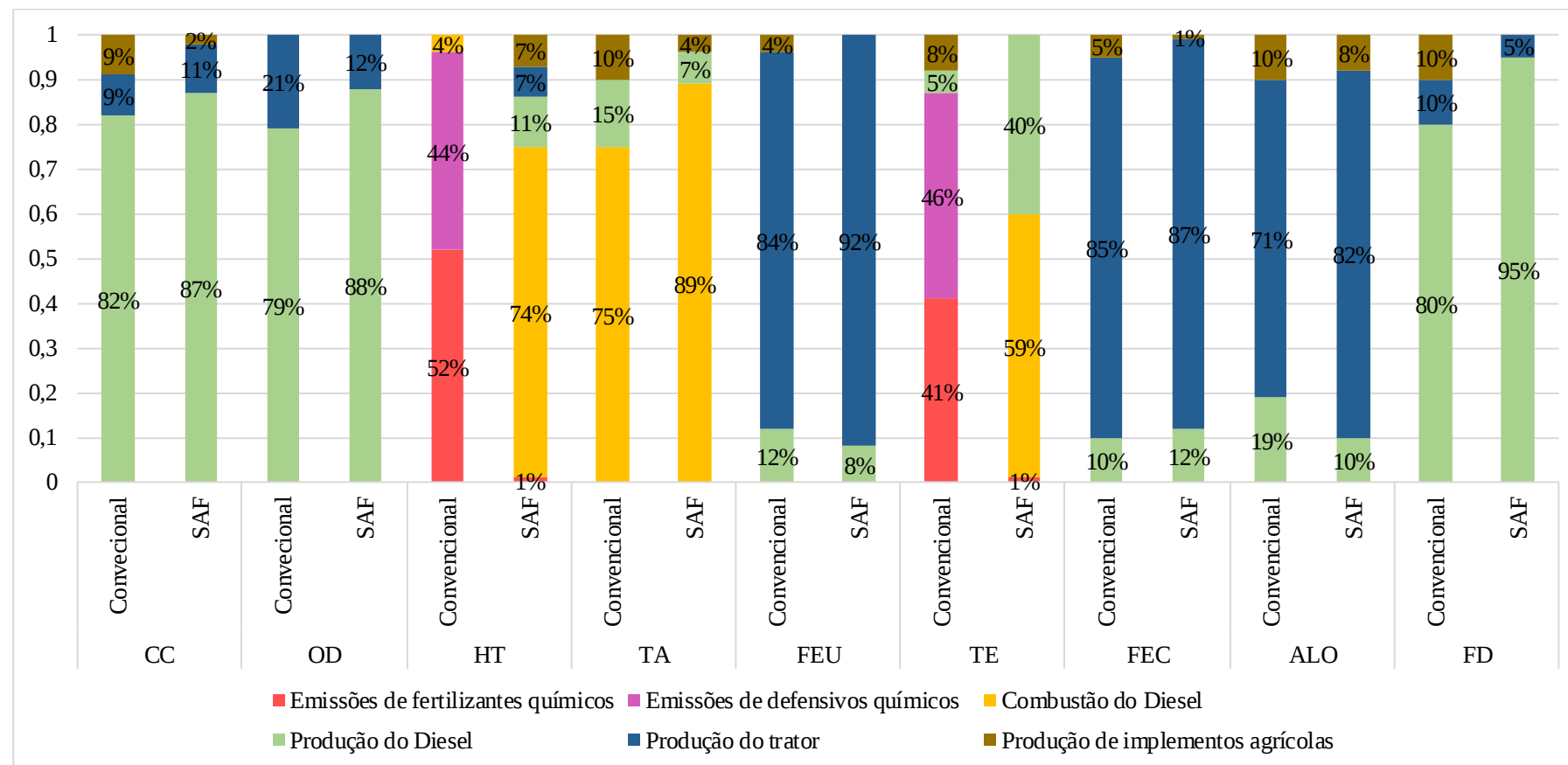
Em ambos os sistemas produtivos, as principais fontes de emissão estão relacionadas ao transporte de veículos, seja das mudas, dos insumos, dos trabalhadores e do limão Tahiti, e às máquinas agrícolas utilizadas nos processos produtivos, principalmente tratores. As emissões geradas nos processos produtivos mecanizados e transporte, responsáveis por grande parte das emissões geradas durante todo o processo de produção do limão Tahiti, acontecem nas etapas de produção do diesel, produção dos tratores, produção dos implementos agrícolas e na combustão do diesel.

Conforme demonstrado nos fluxogramas elaborados para os dois processos produtivos e ilustrados nas Figuras 8 e 11, as etapas mecanizadas são semelhantes em ambos os sistemas analisados. A divergência entre os dois processos encontra-se no início do cultivo, especificamente na etapa de preparo do solo. O sistema convencional realiza os processos de aração e gradagem do solo; que são inexistentes no SAF. Para os processos de preparo do solo realizados no sistema convencional, são utilizadas máquinas robustas e com maior consumo de diesel se comparado ao consumo das máquinas desenvolvidas para o SAF, que são mais leves e econômicas.

As emissões geradas por fertilizantes sintéticos encontram-se entre as principais emissões do sistema de produção convencional de limão Tahiti. No SAF, foi identificada a emissão por fertilizantes representando 1% das emissões da categoria de impacto de

Toxicidade Humana. As emissões advindas do uso de fertilizantes sintéticos no SAF referem-se ao uso desses insumos na etapa de produção das mudas de limão e demais espécies do consórcio. Por se tratar de uma etapa terceirizada do processo produtivo, foram utilizados dados secundários de viveiros de plantas disponibilizadas na base de dados Ecoinvent. Além do processo do cultivo de mudas, a utilização de Cal (CaO) e Fosfato natural reativo (P_2O_5) na etapa de correção do solo contribuíram para as emissões geradas pelo SAF advindas do uso de fertilizantes sintéticos.

