



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO**  
**AMBIENTE – PRODEMA**

**ANNE KAROLYNE PEREIRA DA SILVA**

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE BIOPRODUTOS E PROPOSTAS DE**  
**BIORREFINARIA, A PARTIR DOS RESÍDUOS DA MANGA**

**FORTALEZA**

**2020**

ANNE KAROLYNE PEREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE BIOPRODUTOS E PROPOSTAS DE BIORREFINARIA,  
A PARTIR DOS RESÍDUOS DA MANGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Proteção Ambiental e Gestão dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Casimiro Filho.  
Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Cléa Brito de Figueirêdo.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S578a Silva, Anne Karolyne Pereira da.  
Avaliação ambiental de bioprodutos e propostas de biorrefinaria, a partir dos resíduos da manga / Anne Karolyne Pereira da Silva. – 2020.  
117 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Fortaleza, 2020.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Casimiro Filho.  
Coorientação: Prof. Dr. Maria Cléa Brito de Figueirêdo.
1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Economia circular. 3. Valorização de resíduos. I. Título.
- CDD 333.7
-

ANNE KAROLYNE PEREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE BIOPRODUTOS E PROPOSTAS DE BIORREFINARIA,  
A PARTIR DOS RESÍDUOS DA MANGA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Área de concentração: Proteção Ambiental e Gestão dos Recursos Naturais.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Casimiro Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Viviane da Silva Barros  
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marta Celina Linhares Sales  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Archimedes e Evandia; e à  
minha avó Maria Façanha.

## **AGRADECIMENTOS**

A presente dissertação de mestrado não lograria sucesso sem o valioso auxílio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Francisco Casimiro Filho, e à minha coorientadora, Maria Cléa Brito de Figueirêdo, pela paciência e empenho com que sempre me orientaram neste trabalho e em todos os que realizei durante o mestrado. Muito obrigada pelas correções quando necessárias sem nunca me desmotivar.

Aos membros da banca Viviane da Silva Barros e Marta Celina Linhares Sales pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, assim como aos companheiros do Grupo de Estudo de ACV da Embrapa agroindústria Tropical, cujo apoio e amizade foram fundamentais e estiveram presentes em todos os momentos.

Agradeço à minha família e amigos pelo suporte incondicional que me deram, especialmente nos momentos mais adversos dessa caminhada.

Por último, quero agradecer à Universidade Federal do Ceará por abrir as portas para que eu pudesse realizar este sonho que é o Mestrado. À Embrapa Agroindústria Tropical por ceder a infraestrutura necessária para que pudesse desenvolver esse projeto.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”  
(Simone de Beauvoir)

## RESUMO

A manga é uma das principais frutas produzidas no Brasil, contando com uma produção de 1 milhão de toneladas por ano, seu mercado é majoritariamente nacional, no qual pode ser encontrada in natura ou processada industrialmente como suco integral, ou polpa. No entanto, o processamento industrial de frutas é responsável pela geração de grandes volumes de resíduos. Diante dessa problemática, pesquisadores descobriram que dos coprodutos da manga (cascas e caroços), podem ser extraídos pectina e compostos fenólicos (CF, da casca); lignina, celulose e hemicelulose (tegumento); e, amido, gordura e compostos fenólicos (amêndoa). Processos capazes de extrair esses produtos estão sendo desenvolvidos, tornando-se importante considerar desde o início do projeto critérios ambientais, para desenvolver produtos ecologicamente corretos. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) contribui para esse fim, porque permite identificar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos em estudo. Dessa forma, o objetivo desse estudo foi escolher os processos de extração com menor impacto ambiental e, posteriormente, avaliar a extração integrada desses produtos. A primeira parte do trabalho consistiu em comparar processos de referência com outras alternativas ou com cenário de melhoria para escolher o processo de menor impacto. Por sua vez, na segunda parte foram consideradas as rotas identificadas na etapa anterior com menor impacto ambiental, a fim de montar um sistema capaz de extrair conjuntamente todos os bioprodutos dos coprodutos da manga ou combinações desses. Foram adotadas as recomendações das ISO 14040 e 14044 (2006). O escopo do estudo é do berço ao portão; o inventário dos processos foi montado após padronização para 1 mês de extração; a unidade funcional considerada foi 1g de produto (parte I) e 1 US\$ de receita com a venda dos produtos (parte II). Os métodos de avaliação de impactos usados foram o ILCD Midpoint 2011 (mudanças climáticas, acidificação, eutrofização de água doce e marinha, ecotoxicidade, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena) e o AWARE (escassez hídrica). Após o cálculo dos impactos ambientais, realizou-se a análise de incerteza pelo método de Monte Carlo. Na parte I, os resultados mostraram que os processos com menor impacto foram: i) extração de CF por ESP; ii) extração de pectina por Ultrassom; iii) extração acetosolv de lignina utilizando equipamentos alternativos; iv) extração acetosolv de celulose; v) extração isolada de amido. O principal elemento responsável pelo impacto ambiental em todos os processos foi a produção de energia elétrica. Na parte II, os resultados mostraram que o cenário com melhor desempenho ambiental foi o que beneficiou a casca da manga, visto

que, apresentou melhor relação entre a receita obtida e o nível de complexidade da biorrefinaria.

**Palavras-chave:** Avaliação do ciclo de vida. Economia circular. Valorização de resíduos.

## ABSTRACT

Mango is one of the main fruits produced in Brazil, with a production of 1 million tons per year, its market is mostly national, where it can be found natural or processed industrially as whole juice, or pulp. However, industrial fruit processing is responsible for the generation of large volumes of waste. Faced with this problem, researchers found that mango co-products (peel and stone) can be extracted pectin and phenolic compounds (peel); lignin, cellulose and hemicellulose (coat); and starch, fat and phenolic compounds (kernel). Processes capable of extracting these products are being developed and it is important to consider from the outset of the project environmental criteria to develop environmentally friendly products. In this sense, the Life Cycle Assessment (LCA) contributes to this purpose, because it allows to identify the environmental impacts throughout the life cycle of the products under study. Thus, the purpose of this study was to choose the extraction processes with the lowest environmental impact and, subsequently, to evaluate the integrated extraction of these products. The first part of this work consisted in comparing reference processes with other alternatives or with an improvement scenario to choose the process with the lowest impact. In turn, the second part considered the routes identified in the previous step with the lowest environmental impact, in order to set up a system capable of extracting all bioproducts from mango co-products or combinations thereof. The recommendations of ISO 14040 and 14044 (2006) were adopted. The scope of the study is from cradle to gate; The process inventory was assembled after standardization for 1 month of extraction; The functional unit considered was 1g (part I) and 1 US \$ (part II). The impact assessment methods used were ILCD Midpoint 2011 (climate change, acidification, freshwater and marine eutrophication, ecotoxicity, carcinogenic and non-carcinogenic human toxicity) and AWARE (water scarcity). After calculating the environmental impacts, the uncertainty analysis was performed by the Monte Carlo method. In part I, the results showed that the processes with the lowest impact were: i) CF extraction by ESP; ii) pectin extraction by Ultrasound; iii) Acetoolv lignin extraction using alternative equipment; iv) acetosolv extraction of cellulose; v) isolated extraction of starch. Where the main element responsible for the environmental impact was the production of electricity in all processes. In the second part, the results showed that the scenario with the best environmental performance was the one that benefited the mango peel, since it presented a better relationship between the revenue obtained and the level of complexity of the biorefinery.

**Keywords:** Life cycle assessment. Circular economy. Waste recovery.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura do trabalho .....	18
Figura 2 – Fundamento da Economia Circular .....	24
Figura 3 – Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável .....	25
Figura 4 – Manga cv. Tommy Atkins .....	28
Figura 5 – Fluxograma simplificado do processamento de manga .....	29
Figura 6 – Fluxograma dos componentes dos resíduos da manga .....	30
Figura 7 – Ilustração do sistema Soxhlet (a), banho ultrassom (b) e extração por solvente pressurizado (c) .....	35
Figura 8 – Polpação acetosolv .....	36
Figura 9 – Homogeneização da farinha da amêndoa de manga desengordurada e sem CF .....	37
Figura 10 – Etapas da ACV .....	38
Figura 11 – Ilustração do ciclo de vida geral .....	42
Figura 12 – Sistema de produto do processo .....	54
Figura 13 – Fluxograma da obtenção dos coprodutos da manga .....	58
Figura 14 – Fluxograma da extração de CF por Soxhlet e por ESP .....	59
Figura 15 – Fluxograma da extração de pectina por Ultrassom e por ESP .....	59
Figura 16 – Fluxograma da extração acetosolv de celulose e lignina .....	61
Figura 17 – Fluxograma da extração isolada de amido .....	63
Figura 18 – Fluxograma da extração integrada de gordura, CF e amido .....	64
Figura 19 – Alocação na etapa de despolpa .....	68
Figura 20 – Alocação no beneficiamento da casca .....	68
Figura 21 – Alocação no beneficiamento do tegumento .....	69
Figura 22 – Alocação no beneficiamento da amêndoa .....	69

Figura 23 – Processos de extração com menor impacto ambiental .....	83
Figura 24 – Sistema de produto da biorrefinaria da manga .....	96
Figura 25 – Análise de incerteza dos cenários da biorrefinaria .....	10

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Produção de manga no mundo .....	27
Gráfico 2– Distribuição por estados da produção de manga no Brasil em 2018 .....	27
Gráfico 3– Comparação dos processos de extração do CF (Soxhlet e ESP*) .....	75
Gráfico 4– Comparação dos processos de extração da pectina (Ultrassom e ESP*) .....	76
Gráfico 5– Comparação do processo base de extração de lignina com o cenário .....	76
Gráfico 6– Comparação dos processos de extração de amido (apenas amido e amido com coprodutos) .....	77
Gráfico 7– Análise dos processos críticos no ciclo de vida dos CF extraídos por ESP ..	85
Gráfico 8– Análise dos processos no ciclo de vida da pectina extraída por Ultrassom ..	87
Gráfico 9– Análise dos processos no ciclo de vida da lignina extraída pelo cenário alternativo .....	88
Gráfico 10– Análise dos processos no ciclo de vida da celulose .....	89
Gráfico 11– Análise dos processos no ciclo de vida do amido extraído de acordo com Cordeiro et al. (2014) .....	91
Gráfico 12– Receitas e perdas de cada cenário da biorrefinaria de manga .....	99
Gráfico 13– Avaliação ambiental comparativa dos cenários da biorrefinaria da manga ..	100

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos de ACV de bioprodutos .....	47
Quadro 2 – Padronização da extração de CF para 1 mês .....	53
Quadro 3 – Inventários da base de dados ecoinvent .....	54
Quadro 4 – Unidade Funcional para cada produto avaliado .....	65
Quadro 5 – Unidade funcional para cada .....	95
Quadro 6 – Cenários da biorrefinaria de manga .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de alocação .....	72
Tabela 2 – Inventário do ciclo de vida dos processos estudados considerando 1 mês de extração .....	75
Tabela 3 – Análise de incerteza na comparação dos processos .....	82
Tabela 4 – Receitas e perdas de cada cenário da biorrefinaria de manga para 1 mês de produção .....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Acidificação
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida
CTUh	Unidade comparativa de Toxicidade Humana
CTUe	Unidade comparativa de Toxicidade para Ecossistema
CF	Composto fenólico
EAD	Eutrofização de Água Doce
ECT	Ecotoxicidade
EH	Escassez Hídrica
EM	Eutrofização Marinha
ESP	Extração por Solvente Pressurizado
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
MC	Mudança Climática
THC	Toxicidade Humana Câncer
THNC	Toxicidade Humana Não Câncer
UF	Unidade Funcional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	20
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b> .....	20
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	22
<b>1.2.1</b>	<b><i>Geral</i></b> .....	22
<b>1.2.2</b>	<b><i>Específicos</i></b> .....	22
<b>1.3</b>	<b>Estrutura de trabalho</b> .....	22
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	23
	<b>Valorização de resíduos no contexto do desenvolvimento</b>	
<b>2.1</b>	<b>sustentável</b> .....	23
<b>2.2</b>	<b>Geração de resíduos a partir do processamento de manga</b> .....	26
	<b><i>Potencial de extração de biomateriais a partir dos coprodutos da</i></b>	
<b>2.2.1</b>	<b><i>manga</i></b> .....	30
<b>2.2.1.1</b>	<b><i>Casca: Pectina e Compostos Fenólicos</i></b> .....	30
<b>2.2.1.2</b>	<b><i>Tegumento: Celulose, Lignina e Hemicelulose</i></b> .....	32
<b>2.2.1.3</b>	<b><i>Amêndoa: Amido, Compostos Fenólicos e Gordura</i></b> .....	32
<b>2.2.2</b>	<b><i>Processos de extração dos produtos dos resíduos da manga</i></b> .....	34
<b>2.2.2.1</b>	<b><i>Casca: Pectina e Compostos Fenólicos</i></b> .....	34
<b>2.2.2.2</b>	<b><i>Tegumento: Celulose, Lignina e Hemicelulose</i></b> .....	35
<b>2.2.2.3</b>	<b><i>Amêndoa: Amido, Compostos Fenólicos e Gordura</i></b> .....	36
<b>2.3</b>	<b>Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de bioprodutos</b> .....	37
<b>2.3.1</b>	<b><i>Revisão dos estudos de ACV de bioprodutos já publicados</i></b> .....	43
	<b>IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DE</b>	
<b>3</b>	<b>BIOPRODUTOS A PARTIR DOS COPRODUTOS DA MANGA COM</b>	
	<b>MENOR IMPACTO AMBIENTAL</b> .....	50
<b>3.1</b>	<b>Introdução</b> .....	50
<b>3.2</b>	<b>Metodologia</b> .....	50
<b>3.2.1</b>	<b><i>Sistema de produto</i></b> .....	51
<b>3.2.2</b>	<b><i>Inventário dos processos de produção</i></b> .....	52
<b>3.2.3</b>	<b><i>Descrição dos processos com coleta de dados primários</i></b> .....	55
<b>3.2.4</b>	<b><i>Unidade funcional</i></b> .....	64
<b>3.2.5</b>	<b><i>Critérios de alocação</i></b> .....	65
<b>3.2.6</b>	<b><i>Análise de cenários</i></b> .....	70

3.2.7	<i>Avaliação de impactos e análise de incerteza</i> .....	70
3.3	<b>Resultados e discussão</b> .....	70
3.3.1	<i>Inventário do Ciclo de Vida (ICV)</i> .....	70
3.3.2	<i>Análise comparativa</i> .....	74
3.3.3	<i>Análise dos processos críticos</i> .....	84
3.4	<b>Conclusão</b> .....	92
	<b>ESCOLHA DO CENÁRIO DE BIORREFINARIA COM MENOR</b>	
4	<b>IMPACTO AMBIENTAL</b> .....	93
4.1	<b>Introdução</b> .....	93
4.2	<b>Metodologia</b> .....	94
4.2.1	<i>Sistema de produto</i> .....	94
4.2.2	<i>Inventário</i> .....	95
4.2.3	<i>Unidade funcional</i> .....	95
4.2.4	<i>Análise de cenários</i> .....	96
4.2.5	<i>Avaliação de impactos e análise de incerteza</i> .....	96
4.3	<b>Resultados e discussão</b> .....	97
4.4	<b>Conclusão</b> .....	108
5	<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	109
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	110

## **1 INTRODUÇÃO GERAL**

A presente seção contém uma visão geral desse trabalho. Primeiramente, há uma contextualização do tema (subseção 1.1). Na sequência, os objetivos da pesquisa são apresentados (subseção 1.2). Por fim, é explicado como será a estrutura do trabalho (subseção 1.3).

### **1.1 Contextualização**

Desde um impulso dado na década de 90 com avanços tecnológicos e projetos de irrigação, a agroindústria de frutas tropicais é uma das principais atividades que alavancam o desenvolvimento socioeconômico no Brasil (LACERDA; LACERDA; ASSIS, 2004). Em 2017, a produção brasileira de frutas foi estimada em 43,5 milhões de toneladas, sendo a terceira maior produção do mundo, colhida em 2,52 milhões de hectares. Segundo o presidente da Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados (Abrafrutas) são gerados no mínimo dois empregos por hectare plantado. Apesar da expressividade na produção, a exportação de frutas frescas e derivados é considerada pouco expressiva e, em 2017, totalizou US\$ 812.846 com 861.501 mil toneladas exportadas. Portanto, a produção brasileira de frutas é consumida majoritariamente pelo mercado nacional, tanto pela população brasileira quanto pela indústria processadora (KIST et al., 2018).

O processamento de frutas, contudo, é responsável pela geração de grandes quantidades de coprodutos (cascas e sementes), os quais são pouco utilizados e geralmente são tratados como lixo, causando impactos ambientais negativos e prejudicando a sustentabilidade de indústrias processadoras (VIEIRA et al., 2009). Estima-se que 50% ou mais dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados na América Latina sejam resíduos de alimentos e materiais de origem orgânica. Essa fração de RSU geralmente é descartada em aterros e lixões, apresentando diferentes impactos, como a geração de gases de efeito estufa, cujo tratamento requer ação e custos adicionais (SARTINI, 2017).

A manga é uma das principais frutas produzidas no Brasil e em 2016 a produtividade brasileira dessa fruta chegou a 16,2 toneladas por hectare com um faturamento de R\$ 788.351 milhões (KIST et al., 2018). Uma vez que a maior parte dessa produção é demandada pelo mercado interno e direcionada para o processamento industrial, sabendo ainda que cerca de 40-45% do peso da manga é composto por casca e semente, o

processamento de manga tem elevado potencial para geração de resíduos (“Mango Tree Tommy Atkins Variety Grafted”, [s.d.]).

Diante desse cenário, muitos pesquisadores começaram a investigar o potencial desses resíduos da manga para a extração de materiais de alto valor potencial. Então, descobriram que a casca é rica em pectina (BERARDINI; KNÖDLER; et al., 2005) e compostos fenólicos (SOGI et al., 2013); o tegumento (parte externa do caroço) é rico em celulose, hemicelulose e lignina (HENRIQUE et al., 2013); e a amêndoa (parte interna do caroço) é rica em amido (SILVA, G. A. S.; CAVALCANTI; ALMEIDA, 2013), compostos fenólicos (SOGI et al., 2013) e gordura (SONWAI; KAPHUEAKNGAM; FLOOD, 2014). Esses materiais têm elevada aplicabilidade industrial, com destaque para a produção de embalagens de fonte renovável e revestimento de alimentos.

Apesar desse potencial, atualmente não existem plantas industriais destinadas à extração desses bioprodutos (ARORA et al., 2018a). Assim, os laboratórios de Tecnologia da Biomassa e Multiusuário de Química e Produtos Naturais (LTB e LMQPN), da Embrapa Agroindústria Tropical, realizaram um esforço conjunto para desenvolver processos de extração dos bioprodutos citados. Os processos foram desenvolvidos por: i) Cavalcante (2018) para os processos de extração de pectina e compostos fenólicos da casca; ii) Verçosa (2017) para lignina e Silva et al. (2019) para celulose, ambas do tegumento; iii) e Cordeiro et al. (2014), Silva et al. (2019) e Oliveira et al. (2018) para extração isolada de amido da amêndoa, e Melo et al. (2019) para extração integrada de amido.

A partir dos processos de extração isolada desses bioprodutos da casca e do caroço da manga, começa-se a ser investigado o potencial da extração integrada dos mesmos, dentro de um conceito de biorrefinaria (ARORA *et al.*, 2018). Esta pode ser entendida como uma instalação cujo objetivo é otimizar o aproveitamento de determinada biomassa (BANERJEE et al., 2017). Os produtos obtidos dessas instalações são chamados de bioprodutos e estão sendo cada vez mais valorizados por causa das atuais preocupações ambientais relacionadas à redução das reservas de materiais não renováveis (GEISSDOERFER et al., 2017). Assim, o conceito de uma biorrefinaria se refere ao conjunto de processos de extração empregados para o processamento e transformação de uma biomassa utilizada como matéria-prima.

Nesse contexto, é importante que os impactos ambientais desses biomateriais sejam avaliados ainda na sua fase de desenvolvimento. Essa preocupação ambiental na fase inicial do projeto é definida como *Ecodesing*, que é uma das principais aplicações da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (SILVEIRA, 2012). Essa última é uma técnica de

mensuração dos potenciais impactos ambientais causados como resultado da produção e/ou utilização de determinado produto ou serviço (IACOVIDOU; VELIS; et al., 2017).

Portanto, esse trabalho tem dois objetivos complementares. Inicialmente, comparam-se processos alternativos de extração dos bioprodutos a partir dos coprodutos da manga, identificando os de menor impacto ambiental. Em seguida, analisam-se diferentes cenários de biorrefinaria, para também identificar os de menor impacto ambiental.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Geral***

Avaliar, em escala de laboratório, o desempenho ambiental de processos alternativos de extração de bioprodutos, assim como diferentes combinações para a concepção de uma biorrefinaria, quando a casca e o caroço da manga (cv. Tommy Atkins) são utilizados como matéria-prima.

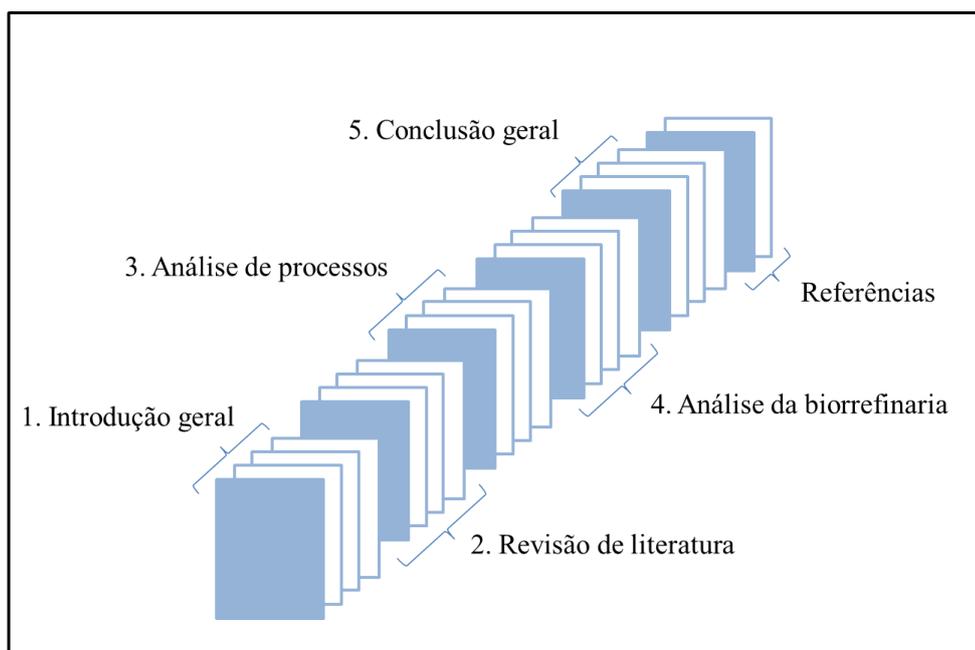
### ***1.2.2 Específicos***

- a) Inventariar processos alternativos de extração de bioprodutos (pectina, compostos fenólicos, celulose, lignina e amido), a partir da casca e caroço de manga;
- b) Comparar processos alternativos de extração dos bioprodutos dos coprodutos da manga para identificar os de menor impacto ambiental;
- c) Identificar as etapas críticas nos processos de menor impacto ambiental, analisando possibilidades de alterações e redução de impacto nesses processos;
- d) Avaliar ambientalmente a biorrefinaria dos coprodutos da manga a partir de diferentes combinações de bioprodutos (pectina, compostos fenólicos, celulose, lignina e amido).

## **1.3 Estrutura do trabalho**

Em conformidade com os objetivos estabelecidos, adotou-se uma estrutura de capítulos para o desenvolvimento deste trabalho. A figura 1 mostra o esquema dessa estrutura.

Figura 1 - Estrutura do trabalho



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

No capítulo 1 encontra-se a introdução geral, que tem a finalidade de apresentar resumidamente o estudo e está dividida entre os tópicos: contextualização, objetivos e estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é feita a revisão de literatura, conectando esse estudo na área de pesquisa a qual ele está inserido. Em que, os principais assuntos abordados são desenvolvimento sustentável, economia circular, importância econômica da manga para o Brasil e uma breve explicação da ferramenta de Análise do Ciclo de Vida (ACV).

O capítulo 3 é dedicado a responder a seguinte pergunta norteadora: Quais processos de extração de bioprodutos, a partir da casca e do caroço da manga, são ambientalmente menos impactantes? Dessa forma, atende aos três primeiros objetivos desse estudo, os quais foram descritos no item 1.2.2.

O capítulo 4 responde a seguinte pergunta: Qual cenário de biorrefinaria a partir da casca e do caroço da manga gera o menor impacto ambiental? Atendendo ao último objetivo descrito no item 1.2.2.

No capítulo 5 está a conclusão geral e as recomendações referentes ao estudo.

O último capítulo traz as referências bibliográficas que foram mencionadas ao longo do trabalho.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Valorização de resíduos no contexto do desenvolvimento sustentável

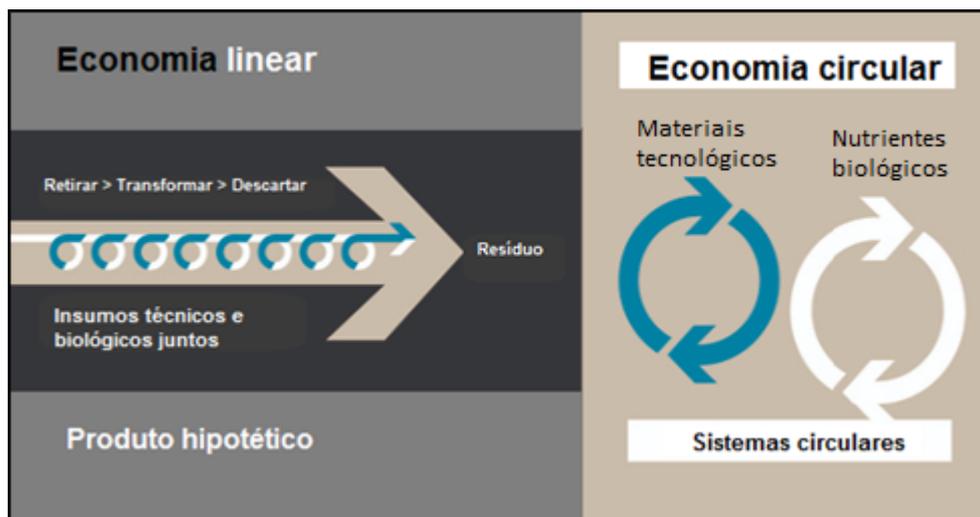
A noção de sustentabilidade foi lançada ao debate público internacional em 1987 com o Relatório Brundtland (ACSELRAD, 1999). Desde então as preocupações acerca das consequências ambientais causadas pelo desenvolvimento econômico tradicional estão cada vez mais inseridas nas agendas políticas e nas estratégias das empresas (GEISSDOERFER et al., 2017).

O modelo econômico tradicional se baseia em um sistema linear de produção e consumo de bens e serviços, em que são extraídos cada vez mais recursos naturais para a obtenção de novas matérias-primas que serão aplicadas na produção de novos produtos, os quais, após a sua vida útil, serão descartados. No entanto, a Terra é considerada um sistema fechado e circular com limitada capacidade de assimilação, deste modo, para garantir a sobrevivência das gerações futuras, é necessário haver equilíbrio entre economia e meio ambiente (MERLI; PREZIOSI; ACAMPORA, 2018).

A temática ambiental se torna cada vez mais imperativa, transformando a ótica em que se observa a dinâmica da economia atual, visto que já não se pode mais ignorar as externalidades negativas das atividades econômicas. Diversos modelos e abordagens com vistas à sustentabilidade estão sendo propostos, cada um valorizando certos problemas e mostrando diferentes soluções, estratégias e tecnologias. Como exemplo, cita-se a economia circular (FARIA; CALDEIRA-PIRES, 2018).

O conceito de economia circular, segundo Geissdoerfer *et al.* (2017), evoluiu ao incorporar diferentes características e contribuições de outros conceitos que compartilham a ideia de ciclo fechado. A fundação Ellen MacArthur, criada para acelerar a transição para uma economia circular, traz a definição mais aceita: “uma economia industrial que é restaurativa ou regenerativa por intenção e design” (MACARTHUR, 2013). A partir disso, pode-se dizer que é um novo modelo de economia em que são requeridas novas formas de produção e consumo, no qual há a recirculação de recursos e energia, reduzindo a demanda por esses recursos e promovendo a valorização de resíduos (PRIETO-SANDOVAL; JACA; ORMAZABAL, 2018). A figura 2 ressalta as diferenças entre o atual modelo econômico e a economia circular.