Gráfico 1. Percentual de contribuição das fontes de emissões para as categorias de impacto por sistema produtivo.



Fonte: elaboração própria.

Legendas: CC (Mudanças Climáticas); OD (Depleção do ozônio estratosférico); HT (Toxicidade Humana); TA (Acidificação terrestre); FEU (Eutrofização de Água Doce); TE (Ecotoxicidade Terrestre); FEC (Ecotoxicidade de Água Doce); ALO (Uso de Terra Agrícola); FD (Depleção de Recursos fósseis).

4.3. Interpretação do ciclo de vida

A interpretação do ciclo de vida consiste na última etapa do ACV, conforme previsto pela ISO14040. Nesta etapa as discussões a respeito dos resultados dos impactos serão aprofundadas para cada categoria de impacto definida para esta pesquisa.

4.3.1. Mudanças Climáticas

A categoria de impacto de Mudanças Climáticas está relacionada com o aquecimento global e, portanto, à emissão dos gases do efeito estufa. A agricultura é responsável por parte das emissões de GEE como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). A emissão de CO_2 está relacionada à queima de combustíveis fósseis pelas máquinas e tratores agrícolas e pela perda do estoque de carbono devido a exploração e esgotamento do solo, principalmente nos casos de monocultura. A emissão de N_2O está relacionada à utilização de fertilizantes nitrogenados e a emissão de CH_4 está relacionada à decomposição da matéria orgânica e a utilização de combustíveis fósseis (PORTELA; LEITE, 2016).

No caso da produção de limão Tahiti, o maior impacto na categoria de Mudanças Climáticas é proveniente da emissão de CO_2 . O sistema convencional apresentou um maior impacto na categoria CC, com emissão de 22,77 kg CO_2 eq por tonelada de limão. O SAF resultou em menor impacto, com emissão de 14,62 CO_2 eq por tonelada de limão produzido.

A combustão do diesel é o processo com maior impacto na emissão de CO_2 , representando 87% das emissões do SAF e 82% das emissões de CO_2 do sistema convencional. As demais emissões que impactam esta categoria estão atreladas à cadeia produtiva de outros produtos. Neste caso, a fabricação do diesel e a fabricação de tratores e implementos agrícolas. O processo de produção do diesel é responsável por 9% das emissões de CO_2 do sistema convencional e 11% do SAF. Por fim, a produção de implementos agrícolas que contribui com 9% das emissões do sistema convencional e 2% do SAF. Apesar dos sistemas mecanizados de ambos os processos serem semelhantes, a diferença das emissões se justifica pelo tipo de trator e máquinas agrícolas de cada sistema. O sistema convencional utiliza arado, niveladoras e tratores, enquanto o SAF utiliza máquinas simplificadas, desenvolvidas para o modelo.

4.3.2. Depleção do ozônio estratosférico

A camada de ozônio é formada por gases atmosféricos, sendo 90% o ozônio (O₃). Esta camada possui papel importante no equilíbrio do planeta, principalmente por impedir a passagem de radiação ultravioleta emitida pelo Sol. Produtos químicos como halon, tetracloreto de carbono (CTC), hidrofluorcarbono (HCFC), CFC (clorofluorcarbono) e brometo de metila são os principais responsáveis pela depleção de ozônio devido a interferência na composição atmosférica reduzindo a espessura da camada e, conseqüentemente a proteção UV. A incidência de raios UV pode causar danos ao meio ambiente e aos humanos (HUIJBREGTS et al., 2016).

Na agricultura, a depleção da camada de ozônio está relacionada às atividades secundárias como a indústria que produz máquinas e implementos agrícolas devido a utilização de solventes, baterias, extintores de incêndio, sistemas de refrigeração de motores e ares-condicionados. Estes processos são responsáveis pela emissão de gases que afetam a camada de ozônio (WEARE, 1995).

As emissões dos sistemas produtivos de limão são provenientes da produção de diesel e da produção dos tratores. Os resultados de emissão de CFC obtidos neste estudo foi de 2,89E-06 kg CFC-11 para a produção de 1 tonelada de limão Tahiti no sistema convencional e de 1,91E- kg CFC-11 para a produção de 1 tonelada de limão Thaiti em SAF. Em termos de contribuição percentual, 79% das emissões de CFC do sistema convencional são provenientes da produção do diesel e 21% da produção de tratores. No SAF, 88% da emissão de CFC é proveniente da produção de diesel e 12% da produção de tratores. Assim como as emissões de CO₂, a quantidade difere-se entre os sistemas produtivos devido ao modelo de máquinas e implementos agrícolas utilizados em cada um dos processos.

4.3.3. Toxicidade Humana

A categoria de toxicidade humana consiste na identificação dos processos produtivos de emissões de substâncias químicas que, ao serem emitidas no ar, no solo ou na água, podem prejudicar a saúde humana de diversas maneiras (WENZEL et al.;1997).

No SAF, a toxicidade humana está relacionada principalmente à combustão do diesel, representando 74% das emissões, em seguida está o processo de produção do diesel, responsável por 11% das emissões a produção dos tratores e implementos agrícolas representam 7% cada e o uso de fertilizantes com apenas 1% das emissões.

O SAF é orgânico e, portanto, não utiliza fertilizantes químicos. As emissões provenientes do SAF foram contabilizadas na etapa de criação de mudas, que é terceirizada, e na etapa de correção básica da fertilidade do solo.

No sistema convencional, 52% das emissões de CFC são provenientes da utilização de fertilizantes químicos, 44% resultantes da utilização de defensivos químicos, e o restante, correspondente a 4% das emissões é proveniente da combustão do diesel.

Conforme o esperado, principalmente na categoria de toxicidade humana, o desempenho do SAF é superior ao sistema convencional. No resultado deste estudo, obteve-se que para produção de 1 tonelada de limão Tahiti em SAF são emitidos 1,601 kg 1,4-DB eq, enquanto para produção da mesma quantidade de limão em sistema convencional, são emitidos 4,401 kg 1,4-DB eq. Com 53% de variação, representa uma das categorias com maior porcentagem entre os sistemas de produção analisados.

4.3.4. Acidificação terrestre

A acidificação terrestre ocorre quando nível de acidez do solo é afetado pela emissão atmosférica de substâncias inorgânicas como sulfatos, nitratos e fosfatos o nível de acidez. As substâncias são emitidas no ar e, posteriormente depositadas no solo através da chuva. Este fenômeno é conhecido como chuva ácida. A modificação da acidez do solo por substâncias inorgânicas é prejudicial para árvores e plantas, podendo eliminar a vegetação e causar o desaparecimento de espécies, dependendo da frequência que ocorre e o nível de alteração da acidez (HUIJBREGTS et al., 2016).

Na produção do limão, o processo com maior contribuição para o fenômeno chuva ácida e, conseqüentemente, acidificação terrestre foi a emissão de para a emissão de dióxido de enxofre (SO₂) pelos processos de combustão do diesel, fabricação do diesel e de tratores e implementos agrícolas.

O desempenho do SAF nesta categoria foi superior ao desempenho do sistema convencional. Para produção de 1 tonelada de limão em SAF, foram emitidos 0,0474 kg SO₂ eq, enquanto para a produção da mesma quantidade de limão no sistema convencional foram emitidos 0,112 kg SO₂ eq, apresentando variação de 58%.

No SAF, 89% das emissões são provenientes da utilização do diesel e o restante está dividido entre a produção de diesel, tratores e máquinas agrícolas. No sistema convencional, a 74% das emissões são provenientes da combustão de diesel e o restante é proveniente dos processos produtivos do diesel, tratores e implementos agrícolas.

A grande participação do diesel na emissão de substâncias provocadoras da chuva ácida é devido ao processo de refinaria do petróleo, responsável pela emissão de dióxido

de enxofre, e ao processo de combustão do diesel, que emite um composto de óxidos de nitrogênio (NOx) e óxido sulfúrico.

4.3.5. Eutrofização de água doce

A eutrofização de água doce consiste no processo de aumento de nutrientes nos ecossistemas aquáticos causados pelo depósito de substâncias como nitrogênio, fósforo e potássio. A elevação da quantidade de nutrientes nas águas aumenta a reprodução de algas e demais espécies que se alimentam desses nutrientes. A proliferação das espécies de forma desregulada causa danos aos ecossistemas, na maioria das vezes irreversíveis.

A agricultura está relacionada à eutrofização da água uma vez que os fertilizantes aplicados no solo atingem os corpos hídricos por meio das chuvas ou da própria irrigação do sistema agrícola. O método utilizado para a realização deste estudo, o ReCiPe, calcula a quantidade de fósforo que passa do solo para a água doce e o tempo que esse nutriente permanece na água para avaliar a categoria de eutrofização da água doce (HUIJBREGTS et al., 2016).

As emissões de fósforo do sistema convencional foram maiores se comparado ao SAF. Para a produção de 1 tonelada de limão em convencional foram emitidos 0,0027 kg P eq, enquanto para a produção da mesma quantidade de limão no sistema houve uma redução de 59%, com emissão de 0,0011 kg P eq.

4.3.6. Ecotoxicidade terrestre

A categoria de impacto de ecotoxicidade terrestre mensura a toxicidade dos metais depositados no solo provenientes de atividades produtivas (HUIJBREGTS et al., 2016; HAYE; SLAVEYKOVA; PAYET, 2007). Nesta categoria, o desempenho do SAF em relação aos impactos ambientais foi superior ao processo produtivo convencional.

Para a produção de 1 tonelada de limão convencional foi emitido 0,0052 kg 1,4-DB eq., com variação de 46% para o sistema SAF que emitiu 0,0028 kg 1,4-DB eq. Para produzir a mesma quantidade de limão Tahiti.

No SAF, a principal fonte das emissões é proveniente da combustão do diesel utilizado nos transportes e máquinas agrícolas, representando 59% do total. O segundo maior processo responsável pelas emissões é produção do diesel, correspondendo a 40% da totalidade. E por fim, o uso de fertilizantes que responde por apenas 1% da totalidade.

No sistema convencional, a principal fonte de emissão é proveniente da aplicação de fertilizantes e defensivos, responsáveis por 87% das emissões que impactam a

categoria. As demais participações dividem-se nos processos mecanizados do sistema, sendo 5%, com a produção do diesel e 8%, com a produção dos tratores.

4.3.7. Ecotoxicidade de água doce

A categoria de ecotoxicidade de água doce tem como objetivo a mensuração do potencial tóxico de metais envolvidos em determinado processo produtivo no momento em que entram em contato com a água (HUIJBREGTS et al., 2016).

Nesta categoria, a produção convencional emitiu 0,0607 kg 1,4-DB eq, o que representa um valor 63% maior do que os 0,0227 kg 1,4-DB eq emitidos pela produção convencional.

Em ambos os processos, a principal contribuição para as emissões é proveniente da carga ambiental da produção de tratores, que responde por 85% do total da produção convencional e 87% da produção em SAF. Seguida da cadeia produtiva do diesel que representa 12 % das emissões do sistema convencional e 10 % das emissões do SAF. E por fim, as emissões provenientes da produção de implementos agrícolas que representa 5% das emissões no sistema convencional e apenas 1% das emissões do SAF.

4.3.8. Uso da terra agrícola

A categoria de uso da terra agrícola é pertinente à ocupação de áreas terrestres para a implantação de um sistema produtivo. Nesta categoria é considerada a utilização da terra em tamanho de área, e os fatores relacionados às modificações na qualidade do solo, redução da biodiversidade, dentre outros.