Figura 2 - Fundamento da Economia Circular



Fonte: adaptado de Macarthur, 2013.

Os benefícios dessa nova abordagem relacionam-se à redução de áreas para destinação final de resíduos, do uso de matérias-primas na atividade econômica, das emissões, da perda de energia e do desperdício, por meio de um projeto eficiente de manutenção, reparo, reutilização, remodelagem, remanufatura e reciclagem (GEISSDOERFER et al., 2017). Portanto, a economia circular baseia-se em preservar e aprimorar o capital natural, otimizar o rendimento dos recursos e estimular a efetividade do sistema (MACARTHUR, 2013).

A transição eficiente para uma economia circular requer, sobretudo, trabalhar com a gestão dos resíduos, potencializando, especialmente, a sua valorização. Esse conceito permite a otimização da produção, aumentando o aproveitamento dos recursos e fechando o ciclo de vida dos materiais (IACOVIDOU; MILLWARD-HOPKINS; et al., 2017). Essa abordagem tem potencial de maximizar lucros e minimizar os impactos ambientais, a partir do aumento da eficácia e da sustentabilidade das cadeias produtivas (IACOVIDOU; VELIS; et al., 2017).

Os produtos desenvolvidos a partir de coprodutos e/ou resíduos apresentam maior potencial para agregação de valor. Cada etapa de processamento tem por objetivo explorar todos os compostos disponíveis, de forma que não haja geração de resíduos, pois todos os materiais descartados são aproveitados em outros processos (FARIA; CALDEIRA-PIRES, 2018).

Vale ressaltar que a valorização dos resíduos é uma forma de reduzir substancialmente a sua geração, estando em consonância com os objetivos da agenda de desenvolvimento pós-2015, aprovada pelos países membros da Organização das Nações

Unidas (ONU). Em especial, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12, que se relaciona à sustentabilidade dos padrões de consumo e produção, visando, entre outras coisas, à gestão sustentável e ao uso eficiente dos recursos naturais até 2030. No total, foram estabelecidos 17 ODSs pelas Nações Unidas juntamente aos Governos, a sociedade civil e outros parceiros (FIGURA 3) (“Agenda 2030 | ONU Brasil”, [s.d.]).

Figura 3 - Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável



Fonte: “Agenda 2030 | ONU Brasil”, 2019.

No Brasil, o processamento de produtos agroindustriais é responsável por gerar uma fonte significativa de resíduos, os quais apresentam elevada carga poluidora, quando depositados indevidamente na natureza (VIEIRA et al., 2009). Além dos potenciais problemas ambientais, o descarte de resíduos da agroindústria é um desperdício de materiais de alto valor potencial agregado (INGRAO et al., 2018). Tradicionalmente, a exploração dos coprodutos agroindustriais se dava por meio de seu uso para alimentação animal. De outro modo, uma abordagem mais recente e racional é o processamento desses coprodutos de forma a fracionar seus componentes de alto valor comercial, transformando resíduos em produtos de interesse comercial e industrial (SOUZA FILHO et al., 2011).

A manga, particularmente, apresenta grande potencial para valorização dos coprodutos oriundos do seu processamento a partir da produção de diversos produtos, principalmente nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, onde há disponibilidade como matéria-prima local (KIST et al., 2018). Em geral, encontram-se apenas estudos em escala

laboratorial da extração isolada de cada componente de valor oriundo dos resíduos da manga, no entanto, começam a surgir estudos que analisam a viabilidade de um modelo de recuperação integrada (ARORA et al., 2018a).

Conforme Banerjee et al. (2017), a recuperação integrada dos produtos que podem ser extraídos de determinada biomassa torna o processo mais econômico devido à utilização mais eficiente e completa dessa biomassa e ao uso mais sustentável de todos os recursos. Essa recuperação integrada forneceria a base de um modelo de biorrefinaria. O conceito de biorrefinaria ainda está em desenvolvimento, mas pode ser definido, resumidamente, pelo processamento sustentável da biomassa em diversos produtos comerciáveis e energia (JUNGMEIER, 2014). Apesar de ainda não existir modelos e padrões consagrados para biorrefinarias podem ser apontados exemplos que já funcionam na prática, como usinas de cana-de-açúcar que produzem açúcar, etanol e bioeletricidade (EMBRAPA, 2012).

Portanto, as possibilidades provenientes do desenvolvimento das biorrefinarias, que permitem o aproveitamento eficiente da biomassa e dos resíduos agrícolas e agroindustriais, mostram o potencial econômico que o Brasil tem para essas instalações. País, o qual ainda apresenta grande demanda tecnológica nos setores químicos e agroindustriais, em contrapartida se destaca no agronegócio e na produção de biocombustíveis. Além disso, a diversificação de produtos impactará positivamente nas várias cadeias produtivas envolvidas, gerando benefícios para a sociedade, na forma de geração de empregos e renda, assim como na conquista de mercados externos, na diminuição de importações, etc (EMBRAPA, 2012).

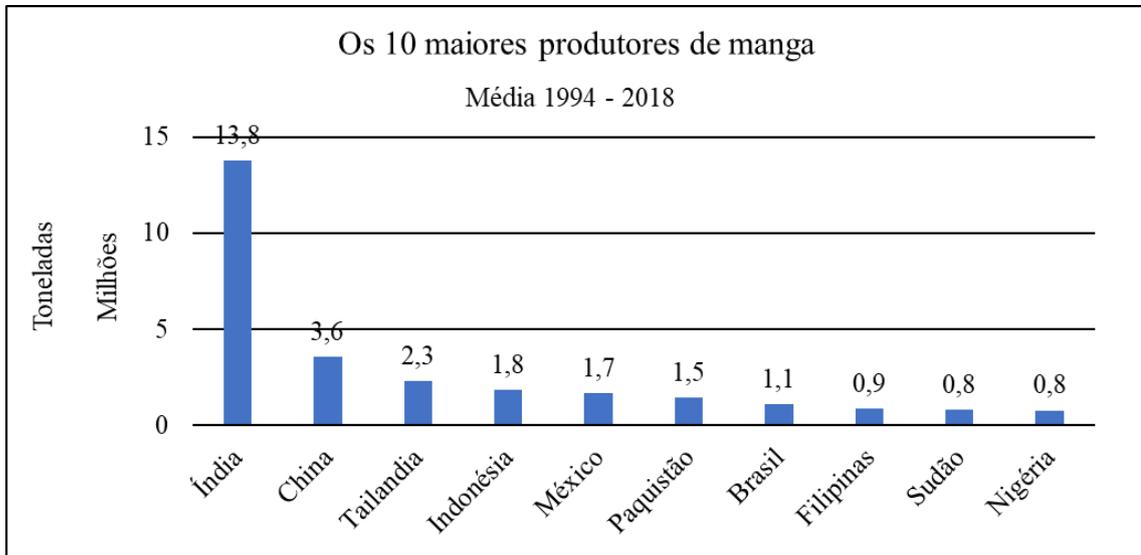
## **2.2 Geração de resíduos a partir do processamento de manga**

A manga (*Mangifera indica* L.) é uma espécie originária da Ásia, mais precisamente da Índia. O fruto é do tipo drupa, sua polpa é carnosa, suculenta, com coloração amarelada. O tamanho varia entre 5 e 20 cm de comprimento, forma alongada, ovoide ou arredondada. A aparência da casca pode ser esverdeada com manchas pretas, amarelas ou róseas quando maduras. A mangueira é de grande porte podendo atingir 40 m de altura, sua copa é densa, frondosa e perene (“O cultivo e o mercado da manga | Sebrae”, 2019).

No Brasil, a manga é uma das principais frutas produzidas, ocupando a sétima posição no ranking mundial de produção de manga com uma produção média anual de 1 milhão de toneladas, como pode ser visto no gráfico 1 (“FAOSTAT”, 2020). Enquanto pelo gráfico 2 pode-se notar que em 2018 a mangicultura foi observada principalmente nos seguintes estados brasileiros: Pernambuco (38%), Bahia (29%), São Paulo (15%), Minas

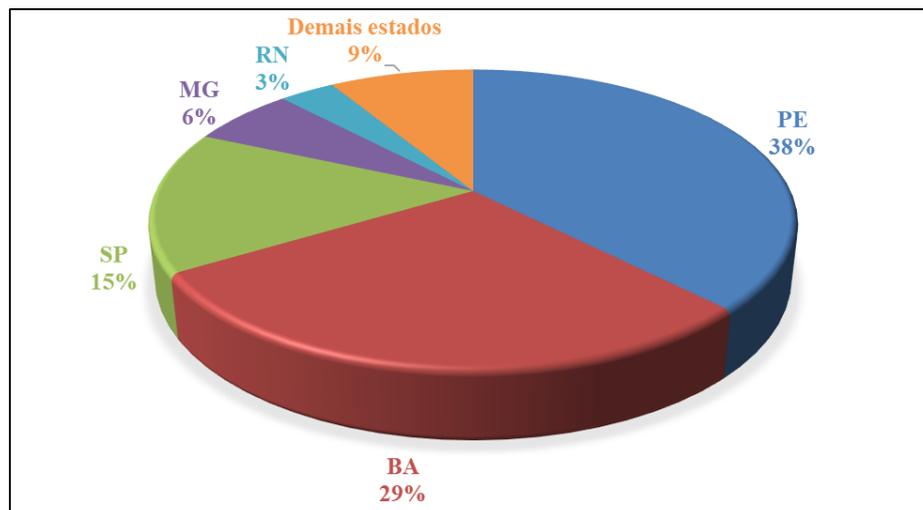
Gerais (6%), e Rio Grande do Norte (3%) (“Produção Agrícola Municipal - PAM | IBGE”, 2020).

Gráfico 1 - Produção de manga no mundo



Fonte: “FAOSTAT”, 2020.

Gráfico 2 – Distribuição por estados da produção de manga no Brasil em 2018



Fonte: “Produção Agrícola Municipal - PAM | IBGE”, 2020.

A manga tem demanda tanto no mercado nacional quanto internacional, entretanto o primeiro é a principal forma de escoamento da produção. Em 2017, observou-se uma produção de manga de 1.087.091 toneladas, destinando-se apenas 179.000 toneladas, cerca de 16%, para exportação (KIST et al., 2018). Segundo informações do Sistema de produção da

Embrapa (2004), apesar do crescimento anual da produção, a janela de exportação da manga tende a diminuir devido ao mercado extremamente competitivo que reduz os preços e aumenta as exigências.

No mercado doméstico, a manga é comercializada basicamente na forma *in natura*, mas também pode ser encontrada como suco integral e polpa congelada. Da polpa pode-se obter ainda diversos produtos como doces, geleias, sorvetes, licores e outros (“O cultivo e o mercado da manga | Sebrae”, 2019).

A variedade de manga tipicamente mais produzida no Brasil é a Tommy Atkins, que corresponde a quase 80% da área cultivada (FURLANETO; SOARES; BERTANI, 2014). Essa cultivar foi originada nos Estados Unidos (EUA) por volta da década de 1920. Ela possui como característica a produção elevada e regular, e considerável resistência tanto aos impactos mecânicos quanto à deterioração após a colheita. O fruto tem em média 500g, coloração alaranjada, amarelada, avermelhada ou púrpura (FIGURA 4). A polpa é consistente, firme e aderente (SISTEMA DE PRODUÇÃO, 2004).

Figura 4 - Manga cv. Tommy Atkins



Fonte: “6 dúvidas sobre o plantio de manga - Revista Globo Rural | GR Responde”, 2020.

A composição da variedade Tommy Atkins é dividida entre casca (20-25% do peso total), caroço (22% do peso total – sendo a amêndoa responsável por 13% e o tegumento por 9%), e polpa (53-58% do peso total) (“Mango Tree Tommy Atkins Variety Grafted”, 2020). Pode-se notar então que o processamento agroindustrial dessa variedade de manga tem alto potencial para a geração de resíduos agroindustriais (FIGURA 5). Não se encontram

dados sobre o percentual de mangas dessa variedade destinadas ao processamento, mas supondo que 5% da produção sejam processados isso resultaria em no mínimo 365 mil toneladas de resíduos junto às agroindústrias. Os quais devem ter a correta destinação, atendendo aos padrões estabelecidos pelas normas reguladoras, o que resulta em mais custos para a agroindústria.

Figura 5 - Fluxograma simplificado do processamento de manga



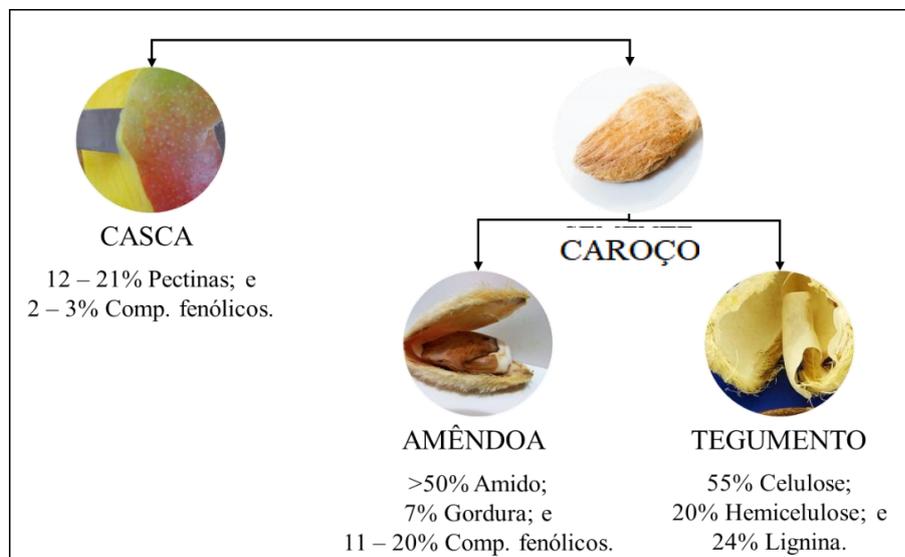
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Dessa forma, nota-se o aumento de estudos para aproveitamento desses resíduos, visando à redução de custos e do desperdício de materiais de alto valor potencial (CORDEIRO et al., 2014; SILVA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2018; MELO et al., 2019; VERÇOSA, 2017; CAVALCANTE, 2018). Ressalta-se que uma das soluções é o fracionamento desses materiais de forma a extrair seus componentes de alto valor potencial, transformando resíduos em produtos de interesse comercial e industrial. Propõe-se a partir desse ponto que as cascas e caroços da manga sejam reportados como coprodutos do processamento da manga ao invés de resíduos devido ao valor potencial desses materiais.

### 2.2.1 Potencial de extração de biomateriais a partir dos coprodutos da manga

No caso específico do processamento das mangas, os componentes de valor comercial que podem ser obtidos a partir dos coprodutos da manga são: i) das cascas: pectina (12 - 21%, BERARDINI et al., 2005) e compostos fenólicos (CF) (2 - 3%, SOGI et al., 2013); ii) das amêndoas: amido (>50%, SILVA, G. A. S.; CAVALCANTI; ALMEIDA, 2013), altos teores de CF (11 - 20%, SOGI et al., 2013) e gordura (cerca de 7%, SONWAI; KAPHUEAKNGAM; FLOOD, 2014); iii) do tegumento: celulose (55%), hemiceluloses (20%) e lignina (24%) (HENRIQUE et al., 2013). A figura 6 apresenta de forma simplificada o fluxograma de obtenção desses componentes de valor.

Figura 6 - Fluxograma dos componentes dos resíduos da manga



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Esses componentes podem ser usados como matérias-primas para obtenção de vários produtos com aplicações industriais, como será descrito nos tópicos a seguir. Uma das principais vantagens de se utilizar coprodutos de frutas para a obtenção de materiais é a sua origem não alimentar, evitando o uso de fontes alimentares para produção de materiais de uso não alimentar, como a produção de filmes plásticos (ARORA et al., 2018a).

A pectina é classificada como heteropolissacarídeo aniônico com composição predominante de ácido galacturônico. Segundo Berardini et al. (2005), a pectina da casca da manga tem grau de esterificação em torno de 60%, caracterizando-a como pectina de alta metoxilação. Essa característica assegura uma grande quantidade de aplicações industriais,

como a elaboração de filmes plásticos a partir de emulsões de pectina devido às suas características plastificantes e de gelatinização (DE'NOBILI et al., 2013; PENHASI; MEIDAN, 2014). Na indústria de alimentos, a pectina da casca de manga é estudada por causa da sua capacidade de formação de gel e eficácia como emulsificante (WANG et al., 2016).

A alta metoxilação da pectina encontrada na casca da manga a assemelha com as principais fontes para extração de pectina, que são as cascas de maçã e de frutas cítricas. No entanto, as propriedades finais da pectina variam consideravelmente com a fonte da qual é extraída e com o procedimento de extração (CANTERI et al., 2012).

Já os CF estão presentes em quantidades expressivas tanto na casca quanto na amêndoa da manga. Segundo Ajila et al. (2007), extratos de casca de manga já se mostraram ativos antioxidantes. O principal composto responsável por essa característica é a mangiferina (BERARDINI; FEZER; et al., 2005; BERARDINI; KNÖDLER; et al., 2005), a qual apresenta diversas propriedades ativas, tais como antioxidantes, quelantes (de ferro), antimicrobianas e fotoprotetoras (inclusive contra raios UV) (MATKOWSKI et al., 2013).

Estudos já avaliaram os efeitos da adição de CF em filmes plásticos, mostrando que este composto é capaz de conferir suas características quando aplicado nesses materiais. Desse modo, posterior a essa adição, os filmes plásticos apresentaram propriedades antioxidantes (DU et al., 2011; GÓMEZ-GUILLÉN et al., 2007; WU et al., 2013), antimicrobianas (DU et al., 2011) e de barreira à luz UV (GÓMEZ-GUILLÉN et al., 2007; WU et al., 2013).

A mangiferina também é objeto de estudo no ramo farmacológico devido às suas características. Segundo Gold-Smith; Fernandez; Bishop (2016), este composto tem mostrado potencial promissor quimioterápico e quimiopreventivo. Já Garrido-Suárez et al. (2010) avaliou as propriedades analgésicas, anti-inflamatórias, antioxidantes e imunomoduladoras da mangiferina no tratamento de dores neuropáticas. Por sua vez, Morais et al. (2015) pesquisou a ação pró-cinética gastrointestinal da mangiferina que pode prevenir a resposta inflamatória intestinal em pós-operatórios.

#### *2.2.1.2 Tegumento: Celulose, Lignina e Hemicelulose*

A celulose, presente no tegumento da manga, é um polímero linear com alto peso molecular. É considerada o componente principal da parede celular dos vegetais sendo, portanto, o material mais abundante da Terra (KLOCK, 2005). A estrutura da celulose confere

a este composto uma forte tendência de formar cristais, que a tornam insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos. Segundo Henrique et al. (2013), a nanocelulose pode ser usada como reforço em materiais, notadamente os filmes plásticos a base de biopolímeros naturais (KUMAR; ATANASSOV; TURNER, 2017; SUDHARSAN et al., 2016).

A lignina, outro componente do tegumento, é um polifenol de estrutura tridimensional altamente ramificada. Este composto é responsável por conferir resistência e, portanto, proteger as paredes celulares de materiais celulósicos. Apresenta ainda propriedades antioxidantes, antimicrobianas e hidrofóbicas, que podem ser conferidas aos materiais que tenham lignina em sua formação (DOHERTY; MOUSAVIOUN; FELLOWS, 2011).

Existem na literatura estudos acerca da inclusão de lignina em filmes plásticos de polissacarídeos ou proteínas (BAUMBERGER et al., 1998; CHEN et al., 2009; NÚÑEZ-FLORES et al., 2013). Segundo esses estudos, os filmes plásticos resultantes podem perder transparência, mas ganham propriedades antioxidantes e de barreira a luz UV (NÚÑEZ-FLORES et al., 2013), que podem ser usados em alimentos suscetíveis a oxidação de lipídios. Em filmes plásticos de amido foi possível inclusive melhorar a resistência à umidade, à estabilidade térmica e a resistência à tração (SPIRIDON; TEACA; BODIRLAU, 2011). A lignina pode ainda formar um material cimentante para as fibrilas de celulose, melhorando as propriedades mecânicas dos painéis lignocelulósicos (ROHELLA et al., 1996).

Por fim, a hemicelulose que também está presente no tegumento é uma mistura de cadeias poliméricas de polissacarídeos de baixa massa molecular e amorfa, a qual está associada a celulose (KLOCK, 2005). Esse composto pode ser hidrolisado, gerando uma mistura de açúcares, predominantemente a xilose, a qual pode ser convertida biologicamente em uma variedade de combustíveis e solventes, como o etanol (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2013).

### *2.2.1.3 Amêndoa: Amido, Compostos Fenólicos e Gordura*

A amêndoa da manga tem na sua composição elevada quantidade de amido que é um polímero de glicose, constituído por amilose e amilopectina, ambas são responsáveis pela capacidade do amido formar géis e filmes plásticos (PÉREZ; BERTOFT, 2010). Este polímero pode ser facilmente separado dos outros componentes da amêndoa e, assim como a pectina, tem ampla aplicação industrial, notadamente os filmes plásticos biopoliméricos (ARVANITOYANNIS; KASSAVETI, 2009). No entanto, para que os filmes plásticos apresentem propriedades mecânicas, térmicas e de barreira desejáveis, o amido deve ser

extrusado, ou seja, misturado com plastificante a 140/160°C, alta pressão e cisalhamento (DETDUANGCHAN; SRIDACH; WITTAYA, 2014).

O amido é um produto com mercado mundial, sendo cereais, legumes e tubérculos as principais fontes desse polímero. Com base nessas fontes, o amido é classificado como de origem alimentar, apresentando boas características funcionais para propósitos alimentares. Contudo, por causa da sua abundância e baixo custo, indústrias não alimentares do setor de embalagens vêm aumentando a busca por esse material. Essa situação poderá se transformar em um problema, uma vez que pode reduzir a disponibilidade desse material para a alimentação (NAWAB et al., 2017).

Nesse contexto, exploração de fontes alternativas de amido com vistas a aplicações não alimentares, como a elaboração de biopolímeros, vem ganhando destaque. O amido presente na amêndoa da manga é considerado uma boa alternativa devido às suas propriedades de gelatinização e retrogradação para confecção de filmes plásticos. Dessa forma, esse amido possibilita a confecção de embalagens sem o uso de amido alimentício tampouco de material não-renovável (NAWAB et al., 2017).

Além do amido, a amêndoa da manga contém quantidades significativas de CF (11-20%, SOGI et al., 2013). Nesse caso, há o predomínio do tanino e da vanilina (ABDALLA et al., 2007). Do mesmo modo que a mangiferina, o tanino e a vanilina são reportados na literatura científica com potencial antioxidante, com isso a adição desses compostos em embalagens para revestimento de alimentos tem como principais vantagens a redução das perdas por processos oxidativos e do uso de antioxidantes sintéticos, que são prejudiciais à saúde de quem consome (LORENZO et al., 2013; MAISUTHISAKUL; GORDON, 2009).

Também da amêndoa obtém-se gordura que, segundo Sonwai; Kaphueakngam; Flood (2014), têm em sua composição ácidos graxos, predominantemente o esteárico e o oleico. A gordura adicionada em materiais reduz a permeabilidade a vapores de água, podendo ainda interferir nas interações entre cadeias, causando um efeito plastificante (ANDREUCETTI; CARVALHO; GROSSO, 2010; LIMPISOPHON; TANAKA; OSAKO, 2010; PÉREZ-MATEOS; MONTERO; GÓMEZ-GUILLÉN, 2009).

Na indústria de alimentos, a gordura tem elevada importância devido as suas implicações nas propriedades e estruturas dos alimentos. Ultimamente, gorduras de sementes vêm ganhando destaque por serem benéficas ao organismo e terem elevadas propriedades nutritivas. Naturalmente, a gordura da manga dispõe de características e propriedades físico-químicas favoráveis a substituição de gorduras tradicionais usadas pela indústria confeitaria.

Outra vantagem da gordura de manga é que este composto é livre de ácidos graxos trans, os responsáveis pelo surgimento de doenças (SOLÍS-FUENTES; DURÁN-DE-BAZÚA, 2011).

### ***2.2.2 Processos de extração dos produtos dos coprodutos da manga***

Atualmente, não existem plantas comerciais dedicadas à valorização de coprodutos do processamento de manga em produtos de valor agregado como os indicados previamente nesse texto (ARORA et al., 2018a). No entanto, os laboratórios de Tecnologia da Biomassa e Multiusuário de Química e Produtos Naturais (LTB e LMQPN), da Embrapa Agroindústria Tropical, iniciaram um esforço comum para o desenvolvimento de processos de extração dos diversos produtos que podem ser extraídos dos coprodutos da manga.

Nos tópicos a seguir estão descritos os processos de extração, que estão sendo desenvolvidas nos laboratórios LTB e LMQPN, para cada produto de interesse supracitado no item 3.2.1.

#### ***2.2.2.1 Casca: Pectina e Compostos Fenólicos***

Conforme propôs Cavalcante (2018), a extração da pectina deve ocorrer na sequência da remoção dos CF. Nesse estudo, foram comparadas duas rotas de extração para esses compostos. A rota de referência consiste na extração dos CF pelo sistema Soxhlet seguida pela extração da pectina pelo banho ultrassom. Enquanto a rota alternativa compreende a extração sequencial dos CF e da pectina por solvente pressurizado.

A extração de CF pelo sistema Soxhlet é a técnica mais convencional, servindo como referência para comparação com processos em desenvolvimento (FIGURA 7a) (SANTOS, Ê. R. de M., 2013). As vantagens desse sistema são a alta eficiência, o solvente constantemente reutilizado em contato com a amostra, a simplicidade do processo e a dispensa da filtração após o processo. Entretanto, nesse processo há o uso excessivo de solvente orgânico, a ausência do controle de temperatura, e o elevado tempo de extração (FELLOWS, 2009). Em decorrência disso, novos processos de extração estão sendo propostos, como a Extração por Solvente Pressurizado (ESP) (THIRUGNANASAMBANDHAM; SIVAKUMAR; PRAKASH MARAN, 2014).

Por sua vez, a pectina pode ser extraída pelo banho ultrassom (FIGURA 7b), que utiliza a energia das ondas sonoras para desestruturar a matriz das células vegetais, permitindo a saída dos compostos. Este processo é amplamente utilizado na extração de compostos em

amostras sólidas, visto que, apresenta rapidez, simplicidade, baixo custo e reduzidos volumes de solventes (ESPADA-BELLIDO et al., 2017).

O processo de extração por ESP é considerado uma alternativa interessante para a remoção de compostos bioativos (FIGURA 7c). Esse processo utiliza líquidos com pressões elevadas entre 10,3 e 13,8 Mpa e temperatura entre 40 e 200°C. As principais vantagens são a redução do consumo de energia e do tempo de extração. Além da inibição das enzimas que degradam os CF devido às altas pressões (SEMEDO, 2012).

Figura 7 - Ilustração do sistema Soxhlet (a), banho ultrassom (b) e extração por solvente pressurizado (c)



Fonte: elaborado pela Autora, 2020.

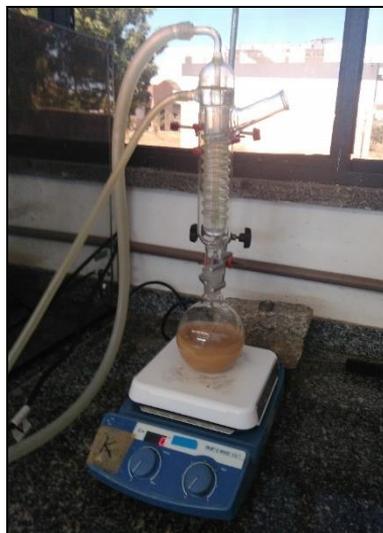
#### 2.2.2.2 Tegumento: Celulose, Lignina e Hemicelulose

Para a extração desses produtos foi considerado o processo *organosolv*, que utiliza solventes orgânicos como agentes deslignificantes. Esse processo é uma alternativa para os processos *kraft* e sulfito, apresentando como principais vantagens a ausência de enxofre na polpação, a possibilidade de recuperar mais solvente e a menor exigência de água, reagentes e energia. O ácido acético tem se mostrado eficiente em processos *organosolv*, visto que, remove consideravelmente lignina e hemicelulose sem degradar a celulose. Verçosa (2016) e Silva et al. (2019) foram pioneiros ao utilizar o processo *organosolv*, com ácido acético como agente deslignificante (*acetosolv*), para extrair celulose e lignina do tegumento da manga.