Segundo Mondelaers et al. (2009), a terra é um bem escasso e, portanto, é necessário utilizá-la com a eficiência. O uso da terra agrícola se apresenta como um importante indicador para medir a competição entre as culturas com outros tipos de cultivo, bem como com outras destinações como habitação ou instalação de indústrias (MONDELAERS et al., 2009).

A única categoria em que o SAF apresentou desempenho inferior ao sistema convencional em relação aos impactos ambientais causados foi na categoria de uso de terra agrícola.

Nos resultados de impacto de ciclo de vida deste trabalho, o SAF obteve o valor de 0,0982 m²a, apresentando desempenho 35% inferior ao atingido pela produção convencional, que obteve resultado de 0,0728 m²a.

Assim como nas demais categorias de impacto analisadas, as principais fontes de emissão são os processos mecanizados dos sistemas produtivos e o uso de fertilizantes,

no caso do sistema convencional. No SAF, 82% das emissões são provenientes da produção de tratores, 10% são provenientes da produção do diesel e o restante está atrelado à produção de implementos agrícolas, representando 8% das emissões. No sistema convencional, 71% das emissões estão atreladas à produção de tratores, 19% à produção de diesel e 10% à produção de implementos agrícolas.

Segundo Mondelaers et al. (2009), os sistemas de produção orgânico apresentam a eficiência no uso da terra de 15% a 20% menor se comparado à eficiência do sistema convencional. O sistema de produção analisado neste estudo para fins de comparação com o sistema de produção agrícola convencional é orgânico. No entanto, além de não utilizar fertilizantes e defensivos químicos, o modelo produz o limão Tahiti em consórcio com outras espécies que poderão ser comercializadas no momento de erradicação do pomar. O segundo fator importante em relação ao SAF, que deve ser considerado para análise da performance do sistema principalmente em relação ao uso da terra agrícola, é a capacidade regenerativa que o modelo de produção proporciona para o meio ambiente.

4.3.9. Depleção de recursos fósseis

A categoria Depleção de recursos fósseis está relacionada à contribuição dos sistemas de produção para o esgotamento da disponibilidade de recursos fósseis (HUIJBREGTS et al., 2016).

Por se tratar de recursos fósseis, o processo produtivo atrelado à produção de limão Tahiti que apresentou a maior contribuição para os impactos da categoria foi a produção do diesel, representando 95% das emissões da SAF e 80% das emissões do sistema convencional. Em seguida está o processo de produção do trator, responsável por 5% das emissões do SAF e 10% das emissões do sistema convencional. Por fim, a produção de implementos agrícolas, que contribui para 10% das emissões do sistema convencional.

Em relação à quantidade de resíduos produzida, os resultados deste estudo obtiveram os valores de 7,45 kg oil eq emitidos pelo sistema convencional e 6,12 kg oil eq, emitidos pelo SAF para a produção de 1 tonelada de limão Tahiti. A categoria de depleção de recursos fósseis apresentou 18% de variação entre os sistemas, sendo a categoria com menor variação dentre as demais categorias analisadas.

4.4. Implicações gerenciais

A ACV é uma ferramenta amplamente utilizada em pesquisas de desempenho ambiental de produtos e serviços, uma vez que permite mensurar os potenciais impactos ambientais gerados pelo produto ao longo do seu ciclo de vida. O método de ACV abrange as etapas da cadeia produtiva e os impactos gerados na produção dos insumos utilizados na produção, proporcionando informações relevantes para as empresas no momento de escolha de fornecedores. Os impactos identificados ao longo do ciclo de vida de um produto podem ser classificados em diversas categorias. A classificação dos impactos permite a escolha de ferramentas e tecnologias mais adequada para cada processo produtivo (BALKEMA et al., 2002).

No estudo realizado, foi possível verificar que os maiores impactos ambientais foram gerados pelos processos mecanizados utilizados nas duas propriedades. A mecanização do processo através da utilização de máquinas e implementos agrícolas incide na utilização de diesel. O processo de combustão do diesel esteve presente em todas as categorias de impacto analisadas, além das emissões provenientes do processo de refinaria de petróleo e da cadeia produtiva das máquinas agrícolas e tratores.

O conhecimento das principais fontes de emissões dos sistemas produtivos possibilita a análise de possíveis mudanças no processo, com o objetivo de reduzir os impactos ambientais gerados. Contudo, as tomadas de decisão de uma empresa ou produtor agrícola estão atreladas a outros importantes fatores de decisão, como a produtividade e desempenho financeiro.

O impacto ambiental causado pela mecanização é um conhecimento de senso comum. No entanto, a não utilização de maquinário agrícola representaria um regresso no processo produtivo e inviabilizaria os meios de produção. No caso dos sistemas produtivos de limão Tahiti, as máquinas são utilizadas para o preparo do solo, para a plantação, irrigação, pulverização e demais processos produtivos. Ainda que os processos produtivos fossem reformulados, com o objetivo de redução da mecanização e consequente minimização dos impactos ambientais gerados, o transporte das mudas, dos insumos, das ferramentas e do limão Tahiti, assim como a locomoção dos funcionários até a fazenda e dentro da propriedade, necessitam da utilização de veículos.

A alternativa encontrada pelos produtores de SAF para reduzir os impactos das emissões geradas pelas máquinas agrícolas foi o desenvolvimento de máquinas mais leves, que consomem menos combustível e geram menor compactação do solo. Ademais, no SAF, os processos como plantio, pulverização de micronutrientes e controle de plantas daninhas são realizados de forma manual, o que contribui para o melhor desempenho ambiental do SAF, se comparado ao sistema convencional de produção.

O processo produtivo do limão Tahiti é um processo simples e composto por poucas etapas, se comparado a um processo de produção industrial. Os resultados da presente pesquisa possibilitam a avaliação, por parte do produtor de limão Tahiti convencional, da implementação de mudanças dentro dos processos, com a função de elevar o desempenho ambiental do sistema convencional, sem prejudicar a produtividade do limão Tahiti.