No processo de polpação *acetosolv* (FIGURA 8), ocorre a deslignificação da biomassa lignocelulósica por meio da clivagem das ligações da lignina. Para acelerar esse processo são usados catalisadores como o ácido clorídrico, visto que, os íons  $H^+$  oriundos da dissociação do catalisador sobrepõem os que são do ácido acético. Esse processo propicia maior fragmentação da biomassa, uma vez que, é possível obter uma fração rica em

hemicelulose, outra fração rica em celulose e o licor negro rico em lignina. Contudo, dentre os processos desenvolvidos pelos laboratórios LTB e LMQPN ainda não foi desenvolvido uma rota para aproveitamento da hemicelulose.

Figura 8 - Polpação *acetosolv*



Fonte: elaborado pela Autora, 2020.

#### 2.2.2.3 Amêndoa: Amido, Compostos Fenólicos e Gordura

A extração de amido do tegumento da manga já vem sendo reportada desde 2014 por Cordeiro et al. (2014), continuando com Oliveira et al. (2018) e Silva et al. (2019) para diferentes aplicações. No entanto, Melo et al. (2019) aprimorou esse processo já estabelecido para recuperar além do amido, gordura e CF, visando ampliar o potencial de aproveitamento da amêndoa da manga.

O processo estabelecido por Cordeiro et al. (2014), Oliveira et al. (2018) e Silva et al. (2019) para extração de amido a partir da amêndoa de manga consiste em triturar as amêndoas com água a fim de formar uma pasta, da qual a fração amilácea é removida diretamente por meio de uma extração aquosa a frio e agitação vigorosa.

Já o processo proposto por Melo et al. (2019) consiste em processar as amêndoas da manga secas para se obter uma farinha, da qual é extraída a gordura, os CF e o amido, respectivamente. Para a extração da gordura utiliza-se o sistema Soxhlet com o hexano como solvente. Em seguida obtêm-se os CF também pelo sistema Soxhlet, porém utilizando o metanol como solvente. Então, a amostra que sobra da separação da gordura e dos CF é homogeneizada para posterior separação da fração amilácea por meio de uma extração aquosa

sob agitação contínua e vigorosa (FIGURA 9). De acordo com Melo et al. (2019), a extração conjunta desses produtos apresentou viabilidade e bons rendimentos quando comparados com dados de outros autores.

Figura 9 – Homogeneização da farinha da amêndoa de manga desengordurada e sem CF

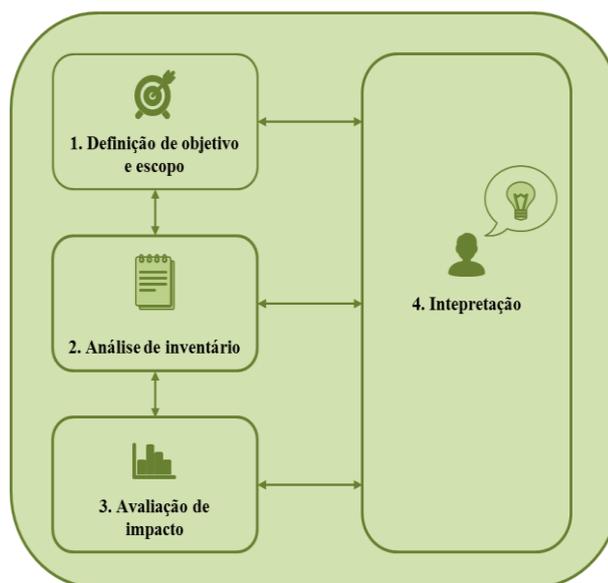


Fone: Elaborado pela autora, 2020.

### **2.3 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de bioprodutos**

O método da ACV é definido pelas ISO 14040 (2001) e 14044 (2009), e apresenta quatro etapas (FIGURA 10).

Figura 10 - Etapas da ACV



Fonte: Adaptado de ISO 14040 (2001).

O primeiro passo em um estudo de ACV é a definição dos objetivos e escopo. O objetivo se refere à aplicação pretendida, as principais razões do estudo e o público-alvo. Já o escopo indica principalmente o sistema de produto a ser estudado, as funções desses sistemas, a unidade funcional, a fronteira do sistema. Essas definições permitem que produtos com funções iguais ou semelhantes possam ser comparados (ISO 14044, 2009).

A unidade funcional é um dos elementos fundamentais para se entender um estudo de ACV e tem por definição a quantificação do desempenho da função do produto avaliado, servindo como unidade de referência do estudo. Isto é, todos os dados do estudo de ACV estão relacionados com essa unidade que precisa ser bem definida e mensurável. A unidade funcional pode ser em termos de diferentes critérios, mas em geral poder ser relacionada com a massa, 1Kg de manga, ou com o volume, 1L de suco de manga, ou com o valor monetário, 1US\$ obtido com a manga, entre outros (CHEHEBE, 1997).

O próximo passo é a quantificação de todas as entradas (recursos naturais e energia) e saídas (emissões para o ar, água e terra) referentes a cada processo incluído no escopo em estudo. O total de entradas e saídas das atividades é chamado de inventário de ciclo de vida (ICV) (ISO 14044, 2006).

Em geral, em um processo que gera mais que um produto, não seria justo responsabilizar o produto principal por todos os efeitos ambientais do processo e das etapas anteriores no ciclo de vida. Por isso, é necessário distribuir a carga ambiental desse processo

entre os seus produtos. Esse procedimento é chamado de alocação e pode ser feito com base em diferentes critérios. (CHEHEBE, 1997).

Os critérios de alocação mais usuais são aqueles com base na massa, no volume, na energia, e no valor econômico. Pelo critério mássico a distribuição da carga ambiental é feita com base na relação entre o quanto foi gerado de cada produto com a quantidade total dos produtos gerados, resultando em um fator percentual. Para o critério volume considera-se o percentual do volume de cada produto pelo volume total obtido. O critério energético relaciona-se com o percentual do poder calorífico de cada produto pelo poder calorífico total. E com o critério econômico o fator percentual é resultado da relação entre a receita de cada produto com a receita total dos produtos gerados (CHEHEBE, 1997).

A ISO 14044 (2009) recomenda que, quando não for possível evitar a alocação, deve-se dar preferência à alocação feita por relações físicas (critérios mássico, volumétrico e energético). Se as relações físicas não forem possíveis podem-se usar outros critérios, como o econômico. Quando mais de um critério de alocação puder ser aplicado em um estudo, é necessário realizar uma análise de sensibilidade para investigar as consequências das diferentes alternativas nos resultados da avaliação (BAUMANN E TILLMAN, 2004).

No passo subsequente, a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), os resultados do ICV são relacionados às categorias de impacto ambiental para identificar o potencial de ocorrência desses impactos. Geralmente, as categorias de impacto abrangem a depleção dos recursos naturais (bióticos e/ou abióticos), degradação dos ecossistemas (acidificação, eutrofização e ecotoxicidade) e a poluição que afeta a saúde humana (mudanças climáticas e toxicidade humana) (ISO / TR 14047, 2016).

Então, no último passo, os resultados obtidos nas etapas de ICV e AICV são interpretados de forma que se identifiquem os pontos críticos, possibilitando a adoção de medidas que melhorem o desempenho ambiental do produto em estudo. Além da análise de sensibilidade dos resultados que deve ser realizada devido à adoção de diferentes critérios metodológicos (ex.: alocação, unidade funcional, e processo de avaliação de impactos), realiza-se também a análise de incerteza na comparação entre produtos e processos.

A análise de incerteza auxilia na identificação da significância dos resultados em estudos de ACV, bem como da propagação dos erros nos dados de inventário. Para essa análise, adota-se o método de Monte Carlo, o qual considera um nível de confiança de 95%, realizados 1.000 ciclos de geração de valores para as variáveis do inventário (consumos e emissões), gerando-se 1.000 avaliações de impacto para determinar a propagação do erro nas categorias de impacto consideradas no estudo. Esse método requer ainda dados da função de

probabilidade, do desvio-padrão, e do valor médio de cada variável para realizar simulações. Utiliza-se a Matriz Pedigree (FRISCHKNECHT et al., 2004) para gerar o desvio padrão para cada variável do inventário. E considera-se que todas as variáveis seguem distribuição log-normal de probabilidade (GOEDKOOOP, 2008). A análise de Monte Carlo pode ser usada tanto para comparações entre processos como para identificar a incerteza absoluta de um processo.

Como pode ser notado, a ACV é uma metodologia que faz o uso intensivo de dados e a qualidade dos seus resultados depende diretamente da robustez e representatividade desses dados, assim como das suposições feitas pelo profissional que modela os dados. A coleta de informações específicas do ciclo de vida de cada insumo/material que compõe o ciclo de vida do produto em estudo consumiria muito tempo e resultaria em altos custos (SAADE et al., 2019). Diante desse cenário, diversos *softwares* foram desenvolvidos com o objetivo de auxiliar profissionais de ACV no uso dessa ferramenta, como SimaPro, Umberto, GaBi e outros (CAMPOLINA, 2015). Esses *softwares* disponibilizam bancos de dados que são elaborados a partir de ICVs de insumos comuns a diversos ciclos de vida como químicos, energia, transporte e outros. Segundo Saade et al. (2019) o banco de dados *Ecoinvent* se destaca como o mais adotado em artigos publicados. Isso é devido principalmente à combinação de uma estrutura transparente de conjunto de dados com a possibilidade de adaptar os dados. Como resultado, essa ampla aceitação trouxe a necessidade de tornar essa base aplicável globalmente (SAADE et al., 2019).

Ademais, Saade et al. (2019) ressalta que uma das mais importantes atualizações foi na versão 3 que apresenta os dados em três modelos de sistema: 1) “allocation, recycled content – cut-off” (os impactos ambientais de materiais recicláveis não são contabilizados no processo que dá origem ao material); 2) “allocation at the point of substitution – APOS” (este modelo inclui todas as atividades de tratamento de um material dentro do sistema de produto que o deu origem); e 3) “consequential” (usado quando é necessário informações sobre alterações diretas ou indiretas nos impactos ambientais devido a decisões ou mudanças em algum processo). Cada modelo desses utiliza um algoritmo específico para conectar processos unitários do banco de dados. As abordagens 1 e 2 são contrastantes em relação aos materiais recicláveis e a modelagem de resíduos. Já a abordagem 3 é conceitualmente diferente das outras alternativas, chamadas atribucionais. Como cada sistema de modelagem é aplicado a sistemas diferentes a escolha do modelo deve ser bem declarada e documentada.

O pensamento acerca do ciclo de vida no Brasil vem evoluindo nos últimos anos devido ao esforço dos setores público e privado. Diversas instituições de pesquisa e vários pesquisadores no nível acadêmico contribuem continuamente para o seu desenvolvimento no

país, como o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), e a Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV). Outros fatores que colaboraram para esse avanço foram o lançamento do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) e as relevantes contribuições do Projeto de Avaliação do Ciclo de Vida do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT). No setor privado, a formação da Rede Brasileira de Ciclo de Vida Empresarial (REBACV) é considerada a alavanca que proporcionou o engajamento das empresas privadas em aplicar a ACV para abordar a sustentabilidade de seus produtos (MAIA DE SOUZA et al., 2016).

A ACV é uma ferramenta particularmente interessante, visto que, o objetivo principal dessa ferramenta é avaliar os impactos ambientais potenciais do ciclo de vida de determinado produto. Ou seja, considera os impactos desde a extração da matéria-prima, passando pela produção, distribuição e uso, até a disposição final (FIGURA 11). Nesse contexto, a ACV fornece a compreensão de todos os impactos ambientais associados com a cadeia produtiva de qualquer produto, sendo importante para garantir a proteção à saúde humana e aos ecossistemas (BAUMANN; TILLMAN, 2004).

Figura 11 - Ilustração do ciclo de vida geral



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Em resumo, a ACV estabelece um fluxo de massa e energia entre os processos de um sistema, avaliando o impacto ambiental de cada um desses processos e como eles devem ser alocados nos produtos e/ou coprodutos. Dessa forma, a característica holística desse método na investigação dos impactos ambientais também pode ser bastante útil para otimizar processos em desenvolvimento, como os novos processos de valorização de resíduos (IACOVIDOU; MILLWARD-HOPKINS; et al., 2017). O desenvolvimento de novos produtos com vistas ao uso eficiente dos recursos e a responsabilidade ambiental é definido como *ecodesign* (VENZKE, 2002).

O *ecodesign* é uma das principais aplicações da ACV, visto que, dentro dessa perspectiva os impactos ambientais levantados ao longo do ciclo de vida do produto em estudo são considerados durante a fase inicial de desenvolvimento do produto (SILVEIRA, 2012). O objetivo é o desenvolvimento de produtos ecologicamente mais competitivos, sem comprometer seus custos e qualidade (VENZKE, 2002). Atualmente, produtos de base biológica ou bioprodutos, como os obtidos a partir dos resíduos agroindustriais da manga, vem sendo amplamente desenvolvidos, tanto pelo avanço da biotecnologia quanto pelo aumento com as preocupações ambientais, o que reforça a necessidade de se avaliar a viabilidade ambiental desses processos em desenvolvimento (PAWELZIK et al., 2013).

Moni et al. (2019) explicam que o uso da ACV tem grande potencial para impulsionar o desenvolvimento de tecnologias emergentes com melhor desempenho ambiental, a partir da identificação de pontos críticos ambientais e da comparação com alternativas existentes. No entanto, problemas como dados limitados, função incerta do produto/processo, escalas pequenas e incertezas tornam bastante desafiador a aplicação da ACV em estudos de tecnologias emergentes.

O uso de dados secundários geralmente é a solução mais prática para fornecer informações aos desenvolvedores de tecnologia em tempo hábil para tomada de decisões, visto que, é difícil o acesso a dados primários suficientes para a elaboração do inventário de tecnologias emergentes devido à falta de dados históricos, processos industriais confidenciais, uso de novos materiais, e/ou elevado tempo para obtenção (MONI et al., 2020).

Outra limitação é a função do produto/processo, salienta Moni et al. (2020), isto é, a função da tecnologia emergente pode não estar definida de forma abrangente nesse nível de desenvolvimento e pode mudar a partir do desenvolvimento da tecnologia.

A ACV de tecnologias emergentes usa em geral dados de laboratório (MONI et al., 2020). No entanto, os processos em escala laboratorial não refletem o mesmo nível de complexidade de processos em escala industrial, ou seja, no laboratório, várias etapas

normalmente não estão diretamente ligadas entre si, o tipo de equipamento utilizado não é equivalente aos reatores e maquinários utilizados industrialmente, assim como várias medidas de eficiência (por exemplo, reutilização e reciclagem de matérias-primas; uso de calor residual; processo contínuo) ainda não são viáveis. De forma que, a ACV baseada em dados em escala de laboratório pode representar impactos ambientais superestimados, uma vez que o rendimento do processo e os ganhos de eficiência ainda não foram alcançados. Assim, faz-se necessário a realização de simulações de escalonamento para a produção em maior escala com o uso de softwares, por exemplo (HETHERINGTON et al., 2014).

Avaliações iniciais de tecnologias emergentes são repletas de incertezas. Assim, a análise de incerteza, típica de estudos de ACV, pode identificar incertezas irrelevantes na avaliação comparativa de tecnologias emergentes, podendo em um contexto específico de decisão desencorajar o desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse contexto, deve-se priorizar a identificação de parâmetros incertos que mais influenciam a diferença de desempenho entre as alternativas de tecnologia e assegurar a comunicação clara das incertezas, tornando-as acessíveis ao público (GAVANKAR; ANDERSON; KELLER, 2015).

Para dar exemplos e investigar os escopos de estudos de ACV de bioprodutos foram utilizados 15 artigos publicados entre 2009 e 2018. Esses artigos foram obtidos por meio de uma seleção nos bancos de dados disponíveis publicamente no portal Periódicos CAPES e Google Acadêmico. Os critérios de seleção dos artigos foram a presença de avaliação de impactos ambientais por meio da ACV em sistemas de produção de bioprodutos. Ressalta-se que os artigos selecionados não representam a totalidade de trabalhos acerca dessa temática. A análise dos artigos escolhidos está na seção 2.3.1.

### ***2.3.1 Revisão dos estudos de ACV de bioprodutos já publicados***

Os artigos selecionados no levantamento da literatura estão apresentados no quadro 1. Alguns dos estudos selecionados, trazem o termo biorrefinaria para designar sistemas de produção que utilizam biomassa como matéria-prima. Como explica Ahlgren et al. (2013), esse termo não é utilizado em todos os estudos devido à falta de uma definição clara e universal de biorrefinarias.

Com relação ao objetivo dos estudos, alguns visam avaliar, identificar, quantificar, caracterizar, ou investigar o impacto ambiental de um sistema que produz bioprodutos para compará-los com um sistema de referência. Entende-se por sistema de referência aquele cujo sistema de produção é baseado em matérias-primas de origens fósseis (BARR; LANDIS,

2017; CHERUBINI; JUNGMEIER, 2010; FIORENTINO et al., 2013; KHOSHNEVISAN et al., 2017; LIARD et al., 2012; PIEMONTE, 2012; UIHLEIN; SCHEBEK, 2009). Outros estudos, porém, objetivaram identificar os pontos críticos para propor melhorias que reduzem os impactos ambientais da produção de bioprodutos (BERNIER; LAVIGNE; ROBIDOUX, 2013; BOLDRIN; BALZAN; ASTRUP, 2013; CORONA et al., 2018; FREIRE et al., 2017; HONG; ZHOU; HONG, 2015; RAHIMI et al., 2018; RENOUF; PAGAN; WEGENER, 2013; SILALERTRUKSA; PONGPAT; GHEEWALA, 2017).

As unidades funcionais desses estudos puderam ser agrupadas em três categorias. A primeira consiste em selecionar apenas um produto, como 1ton de ácidos graxos, 1kg de pó seco de lignina, 1ton de furfural, 1 painel de fibra de coco, ou 1GJ de energia (BARR; LANDIS, 2017; BERNIER; LAVIGNE; ROBIDOUX, 2013; FREIRE et al., 2017; HONG; ZHOU; HONG, 2015; KHOSHNEVISAN et al., 2017; RAHIMI et al., 2018).

Na segunda categoria, a unidade funcional compreende um conjunto de produtos quantificados em diferentes unidades de medida: i) 40Mgal de etanol, 100.000ton de PLA, 75.000ton de TPS/PLA misturados no sistema que utiliza cereal triticales, avaliado por Liard et al. (2012); ii) 1kg de combustível (bioetanol para biorrefinaria e óleo combustível leve para sistemas de refinaria) e 1kWh de eletricidade, utilizando resíduos de madeira como matéria-prima, em sistema proposto por Piemonte (2012); iii) 1ton de açúcar bruto, 1ton açúcar refinado, 1000L de melão, e 1MWh de eletricidade obtidos com o processamento de cana-de-açúcar, de acordo com Silalertruksa; Pongpat; Gheewala (2017).

Já a terceira categoria utiliza como unidade funcional a massa de matéria-prima ou a área de terra cultivada: i) 1mg de colza (*Brassica napus*) (BOLDRIN; BALZAN; ASTRUP, 2013); ii) 477 mil ton de swithcgrass (*Panicum virgatum*) (CHERUBINI; JUNGMEIER, 2010); iii) 1ton de alfalfa (CORONA et al., 2018); 1ton de material ligancelulósico (UIHLEIN; SCHEBEK, 2009); 100ton de cana-de-açúcar (RENOUF; PAGAN; WEGENER, 2013); e 1ha de terra cultivada (FIORENTINO et al., 2013).

As unidades funcionais da primeira e da segunda categorias se destacaram quando o objetivo dos trabalhos era comparar produtos com funções similares. Enquanto a unidade funcional da terceira categoria foi considerada a alternativa mais razoável para análise de conceitos de biorrefinaria, contudo, sem especificar os impactos por produto (AHLGREN et al., 2013). Isto é, os resultados da avaliação são relativos à quantidade de matéria-prima processada e não ao produto obtido. Administradores dessas empresas talvez preferissem conhecer os resultados dos impactos por receita ou lucro obtido em cada conceito de biorrefinaria, e não por quantidade de matéria-prima processada.

O escopo dos estudos analisados abrange, em geral, as etapas de obtenção da matéria-prima até a sua transformação em bioprodutos, classificados como do “berço ao portão”. Essa abordagem é a mais comum devido às diversas aplicações dos bioprodutos. Nos estudos de Bernier; Lavigne; Robidoux (2013) e Boldrin; Balzan; Astrup (2013) desconsideraram-se as etapas de obtenção da biomassa. Bernier; Lavigne; Robidoux (2013) fizeram essa adaptação, porque a lignina é considerada resíduo do processamento da celulose, embora possa ser queimada para geração de energia ou comercializada. Já Boldrin; Balzan; Astrup (2013) excluíram a fase agrícola do escopo, visto que, objetivava comparar diferentes configurações de biorrefinarias baseadas na mesma biomassa. Somente Rahimi et al. (2018) realizaram análise do “berço ao túmulo”, ou seja, incluíram além do cultivo e processamento da biomassa, o uso final do produto.

Entre os artigos selecionados, a maioria preferiu evitar o problema da alocação por meio da expansão do sistema, isto é, ao invés de particionar o impacto ambiental entre os produtos obtidos, a expansão do sistema faz com que esse impacto seja creditado ao sistema (BAUMANN E TILLMAN, 2004). Alguns estudos aplicaram a alocação econômica, baseando-se nos preços de mercado de cada produto, visto que são produzidos por unidades em operação (SILALERTRUKSA; PONGPAT; GHEEWALA, 2017) ou por unidades que geram produtos idênticos às alternativas de mercado (FIORENTINO et al., 2013; PIEMONTE, 2012). Outros estudos que tinham produtos com fins energéticos avaliaram a alocação baseada em energia, em análise de cenário ou sensibilidade (BOLDRIN; BALZAN; ASTRUP, 2013; FIORENTINO et al., 2013). A alocação mássica foi utilizada por Hong; Zhou; Hong (2015) e Freire et al. (2017) para expressar os impactos ambientais da produção da biomassa (utilizada como matéria-prima) e dos produtos finais, porém Freire et al. (2017) avaliou ainda a alocação econômica, através de cenários.

Os danos mais avaliados foram os danos à saúde humana e qualidade dos ecossistemas. As categorias de impacto mais avaliadas, relacionadas a esses danos, foram: aquecimento global, formação de ozônio fotoquímico, depleção da camada de ozônio, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade, e toxicidade humana.

Em geral, o IMPACT 2002+ foi o mais utilizado por ser a combinação de outros métodos (Ecoindicator 99, CML 2001 e IPCC) e permitir avaliar até 15 categorias de impacto em quatro categorias de danos. Os métodos de avaliação de impactos ambientais usados foram: IMPACT 2002+ (BERNIER; LAVIGNE; ROBIDOUX, 2013; KHOSHNEVISAN et al., 2017; LIARD et al., 2012; RAHIMI et al., 2018; RENOUF; PAGAN; WEGENER, 2013), ReCiPe (CORONA et al., 2018; HONG; ZHOU; HONG, 2015; SILALERTRUKSA;

PONGPAT; GHEEWALA, 2017), ILCD (CORONA et al., 2018; FREIRE et al., 2017), CML 2001 (CHERUBINI; JUNGMEIER, 2010; FIORENTINO et al., 2013), Ecoindicator 99 (PIEMONTE, 2012; UIHLEIN; SCHEBEK, 2009), TRACI 2.1 (BARR; LANDIS, 2017), e EDIP 2003 (BOLDRIN; BALZAN; ASTRUP, 2013).

Quando se considera produtos que podem ser usados na geração de energia ou como combustíveis, alguns trabalhos realizaram ainda a análise energética. Para isso, os métodos aplicados foram Cumulative Energy Demand (CED) (FIORENTINO et al., 2013; PIEMONTE, 2012), ou Retorno Energético do Investimento (EROI) (CHERUBINI; JUNGMEIER, 2010).

Quadro 1 – Estudos de ACV de bioprodutos

Nº	Referência	Objetivo	UF	Fronteira do sistema	Critério de alocação	Categorias de impacto analisadas*	Método de avaliação
1	Uihlein; Schebek (2009)	Realizou-se a ACV de um sistema de biorrefinaria de material lignocelulósico e comparou-se com alternativas de produtos convencionais	1000kg de palha	Berço ao portão (inclui desde o fornecimento de insumos até a produção na biorrefinaria)	Expansão do sistema	RI, MC, C, ER, DCO, EXM, CF, OT, A/E e ECO	EcoIndicator 99
2	Cherubini; Jungmeier (2010)	Este artigo enfoca um conceito de biorrefinaria que produz bioetanol, bioenergia e bioquímicos de <i>switchgrass</i> , uma cultura lignocelulósica. Os resultados são comparados com um sistema de referência que tem os mesmos produtos, mas de fontes fósseis	477kt <sub>dry</sub> /a de <i>switchgrass</i>	Berço ao portão (plantio e colheita da biomassa, e o seu processamento no sistema de biorrefinaria)	Sem alocação	BE, BGEE, DA, AG, DCO, TH, ECAD, ECM, ECT, OF, A, e E	EROI, CML 2
3	Liard et al. (2012)	Esse trabalho teve como objetivos: i) caracterizar e comparar os impactos ambientais de várias rotas de conversão para produção de etanol, ácido polilático (PLA) e amido termoplástico (TPS); ii) para o caso de PLA, identificar os critérios mais pertinentes para levar adiante a tomada de decisão multicritério; e iii) avaliar os benefícios da produtividade de <i>triticale</i> e sua capacidade de crescer em terras marginais	Etanol: 40 Mgal; PLA: 100.000 ton; TPS/PLA misturados: 75.000 ton.	Berço ao portão (da aquisição de matérias-primas até o final do estágio de produção)	Expansão do sistema	A, OT, DCO, SH, QE, DRNR, MC	Impact 2002+ v219
4	Piemonte (2012)	Este trabalho enfoca a produção de bioetanol a	1kg de	Berço ao portão (desde a	Alocação	C, OR, IR,	CED e

Nº	Referência	Objetivo	UF	Fronteira do sistema	Critério de alocação	Categorias de impacto analisadas*	Método de avaliação
		partir de resíduos de madeira. Para avaliar a impactos ambientais do sistema em estudo, comparou-se essa biorrefinaria, tanto ao sistema convencional de refino quanto a biorrefinaria de milho, produzindo os mesmos produtos	combustível (bioetanol e óleo combustível leve) e 1kWh de eletricidade	produção de matéria-prima até a produção do combustível/eletricidade no sistema de referência)	econômica	MC, R, DCO, EC, A/E, UT, M, e CF	Ecoindicator 99
5	Bernier; Lavigne; Robidoux (2013)	Esse estudo foca no inventário de ciclo de vida da lignina obtida a partir do processo de polpação Kraft, para aplicação em polímeros	1kg de pó seco de lignina Kraft	Berço ao portão (precipitação da lignina do licor negro, lavagem e secagem).	Expansão do sistema	IR, RI, DCO, OR, ANT, OT, AA, EA, AG, ENR, EXM, C, NC, ECT, e ECA	Impact 2002+
6	(Boldrin; Balzan; Astrup (2013)	O objetivo desse estudo é: i) estabelecer balanços detalhados de massa e energia; ii) coletar dados de inventário específicos; ii) realizar a ACV para comparar diferentes configurações do processo de biorrefinaria de colza; e iv) realizar análises de sensibilidade para fortalecer as conclusões	1mg de colza	Berço ao portão (excluiu-se a fase agrícola para efeitos de comparação)	Expansão do sistema (alocação energética na avaliação de cenário)	AG, A e ET	EDIP 2003
7	Fiorentino et al. (2013)	O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de um sistema agroindustrial para biodiesel e bioquímicos. Uma comparação com um sistema equivalente produzindo apenas biodiesel e energia térmica também é realizada	1ha de terra marginal cultivada	Berço ao portão (o uso dos produtos não foi considerado)	Alocação econômica (e exergética para análise de	AG, A, DA, TH, E e OF	CML 2001 e CED

Nº	Referência	Objetivo	UF	Fronteira do sistema	Critério de alocação	Categorias de impacto analisadas*	Método de avaliação
8	Renouf; Pagan; Wegener (2013)	Este artigo avalia os impactos ambientais da produção de bioenergia, biocombustíveis e biomateriais da cana-de-açúcar australiana ( <i>Saccharum officinarum</i> ) e indica as vias de bioprodução que oferecem os melhores ganhos ambientais	100ton de cana-de-açúcar	Berço ao portão (fornecimento de insumos até a produção)	Sem alocação	DR, UT, ENR, AG, A, E, IR e OR	Impact 2002+
9	Hong; Zhou; Hong (2015)	Este estudo tem como objetivo quantificar os impactos ambientais e econômicos da produção de furfural e furfuralcool de milho, identificar os principais processos e substâncias poluentes, melhorar os potenciais e construir um banco de dados acerca da indústria de furfural	1ton de furfuralcool	Berço ao portão (envolve a produção de milho, furfural e recuperação de energia a partir de resíduos do furfural, emissões diretas, tratamento de águas residuais no local, bem como a reutilização de resíduos sólidos e efluentes na fábrica de álcool furfural.)	Alocação mássica	MC, DCO, TH, OF, MP, RI, AT, EAD, EM, ECT, ECAD, ECM, OTA, OTU, TTN, DH, DM, e DF	ReCiPe
10	Barr; Landis (2017)	O objetivo deste estudo foi comparar os impactos ambientais da produção de ácido graxo ômega-3 (n-3), altos teores de proteína e biocombustível a partir de algas com os impactos da produção desses mesmos produtos a partir de peixes	1ton métrica de ácidos graxos ômega-3	Berço ao portão (cultivo e processamento da biomassa).	Sem alocação	DCO, AG, FS, A e E	TRACI 2.1
11	Freire et al. (2017)	Este estudo avalia os impactos ambientais de	1 painel de fibra	Berço ao portão (produção de	Alocação	DH, UT, DRN,	ILCD