A substituição do maquinário utilizado no sistema convencional por modelos de maquinário, cuja função permanece a mesma dos tratores agrícolas, porém, com menor consumo de combustível, se apresenta como uma alternativa para otimizar o desempenho ambiental do sistema convencional, visto que, o uso do maquinário e implementos agrícolas é a principal fonte de emissões do processo produtivo do limão Tahiti.

No entanto, para a substituição dos veículos e maquinários é necessário considerar o investimento financeiro e possivelmente, a necessidade de treinamento de pessoal para a utilização de novas máquinas. Além disso, é necessário considerar a utilidade das máquinas dentro da propriedade. É possível que uma máquina utilizada no cultivo do limão pode ser utilizada em outros processos produtivos dentro da mesma fazenda.

Em relação ao uso de fertilizantes nos processos produtivos, foi observado que o sistema convencional adota algumas práticas utilizadas no SAF, como a utilização de adubo orgânico no momento do plantio das mudas e o uso de compostagem para manter a umidade da terra e diminuir o consumo de água. A adoção de medidas semelhantes às medidas supracitadas, poderia acarretar a diminuição do uso de fertilizantes e defensivos sintéticos, contribuindo para o desempenho ambiental do limão Tahiti convencional. No SAF, as emissões advindas de fertilizantes sintéticos, identificadas na etapa da criação de mudas e correção do solo, podem ser consideradas irrelevantes diante das demais emissões do sistema e quando comparadas às emissões do sistema convencional.

Na categoria de uso de terra agrícola, que está relacionada à área utilizada e a qualidade do solo, o SAF apresentou desempenho inferior se comparado ao sistema convencional. Devido a menor produtividade do SAF, é possível constatar a necessidade da utilização de uma área mais extensa para a produção da mesma quantidade de limão produzida pelo sistema convencional. Contudo, o consórcio de espécies realizado pelo SAF promove a preservação da biodiversidade e a qualidade do solo, além da possibilidade de comercialização das demais espécies cultivadas.

O desempenho do uso de terra agrícola do SAF é inferior se comparado ao sistema convencional somente no fator uso de terra em tamanho de área. Para avaliar o desempenho do SAF na categoria uso de terra em relação à preservação de biodiversidade

e qualidade do solo, é necessário o desenvolvimento de pesquisas mais aprofundadas sobre a capacidade regenerativa do solo que, em conjunto com a ACV, poderão elucidar as questões a respeito do desempenho inferior do SAF se comparado ao sistema convencional na categoria uso de terra.

Além da capacidade de regeneração do solo pelo SAF, não é possível concluir sobre o desempenho ambiental do SAF na categoria de uso de terra, com a ausência de uma avaliação da produtividade e comercialização das espécies cultivadas em consórcio com o limão Tahiti. A comercialização das espécies consorciadas deverá ocorrer no momento de erradicação do pomar de limão Tahiti. Dessa forma, não foi possível avaliar a viabilidade da comercialização das demais espécies no talhão utilizado para a realização da presente pesquisa.

Com base somente nos resultados da ACV, como implicações gerenciais para o SAF, recomenda-se a avaliação da implantação de um modelo de consórcio com menor complexidade, utilizando menor quantidade de espécies vegetais, com o objetivo de reduzir o espaçamento entre as plantas e otimizar a produtividade do limão Tahiti.

Os resultados desta pesquisa poderão contribuir em diversos aspectos para os sistemas de produção analisados. Para identificar demais oportunidades, é necessário avaliar os resultados encontrados junto aos interesses dos produtores.

5. CONCLUSÕES

Os impactos ambientais causados pela cadeia de produção agroalimentar brasileira são relevantes, não somente pelas emissões geradas por cada processo produtivo, mas pela grande quantidade de alimento produzida no país, que representa um dos principais provedores de alimento no mundo.

A tendência de crescimento do setor, devido à previsão de aumento da demanda, provoca alerta para os potenciais impactos ambientais causados pela produção de alimentos, ressaltando a necessidade de desenvolvimento de estudos que avaliem o desempenho ambiental da agricultura no Brasil. O setor da citricultura, no qual o Brasil ocupa papel de destaque, carece de investimentos em pesquisas de Avaliação de desempenho ambiental. O presente estudo permitiu verificar, não somente a ausência de pesquisas de ADA no setor, como a dificuldade de abertura das empresas para fornecimento dos dados necessários para o desenvolvimento das análises.

A Avaliação do ciclo de vida realizada nesta pesquisa, para o sistema de produção convencional e SAF orgânico do limão Tahiti, identificou emissões geradas para o ar, para a água e para o solo, pelos dois sistemas produtivos analisados. As emissões geradas causam impacto nas nove categorias do método ReCiPe de ACV: Mudanças climáticas, Depleção do ozônio estratosférico, Acidificação terrestre, Eutrofização de água doce, Ecotoxicidade terrestre, Ecotoxicidade de água doce, Uso de terra agrícola, Depleção de recursos fósseis e Toxicidade humana

Os processos mecanizados dos sistemas produtivos e a utilização de fertilizantes sintéticos são os principais responsáveis pelas emissões geradas pela produção de limão Tahiti, devido aos processos de produção dos tratores e implementos agrícolas, da produção e combustão do óleo diesel e da contaminação da água e do solo pelas substâncias químicas presentes nos fertilizantes sintéticos.

Com os resultados do estudo comparativo de ACV, pode-se verificar performance superior do limão Tahiti produzido em sistema agroflorestal orgânico, em relação ao limão convencional, para a unidade funcional de 1 tonelada de limão. Dentre as nove categorias analisadas neste estudo, o SAF apresentou resultados superiores em oito categorias, em comparação ao sistema convencional. O desempenho do SAF foi inferior ao convencional somente na categoria de uso da terra agrícola, que está relacionada à área utilizada e aos impactos causados no solo.

A produtividade do SAF está abaixo do esperado pelos produtores e representa apenas 15% da produção de limão Tahiti do sistema convencional. A produtividade está

diretamente ligada ao uso da terra, uma vez que, quanto menor a produção da fruta por hectare, maior é a necessidade do uso de área agrícola para o cultivo. Entretanto, é importante ressaltar que o SAF produz o limão em consórcio com demais espécies, com o objetivo de simular o ambiente natural de desenvolvimento do limão. Segundo Schroth et al. (2004), quanto maior a quantidade de espécies envolvidas no consórcio de plantas, maior a similaridade do arranjo de SAF com as florestas e, conseqüentemente, maior a manutenção da qualidade do solo e da biodiversidade.

Conforme citado anteriormente, nas demais categorias de impacto analisadas, a principal fonte de emissões são os processos industriais relacionados à cadeia produtiva do limão Tahiti. Com o estudo realizado nos processos agrícolas, foi possível identificar oportunidades de adoção, pelos produtores de limão convencional, de procedimentos e métodos utilizados pelos produtores de SAF, a fim de otimizar o desempenho ambiental da produção de limão Tahiti convencional.

Uma vez identificadas as principais fontes de emissão dentro dos sistemas de produção, como medida de redução dos danos causados ao meio ambiente, recomenda-se a avaliação, pelos produtores do limão convencional, da modernização das máquinas e implementos agrícolas utilizados, substituindo os tratores por veículos mais leves, com o objetivo de reduzir os danos causados ao solo e com menor consumo de combustível, com o objetivo de reduzir as emissões geradas pela combustão do diesel e demais processos que envolvem a produção de implementos e combustível.

O presente estudo avalia o impacto dos processos na categoria de mudanças climáticas, que está diretamente relacionada à emissão de CO₂ na atmosfera. Contudo, a pesquisa não avalia o sequestro de carbono proporcionado pela produção agrícola, que pode compensar as emissões provenientes da mesma produção, principalmente do SAF, devido ao cultivo de diferentes espécies vegetais em consórcio. Segundo o produtor de SAF, o sequestro de CO₂ da área produtiva de limão Tahiti é de aproximadamente trinta e duas toneladas por ano. Para considerar o impacto do sequestro de carbono no meio ambiente, recomenda-se, em próximos estudos, o desenvolvimento de análise conjunta ao método de ACV.

Por fim, a ACV realizada na presente pesquisa, permitiu comprovar a premissa de que as práticas adotadas pelo sistema agroflorestal orgânico reduzem os impactos ambientais causados pelo processo produtivo do limão Tahiti, uma vez que o limão SAF orgânico apresentou desempenho ambiental superior, se comprado ao limão Tahiti convencional. Contudo, para complementar o presente estudo e elevar a assertividade dos processos de tomada de decisão dos produtores de limão Tahiti, recomenda-se a

associação do método de ACV à análise da capacidade de sequestro de carbono e regeneração do solo por meio do consórcio de plantas. Ademais, a combinação de estudos de modelagem econômica para avaliar a viabilidade das mudanças sugeridas com base no desempenho ambiental dos sistemas de produção do limão Tahiti analisados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ADEWALE, C.; HIGGINS, S.; GRANATSTEIN, D.; STOCKLE, C.; CARLSON, B.; ZAHER, U.; CARPENTER-BOGGS, L. Identifying hotspots in the carbon footprint of a small scale organic vegetable farm. **Agricultural systems**, v. 149, p. 112-121, 2016.
- ADEWALE, C.; REGANOLD, J.; HIGGINS, S.; EVANS, R.; CARPENTER-BOGGS, L. Improving carbon footprinting of agricultural systems: Boundaries, tiers, and organic farming. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, p. 41-48, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- BALKEMA, A. J.; PREISING, H. A.; OTTERPOHL, R.; LAMBERT, F. J. D. Indicators for the sustainability assessment of wastewater treatment systems. **Urban Water**, v. 4, p. 153-161, 2002.
- BARROS, S. A. et al. Efeito do ácido giberélico e do uniconazole na fisiologia pós-colheita do limão Tahiti'(Citrus latifolia Tanaka). **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v. 13, n. 3, p. 223-226, 1991.
- BAUMANN, H.; TILLMAN, A.M. The Hitch Hiker's Guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application. Lund: Studentlitteratur, 2004. 543p.
- BECALLI, M.; CELLURA, M.; IUDICELLO, M. Resource Consumption and Environmental Impacts of the Agrofood Sector: Life Cycle Assessment of Italian Citrus-Based Products. **Environmental Management**, v. 43, p. 707–724, 2009.
- BECCALI, M.; CELLURA, M.; IUDICELLO, M. Life cycle assessment of Italian citrus-based products. Sensitivity analysis and improvement scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 1415-1428, 2010.
- BOSCO, S.; BENE, C.; GALLI, M.; REMORINI, D.; MASSAI, R.; BONARI, E. Soil organic matter accounting in the carbon footprint analysis of the wine chain. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 5, p. 973-989, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Boas Práticas Agrícolas. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/producao-integrada/boaspraticas-agricolas>>.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Produtos orgânicos.
- CHEHEBE, J.B. Análise do Ciclo de Vida de Produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro. Ed. Qualitymark, 1997. 120p.
- CAVALETT, O. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 647-658, 2013.

CLAUDINO, E.; TALAMINI, E. Análise do ciclo de vida (ACV) aplicada ao agronegócio: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. Vol. 17, n. 1, p.[77]-85, 2012.

COELHO, Y. da S.; CUNHA SOBRINHO, A. P. da; MAGALHÃES, A. F. de J.; PASSOS, O. S.; NASCIMENTO, A. S. do; SANTOS FILHO, H. P.; SOARES FILHO, W. dos S. Lima ácida ‘Tahiti’ para exportação: aspectos técnicos da produção. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria de Desenvolvimento Rural, Programa de Apoio à Produção e Exportação de Frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. Brasília: EMBRAPA-SPI. **Série publicações técnicas FRUPEX**, 1993.