Nº	Referência	Objetivo	UF	Fronteira do sistema	Critério de alocação	Categorias de impacto analisadas*	Método de avaliação
		novos painéis de fibras à base de casca de coco, em fase de desenvolvimento, visando priorizá-los para futuras melhorias e ampliação de escala.	de casca de coco de 6,05*10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> , para escala laboratorial, e com 1 m <sup>3</sup> , para escala piloto.	energia e insumos, transporte de insumos e cocos, cultivo de coco, processamento de água de coco, processamento de casca e fabricação de painéis de fibra.)	mássica e econômica	A, ET, EAD, EM, AG, DCO, FOF, MP, RI, TH e ECAD	
12	Khoshnevisan et al. (2017)	Este estudo objetivou o desenvolvimento de diferentes cenários de biorrefinaria de mamona para gerar biodiesel, etanol e biogás. Esses cenários desenvolvidos também foram comparados com um sistema de referência fóssil que fornece a mesma quantidade de energia através da combustão de diesel puro	1GJ de energia de combustão	Well to Wheel (inclui desde o cultivo da mamona até a biorrefinaria)	Expansão do sistema e substituição	BGEE, ENR, EXM, TH, ER, RI, DCO, OF, ECA, ECT, ANT, OT, AA e EA	Impact2002+
13	Silalertruksa; Pongpat; Gheewala (2017)	Esse estudo visa a avaliação do desempenho ambiental de diferentes opções de biorrefinaria de cana-de-açúcar na Tailândia usando ACV	1ton de açúcar bruto, 1ton açúcar refinado, 1000L de melaço e 1MWh de eletricidade	Berço ao portão (inclui cultivo e colheita de cana-de-açúcar, moagem de cana-de-açúcar e utilização de coprodutos, ou seja, bagaço para vapor e eletricidade, e melaço para etanol)	Alocação econômica	MC, AT, EAD, TH, OF, MP, ECT, ECA e DF	ReCiPe
14	Corona et al. (2018)	Este autor combinou uma Simulação de Fluxograma de Processo (PFS) e ACV para avaliar o desempenho técnico e ambiental de	1ton <sub>DM</sub> de alfafa	Berço ao portão (cultivo e transformação da biomassa)	Sem alocação	AG, E, ENR, OTA, e ECAD	EPD, ReCiPe e ILCD

Nº	Referência	Objetivo	UF	Fronteira do sistema	Critério de alocação	Categorias de impacto analisadas*	Método de avaliação
		diferentes configurações de uma biorrefinaria verde e a utilização em cascata dos produtos desta biorrefinaria					
15	Rahimi et al. (2018)	Neste trabalho, a sustentabilidade de três diferentes cenários de biorrefinaria com base em Eruca sativa (ES) como matéria-prima foi investigada, usando uma abordagem de ACV a partir do balanço energético e do ponto de vista ambiental	1GJ de energia de combustão	Berço ao túmulo (inclui cultivo e transporte da matéria-prima, produção e transportadores, bem como a combustão em um motor a diesel)	Expansão do sistema e substituição	BGEE, ENR, EXM, TH, ER, RI, DCO, OF, ECA, ECT, ANT, OT, AA, EA	Impact 2002+

\* Aquecimento Global (AG), Balanço de Energia (BE), Energia Não Renovável (ENR), Balanço de Gases do Efeito Estufa (BGEE), Mudança Climática (MC), Formação de Smog (FS), Formação de Ozônio Fotoquímico (FOF), Oxidação Fotoquímica (OF), Inorgânicos Respiratórios (IR), Orgânicos Respiratórios (OR), Matéria Particulada (MP), Radiação Ionizante (RI), Efeitos Respiratórios (ER), Saúde Humana (SH), Toxicidade Humana (TH), Cancerígeno (C), Não cancerígeno (NC), Ocupação da Terra (OT), Ocupação de Terra Agrícola (OTA), Ocupação de Terras Urbanas (OTU), Uso da Terra (UT), Transformações de Terras Naturais (TTN), Qualidade do Ecossistema (QE), Eutrofização (E), Eutrofização Aquática (EA), Eutrofização Terrestre (ET), Eutrofização de Água Doce (EAD), Eutrofização Marinha (EM), Acidificação (A), Acidificação Aquática (AA), Acidificação Terrestre (AT), Ecotoxicidade Terrestre (ECT), Ecotoxicidade Aquática (ECA), Ecotoxicidade de Água Doce (ECAD), Ecotoxicidade Marinha (ECM), Ecotoxicidade Terrestre (ECT), Ecotoxicidade (ECO), Depleção da Camada de Ozônio (DCO), Depleção Abiótica (DA), Depleção Hídrica (DH), Depleção dos Recursos Naturais (DRN), Depleção de Metal (DM), Depleção Fóssil (DF), Depleção dos Recursos não Renováveis (DRNR), Depleção Fóssil (DF), Mineral (M), Combustíveis Fósseis (CF), Acid/Nutri Terrestre (ANT), e Extração Mineral (EXM).

### **3 IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DE BIOPRODUTOS A PARTIR DOS COPRODUTOS DA MANGA COM MENOR IMPACTO AMBIENTAL**

#### **3.1 Introdução**

O reaproveitamento de resíduos, dentro da economia circular, proposta de produção alternativa à tradicional economia linear, visa minimizar as perdas durante o processo de produção, reduzindo os resíduos a um mínimo reciclável que possa ser incorporado de novo à cadeia produtiva. Contudo, antes que um resíduo possa ser reciclado e passar a ser denominado como produto sustentável e que um sistema de reciclagem seja implementado, é necessário que se entendam todos os aspectos desse processo, principalmente os reais benefícios para o setor produtivo e para o meio ambiente, em especial (DOS SANTOS et al., 2011).

Para se obter um panorama completo de todos os aspectos e impactos ambientais relacionados com esses produtos a metodologia mais adequada é a ACV, visto que, propõe uma visão mais sistêmica, integrando todas as suas fases de produção (da extração da matéria-prima até a disposição final) e procura identificar os pontos críticos da produção para minimizar seus possíveis efeitos negativos (“ABNT NBR ISO 14040”, 2001).

A ideia ao se usar a ACV no desenvolvimento de processos para o reaproveitamento de resíduos é que esse novo produto seja desenvolvido em equilíbrio com o meio ambiente, de forma tão importante quanto a exequibilidade técnica, o controle de custos e a demanda de mercado relativa do mesmo. O projeto de desenvolvimento de um produto deve articular soluções de acordo com o impacto do seu ciclo de vida: extração da matéria-prima, produção, transporte, uso, e fim de vida (BORCHARDT et al., 2008).

Diante do exposto, este capítulo objetiva utilizar a ACV para comparar processos de extração de bioprodutos a partir de coprodutos da manga (cascas e caroços), identificando os processos de menor impacto ambiental. Em seguida, identificar nos processos menos impactantes as etapas críticas do processo, auxiliando no desenvolvimento de processos sustentáveis.

#### **3.2 Metodologia**

A avaliação dos impactos ambientais dos processos de extração dos bioprodutos a partir dos coprodutos da manga (casca e caroço) foi realizada por meio da ACV, seguindo as

normas NBR ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura; e NBR ISO 14044 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

Os processos de extração avaliados foram: i) Cavalcante (2018) para os processos de extração de pectina e compostos fenólicos da casca; ii) Verçosa (2016) para lignina e Silva et al. (2019) para celulose, ambas do tegumento; iii) e Cordeiro et al. (2014) e Melo et al. (2019) para extração de amido e outros compostos.

Com relação aos bioprodutos extraídos da casca da manga, avaliou-se a extração de compostos fenólicos por Soxhlet (processo base) e por solvente pressurizado (ESP) (processo alternativo). Para a pectina avaliou-se a extração por ultrassom (processo base) e por ESP (processo alternativo).

No caso dos bioprodutos obtidos do tegumento da manga, avaliou-se a extração de lignina e de celulose por uma polpação *acetosolv* (processo base). Contudo, não havia processos alternativos ao processo base. Dessa forma, avaliou-se as etapas do processo base com maior impacto ambiental, com a finalidade de propor alternativas que serviram de suporte para a elaboração de um cenário alternativo de produção.

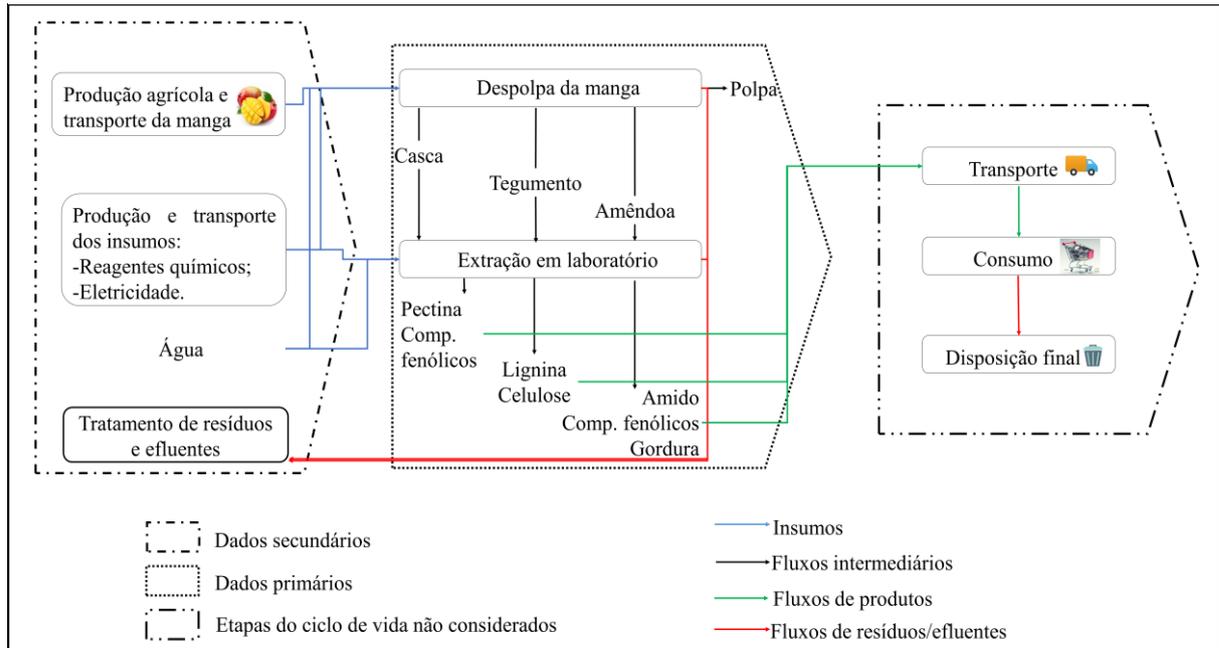
Para a amêndoa da manga, compararam-se duas formas de obtenção do amido, uma que extrai amido isoladamente (CORDEIRO et al., 2014), e outra que extrai além do amido, gordura e compostos fenólicos (extração integrada) (MELO et al., 2019).

### **3.2.1 Sistema de produto**

O escopo do estudo foi do berço ao portão, sendo considerados os processos de produção agrícola e transporte de manga, produção e transporte dos reagentes químicos e da energia, despolpa da manga, extração de bioprodutos a partir dos coprodutos da manga, e tratamento de efluentes e de resíduos dos processos de extração (FIGURA 12). No caso dos efluentes líquidos foi considerado um tratamento genérico, visto que, não foi possível fazer a análise desses efluentes. Para os resíduos sólidos, por serem orgânicos, considerou-se como tratamento a compostagem.

A produção agrícola da manga foi contemplada nesse estudo, apesar de atualmente os coprodutos da manga serem resíduos do processo de despolpa da manga. Essa decisão foi tomada considerando que no futuro próximo, esses resíduos passarão a ter valor econômico para as indústrias de despolpa, passando a integrar o ciclo de vida dos bioprodutos obtidos a partir dessas biomassas residuais.

Figura 12 - Sistema de produto do processo



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

### 3.2.2 Inventário dos processos de produção

- *Dados Primários:*

Os inventários dos processos de extração de bioprodutos e de despolpa da manga foram montados a partir de dados primários, os quais foram coletados no período de julho de 2018 a janeiro de 2019, nos laboratórios e Planta Piloto da Embrapa Agroindústria Tropical.

Observou-se que era necessário na comparação de processos de extração alternativos considerar um mesmo tempo de produção para ambos os processos. Adotou-se como tempo padrão 1 mês de extração. Os dados referentes a consumos, emissões e produção foram então recalculados para 1 mês, seguindo dois passos: 1º) padronização do rendimento do processo para 1 mês (Equação 1); 2º) padronização das quantidades de insumos e emissões para o rendimento de 1 mês (Equação 2).

Apresenta-se no Quadro 2 um exemplo da realização desse procedimento com a extração de CF (processo ESP). Nesse exemplo, objetivou-se encontrar o rendimento dessa extração no período de 1 mês (30 dias), onde a variável  $x$  é o rendimento padronizado da extração de CF em 1 mês.

Quadro 2 – Padronização da extração de CF para 1 mês

	Extração de CF	Extração de CF (1 mês)
<b>Etanol 50%</b>	420ml	6.090ml
<b>CF</b>	40ml	580ml
<b>Tempo total</b>	2,07 dias	30 dias

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

$$\frac{\text{Produção total do processo I}}{x} = \frac{\text{tempo total do processo I}}{30 \text{ dias}} \quad (1)$$

$$\frac{40 \text{ ml}}{x} = \frac{2,07 \text{ dias}}{30 \text{ dias}} = \frac{40 * 30}{2,07} = 580 \text{ ml}$$

Assim, é possível extrair 580ml de CF em 30 dias. Em seguida, calcula-se a quantidade de cada insumo e emissão para a produção de CF em 1 mês.

Considerando o consumo de etanol 50%, realiza-se o seguinte cálculo:

$$\frac{\text{Quantidade de etanol}}{\text{Quantidade etanol em 1 mês (x)}} = \frac{\text{Produção de CF}}{\text{Produção de CF em 1 mês}} \quad (2)$$

$$\frac{420 \text{ ml}}{x} = \frac{40 \text{ ml}}{580 \text{ ml}} = \frac{420 * 580}{40} = 6.090 \text{ ml}$$

Logo, para a produção de 1 mês de CF são requeridos 6.090ml de etanol 50%. A partir disso, é montado o inventário para a produção padronizada de 1 mês.

No caso do consumo de energia elétrica, ele foi estimado em cada processo unitário, considerando a potência dos equipamentos (kW), o tempo de uso (h) e a capacidade utilizada em massa (kg) ou volume (L). Isto é, o consumo elétrico total de cada equipamento ( $Pot (kW) * Uso (h)$ ) foi ponderado em relação ao volume ou a massa ocupada no mesmo, não sendo contabilizada a capacidade máxima de cada equipamento. Ao final, o consumo de energia também foi extrapolado para 1 mês.

- *Dados secundários:*

Já os dados secundários foram utilizados para os seguintes processos: produção agrícola de manga, produção dos insumos que são usados nos processos de extração (água, energia e produtos químicos) dos bioprodutos, e tratamento de efluentes e resíduos. O inventário agrícola da manga foi obtido em Carneiro et al. (2019), enquanto os demais, na

base de dados *ecoinvent* v.3.1 (FRISCHKNECHT et al., 2007). O quadro 3 apresenta o nome dos processos dessa base de dados utilizados nesse estudo, assim como a versão de cada processo e o sistema de modelagem adotado. Todos inventários utilizam a abordagem “*allocation at the point of substitution*” (APOS) (ver seção 2.3), a qual foi inserida no *ecoinvent* a partir da versão 3. A água é uma entrada da natureza, classificada no *ecoinvent* como uma matéria-prima, portanto, não varia quanto a versão e ao sistema de modelagem.

Quadro 3 – Inventários da base de dados *ecoinvent*

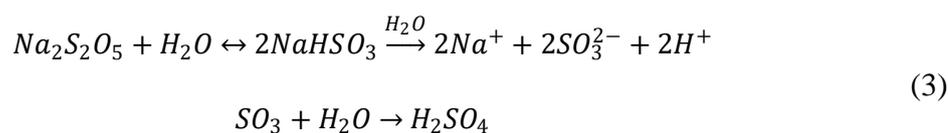
Nome do insumo/processo	Nome na base de dados <i>ecoinvent</i>	Versão	Sistema de modelagem
Ácido acético	Acetic acid, without water, in 98% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.1	APOS
Ácido cítrico	Citric acid {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.0	APOS
Ácido clorídrico	Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RoW}  market for   Alloc Def, U	3.0.3.0	APOS
Água	Water, well, in ground BR (in water)	-	-
Álcool	Ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant/BR U	2.2	APOS
Compostagem	Biowaste {CH}  treatment of, composting   Alloc Def, U	3.0.91.1	APOS
Hexano	Hexane {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.0	APOS
Hidróxido de sódio	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.5.0	APOS
Hipoclorito de Sódio	Sodium hypochlorite, without water, in 15% solution state {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.1	APOS
Metabissulfito de sódio	Chemical, inorganic {GLO}  market for chemicals, inorganic ( <i>Proxy</i> )	3.0.3.0	APOS
Metanol	Methanol {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.1	APOS
Peróxido de hidrogênio	Hydrogen peroxide, without water, in 50% solution state {GLO}  market for	3.0.2.1	APOS

Nome do insumo/processo	Nome na base de dados <i>ecoinvent</i>	Versão	Sistema de modelagem
	Alloc Def, U		
Produção de energia	Electricity, medium voltage {BR}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.0	APOS
Terra diatomácea	Silica sand {GLO}  market for   Alloc Def, U	3.0.2.1	APOS
Tratamento de efluentes líquidos dos processos de extração de bioprodutos	Wastewater from vegetable oil refinery {GLO}  treatment of   Alloc Def, U (Adaptado para o Brasil)	3.0.1.0	APOS

Fonte: Elabora pela Autora, 2020.

Para o processo de produção e transporte do metabissulfito de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) foi considerado um inventário genérico para a produção de químicos inorgânicos, visto que, a base de dados utilizada não possuía um inventário específico desse insumo. Essa consideração foi feita a partir da recomendação de Miyamoto et al. (2007). No entanto, segundo Figueirêdo et al. (2006) os principais problemas ambientais relacionados ao metabissulfito de sódio ocorrem quando este é lançado em corpos hídricos, uma vez que após sucessivas reações com água há a liberação do ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), reduzindo o oxigênio disponível (OD) e o pH da água.

Assim, realizou-se uma estimativa da emissão de ácido sulfúrico para água devido às reações do metabissulfito de sódio em meio aquoso com base nas equações químicas descritas a seguir (Equação 3). De acordo com essas equações, 1g de metabissulfito de sódio ao reagir com água libera 1,032g de ácido sulfúrico.



### 3.2.3 Descrição dos processos com coleta de dados primários

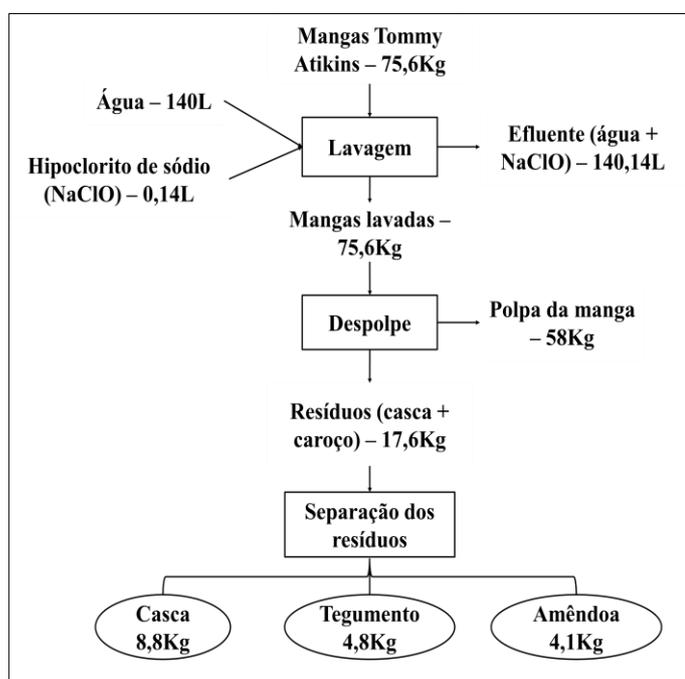
- *Despolpa da manga:*

Foram adquiridos 75,7 kg de manga (*Mangifera indica L.*) cv. Tommy Atkins na Central de Abastecimento do Ceará (CEASA) as quais foram colocadas em tanques de aço para higienização com uma solução de cloro (200ppm) por 20 minutos. As mangas foram

levadas a uma despoldadeira elétrica da marca Itametal para partição da polpa e dos coprodutos (cascas e caroços).

Os caroços da manga são compostos pelo tegumento (parte externa) e pela amêndoa (parte interna). Por isso, realizou-se a separação manual da amêndoa e do tegumento. Essa etapa foi realizada com o auxílio de uma morsa de bancada, na qual aplicou-se uma tensão de compressão até o rompimento do tegumento. Imediatamente, após a separação das amêndoas elas foram submersas em água para evitar o escurecimento oxidativo (MELO et al., 2019). A figura 13 apresenta o fluxograma do processo de despolda da manga.

Figura 13 - Fluxograma da obtenção dos coprodutos da manga

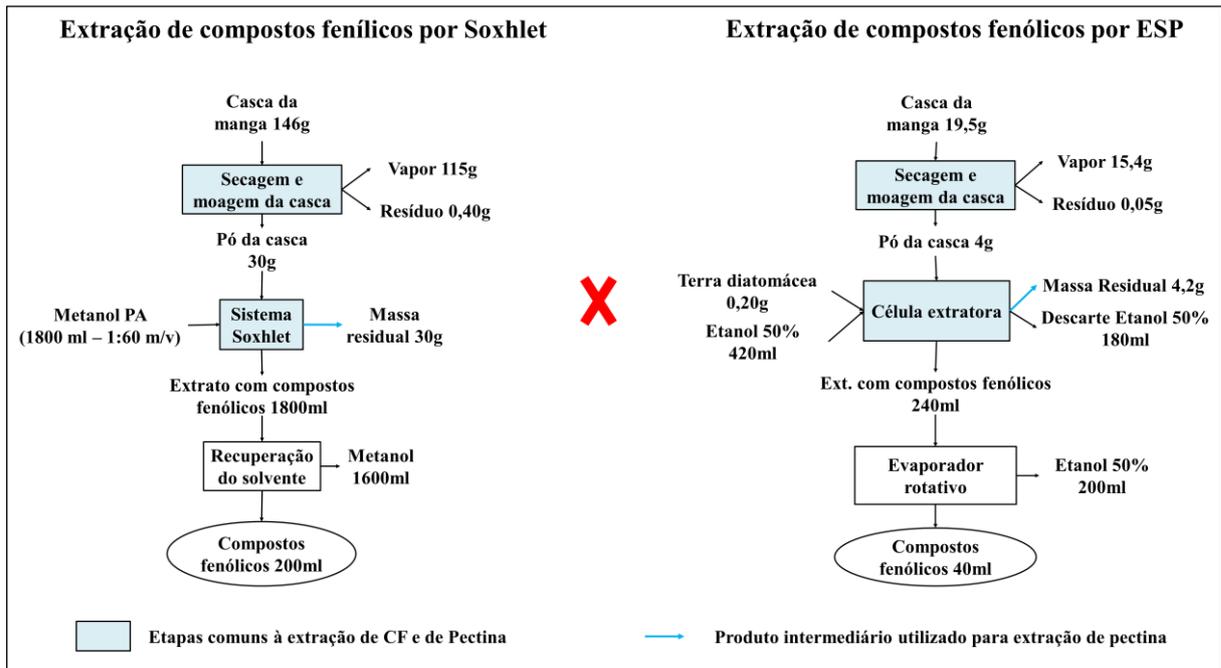


Fonte: Adaptado de Silva et al. (2019), Oliveira *et al.* (2018), Cavalcante (2018) e Melo *et al.* (2020).

- *Extração de Pectina e Compostos Fenólicos a partir da casca de manga:*

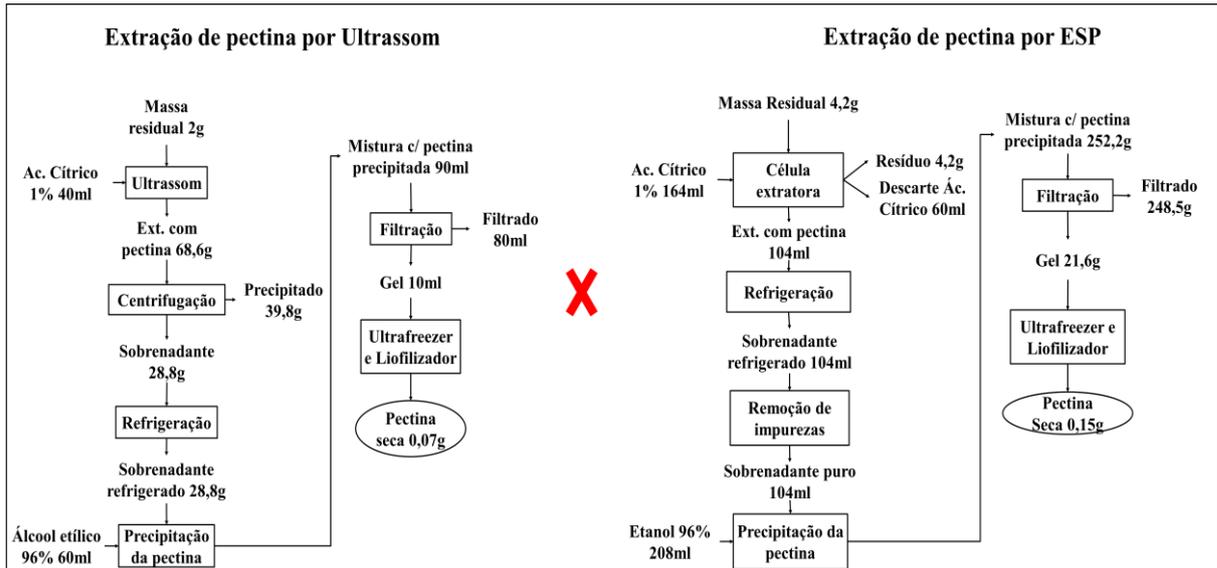
Os fluxogramas dos dois processos de extração de CF (Soxhlet e ESP) estão apresentados na figura 14. Essa figura mostra ainda as etapas comuns aos processos de extração de CF e de pectina, assim como a massa residual que sai dos processos de extração de CF e é utilizada para extração de pectina. Já a figura 15 apresenta os dois processos de extração de pectina (Ultrassom e Solvente Pressurizado – ESP). Todos os processos foram propostos por Cavalcante (2018).

Figura 14 – Fluxograma da extração de CF por Soxhlet e por ESP



Fonte: Adaptado de Cavalcante (2018).

Figura 15 – Fluxograma da extração de pectina por Ultrassom e por ESP



Fonte: Adaptado de Cavalcante (2018).

Para a extração de CF, em ambos processos, as cascas da manga foram inicialmente secas em estufa a 65°C por 66 horas. Posteriormente, elas foram desidratadas e moídas em moinho de facas do tipo Willey, obtendo-se uma farinha de casca de manga.

A condição de extração dos CF pelo sistema Soxhlet deu-se da seguinte forma: adicionou-se 10g da amostra (casca de manga em pó) em um cartucho de extração e 600ml de

metanol P.A (1:60 m/v) em um balão de fundo redondo. Em seguida, montou-se o sistema Soxhlet (FIGURA 7a). Essa reação ocorreu durante 9h.

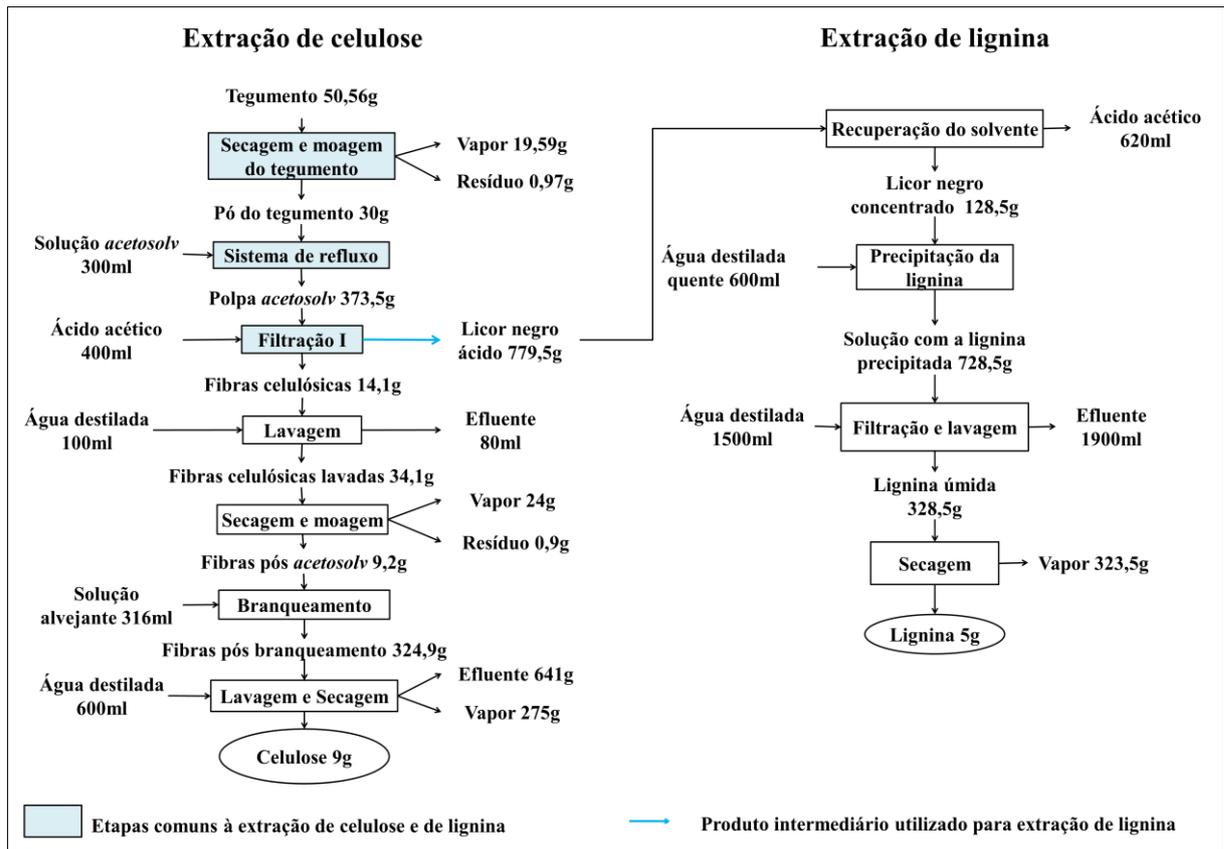
A extração por ESP ocorreu em um extrator automático ASE 350 Dionex (FIGURA 7c). Inicialmente, para a extração dos CF, adicionou-se 2g da farinha de casca de manga com 0,1g de terra diatomácea, que foram colocados em uma célula extratora de aço inoxidável de volume 34ml. As condições de extração foram pressão de 10342-11721 kPa, rinse de 5 minutos, 1 ciclo e purga de 200 segundos, tempo de 15 minutos, temperatura de 70°C e Etanol 50% como solvente. As amostras com CF obtidas foram concentradas no rotaevaporador por 30 minutos, obtendo-se o CF.

Para a extração da pectina por Ultrassom, foram misturados 2g da massa residual que sai do sistema Soxhlet com 40ml de uma solução de ácido cítrico 1%. A mistura foi colocada no banho ultrassom por 10min (FIGURA 7b). O extrato com pectina foi direcionado para a centrífuga, também por 10min. O sobrenadante que saiu da centrífuga foi refrigerado por 24h. Ao sobrenadante refrigerado, que contém pectina, adicionou-se 60ml de álcool etílico 96% (1:2 v/v), após 1h de repouso ocorreu a precipitação da pectina em forma de gel. Por filtração, o gel foi separado e, em seguida, liofilizado para se obter a pectina seca.

A extração da pectina por ESP utilizou a massa residual que saiu do extrator automático após a extração dos CF, a qual foi novamente colocada nesse equipamento para a extração de pectina. Foram aplicadas as mesmas condições de extração de CF, exceto para o solvente, sendo utilizado ácido cítrico 1%. Obteve-se dessa fase o extrato de pectina que foi refrigerado por 24h e, em seguida, filtrado para remoção de impurezas. Ao filtrado adicionou-se álcool etílico 96% na proporção 1:2 (v/v). Essa mistura permaneceu em repouso por 1h até a precipitação da pectina em forma de gel, que foi separada por filtração. O gel foi, então, liofilizado para obtenção da pectina seca.

- *Extração de Celulose, Lignina e Hemicelulose a partir do tegumento:*

O fluxograma do processo proposto por Verçosa (2016) para a extração de lignina e do processo proposto por Silva et al. (2019) para a extração de celulose estão na Figura 16. Na qual pode-se identificar também as etapas comuns a esses processos e o produto intermediário que sai da extração de celulose e é utilizado na extração de lignina.

Figura 16 - Fluxograma da extração *acetosolv* de celulose e lignina

Fonte: Adaptado de Verçosa (2017) e Silva et al. (2019).

Primeiramente, o tegumento foi desidratado na estufa a 50°C, cortado em quadrados com cerca de 3cm<sup>2</sup>, e moído em moinho tipo willey com malha de 30 mesh. Foram requeridos 30g de tegumento moído nesse processo para um ciclo de extração.

Com isso, os 30g do pó do tegumento foram colocados juntamente aos 300ml de solução *acetosolv* (93% ácido acético, 0,3% ácido clorídrico e 6,7% água) em um balão de fundo chato. O balão foi, então, levado a um sistema de refluxo, com pressão atmosférica, agitação magnética constante, e a 115°C de temperatura, durante 1 hora e 30 minutos. Deste sistema de refluxo, obteve-se uma polpa que foi filtrada para separar as fibras celulósicas (14g) do licor negro ácido (779g), que contém lignina.

As fibras celulósicas foram lavadas com água destilada até pH neutro e secas na estufa a 50°C por 24 horas. Na sequência, as fibras foram trituradas em moinho analítico e branqueadas para retirar lignina e hemicelulose remanescente, utilizando para cada 1g de fibra 32ml de uma solução alvejante (20ml de NaOH 4% (m/v) e 12ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% (v/v)). Para o branqueamento, aqueceu-se a solução de NaOH até 40°C, momento o qual foram adicionadas as fibras, sob agitação mecânica. Quando a mistura alcançou 65°C, metade do volume de

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> necessário para o branqueamento foi adicionado. Após 60min, a segunda parte de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi acrescentada e a reação seguiu com a mesma temperatura, sob agitação mecânica contínua, por mais 90 min. Depois da finalização da reação, as fibras foram lavadas com água destilada até pH neutro e secas em estufa de circulação de ar a 50°C por 24h.

Já o licor negro foi colocado no rotaevaporador para concentrá-lo e recuperar o ácido acético (620ml). O licor concentrado obtido, 80 ml, foi misturado com água destilada quente na proporção de 1:10 (v/v). Essa mistura foi colocada em repouso por 24 horas para que ocorresse a precipitação da lignina. Passado esse período, filtrou-se a lignina precipitada à vácuo com papel filtro de 8µm. A lignina obtida foi lavada com água destilada até pH neutro e, posteriormente, colocada na estufa para secagem, a 50°C por 24 horas. Dessa forma, obteve-se a lignina do tegumento da manga.

Embora a hemicelulose também possa ser obtida do tegumento da manga, ainda não foi definido processo para o seu isolamento.

Visando otimizar o consumo de energia de equipamentos com alta demanda, evaporador rotativo e filtro à vácuo, avaliou-se a possibilidade de substituição desses equipamentos.

O evaporador rotativo é usado na etapa de recuperação do solvente para separar o solvente da amostra, concentrando-a. O funcionamento desse equipamento é considerado simples e consiste em evaporar e condensar os materiais para separar diferentes substâncias. No entanto, a sua eficiência é baixa devida à alta dissipação de calor para o meio, fazendo com que o consumo de energia elétrica seja elevado. Assim, foi proposto, em reunião com especialistas em processos químicos, a substituição do evaporador rotativo pelo evaporador múltiplo efeito.

O evaporador múltiplo efeito apresenta como vantagem o aproveitamento dos vapores gerados, ou seja, o vapor produzido no efeito anterior é usado como meio de aquecimento para o próximo efeito, de forma que a alimentação acontece apenas no primeiro efeito.

Na etapa de lavagem e filtração, utiliza-se um filtro à vácuo, cujo funcionamento baseia-se na remoção da resistência à queda do líquido, acelerando o processo. Apesar de ser mais eficiente que filtros comuns, não é recomendado para filtrar grandes quantidades de mistura. Devido a elevada demanda por filtração nessa etapa há um excessivo consumo de energia. Assim, optou-se por substituir o filtro a vácuo por filtro prensa nessa etapa.

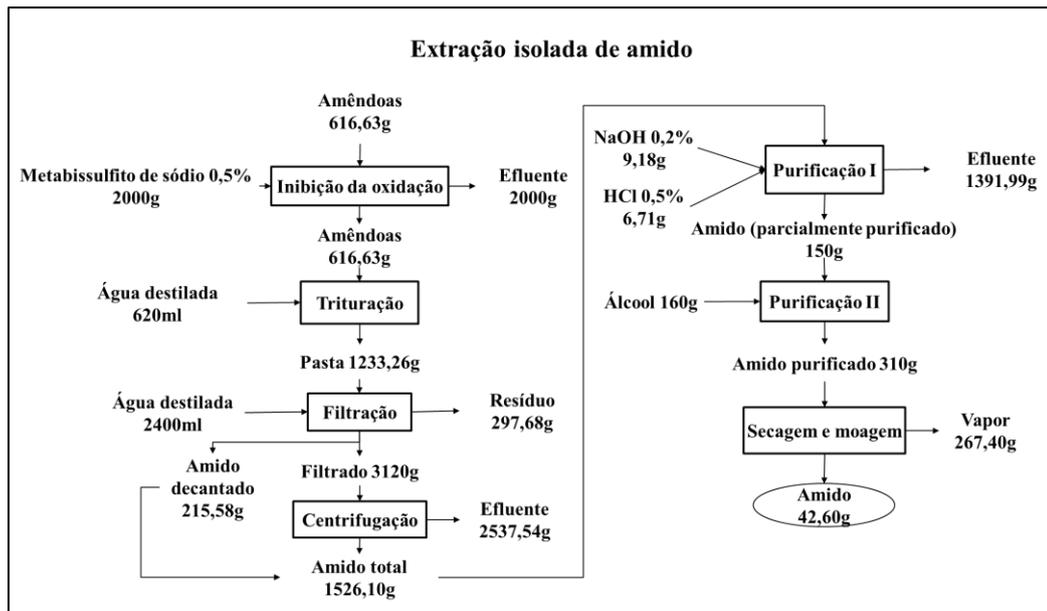
O filtro prensa através de uma série de placas projetadas e alta pressão, aumenta tanto a área quanto a taxa de filtração. Os sólidos ficam retidos nas placas, enquanto o líquido

escoa pelos dutos, sendo direcionado para fora do filtro.

- *Extração do Amido da amêndoa da manga:*

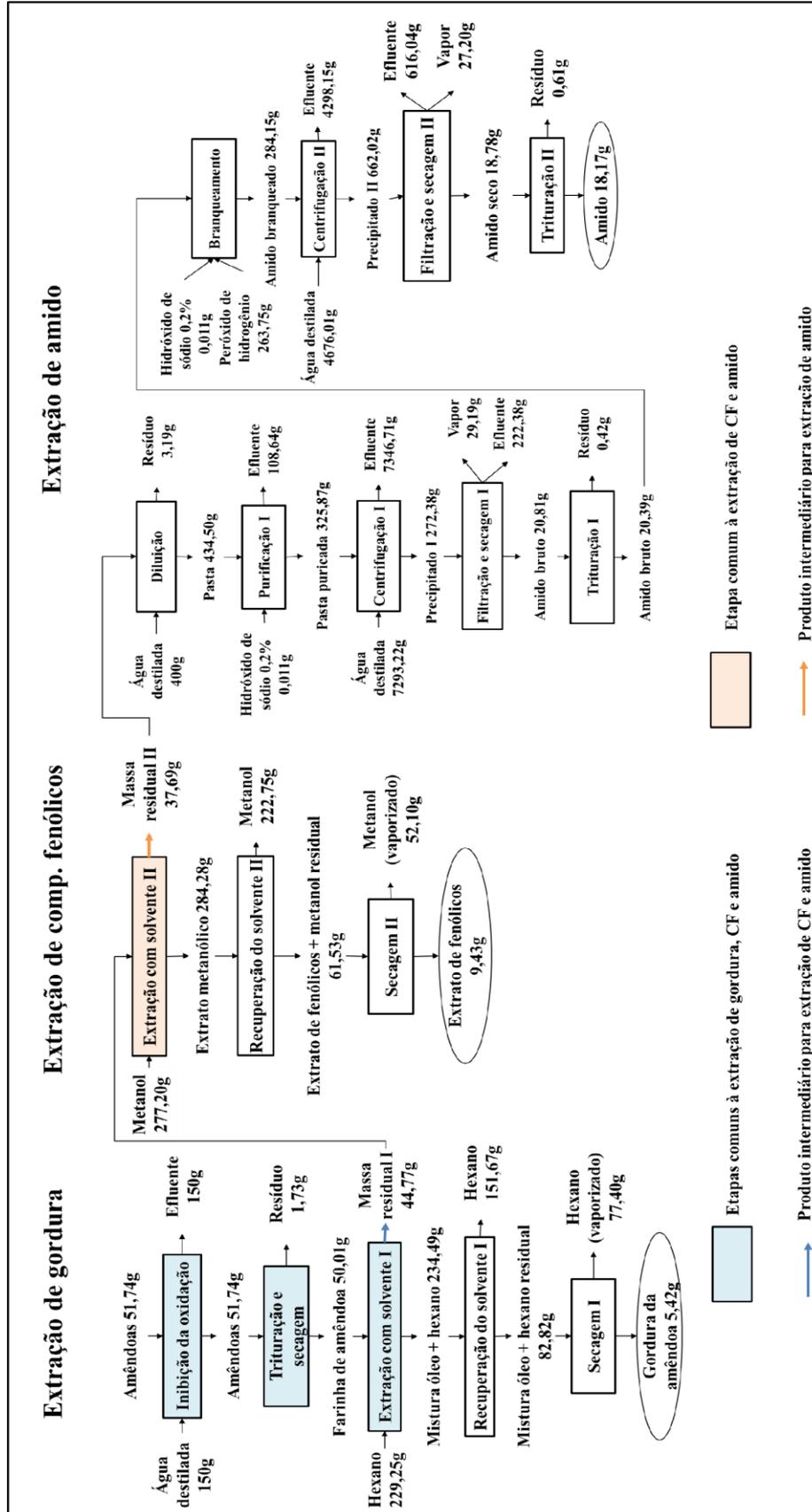
Para a avaliação dos produtos obtidos da amêndoa da manga foram considerados dois processos: o primeiro extrai amido isoladamente (CORDEIRO et al., 2014) (FIGURA 17), enquanto o segundo extrai, além do amido, gordura e CF (MELO et al., 2019) (FIGURA 18).

Figura 17 – Fluxograma da extração isolada de amido



Fonte: Adaptado de Cordeiro et al. (2014).

Figura 18 – Fluxograma da extração integrada de gordura, CF e amido



Fonte: Adaptado de Melo et al. (2020).

De acordo com Cordeiro et al. (2014), realizou-se inicialmente o corte das amêndoas em pedaços pequenos (~1cm<sup>3</sup>) que foram imersos em solução de metabissulfito de sódio 0,5% (m/v) por 48h, em câmara fria (~4°C), na proporção de 200mL de solução/ 100g de amêndoas. As amêndoas foram drenadas após 48h e levadas para serem trituradas junto com água destilada na proporção de 100mL de água destilada/100g de amêndoas, durante 3 minutos, a 1750rpm. A pasta obtida dessa trituração foi filtrada usando uma peneira de 60 mesh. O retido na peneira foi novamente levado ao triturador com água destilada e em seguida filtrado. Esse procedimento foi repetido até obtenção de um filtrado translúcido. Na fração amilácea foi adicionada uma solução de NaOH 0,2% (m/v), em proporção de 200mL de solução/100g da fração amilácea, sob agitação magnética (200rpm) por 2h em temperatura ambiente. Após 2h, foi adicionado HCl 0,5% (v/v) à mistura até que o conjunto atingisse pH 6,0. Essa mistura foi centrifugada em ultracentrífuga refrigerada, repetidas vezes, sempre adicionando água destilada ao precipitado, até atingir pH 7,0. Na sequência, álcool absoluto foi adicionado ao amido (200mL de álcool para cada 100mL de suspensão de amido obtida) com agitação magnética (200rpm) por 1 h. Em seguida, essa mistura permaneceu em repouso para a decantação de amido. Este amido decantado foi lavado com água destilada através de filtração a vácuo, utilizando papel de filtro 28µm. Por fim, o amido foi seco em estufa, a 40°C por 24 h, moído em moinho analítico de impacto e armazenado em frascos de vidro devidamente identificados.

De acordo com o processo proposto por Melo et al. (2019), realizou-se a trituração das amêndoas em um processador de alimentos a 1500rpm para que fosse aumentada a sua superfície de contato, acelerando a etapa posterior de secagem. Essa etapa ocorreu em uma estufa por 48 horas com temperatura variando entre 40°C e 45°C. O material desidratado obtido foi moído em moinho analítico para obtenção da farinha de amêndoa.

A partir dessa farinha, extraiu-se, primeiramente, a gordura. O processo de extração desse produto aconteceu no sistema Soxhlet, com duração de 16 horas, utilizando 350ml do solvente hexano para 50g de farinha. A mistura de solvente e gordura foi colocada no evaporador rotativo para concentração da amostra e recuperação do solvente, com aplicação de 450/500mbar de pressão e 65°C de temperatura. Essa amostra concentrada foi colocada em tubos de ensaio e depois na estufa para que houvesse a remoção do hexano residual.

A massa residual obtida nessa etapa anterior de desengorduramento foi seca em estufa a 45°C por 24 horas, removendo o solvente residual. Essa massa residual

desengordurada e seca (50g) foi colocada no sistema Soxhlet para uma nova extração, agora de CF. Para tanto, utilizou-se o solvente orgânico metanol (350ml) para ficar em contato com a amostra por 24 horas. O extrato metanólico que saiu do Soxhlet foi concentrado no evaporador rotativo com pressão entre 200 e 150mbar e temperatura de 50°C. A etapa posterior foi filtrar, com papel de filtro de 0,28µm, o extrato metanólico concentrado para remoção de impurezas. O filtrado foi colocado em estufa estática a 65°C por 50 horas para remoção do solvente residual. Ao final, obteve-se CF com alta viscosidade e cor escura intensa.

O resíduo restante da extração de CF foi colocado na estufa a 45°C por 24 horas, possibilitando a remoção do solvente residual. Em seguida, 60g desse material foi misturado com 500ml de água destilada em um homogeneizador por 15 minutos a 4000rpm. A pasta obtida nessa etapa foi peneirada utilizando uma rede de poliamida de 60 mesh, lavando até que a coloração do filtrado fique mais clara. Ao filtrado, adicionou-se uma solução de hidróxido de sódio 0,2% (1:2 v/v). Essa mistura foi mantida em agitação magnética, por 2 horas, na chapa de aquecimento e agitação a 500rpm. Encerrada a etapa de agitação, a amostra ficou em repouso por 15 minutos para a decantação do amido bruto e separação do sobrenadante, que foi neutralizado e descartado. O amido que decantou foi centrifugado em ultracentrífuga com rotação de 24430G a 4°C por 20 minutos, seguido por diversas remoções de impurezas e lavagens até pH neutro.

O amido bruto foi filtrado em papel de filtro de 0,28µm e seco em estufa a 40°C por 24 horas. Na sequência, o amido bruto seco foi moído em moinho analítico. Esse amido foi, então, branqueado com uma solução alvejante. Essa solução foi constituída por 20ml de NaOH 0,2% (m/v) e 12ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35% (v/v) para cada grama de amido. Primeiramente, foi aquecida a solução de NaOH 0,2% até 40°C sob agitação contínua. A partir disso, adicionou-se lentamente o amido bruto e, logo após, a primeira metade de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35%. Ao fim de 1 hora, foi colocada a segunda metade de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35%, deixando a reação sob agitação por mais 30 minutos. A solução obtida foi centrifugada, sob a mesma condição anterior, e lavada até pH neutro. Então, filtrou-se o amido branqueado resultante em papel de filtro de 0,28µm, desidratou-se em estufa a 40°C por 24 horas, e triturou-se em moinho analítico.

### ***3.2.4 Unidade funcional***

A unidade funcional escolhida foi 1 g de bioproduto (pectina, CF, amido, lignina ou celulose) (QUADRO 4). Essa unidade funcional permite focar nos bioprodutos, avaliando

os impactos de forma relativa à quantidade de bioproduto gerado por cada processo. Para isso, faz-se uma ponderação de todas as entradas e saídas pelo rendimento final do produto de interesse, obtendo assim o que seria necessário para a produção de 1g do produto de interesse.

Quadro 4 - Unidade Funcional  
para cada produto avaliado

<b>Produto</b>	<b>Unidade Funcional para pergunta 1 (foco no bioproduto)</b>
<b>Casca</b>	
Pectina	1g
CF	1g
<b>Tegumento</b>	
Celulose	1g
Lignina	1g
<b>Amêndoa</b>	
Amido	1g

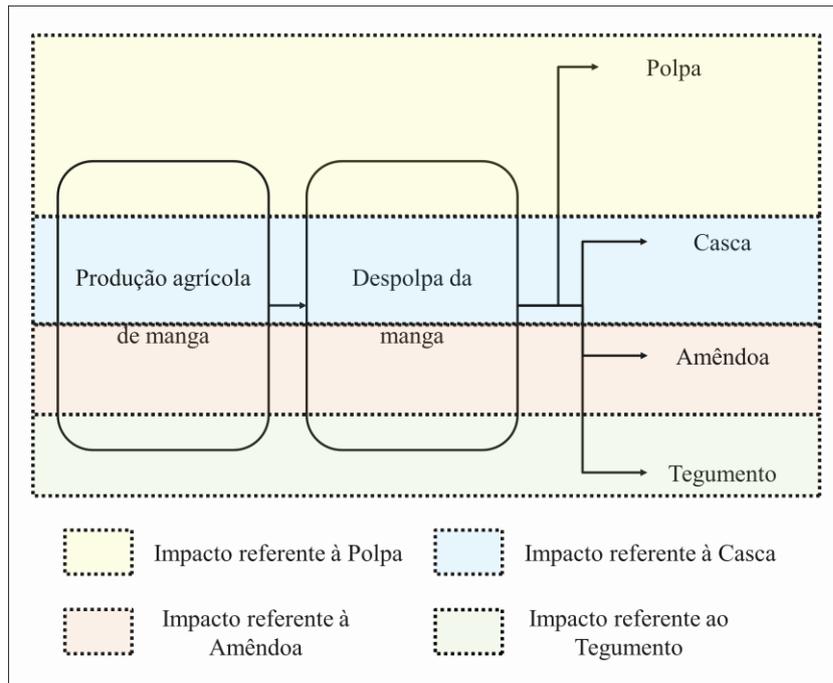
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### ***3.2.5 Critérios de alocação***

Processos em que são obtidos mais de um produto necessitam de alocação, ou seja, divisão das cargas ambientais entre os produtos obtidos nesses processos, de acordo com algum critério de alocação. Assim, foi necessário realizar alocação nos seguintes processos:

- i) Despolpa da manga, uma vez que nessa etapa são obtidos a polpa e os coprodutos (cascas e caroços) (FIGURA 19).

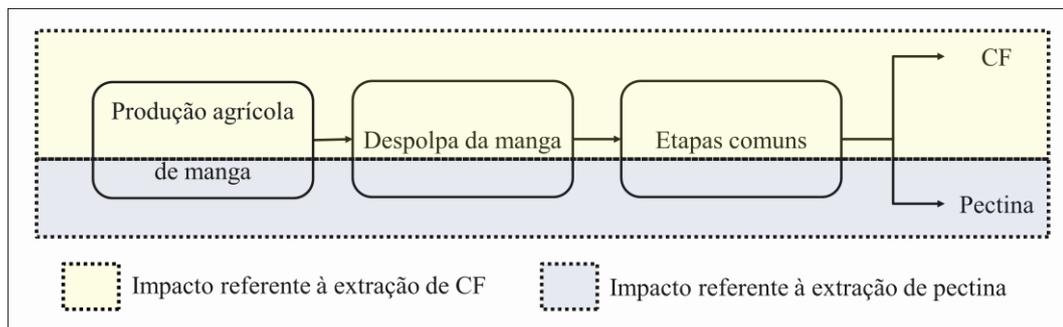
Figura 19 – Alocação na etapa de despolpa



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

- ii) Beneficiamento da casca, porque desse processo foram obtidos os CF e a Pectina, em ambas metodologias de extração (Soxhlet e ESP) (FIGURA 20).

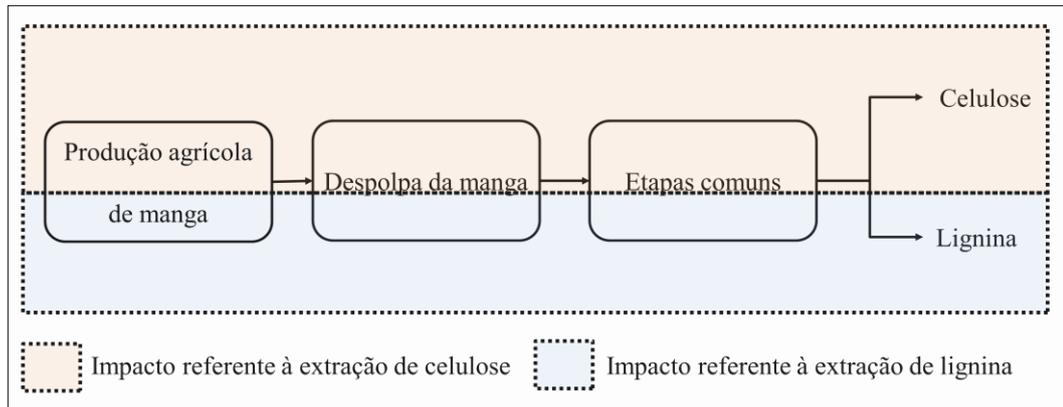
Figura 20 - Alocação no beneficiamento da casca



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

- iii) No beneficiamento do tegumento, visto que, são obtidas a lignina e a celulose (FIGURA 21).

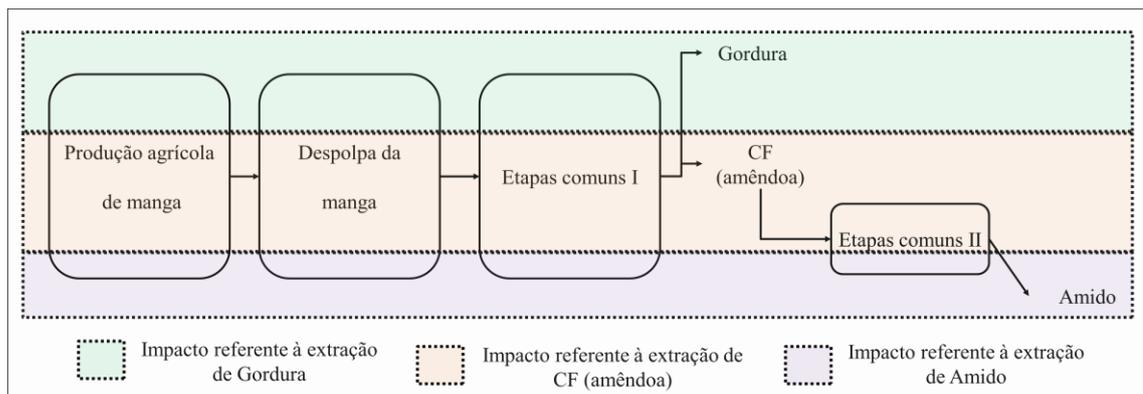
Figura 21 - Alocação no beneficiamento do tegumento



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

- iv) No beneficiamento da amêndoa, no processo desenvolvido por Melo *et al.* (2019) de extração integrada de gordura, CF e amido, realizou-se a alocação entre esses três produtos (FIGURA 22).