COELHO, Y.S., SOBRINHO, A.P.C., MAGALHÃES, A.F.J., PASSOS, O.S., NASCIMENTO, A.S., SANTOS FILHO, H.P., SOARES FILHO, W.S. **A cultura do limão taiti** / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura Tropical. – 2. Ed., ver. E aum. – Brasília: Embrapa-SPI, 1998. 69p.; 16 cm. (Coleção Plantar; 39). ISBN 85-7383-039-5.

CURRAN, M. A. Life Cycle Assessment. In: JORGENSEN, S. E.; FATH, B.D. (editor chefe). **Human Ecology**. v.3, p. 2168-2174, 2008.

DESIDERIO, E.; HERRERO, G.; HALL, D.; SEGRE, A.; VITTUARI, M. Social sustainability tools and indicators for the food supply chain: A systematic literature review. **Institution of Chemical Engineers**, p. 527-540, 2022.

DREYER, L.; NIEMANN, A.; HAUSCHILD, M. Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 4, p. 191-200, 2003.

EMBRAPA. Classificação por produção: Produção brasileira de limão em 2020. Disponível em:. Acesso em: 12 de janeiro. 2022.

FINNVEDEN, G. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FONSECA, J. Metodologia da Pesquisa Científica. 2002.

GAYET, J. P.; Características Visuais. In: Lima ácida tahiti para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita; Jean Paul Gayet... et al / Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria de Desenvolvimento Rural, Programa de Apoio à Produção e Exportação de frutas, Hortaliças, Flores e Plantas Ornamentais. – Brasília: EMBRAPA – SPI. **Série Publicações Técnicas FRUPEX**, v. 12, p. 9-10, 1995.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

HALBERG, N. Assessment of the environmental sustainability of organic farming: Definitions, indicators and the major challenges. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 92, n. 6, p. 981-996, 2012.

HAYE, S.; SLAVEYKOVA, V.; PAYET, J. Terrestrial ecotoxicity and effect factors of metals in life cycle assessment (LCA). **Chemosphere**, v. 68, n. 8, p. 1489-1496, 2007.

- HERTWICH, E. G. Life Cycle Approaches to Sustainable Consumption: A Critical Review. **Environmental Science & Technology**, v. 39, n.13, p. 4672-4684, 2005.
- HUIJBREGTS, M. A. J. et al. ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. 2016.
- HUNT R. G.; FRANKLIN, W.E.; LCA e how it came about e personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, p.4-7, 1996.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. In: Smith P. et al. (Ed.). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, 2014. 922p.
- ISLAM, S.; PONNAMBALAM, S. G.; LAM, H.. Review on life cycle inventory: methods, examples and applications. **Journal of cleaner production**, v. 136, p. 266- 278, 2016.
- KLOEPFFER, W. Life cycle sustainability assessment of products. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 2, p. 89, 2008.
- KNIGHT, A.; WOLFE, J.; POON, J. Life cycle assessment. Toronto: ICF Kaiser Canada, 1996.
- KOLLER, O.C. Adubação e Práticas de manejo no Controle do Cancro Cítrico. XV Ciclo de Palestras sobre citricultura do RS. Alpestre, RS. 2008.
- MAGALHÃES, A., F., J., Citros: Nutrição e Adubação. Cruz das Almas, BA: EMBRAPACNPMP, 1997. 37 p. (EMBRAPA-CNPMP. Circular Técnica, 28).
- MOLUA, E. L. The economics of tropical agroforestry systems: the case of agroforestry farms in Cameroon. **Forest Policy and Economics**. v. 7, n. 2, p. 199-211. 2005.
- MORALES, M.; GARCÍA, S.; AROCA, G.; MOREIRA, M.T. Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile. **Science of The Total Environment**, v. 505, p. 833-843, 2015.
- MEIER, M.; STOESSEL, F.; JUNGBLUTH, N.; JURASKE, R.; SCHADER, C.; STOLZE, M. Environmental impacts of organic and conventional agricultural products—Are the differences captured by life cycle assessment?. **Journal of Environmental Management**, v. 149, p. 193-208, 2015.
- MENDES, N.; BUENO, C.; OMETTO, A. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, 2016.
- MICCOLIS, Andrew et al. Restauração ecológica com sistemas agroflorestais. Como conciliar conservação com produção-opções para cerrado e caatinga. **Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal**. Brasília: ICRAF, 2016.
- MONDELAERS, K.; AERTSENS, J.; VAN HUYLENBROECK, G. A meta-analysis of the differences in environmental impacts between organic and conventional farming. **British food journal**, v. 111, n. 10, p. 1098-1119, 2009.