Figura 22 - Alocação no beneficiamento da amêndoa



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Os critérios utilizados para a alocação foram: mássico e econômico. O percentual de alocação de impacto para cada bioproduto, seguindo o critério mássico, foi calculado com a Equação 4:

$$F_i = \frac{m_i}{\sum M} \quad (4)$$

Onde:

$F_i$  – Fator de alocação para o produto  $i$ , em %;

$m_i$  – Massa do produto  $i$  [unidades de massa];

$\sum M$  – Somatório das massas de todos os bioprodutos gerados no processo [unidades de massa].

Seguindo o critério econômico, o percentual de alocação de impacto para cada bioproducto foi calculado com a Equação 5:

$$F_i = \frac{p_i * m_i}{\sum P * M} \quad (5)$$

Onde:

$F_i$  – Fator de alocação para o produto  $i$  (%);

$p_i$  – Valor econômico do produto  $i$  [unidade monetária por unidade de massa];

$m_i$  – Massa do produto  $i$  [unidades de massa];

$\sum P * M$  – Somatório do produto do valor econômico de cada produto pela sua respectiva massa [unidade monetária].

Os valores dos coprodutos da manga (casca, tegumento e amêndoa) foram obtidos no *indiamart* e dos bioprodutos estudados foram obtidos no *sigma aldrich*. Para obter os valores dos coprodutos da manga, que atualmente não têm mercado, considerou-se o valor de produtos que apresentam composição semelhante e já estão disponíveis no mercado. Para a casca da manga, considerou-se o valor da casca da maçã; para o tegumento foi considerado o valor da serragem de madeira; e para a amêndoa considerou-se o valor do milho. Enquanto para os bioprodutos avaliados foram considerados os valores dos produtos que já estão em mercado, mas de origens diferentes (ex.: amido de milho).

A Tabela 1 apresenta os percentuais de alocação obtidos, quando os critérios mássico e econômico foram adotados, para cada processo que resultou em mais de um produto. Em geral, os fatores de alocação dos bioprodutos não variaram muito de um critério para outro. Mas os fatores dos coprodutos da despolpa de manga, que tiveram elevada quantidade de massa, mas baixo preço, apresentaram expressiva redução no fator de alocação do critério mássico para o econômico (TABELA 1).

Tabela 1 – Fatores de alocação

Produto	Quantidade (g)	Valor unitário* (US\$/g)	Receita (US\$)	Alocação mássica (%)	Alocação econômica (%)
<b>Processo de despolpa da manga</b>					
Polpa	58.000	0,001	58	89,91%	99,9983%
Casca	1.830	2,5E-7	0,0005	2,83%	0,0008%
Tegumento	2.920	1E-7	0,0003	4,53%	0,0005%
Amêndoa	1.750	1,5E-7	0,0003	2,72%	0,0005%
Massa total	64,51	<b>Receita total</b>	58,00		
<b>Processo de extração de Pectina e CF – Soxhlet e ultrassom</b>					
CF	1.259,41	0,75	945	99,96%	99,95%
Pectina	0,45	0,98	0,44	0,04%	0,05%
Massa total	1.26	<b>Receita total</b>	945		
<b>Processo de extração de CF e pectina – ESP</b>					
CF	175	0,75	131	99,40%	99,26%
Pectina	0,99	0,98	1	0,60%	0,74%
Massa total	176	<b>Receita total</b>	132		
<b>Processo de extração de celulose e lignina - Eq. Convencionais</b>					
Lignina	30	0,53	16	36%	34%
Celulose	55	0,56	31	64%	66%
Massa total	85	<b>Receita total</b>	47		
<b>Extração de lignina - Eq. Alternativos</b>					
Lignina	36	0,53	19	39%	38%
Celulose	55	0,56	31	61%	62%
Massa total	90	<b>Receita total</b>	49		
<b>Processo de extração isolada de amido</b>					
Amido	691	0,26	178	-	-
Massa total	691	<b>Receita total</b>	178		
<b>Processo de extração integrada de amido, CF e gordura</b>					
Gordura	12,02	0,84	10	37%	39%
CF (amêndoa)	20,9	0,75	16	63%	61%
Massa total	32,92	<b>Receita total</b>	26		
CF (amêndoa)	20,9	0,75	16	34%	60%
Amido	40,28	0,26	10	66%	40%
Massa total	61,18	<b>Receita total</b>	26		
Gordura	12,02	0,84	10	16%	28%
CF (amêndoa)	20,9	0,75	16	29%	43%

<b>Produto</b>	<b>Quantidade (g)</b>	<b>Valor unitário* (US\$/g)</b>	<b>Receita (US\$)</b>	<b>Alocação mássica (%)</b>	<b>Alocação econômica (%)</b>
<b>Amido</b>	40,28	0,26	10	55%	29%
<b>Massa total</b>	73,2	<b>Receita total</b>	36		

\*Os valores de cada produto foram obtidos no <https://www.indiamart.com> e no <https://www.sigmaldrich.com/>.

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

### 3.2.6 Análise de cenários

Construiu-se cenário para avaliar possíveis mudanças em processos de extração que não tinham sido testadas alternativas de produção em laboratório. Isso ocorreu no processo de extração da lignina a partir do tegumento da manga. O cenário para esse processo foi definido a partir da identificação das suas etapas mais impactantes e por meio de reuniões com os pesquisadores desenvolvedores do processo foi proposto um cenário alternativo com a troca de equipamentos com alto consumo elétrico.

### 3.2.7 Avaliação de impactos e análise de incerteza

Os seguintes impactos ambientais do beneficiamento dos coprodutos da manga foram analisados pelo método ILCD *Midpoint* 2011 (EUROPEAN COMMISSION, 2011): mudanças climáticas (MC), acidificação (A), eutrofização de água doce (EAD), eutrofização marinha (EM), ecotoxicidade (ECT), toxicidade humana cancerígena (THC) e toxicidade humana não cancerígena (THNC). O impacto na escassez hídrica (EH) foi avaliado pelo método AWARE (BOULAY et al., 2018). Foi utilizado o *software* SimaPro versão 9.0.0.3.5.

Após o cálculo dos impactos ambientais realizou-se a análise de incerteza pelo método de Monte Carlo na avaliação comparativa dos processos alternativos para geração de um bioproduto. Para gerar o desvio-padrão requerido pelo método de Monte Carlo utilizou-se a Matriz Pedigree (FRISCHKNECHT et al., 2007). Considerou-se que todas as variáveis seguem distribuição log-normal de probabilidade (GOEDKOOOP, 2008).

## 3.3 Resultados e discussão

### 3.3.1 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Para a análise do inventário, considerou-se as entradas e saídas dos processos de extração dos diversos bioprodutos originados dos coprodutos da manga, tendo como base a produção de 1 mês (TABELA 2). Observou-se que em todos os processos houve o consumo de energia, mas o processo de Extração de CF por Soxhlet demandou mais. O consumo de água e de diferentes reagentes também foi recorrente na maioria dos processos. Enquanto nas emissões, notou-se a geração de efluentes líquidos, vapores e resíduos sólidos.

No processo de despulpa da manga houve o maior consumo de água, e por consequência, a maior emissão de efluente líquido. Esse consumo elevado foi decorrente da necessidade de higienização das mangas, uma vez que a polpa obtida desse processo foi destinada para fins alimentares. Em contrapartida, o consumo de energia foi o menor dentre os processos analisados, devido a rapidez e quantidade de mangas processadas.

Para a extração de CF, foram avaliados dois processos: extração por Soxhlet e por ESP (ambos propostos por Cavalcante, 2018). A extração por Soxhlet demandou maior consumo de energia, mas foi o processo em que se obteve o maior rendimento, cerca de 86% maior. Enquanto a extração por ESP, processo alternativo, permitiu, simultaneamente, a redução de quase 90% no tempo de extração (Soxhlet 9h e ESP 1h) e de 95% no consumo de energia.

Na extração de pectina também foram avaliados dois processos, propostos por Cavalcante (2018): a extração por Ultrassom e por ESP. Pelo segundo processo foi possível mais que dobrar a produção, porém os consumos de reagente e energia foram pelo menos triplicados. Apenas a emissão de resíduos da casca apresentou uma redução.

A extração da lignina (proposta por Verçosa, 2017) foi avaliada a partir da comparação da extração com equipamentos convencionais com um cenário de extração com equipamentos alternativos (ver seção 3.2.3 no tópico de extração de Extração de Celulose, Lignina e Hemicelulose a partir do tegumento). Percebe-se que o uso de equipamentos alternativos possibilitou aumentar a produção (17%) em 1 mês, sem aumentos expressivos no uso de reagentes, e ainda reduziu consideravelmente o consumo de energia elétrica (94%).

O processo de extração da celulose (SILVA et al., 2019) não apresentou consumos elevados de água, reagente ou energia se comparado com os outros processos de beneficiamento dos coprodutos da manga. E ainda teve um bom rendimento, com quase 90% de aproveitamento em relação às fibras celulósicas secas.

Analisou-se a extração de amido por meio da comparação dos processos de extração isolada de amido (CORDEIRO *et al.*, 2014) e da extração integrada de amido (MELO *et al.*, 2019). Neste último, apesar da extração de dois coprodutos a partir da amêndoa,

a produção de amido foi 94% menor que a produção do primeiro processo.

Tabela 2 – Inventário do ciclo de vida dos processos estudados considerando 1 mês de extração

Entradas			Saídas		
Materiais/Energia	Quantidade	Unidade	Produtos/Resíduos	Quantidade	Unidade
<b>1 Pré-tratamento da manga</b>					
<b>1.1 Despolpa da manga</b>					
Manga Tommy Atkins	75,62	Kg	Polpa	58,00	Kg
Água	126,00	Kg	Casca	8,79	Kg
Hipoclorito de sódio	15,54	Kg	Tegumento	4,77	Kg
Energia	0,11	KWh	Amêndoa	4,06	Kg
			Efluente	141,54	Kg
<b>2 Beneficiamento da casca</b>					
<b>2.1 Extração de CF por Soxhlet</b>					
Casca	1.801,33	g	CF	1.259,41	g
Metanol	17.590,05	g	Massa residual Soxhlet	370,16	g
Energia	79,28	KWh	Vapor	1.426,38	g
			Metanol – recuperado	16.330,64	
			Resíduo da casca	4,79	g
<b>2.2 Extração de CF por ESP</b>					
Casca	282,61	g	CF	175,05	g
Terra diatomácea	2,90	g	Massa residual ESP	60,96	g
Etanol 50%	5.419,42	g	Vapor de água	223,80	g
Energia	3,78	KWh	Resíduo da casca	0,75	g
			Etanol 50% recuperado	3.352,59	g
			Efluente	1.891,78	g
<b>2.3 Extração de Pectina por Ultrassom</b>					
Massa residual Soxhlet	12,63	g	Pectina	0,45	g
Ácido cítrico 1%	254,24	g	Resíduo da casca	85,14	g
Álcool etílico 95%	306,88	g	Efluente	465,81	g
Energia	1,14	KWh	Vapor de água	22,34	g
<b>2.4 Extração de Pectina por ESP</b>					

Entradas			Saídas		
Materiais/Energia	Quantidade	Unidade	Produtos/Resíduos	Quantidade	Unidade
Massa residual ESP	28,28	g	Pectina	0,99	g
Ácido cítrico 1%	1.111,43	g	Resíduo da casca	28,28	g
Álcool etílico 95%	1.134,30	g	Efluente	2.100,37	g
Energia	2,93	KWh	Vapor de água	144,37	g
<b>3 Beneficiamento do tegumento</b>					
<b>3.1 Extração de Lignina com equipamentos convencionais</b>					
Tegumento	307,59	g	Lignina	30,42	g
Solução <i>acetosolv</i>	1.914,00	g	Fibras celulósicas	85,48	g
Ácido acético	2.555,15	g	Vapor de água	1.911,21	g
Água destilada	12.905,74	g	Resíduo do tegumento	5,91	g
Energia	41,13	KWh	Ácido acético recuperado	3.960,49	g
			Efluente	11.559,03	g
<b>3.2 Extração de Lignina com equipamentos alternativos</b>					
Tegumento	361,15	g	Lignina	35,71	g
Solução <i>acetosolv</i>	2.245,88	g	Fibras celulósicas	100,36	g
Ácido acético	3.000,03	g	Vapor de água	2.416,10	g
Água destilada	15.000,15	g	Resíduo do tegumento	6,94	g
Energia	2,39	KWh	Ácido acético	4.476,54	g
			Efluente	13.571,56	g
<b>3.3 Extração de Celulose</b>					
Fibras celulósicas	85,48	g	Celulose	54,75	g
Água destilada	4.258,59	g	Efluente	4.387,32	g
Solução alvejante	1.882,83	g	Vapor de água	1.779,65	g
Energia	0,52	KWh	Resíduo de fibras celulósicas	5,48	g
<b>4 Beneficiamento da amêndoa</b>					
<b>4.1 Extração isolada de amido</b>					
Amêndoa	10.761,74	g	Amido	690,79	g
Metabissulfito de sódio	162,16	g	Resíduo	5.589,73	g
Água destilada	111.011,35	g	Efluente	125.809,56	g
Hidróxido de sódio	148,86	g	Álcool vaporizado	4.336,09	g
Ácido clorídrico	108,81	g	Ácido sulfúrico	167,30	g

Entradas			Saídas		
Materiais/Energia	Quantidade	Unidade	Produtos/Resíduos	Quantidade	Unidade
Álcool grau comercial	2.594,52	g			
Energia	24,56	KWh			
<b>4.2 Extração integrada de amido</b>					
Amêndoa	131,11	g	Gordura	12,02	g
Água destilada	27.975,47	g	CF	20,90	g
Hexano	508,32	g	Amido	40,28	g
Metano	614,63	g	Massa residual I	99,27	g
Hidróxido de sódio	0,048	g	Massa residual II	83,57	g
Peróxido de hidrogênio	584,81	g	Efluente	2.8425,37	g
Energia	65,24	KWh	Resíduo	28,24	g
			Hexano vaporizado	171,62	g
			Metanol vaporizado	115,53	g
			Vapor	125,02	g

Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

### 3.3.2 Análise comparativa

Primeiramente, foram comparados os processos de extração de referência com os alternativos, exceto para a lignina e celulose. Para a lignina realizou-se a comparação do processo base com um cenário composto por equipamentos alternativos. Para a celulose, foi feita apenas a análise do seu processo de extração único, não sendo feita comparação com nenhum outro processo ou cenário.

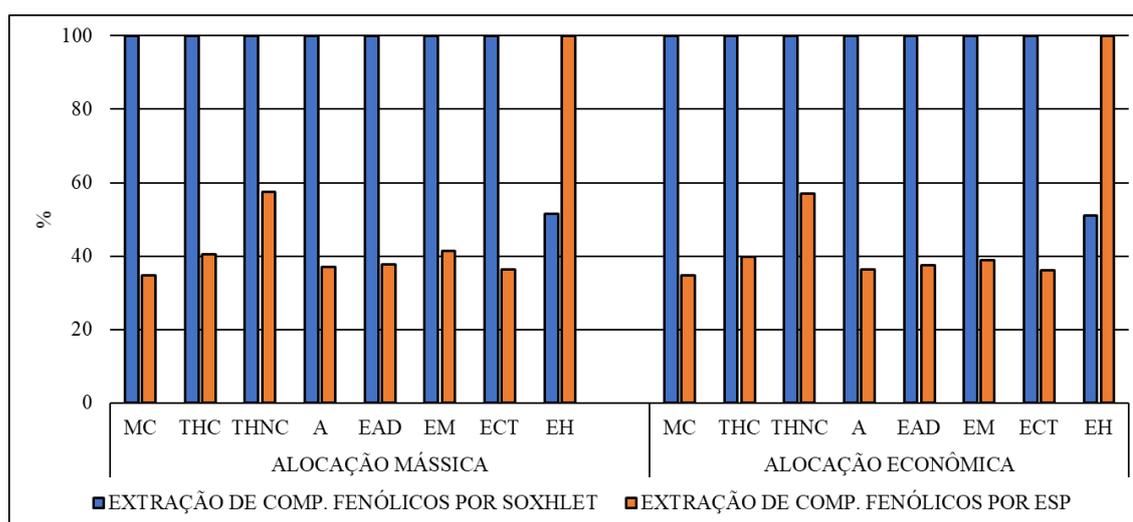
A partir da análise comparativa, foram indicados os processos com menor impacto ambiental. Essas comparações foram realizadas em função dos critérios de alocação mássico e econômico.

No primeiro gráfico, apresenta-se a comparação dos processos de extração de CF, o processo base (Soxhlet) e o alternativo (ESP) (GRÁFICO 3). Pode-se notar que, tanto na alocação mássica quanto na econômica, a extração pelo processo alternativo ESP se mostrou com menor potencial de impacto ambiental em todas as categorias, com uma diferença mínima de 40%, exceto na categoria EH. Nessa categoria, a extração de CF por ESP foi mais impactante com uma diferença de 50%, em ambos processos. A redução do impacto da extração de CF por ESP na maioria das categorias de impacto está associada com a redução

do consumo de energia de 95% (TABELA 2). Contudo na categoria EH a extração por ESP é mais impactante por causa do consumo de água que ocorre nesse processo, enquanto no processo Soxhlet não tem.

A extração de CF da casca da manga por ESP se mostrou ambientalmente menos impactante que a extração por Soxhlet. Segundo Cavalcante (2018), que propôs a extração de CF da casca da manga por ESP, esse processo alternativo apresentou maior eficiência na extração de CF totais que contém mangiferina.

Gráfico 3 - Comparação dos processos de extração do CF (Soxhlet e ESP\*)



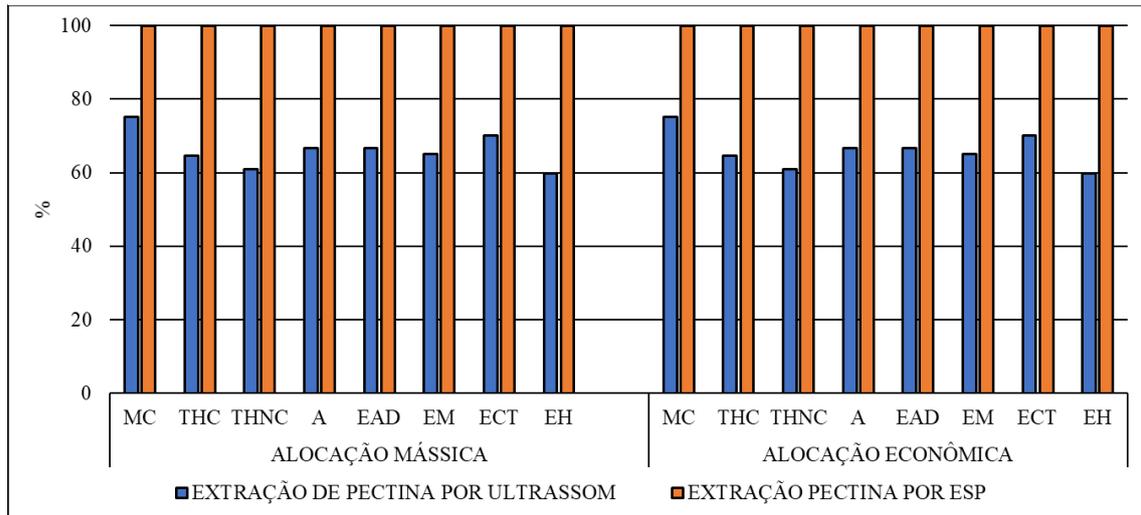
Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

\*ESP – Extração por Solvente Pressurizado.

O gráfico 4 apresenta a comparação entre a extração de pectina por Ultrassom e por ESP. Como pode ser visto, os resultados não variaram em relação ao critério de alocação utilizado, visto que, os resultados não variaram com um critério ou outro.

Em todas as categorias, o maior potencial de impacto foi da extração pelo processo alternativo ESP. O maior potencial da extração por ESP é devido a cadeia produtiva do Etanol, que tem maior demanda nesse método de extração. Contudo, o trabalho de Cavalcante (2018) não evidenciou grandes diferenças na extração de pectina por Ultrassom e por ESP, em termos das propriedades químicas da pectina e rendimento das extrações.

Gráfico 4 - Comparação dos processos de extração da pectina (Ultrassom e ESP\*)

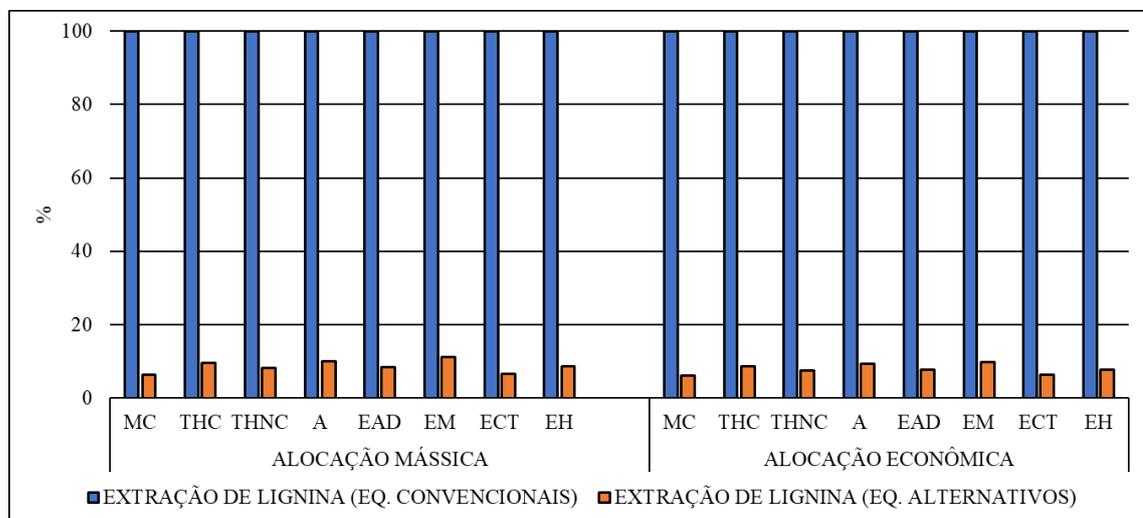


Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

\*ESP – Extração por Solvente Pressurizado.

O gráfico 5 refere-se à comparação entre o processo base de extração de lignina (VERÇOSA, 2016) e o cenário proposto. O cenário foi elaborado a partir da substituição de equipamentos que exercem a mesma função, porém com menor consumo de energia. Pelo gráfico 5 nota-se que o cenário possibilitou a redução da carga ambiental da extração *acetosolv* de lignina em pelo menos 90%, em todas as categorias, e em ambos os critérios de alocação.

Gráfico 5 - Comparação do processo base de extração de lignina com o cenário

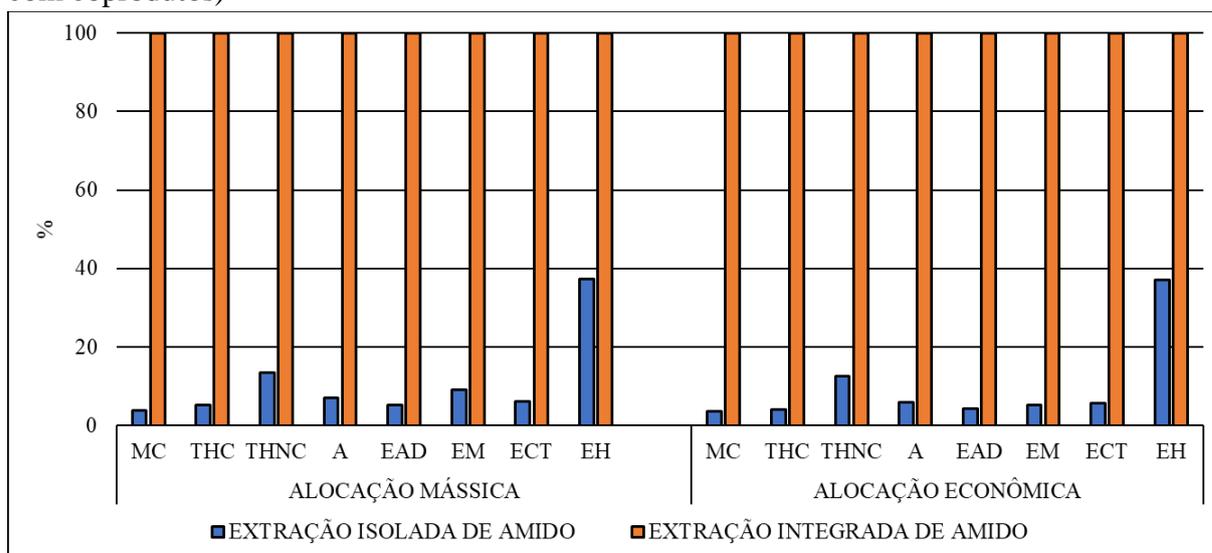


Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

A última comparação tem por objetivo avaliar o impacto da extração de amido pelos processos de extração isolada (CORDEIRO et al., 2014) e integrada (MELO et al.,

2019). O gráfico 6 mostra essa comparação, em que a extração isolada de amido se mostrou com menor potencial de impacto que a extração integrada em todas as categorias e em ambos critérios de alocação. Esse resultado é explicado pela maior demanda de energia da extração integrada. É importante salientar que mesmo que o estudo de Melo et al. (2019) tenha demonstrado que a extração integrada de amido possua viabilidade técnica e bom rendimento, obtendo os outros coprodutos, a análise ambiental (exposta no gráfico acima) mostrou que é mais vantajoso ambientalmente a extração isolada de amido.

Gráfico 6 - Comparação dos processos de extração de amido (apenas amido e amido com coprodutos)



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Como foi possível notar acima, os diferentes critérios de alocação (mássico e econômico) levaram à escolha dos mesmos processos de extração como menos impactante ambientalmente. Apesar de esse trabalho não ter apresentado diferenças nos resultados, considerando o critério mássico ou econômico na alocação, Freire et al. (2017) afirmam que para analisar produtos extraídos a partir de “resíduos” é de grande importância considerar a alocação econômica, visto que, são matérias-primas que estão na transição de um cenário de mercado sem valor monetário (ou resíduo) para um cenário em que começam a ter valor econômico.

### Análise de incerteza na comparação dos processos

A seguir, é apresentado na tabela 3 um resumo dos valores médios dos impactos ambientais dos processos de extração estudados, por categoria de impacto. Mostra-se também

os resultados da análise de incerteza, a qual foi realizada nas avaliações comparativas, utilizando-se ambos os critérios de alocação.

Pode-se notar que, o processo alternativo da extração de CF a partir da casca, e o cenário proposto para a extração de lignina a partir do tegumento apresentaram desempenho ambiental melhor que os processos de referência. Na comparação dos processos de extração de CF e do processo de referência de extração de lignina com o cenário com equipamentos alternativos, a diferença foi significativa em 4 categorias de impacto (MC, A, EAD e EM), tanto na alocação mássica quanto na econômica.

Em contrapartida, os processos alternativos para a extração de pectina a partir da casca, e de amido a partir da amêndoa, não apresentaram melhoria no desempenho ambiental. O que foi confirmado em todas as categorias de impacto na extração de pectina, em ambos critérios de alocação, e em 4 categorias de impacto (MC, A, EAD e EM) na extração de amido, também nos dois critérios de alocação utilizados, em cujas categorias o nível de confiança ficou acima de 95%.

Tabela 3 - Análise de incerteza na comparação dos processos

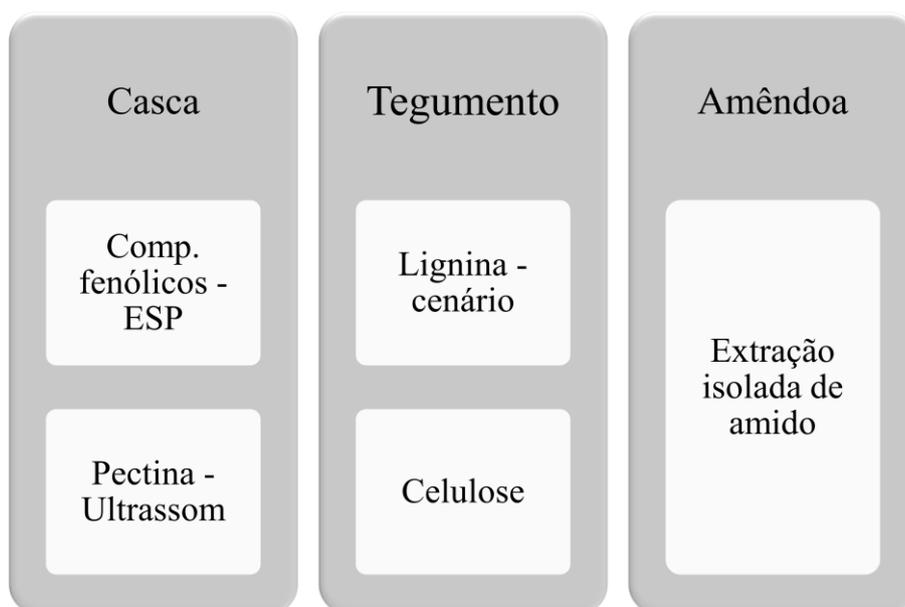
Categorias de impacto	Casca		Análise de erro	Casca		Análise de erro	Tegumento		Análise de erro	Tegumento	Amêndoa		Análise de erro
	CF		A ≥ B	Pectina		A ≤ B	Lignina		A ≥ B	Celulose	Amido		A ≤ B
	Processo base (A)	Processo alternativo (B)		Processo base (A)	Processo alternativo (B)		Processo base (A)	Cenário (B)		Processo único	Processo base (A)	Processo alternativo (B)	
<b>ALOCAÇÃO MÁSSICA</b>													
MC (kg CO2 eq)	0,02	0,01	100	1,03	1,38	100	0,35	0,02	100	0,03	0,02	0,40	100
THC (CTUh)	4,24E-10	1,72E-10	78	5,89E-08	9,13E-08	100	8,78E-09	8,30E-10	75	3,60E-09	7,71E-10	1,47E-08	88
THNC (CTUh)	3,22E-09	1,85E-09	57	1,41E-06	2,32E-06	98	6,56E-08	5,32E-09	52	8,24E-09	1,05E-08	7,82E-08	55
A (mole H+ eq)	0,00007	0,00003	100	0,0092	0,0138	100	0,001	0,0001	100	0,0002	0,0001	0,002	100
EAD (kg P eq)	0,000003	0,000001	100	0,0003	0,00051	100	0,0001	0,00001	100	0,00001	0,000004	0,00008	100
EM (kg N eq)	0,00001	0,00001	100	0,0019	0,00289	100	0,0003	0,00003	100	0,0001	0,00003	0,0004	100
ECT (CTUe)	0,15	0,05	93	10,89	15,53	100	3,04	0,20	94	0,35	0,23	3,69	94
EH (m3)	0,01	0,02	54	19,05	31,84	97	0,24	0,02	57	0,05	0,12	0,32	55

água eq)													
ALOCAÇÃO ECONÔMICA													
<b>MC (kg CO2 eq)</b>	0,02	0,01	100	1,03	1,38	100	0,34	0,02	100	0,04	0,01	0,37	100
<b>THC (CTUh)</b>	4,20E-10	1,68E-10	75	5,89E-08	9,13E-08	100	8,67E-09	7,55E-10	74	3,86E-09	5,71E-10	1,39E-08	86
<b>THNC (CTUh)</b>	3,19E-09	1,82E-09	50	1,41E-06	2,32E-06	97	6,49E-08	4,80E-09	51	1,02E-08	9,14E-09	7,22E-08	52
<b>A (mole H+ eq)</b>	0,00007	0,00003	100	0,0092	0,0138	100	0,0014	0,0001	100	0,0002	0,0001	0,002	100
<b>EAD (kg P eq)</b>	0,000003	0,000001	100	0,0003	0,00051	100	0,0001	0,00001	100	0,00001	0,000003	0,00008	100
<b>EM (kg N eq)</b>	0,00001	0,00001	100	0,0019	0,00289	100	0,0003	0,00003	100	0,0001	0,00002	0,0003	100
<b>ECT (CTUe)</b>	0,15	0,05	94	10,89	15,53	100	3,01	0,19	92	0,45	0,19	3,41	92
<b>EH (m3 água eq)</b>	0,01	0,02	54	19,05	31,84	96	0,24	0,02	56	0,06	0,11	0,29	55
<b>Legenda:</b>		Não houve diferença significativa											
		Houve diferença significativa											

Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Portanto, as rotas de extração dos produtos avaliados com menor impacto ambiental, em ambos critérios de alocação, foram: i) extração de CF por ESP; ii) extração de pectina por Ultrassom; iii) extração *acetosolv* de lignina utilizando equipamentos alternativos; iv) extração *acetosolv* de celulose; v) extração isolada de amido. A figura 23 apresenta o resumo das rotas de menor impacto.

Figura 23 - Processos de extração com menor impacto ambiental



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

### **Análise de incerteza qualitativa**

Gavankar; Anderson e Keller (2015) recomendam que o tratamento técnico da incerteza, como a avaliação pelo método de Monte Carlo, seja complementado com uma abordagem qualitativa sobre os seguintes aspectos de incertezas presentes no estudo: econômico, tecnológico e modelagem empregada para realização da ACV.

O contexto econômico desse estudo considera um cenário comercial hipotético. Considerou-se que as cascas e caroços da manga deixam de ser resíduo e passam a ter valor de mercado. Diferentemente do mercado atual, espera-se que em uma situação de mercado futura as cascas e caroços da manga comecem a ter valor de mercado, devido ao potencial para recuperação de bioprodutos. Essa escolha permitiu que a fronteira do sistema incluísse a produção agrícola da manga e a despolpa. Outra questão foi o contexto tecnológico, uma vez que não existem plantas industriais destinadas à produção dos bioprodutos estudados

(ARORA et al., 2018) foram utilizados dados de laboratório para elaboração dos inventários, os quais podem ter o impacto ambiental superestimado (HETHERINGTON et al., 2014). Giesen et al. (2020) explicam que essa é uma implicação óbvia em ACVs de tecnologias antes da sua implementação comercial.

Quanto ao contexto tecnológico, este influencia diretamente na seleção dos dados primários utilizados no ICV, uma vez que, como explicam Giesen et al. (2020), tecnologias em desenvolvimento, assim como no presente estudo, têm dados disponíveis apenas em nível de laboratório ou projetos pilotos, os quais estão longe de representar o futuro comercial dessas tecnologias em escala operacional. Recomenda-se que os processos analisados sejam modelados em escala de produção piloto ou industrial para representar um futuro hipotético. Assim, podem ser feitas comparações entre uma tecnologia em desenvolvimento e uma já estabelecida, para a qual existem dados em escala industrial, desde que as premissas da modelagem dos dados sejam apresentadas.

Outro fator responsável por aumentar as incertezas na modelagem em estudos de ACV é a alocação. No entanto, como este procedimento não pôde ser evitado, visto que, os processos estudados geravam, em sua maioria, mais de um bioproduto, realizou-se uma análise de sensibilidade dos resultados quanto ao procedimento de alocação, utilizando critérios mássicos e econômicos. Assim, o leitor pode notar a influência dessa escolha metodológica nos resultados.

Para a alocação econômica, o contexto econômico gerou incerteza quanto aos valores comerciais dos coprodutos (casca e caroço) da polpação de manga e dos bioprodutos do processamento da casca e caroço de manga (pectina, compostos fenólicos, lignina, celulose, amido e gordura).

Outro aspecto da modelagem que resulta em incertezas é o uso de base de dados internacionais. Sabe-se que a ACV é uma ferramenta que necessita da utilização de programas computacionais e bancos de dados para otimizar tempo e custo na realização de estudos. Porém, no Brasil são limitados os bancos de dados nacionais, fazendo com que sejam usados bases internacionais (SAADE et al., 2019). De fato, nesse estudo apenas dois inventários utilizados da base *ecoinvent* foram desenvolvidos para o Brasil (produção de etanol e de energia elétrica). Essa realidade pode fazer com que estudos de ACV localizados no Brasil sejam distorcidos, dificultando a tomada de decisão.

Outro fator relacionado à base de dados é a ausência de processos suficientes e atualizados (MONI et al., 2020). No presente estudo, essa limitação foi contornada por meio

da utilização de uma *proxy*, um processo genérico que pode substituir o processo desejado, para o inventário de produção do metabissulfito de sódio.

Essa questão influencia diretamente nos dados secundários usados na montagem do inventário de processos à montante do analisado. Wernet et al. (2016) explicam que o uso de dados secundários oriundos de bases de dados é extremamente relevante, representado cerca de 99% de todos os processos unitários de um sistema de produto, ocasionalmente esse número pode cair para 95%. Nota-se que os dados secundários impactam consideravelmente nos resultados de um estudo de ACV. Giesen et al. (2020) ressaltam que o desafio nessa etapa é a disponibilização de banco de dados de processos secundários, como o *ecoinvent*, que geralmente são considerados como representativos da situação atual, mas que ainda apresentam certa limitação dos inventários secundários.

Já para a avaliação de impactos, Giesen et al. (2020) salienta que os potenciais impactos ambientais de tecnologias em desenvolvimento podem não ser automaticamente abrangidos pelas categorias de impacto existentes que são comumente usadas, visto que, as propriedades das novas tecnologias ainda não são bem conhecidas. Contudo, os bioprodutos analisados no presente estudo não são responsáveis por impactos ambientais desconhecidos, uma vez que são produtos já bem conhecidos, diferindo apenas a matéria-prima (coprodutos da manga).

Outra questão levantada por Giesen et al. (2020) foi a grande limitação e até ausência de fatores de caracterização para avaliação de impactos. Essa problemática foi encontrada nesse trabalho na emissão do óxido sulfúrico, devido ao uso de metabissulfito de sódio, para o qual não havia fator de caracterização na categoria ECT. Assim, para contornar essa situação, fez-se a estimativa da reação dessa substância com a água que resulta em ácido sulfúrico.

Finalmente, na interpretação, deve-se ressaltar que os resultados obtidos em ACVs de tecnologias em desenvolvimento não são um resultado final, mas uma possível implicação que esta tecnologia pode ter a partir de um conjunto específico de premissas, fornecendo uma estrutura para debates e orientação para a pesquisa e desenvolvimento com as partes interessadas. Isto decorre dos maiores níveis de incerteza que estudos de novas tecnologias lidam, ressaltando a importância da comunicação destas no estudo. Nesse contexto, o pesquisador não deve esperar a resposta perfeita e correta, mas reunir informações suficientes para investigar diferentes rotas de desenvolvimento, encoraja-se o uso de cenários (GIESEN et al., 2020).

### ***3.3.3 Análise dos processos críticos***

Essa seção é dedicada à identificação do processo mais impactante no ciclo de vida de cada bioproduto. Inicialmente, avaliam-se os processos agrícola, despolpa, e extração laboratorial do bioproduto. Em seguida, avaliam-se as etapas dos processos de extração para identificar pontos críticos.

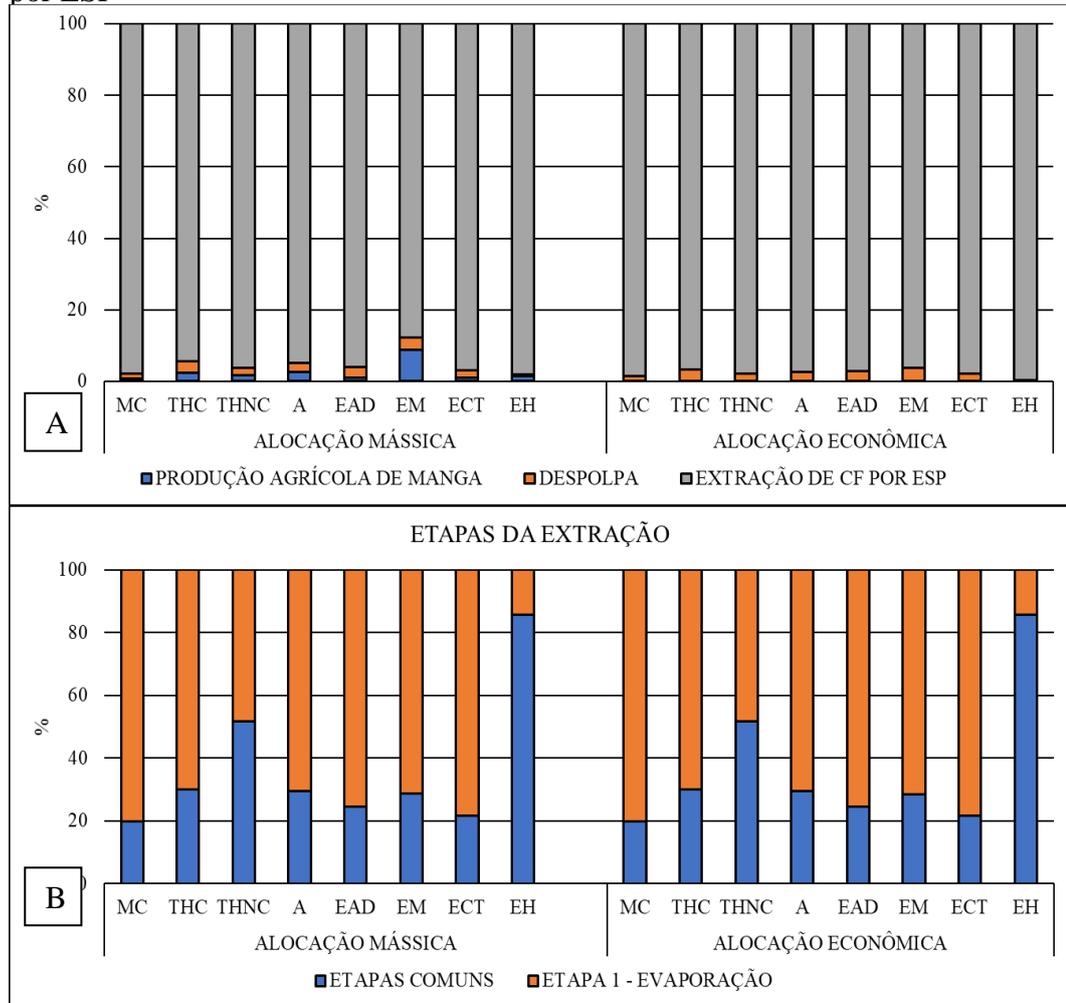
Nos gráficos 8 a 12, mostram-se as cargas ambientais dos processos menos impactantes (identificados no item anterior 3.3.2) por categoria de impacto. Em seguida, são detalhados os impactos das etapas que compõem os processos de extração em laboratório.

O primeiro processo analisado foi a extração de CF por ESP. O gráfico 7A mostra que o processo de extração laboratorial é o principal responsável pela carga ambiental em todas as categorias. Dentro do processo de extração, a etapa de evaporação do solvente (etapa 1) se mostrou com maior potencial de impacto na maioria das categorias, devido ao consumo de energia elétrica. Apenas na categoria EH que as etapas comuns ao processo de extração de CF e de pectina (FIGURA 14) foram mais relevantes. Entre as etapas comuns, a de extração na célula extratora foi a que mais contribuiu para o impacto ambiental, devido à produção do etanol que é usado como solvente (GRÁFICO 7B).

O consumo de energia, principal responsável pelo impacto desse método, em geral se destaca em processos de laboratório como um dos principais elementos responsáveis pelos impactos ambientais, como será explicado com mais detalhes abaixo. Sendo assim, é indicado que em processos de laboratório seja avaliado outros aspectos (além da energia) que mais contribuam para os impactos ambientais (HETHERINGTON et al., 2013). Ao retirar o consumo de energia do processo de extração de CF por ESP, o uso do etanol como solvente na extração se destaca em todas as categorias de impacto. Entretanto, como explica Souza et al. (2018), o uso do solvente na extração por ESP já é reduzido devido às elevadas temperatura e pressão que essa técnica permite aplicar na obtenção do extrato. A temperatura elevada melhora a solubilização, aumentando as taxas de difusão. Já a alta pressão possibilita trabalhar com o solvente acima do seu ponto de ebulição, o que acelera o processo de extração.

Gráfico 7- Análise dos processos críticos no ciclo de vida dos CF extraídos

por ESP



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

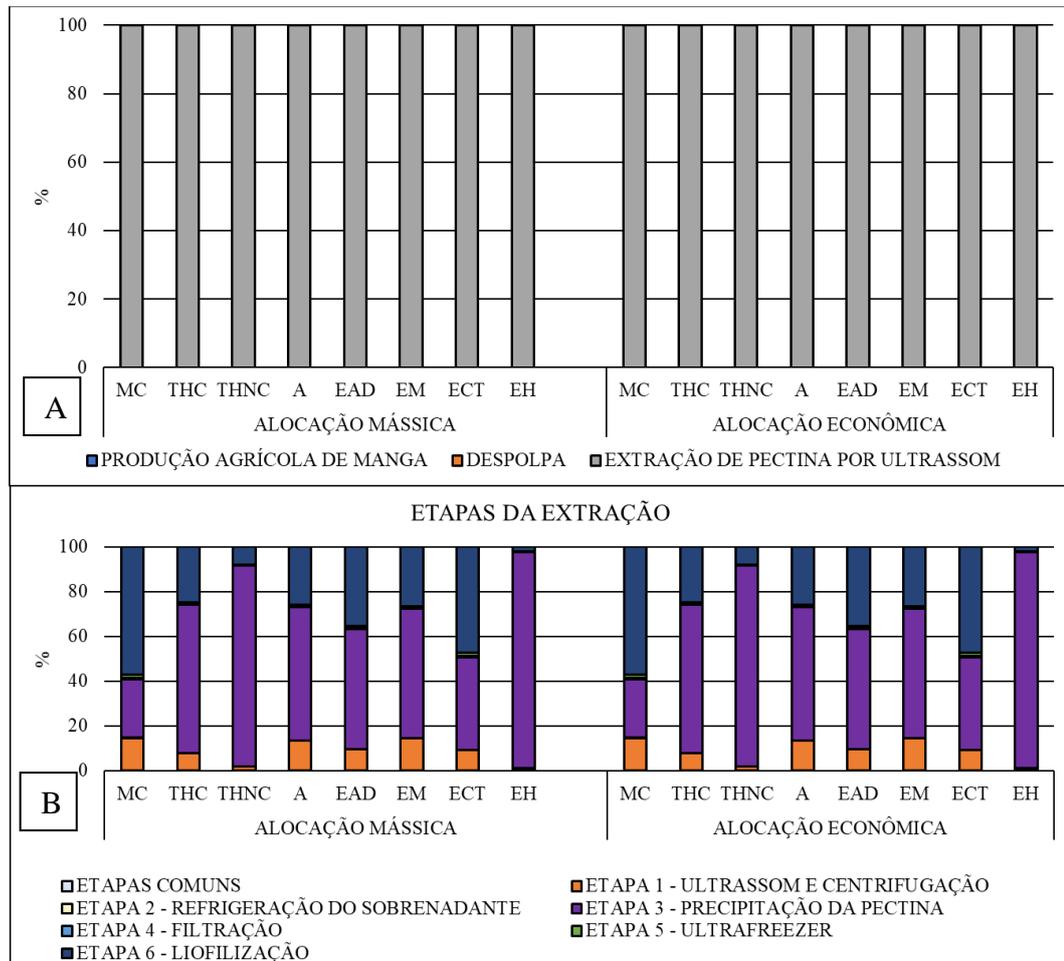
Segundo EPE (2017), a produção de energia elétrica no Brasil é caracterizada pelo conjunto dos mais variados tipos de fontes geradoras, em que cada fonte é responsável por impactos ambientais potenciais específicos. A energia oriunda das hidroelétricas é responsável pelos impactos potenciais nas categorias MC e DH, devido a construção dos seus reservatórios. Já a produção de energia a partir de derivados do petróleo responde pelos impactos potenciais na categoria A por causa da fase de prospecção do petróleo que gera resíduos de gás natural. Enquanto o carvão mineral como fonte de geração de energia tem potencial para impactar nas categorias THC e EAD em decorrência dos rejeitos da mineração do carvão. Outra fonte energética identificada como potencialmente impactante foi a biomassa na categoria THNC devido a fase de produção da cana-de-açúcar. Ao passo que a cogeração de calor e energia impacta potencialmente na categoria EM em razão da obtenção

das lascas de madeira. Não obstante, a transmissão de energia também é potencialmente impactante, mas na categoria ECT em virtude do tratamento de resíduos oxidativos.

Hetherington et al. (2014) ressaltam que o consumo de energia elétrica em processos em escala laboratorial apresenta impactos ambientais significativos devido a produção que frequentemente acontece em lotes de baixo volume. Por outro lado, esses autores avaliam que os impactos identificados em ACVs de processos em escala laboratorial podem estar sendo superestimados, visto que, escalas menores não expressam o nível de complexidade e os ganhos com rendimento e eficiência do processo em escalas comerciais ou industriais. Avaliando outros trabalhos que estudaram processos em escala laboratorial, observa-se que a energia realmente aparece como maior protagonista na avaliação de impactos (SILVA et al., 2020; FREIRE et al., 2017; NASCIMENTO et al., 2016; SAMPAIO et al., 2017).

O próximo processo analisado foi a extração de pectina por Ultrassom. Assim como a extração de CF por ESP, o principal responsável pela carga ambiental foi o processo de extração laboratorial com 100% em todas as categorias (GRÁFICO 8A). Pelo gráfico 8B nota-se que a etapa 6 (Liofilização) apresentou maior potencial de impacto nas categorias MC e ECT. O principal agente dessa etapa é a produção da energia elétrica requerida. Nas demais categorias de impacto (THC, THNC, A, EAD, EM e EH), a etapa 3 (precipitação da pectina) teve o maior potencial de impacto. O elemento da etapa 3 responsável pelos impactos ambientais é a produção do etanol que é requerido nessa fase, devido aos impactos do cultivo de cana-de-açúcar que é utilizada em sua produção. Quando o consumo de energia é desconsiderado, a produção de etanol se torna mais impactante em todas as categorias. Contudo, A quantidade de etanol utilizado nessa etapa foi a quantidade estabelecida na literatura científica, que é uma solução na proporção 1:2 de solução extratora e álcool, respectivamente (SOUZA et al., 2018; CAVALCANTE, 2018).

Gráfico 8 - Análise dos processos no ciclo de vida da pectina extraída por Ultrassom



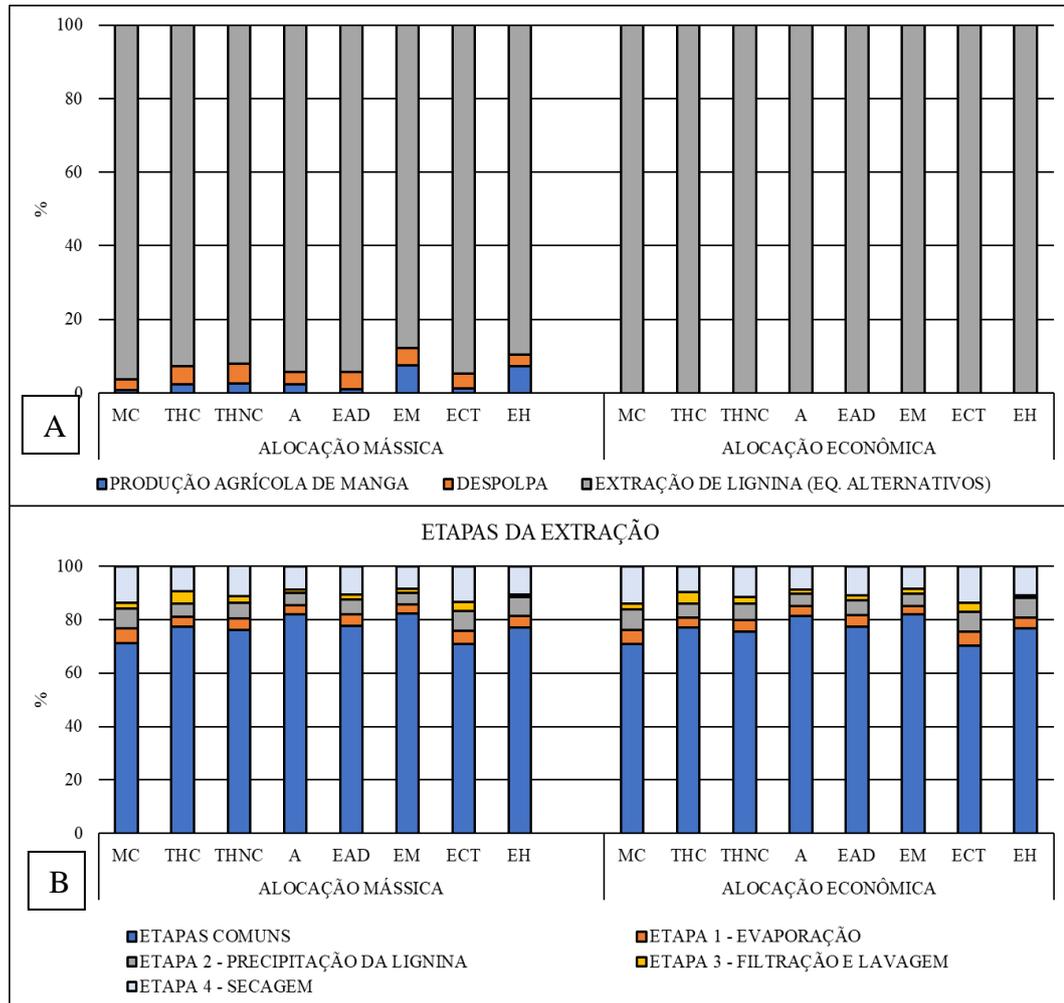
Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Para a lignina, analisou-se o processo de extração *acetosolv* proposto por Verçosa (2016), mas otimizado pela substituição de equipamentos com alto consumo de energia. Ao analisar o gráfico 9A, nota-se que o processo de extração foi o principal responsável pelo impacto total em todas as categorias e em ambos critérios de alocação. O gráfico 9B mostra que dentro do processo de extração, as etapas comuns ao processo de extração de lignina e celulose (FIGURA 14) tiveram maior influência na carga ambiental do processo analisado, em todas as categorias. Entre as etapas comuns, a etapa de refluxo, em que é feita a polpa *acetosolv*, foi a mais impactante devido à cadeia produtiva do ácido acético que é utilizado.

Como nesse cenário o consumo de energia foi bastante reduzido com a substituição de equipamentos, o principal aspecto responsável pelo impacto ambiental foi o ácido acético. No entanto, de acordo com Verçosa (2016), a extração de lignina pelo método *acetosolv* surgiu como uma alternativa mais vantajosa ambientalmente, em comparação a outros métodos já estabelecidos, *kraft* e sulfito. Isto é, a extração *acetosolv* tem como

principais vantagens a não exigência de enxofre durante a polpação, maior facilidade na recuperação do solvente, uso de menores quantidades de água, energia e reagentes. Além disso, o método *acetosolv* tem grande eficiência na remoção de lignina e hemicelulose sem degradar significativamente a celulose.

Gráfico 9 - Análise dos processos no ciclo de vida da lignina extraída pelo cenário alternativo



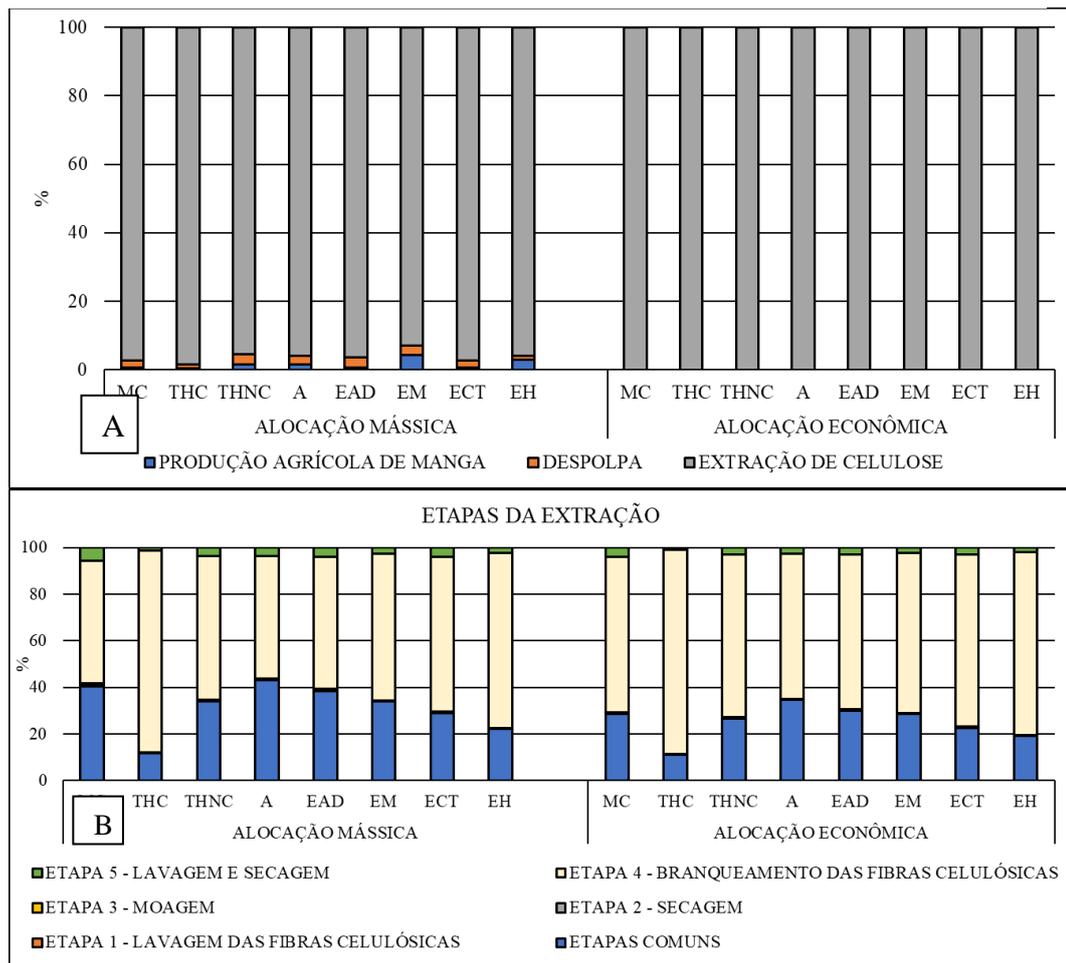
Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Com relação ao perfil de impactos ambientais da extração de celulose, no gráfico 10A mostra-se que o processo de extração em laboratório foi o mais impactante com pelo menos 93%. Dentre as etapas de extração, o gráfico 10B mostra que, na maioria das categorias, a etapa com maior impacto foi o branqueamento das fibras. Isso ocorre devido à produção de energia requerida e dos componentes da solução alvejante, majoritariamente o peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ).