- MORALES, M.; GARCÍA, S.; AROCA, G.; MOREIRA, M.T. Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile. **Science of The Total Environment**, v. 505, p. 833-843, 2015.
- NAIR, P. K. R. Grand challenges in agroecology and land-use. *Frontiers in Environmental Science*. v.2, n.1, 2014.
- NAIR, P.K.R.; NAIR, V. D.; KUMAR, M.B.; SHOWALTER, M.J. Chapter Five - Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. *Advances in Agronomy*. v. 108, p. 237-307, 2010.
- NEVES, M. F. et al. O retrato da citricultura brasileira. Ribeirão Preto: CitrusBR, 2010.
- NOTARNICOLA, B.; SALA, S.; ANTON, A.; MCLAREN, S.; SAOUTER, E.; SONESSON, U. The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems: A review of the challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 399-409, 2017.
- OLIVEIRA, J.; OLIVEIRA, O.; OMETTO, A.; FERRAUDO, A.; SALGADO, M. Environmental Management System ISO 14001 factors for promoting the adoption of Cleaner Production practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1384-1394, 2016.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Conheça os novos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU. Disponível em: Acesso em 19 de outubro de 2012.
- PASCHOAL, A. D. Produção orgânica de alimentos. Edição do autor. Piracicaba, São Paulo, 1994.
- PREVIDELI, Fernando Demetrio; DE ALMEIDA, Marcela Midori Yada. O Mercado “In Natura” do Limão Tahiti. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 409-416, 2020.
- REX, E.; BAUMANN, H. Implications of an interpretive understanding of LCA practice. **Business Strategy and the Environment**, v. 17, n. 7, p. 420-430, 2008.
- RIVM - National Institute for Public Health and the Environment. **LCIA: the ReCiPe model**. Disponível em: < <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>>. Acesso em 18 de setembro de 2022.
- SANTOS FILHO, H. P., AZEVEDO, C.L.L., NASCIMENTO, A.S., CARVALHO, J.E.B. **Manual prático para o Monitoramento e Controle das Pragas de Lima Ácida Tahiti**. Dados eletrônicos. – Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. – (Documentos/ Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, ISSN 1809-4996; 183).
- SCHROTH, G.; FONSECA, G.A.B.; HARVEY, C.A.; VASCONCELOS, H.L.; GASCON, C.; ANNE-MARIE, N.I. (2004). Introduction: The Role of Agroforestry in Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes. In: **Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes** p. 1-12.
- SILVEIRA, D.; CORDOVA, F. A pesquisa científica. In: GERHARDT, T.; SILVEIRA, D. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

Finnveden, G.; Michael Z. Hauschild; Tomas Ekvall; Jeroen Guinée; Reinout Heijungs; Stefanie Hellweg; Annette Koehler; David Pennington; Sangwon Suh. Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management* 91 (2009) 1–21.

RUSSEL, A.; EKVALL, T. ; BAUMANN, H. Life cycle assessment – introduction and overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 13, n. 13-14, 2005.

WEARE, B. Efforts to reduce stratospheric ozone loss affect agriculture. **California agriculture**, v. 49, n. 3, p. 24-27, 1995.

WEIDEMA, B.; PIZZOL, M.; SCHMIDT, J.; THOMA, G. Attributional or consequential Life Cycle Assessment: A matter of social responsibility. *Journal of Cleaner Production*, v. 174, p. 305-314, 2018.

APÊNDICES

Apêndice A - Inventário de entradas do sistema produtivo convencional.

Insumo	Unidade	Quantidade/ha
Mudas de limão	Unidades	14100
2.4 D - 20LTS	L	2
ABAMECTIN 72 EC	L	15
ACIDO BORICO	Kg	1
ACTARA 250 WG	Kg	20
AGR FACILITA	L	325
AGROSULUÇÃO CLORETO MG 8%	L	30
BLADE FR 1 LT	L	1
CALFERTIL MAX	T	14,98
CLOPIRIFOS 48 EC GHARDA	L	60
CONCORDE	L	60
DMA 806BR / 20 LITROS	L	120
ESTERCO DE AVES P/ USO AGRICOLA	T	98,7
EUPROOFF	L	400
FORMICIDA GMN TATU	Kg	20
GARLON 480 BR - FR 1LT	L	1
GARRA WP 450 - SC 15KG	Kg	120
IMIDAN 500 WP - KG	Kg	32
KCL PO BRANCO PURIFICADO	T	3,35
MALATHION 1000CE	L	160
MAP PURIFICADO - 25 KGS	Kg	30
MINECTO PRO - GL 5LTS	L	225
MUSTANG 350 EC - LT	L	3
NATIVO - BD 20 LTS	L	1220
NITRATO DE AMONIO - 33-00-00 - SC 50 KG	Kg	250
NITRATO DE CALCIO 15,5.00.00 + 18,6%CA	T	3,5
QUATERMON	L	20
RATICIDA	Kg	25
RECOP - SC 25KG	Kg	25
RODILON PELLETS RATO	Kg	20
ROUNDUP ORIGINAL	L	60
ROUNDUP TRANSORB BD 20 L	L	260
SELECT 240 EC - GL	L	50
SERENADE - GL 5L	L	600

SPERTO WG - 5KG	Kg	10
STIMULATE (STOLLER) - 20 LTS	L	60
STOLLER COBRE - 20 LTS	L	20
SULFATO DE MAGNESIO - 25 KG	Kg	25
SV CITRUS TOP LT	L	150
SV PHOS CA LT	L	100
TALSTAR 100 EC - GL 10 LT	L	60
U46 PRIME - BD20 LT	L	20
ULTRA ABS CAB 5 KG	Kg	100
VERTIMEC 84 SC - 5L	L	25

Fonte: elaboração própria

Apêndice B - Inventário de entradas do sistema produtivo agroflorestal orgânico.

Insumo	Unidade	Quantidade/ha
Mudas de limão Thaiti	Unidades	990
Mudas de madeiráveis	Unidades	227,25
Mudas de árvores de serviço	Unidades	681,75
Semente Crotalaria Juncea (cânhamo marrom)	Kg	10
Semente Cajanus Cajan	Kg	10
Semente de Girassol	Kg	10
Semente de Capim Mombaça	Kg	8,2
Cal Agrícola - a granel	Kg	1.516,26
Fosfato natural reativo	Kg	240,83
Cama de frango (adubo orgânico)	Kg	21.000
Ácido bórico	Kg	10
Sulfato de zinco	Kg	130
Sulfato de magnésio	Kg	78
Sulfato de manganês	Kg	78
Sulfato de potássio	Kg	65
Água para diluição de micronutrientes	Litro	150.354,4
Biological Product type 1 tracer	Litro	3,12
Biological Product type 2 Boveril	Kg	26
Biological product type 3 Serenade - Bayer - Bacillus subtilis	Litro	8
Oleo Mineral Agefix	Litro	260
Kocide kg	Kg	16
Kumulus kg	Kg	36
Glicerina - Ant	Litro	397,6
Propileno Glicol - Ant	Litro	170,8

Fonte: elaboração própria