De acordo com Souza (2018), uma alternativa ao processo *acetosolv* é o *etanosolv*

(que utiliza etanol como solvente). Entretanto, a etapa de branqueamento das fibras celulósicas após um pré-tratamento *acetosolv* apresenta menor potencial de impacto ambiental quando comparado com a etapa de branqueamento após um pré-tratamento *etanosolv*. Isso acontece porque a polpação *etanosolv* é mais branda e, portanto, menos eficiente na remoção de lignina e hemicelulose em relação a polpação *acetosolv*, exigindo que o branqueamento aconteça sob condições mais severas (mais tempo e reagentes).

Gráfico 10 - Análise dos processos no ciclo de vida da celulose



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

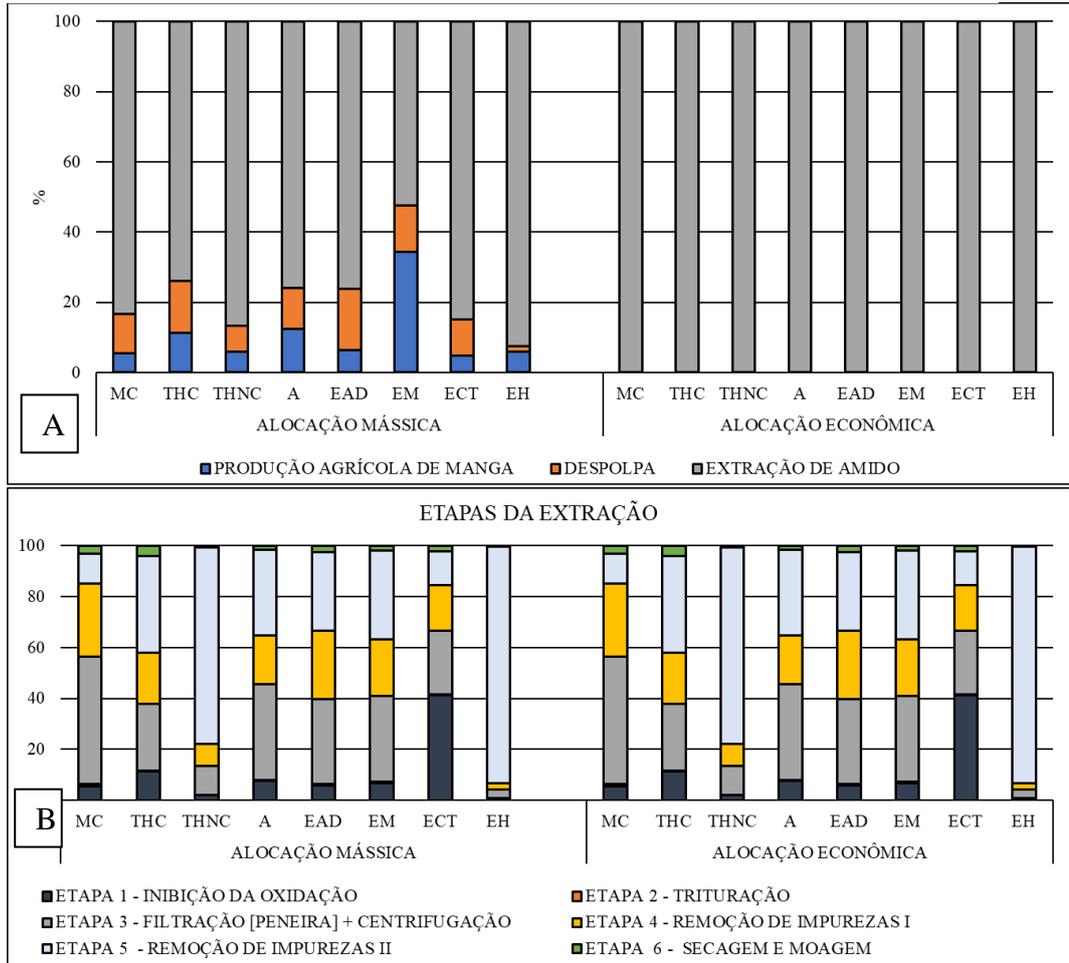
Por fim, teve-se a análise do processo de extração isolada de amido da amêndoa. O gráfico 11A mostra que o processo de extração laboratorial também se mostrou mais impactante em todas as categorias. Contudo, com alocação mássica as etapas de produção agrícola e despolpa tiveram destaque no perfil de impacto, isso é explicado pelos maiores percentuais de alocação mássicos. Os impactos da produção agrícola de manga estão majoritariamente associados com o uso e emissão de fertilizantes nitrogenados (CARNEIRO

et al., 2019), enquanto o impacto da despolpa relaciona-se à produção do hipoclorito de sódio usado na sanitização das mangas.

O gráfico 11B mostra o perfil de impactos ambientais da extração de amido, nota-se que as etapas mais impactantes foram filtração e centrifugação (MC: 50%, A: 38% e EAD: 33%), remoção de impurezas II (THC: 38%, THNC: 77%, EM: 35% e EH: 93%) e inibição da oxidação (EM: 41%). Na etapa de filtração e centrifugação o impacto é decorrente do consumo de energia elétrica. A etapa de remoção das impurezas II se destacou devido a cadeia produtiva do etanol. E na etapa de inibição da oxidação o impacto é devido às emissões de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) decorrente do uso de metabissulfito de sódio.

O etanol e o metabissulfito de sódio se destacaram como os principais aspectos responsáveis pelo impacto ambiental na extração de amido. Para o etanol, a quantidade utilizada está de acordo com o reportado na literatura que é uma proporção de 1:2 de solução com amido e etanol, respectivamente (SILVA et al., 2019 e OLIVEIRA et al., 2018). Contudo, o uso do metabissulfito de sódio pode ser otimizado, segundo os trabalhos de Silva et al. (2019) e Oliveira et al. (2018), que reduziram a concentração da solução desse químico de 0,5% (CORDEIRO et al., 2014) para 0,2%. Fez-se a análise da redução de 0,3% no consumo de metabissulfito de sódio e notou-se que foi possível diminuir o impacto ambiental da extração de amido em até 20% na categoria ecotoxicidade.

Gráfico 11 - Análise dos processos no ciclo de vida do amido extraído de acordo com Cordeiro et al. (2014)



### 3.4 Conclusão

Neste capítulo foram avaliados ambientalmente diferentes processos de extração dos bioprodutos que podem ser obtidos dos coprodutos da manga (casca, tegumento e amêndoa). Para a extração de CF, foram avaliados os processos de extração por Soxhlet e por ESP, em que esta última resultou em um menor impacto ambiental. A extração de pectina foi avaliada pelos processos de extração por Ultrassom e por ESP, sendo o primeiro menos impactante. Com relação a extração de lignina, o cenário de melhoria apresentou uma redução de pelo menos 90% em todas as categorias de impacto. Por fim, na extração de amido o processo de extração isolada desse composto teve melhor desempenho ambiental.

Os resultados obtidos a partir da alocação mássica e da econômica não apresentaram grandes diferenças, apontando resultados próximos tanto nas avaliações comparativas quanto nas análises dos processos menos impactantes.

Na análise dos processos críticos dos processos menos impactantes ambientalmente, o principal elemento responsável pela carga ambiental foi a produção da energia elétrica que é requerida. Espera-se que em escala industrial esse aspecto ambiental seja reduzido.

## **4 ESCOLHA DO CENÁRIO DE BIORREFINARIA COM MENOR IMPACTO AMBIENTAL**

### **4.1 Introdução**

Biorrefinarias possibilitam a utilização de forma eficiente de recursos limitados de determinada biomassa, de resíduos agrícolas e agroindustriais (palhas, bagaço, serragens, etc.) para produção de biocombustíveis e/ou bioprodutos e alimentos. Assim, é possível promover uma diversificação de produtos, impactando positivamente diversas cadeias produtivas e repercutindo em benefícios para a sociedade (PECK et al., 2009).

Ultimamente, as biorrefinarias estão sendo aperfeiçoadas para a criação de unidades integradas, ou seja, com múltiplos processos conectados. Esse aperfeiçoamento é considerado um caminho para implantação de sistemas de produção mais sustentáveis, ou mesmo um novo paradigma da produção (PECK et al., 2009). Contudo, o aproveitamento completo da biomassa por meio de uma biorrefinaria acarreta em um maior número de processos, produtos, matérias-primas e/ou maior grau de integração nos processos.

Quanto maior for a complexidade de uma biorrefinaria, com maiores avanços no aproveitamento da biomassa, de seus resíduos e diversificação de produtos; mais complexa tende a ser sua estrutura (OLIVEIRA, 2016). Dessa forma, é importante investigar, em termos ambientais, se o aumento da complexidade de uma biorrefinaria acarreta em mais benefícios, devido ao maior aproveitamento da biomassa, ou se traz mais impactos negativos ao meio ambiente, por causa da maior estrutura requerida para a biorrefinaria.

Banerjee et al. (2017), Arora et al. (2018) e Tesfaye et al. (2018) propuseram modelos de biorrefinaria para os coprodutos da manga. O primeiro analisou a geração de receitas a partir dos coprodutos da manga, mas não apresentou análise de custos operacionais. Já os estudos de Arora et al. (2018) e Tesfaye et al. (2018) apresentaram uma análise técnico-econômica completa para os modelos de biorrefinaria propostos. Contudo, não é considerado avaliação de impacto ambiental nesses trabalhos.

Esse capítulo tem por objetivo analisar diferentes combinações de bioprodutos para uma biorrefinaria de manga, através da elaboração de cenários, para identificar os de menor potencial de impacto ambiental.

## 4.2 Metodologia

Para avaliar ambientalmente a biorrefinaria dos coprodutos da manga a partir de cenários alternativos utilizou-se a ACV, seguindo as normas NBR ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura; e NBR ISO 14044 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações.

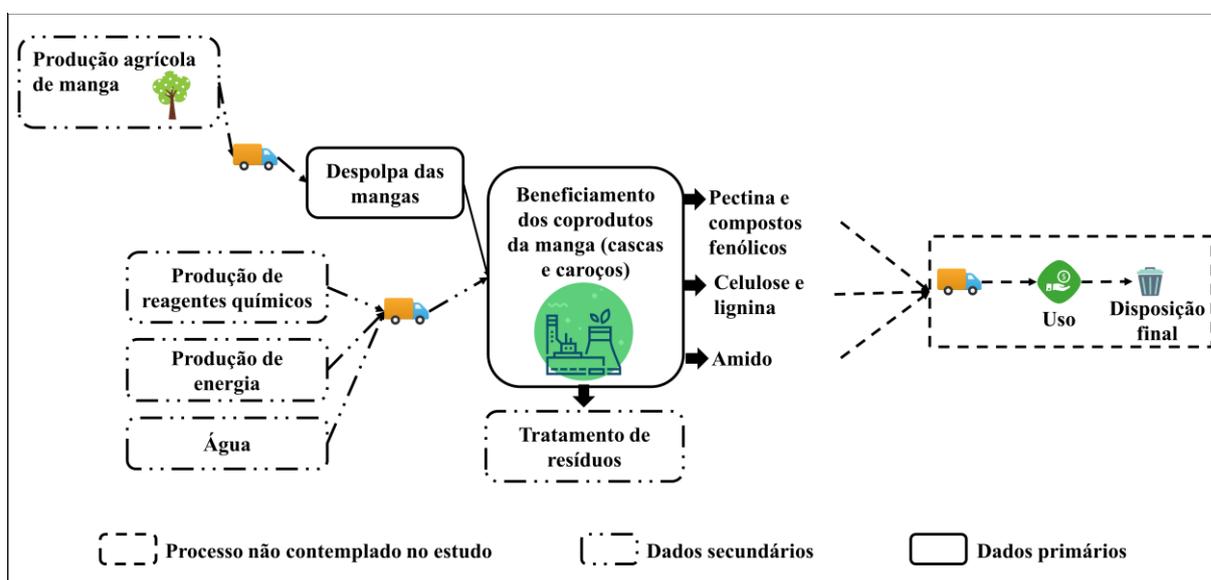
Neste capítulo, foram considerados os processos de extração dos bioprodutos a partir dos coprodutos da manga com menor impacto ambiental, identificados no capítulo anterior (capítulo 3), avaliando-se os impactos ambientais em um cenário em que se produz todos esses bioprodutos e de outros cenários com produção parcial de bioprodutos. Buscou-se identificar o cenário com menor impacto ambiental.

Para que a avaliação ambiental e a comparação dos cenários da biorrefinaria dos coprodutos da manga pudessem ser realizadas, estas foram feitas em função das receitas que podem ser obtidas com os bioprodutos a partir dos diferentes cenários.

### 4.2.1 Sistema de produto

O escopo desse estudo foi do berço ao portão, considerando-se os processos de produção agrícola e transporte de manga, produção e transporte de insumos (reagentes químicos, energia e água), despolpa da manga, extração dos bioprodutos a partir da casca e do caroço de manga, e tratamento de resíduos dos processos de extração (FIGURA 24).

Figura 24 - Sistema de produto da biorrefinaria da manga



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

### 4.2.2 Inventário

Os dados primários foram coletados nos laboratórios e Planta Piloto da Embrapa Agroindústria Tropical no período entre julho de 2018 e janeiro de 2019 (TABELA 3). Além desses dados, para montar o inventário desse capítulo, foi necessário ainda informações sobre os valores de mercado dos coprodutos da manga e dos bioprodutos estudados, visto que, a avaliação ambiental foi realizada em função da receita que pode ser obtida a partir das combinações dos bioprodutos. As informações sobre os valores de mercado foram obtidas no *sigma aldrich*.

Já os dados secundários foram coletados na base de dados *ecoinvent 3.1* (produção e transporte dos insumos, e tratamento de resíduos) (QUADRO 3) e no trabalho de Carneiro et al. (2019) (produção agrícola e transporte de manga).

### 4.2.3 Unidade funcional

Adotou-se como unidade funcional 1 US\$ de receita para cada cenário de biorefinaria, obtida considerando 1 mês de produção (QUADRO 5). Assim, as entradas e saídas de cada processo e os impactos ambientais foram calculados relativos à receita total obtida em um mês de produção que é diferente em cada cenário. A análise feita baseada nessa unidade funcional permite investigar os processos de extração propostos, de forma separada ou integrada, com os impactos gerados relativizados à receita total obtida com a comercialização dos bioprodutos.

Quadro 5 – Unidade funcional para cada cenário avaliado.

Cenários avaliados	Unidade funcional
Pectina e CF; celulose e lignina; e amido	1 US\$
Amido; e celulose e lignina	1 US\$
Amido; e pectina e CF	1 US\$
Celulose e lignina; e pectina e CF	1 US\$
Celulose e lignina	1 US\$
Amido	1 US\$

Pectina e CF	1 US\$
--------------	--------

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

#### 4.2.4 Análise de cenários

Os cenários foram criados a partir de diferentes combinações para a concepção de uma biorrefinaria da manga (QUADRO 6). O primeiro cenário é o mais completo e consistiu em integrar a extração de todos os bioprodutos que podem ser obtidos dos coprodutos da manga e que já contam com processos de extração (Pectina, CF, celulose, lignina e amido). Enquanto os outros cenários foram estabelecidos, considerando diferentes combinações desses bioprodutos e que o coproduto da despolpa (casca, tegumento ou amêndoa) que não foi incluído no cenário, foi tratado como resíduo, sendo enviado para uma unidade de compostagem.

Quadro 6 – Cenários da biorrefinaria de manga

Cenários*	Bioprodutos	Processos de obtenção	Resíduo para compostagem*
C + T + A	Pectina e CF; celulose e lignina; e amido	Ultrassom e ESP; <i>Acetosolv</i> com eq. alternativos; Extração isolada	-
A + T	Amido; e celulose e lignina	Extração isolada; <i>Acetosolv</i> com eq. alternativos	C
A + C	Amido; e pectina e CF	Extração isolada; Ultrassom e ESP	T
T + C	Celulose e lignina; e pectina e CF	<i>Acetosolv</i> com eq. alternativos; Ultrassom e ESP	A
T	Celulose e lignina	<i>Acetosolv</i> com eq. alternativos	C + A
A	Amido	Extração isolada	C + T
C	Pectina e CF	Ultrassom e ESP	T + A

\*C = Casca; T = Tegumento; e A = Amêndoa.

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

#### 4.2.5 Avaliação de impactos e análise de incerteza

Como no capítulo 3, os impactos ambientais nas categorias mudanças climáticas (MC), acidificação (A), eutrofização de água doce (EAD), eutrofização marinha (EM), ecotoxicidade (ECT), toxicidade humana cancerígena (THC) e toxicidade humana não

cancerígena (THNC) foram analisados pelo método ILCD *Midpoint* 2011 (EUROPEAN COMMISSION, 2011). O impacto na escassez hídrica (EH) foi avaliado pelo método AWARE (BOULAY et al., 2018). Utilizou-se o *software* SimaPro versão 9.0.0.35.

Após o cálculo dos impactos ambientais também foi feita a análise de incerteza, pelo método de Monte Carlo, nas combinações para a concepção de uma biorrefinaria para identificar a incerteza absoluta de cada combinação. Para gerar o desvio-padrão requerido pelo método de Monte Carlo utilizou-se a Matriz Pedigree (ALTHAUS, 2004). Considerou-se que todas as variáveis seguem distribuição log-normal de probabilidade (GOEDKOOOP et al., 2008).

### **4.3 Resultados e discussão**

A tabela 4 detalha informações dos cenários propostos para a biorrefinaria da manga, as quais foram divididas entre os bioprodutos e os resíduos da manga que não foram aproveitados (casca, tegumento e amêndoa). Para os bioprodutos apresenta-se a quantidade, o valor unitário e a receita dos mesmos. Já para os resíduos da manga pode-se ver a quantidade e a perda (em termos monetários) com esse resíduo, isto é, a receita que deixa de ser obtida quando o resíduo não é aproveitado.

No primeiro cenário (C + A + T), há a extração de todos os bioprodutos dos coprodutos da manga, fazendo com que se obtenha a máxima receita e nenhuma geração de resíduos. Esse cenário representa o ideal de uma economia circular, uma vez que há o aproveitamento total de uma biomassa e nenhum desperdício. A segunda maior receita foi obtida ao utilizar amêndoa e casca para extração de amido, pectina e compostos fenólicos. Esse cenário, gerou a menor perda com o resíduo (tegumento) encaminhado para compostagem. Em consonância, o cenário com a menor receita e maiores perdas foi o que aproveitou apenas o tegumento para extração de lignina e celulose. Nota-se ainda que quando a amêndoa não é aproveitada há a maior geração de resíduos, visto que, o beneficiamento desse coproduto demanda grande quantidade de amêndoa.

Tabela 4 – Receitas e perdas de cada cenário da biorrefinaria de manga para 1 mês de produção.

Cenário	Bioprodutos	Qtde (g)	Valor unitário (US\$/g)	Receita (US\$)	Resíduo da manga	Qtde resíduo (g)	Perda com o resíduo (US\$)
C + A + T	Pectina (Ultrassom)	0,45	0,98	0,44	-	-	-
	CF (ESP)	175,05	0,75	131			
	Celulose	54,75	0,56	31			
	Lignina (Cenário)	35,71	0,53	19			
	Amido	690,79	0,26	178			
	<b>Total</b>			359			
A + T	Amido	690,79	0,26	178	C (pectina e CF)	283	132
	Celulose	54,75	0,56	31			
	Lignina (Cenário)	35,71	0,53	19			
	<b>Total</b>			228			
A + C	Amido	690,79	0,26	178	T (Celulose e Lignina)	361	49
	Pectina (Ultrassom)	0,45	0,98	0,44			
	CF (ESP)	175,05	0,75	131			
	<b>Total</b>			310			
T + C	Celulose	54,75	0,56	31	A (Amido)	10762	178
	Lignina (Cenário)	35,71	0,53	19			
	Pectina (Ultrassom)	0,45	0,98	0,44			
	CF (ESP)	175,05	0,75	131			
	<b>Total</b>			181			
C	Pectina (Ultrassom)	0,45	0,98	0,44	A + T (Amido, Celulose e Lignina)	11123	228
	CF (ESP)	175,05	0,75	131			
	<b>Total</b>			132			
T	Celulose	54,75	0,56	31	A + C (Amido, CF, Pectina)	11044	310
	Lignina (Cenário)	35,71	0,53	19			
	<b>Total</b>			49			
A	Amido	690,79	0,26	178	C + T (Pectina, CF, Celulose e Lignina)	644	182
	<b>Total</b>			178			

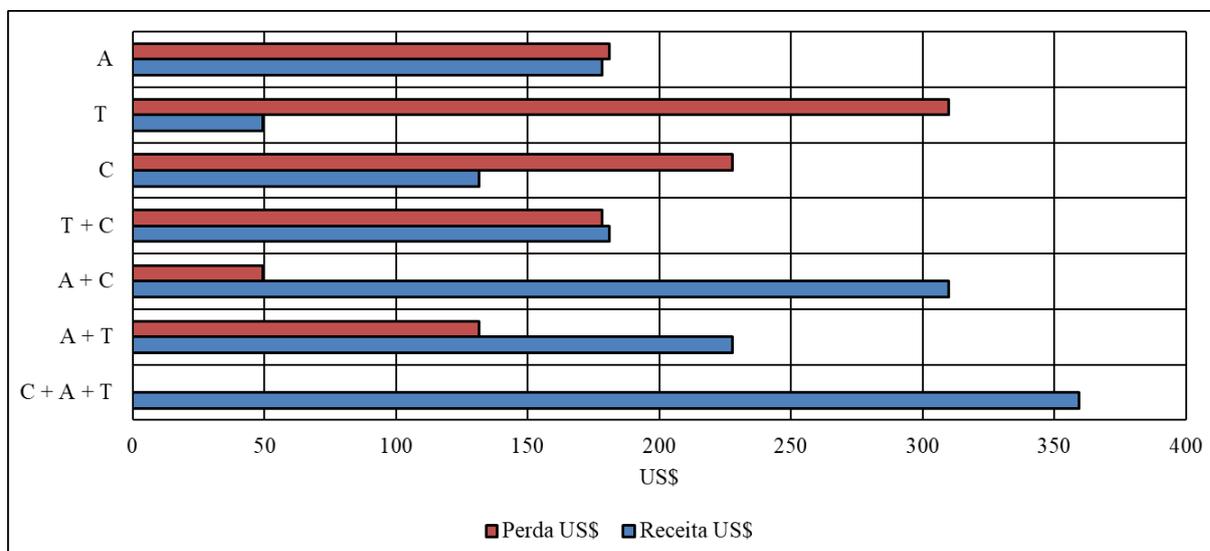
\*C = Casca; T = Tegumento; e A = Amêndoa.

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O gráfico 12 ressalta melhor a relação entre as receitas e as perdas com os resíduos da manga de cada cenário. Percebe-se que os cenários que combinam pelo menos

dois coprodutos têm receita maior que a perda com os resíduos da manga, sendo a maior diferença em A+C e a menor em T+C. Já àqueles que aproveitam apenas um coproduto têm perdas maiores que receitas, onde a maior diferença foi em T e a menor em A.

Gráfico 12 – Receitas e perdas de cada cenário da biorrefinaria de manga



C = Casca; T = Tegumento; e A = Amêndoa.

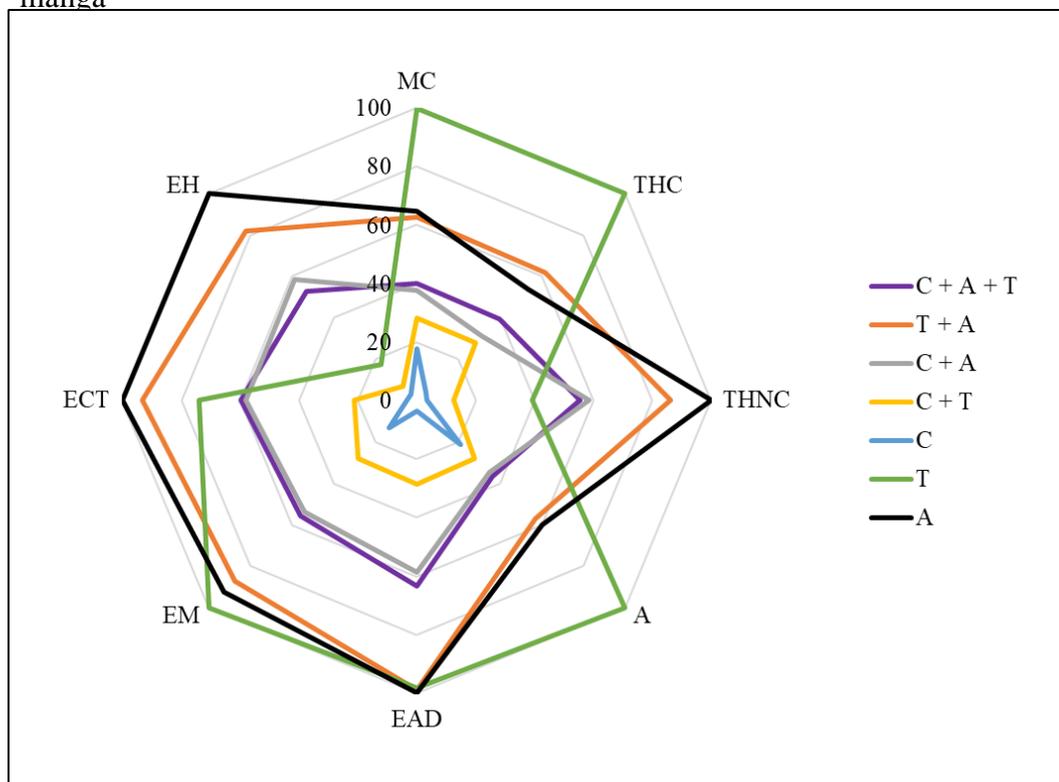
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O gráfico 13 mostra a avaliação ambiental comparativa dos cenários da biorrefinaria da manga em um gráfico de radar, no qual, quanto mais afastado do centro, maior é o impacto. Assim, os cenários T e A apresentaram os piores desempenhos ambientais em todas as categorias de impacto, mostrando que o beneficiamento apenas do tegumento ou da amêndoa (extração de amido) são os menos vantajosos ambientalmente. Já os melhores desempenhos ambientais foram dos cenários C e C + T, em todas as categorias, ou seja, o beneficiamento apenas da casca ou da casca juntamente com o tegumento se mostraram menos agressivos ao meio ambiente e possibilitam ainda a recuperação de combinações de bioprodutos. O cenário mais completo (C+A+T) teve resultados intermediários, variando sua contribuição entre 40 a 60% nas categorias de impacto. Apesar desse cenário possibilitar o aproveitamento total da manga, ele não apresenta a menor carga ambiental devido à maior necessidade de processos, energia e insumos, ou seja, sua maior complexidade para se obter a receita de 1 US dólar.

O resultado dessa avaliação comparativa indica que o impacto ambiental ao aumentar o nível de complexidade da biorrefinaria, incluindo o beneficiamento da amêndoa, não é compensado pelos ganhos com a receita. Isto é, em todos os cenários em que houve o beneficiamento da amêndoa houve também os maiores impactos ambientais (A, T+A, C+A e C+A+T), de forma que os impactos ambientais do beneficiamento da amêndoa só é atenuado

quando associado ao beneficiamento do tegumento e da casca (cenário C+A+T), com a amêndoa encaminhada para compostagem.

Gráfico 13 – Avaliação ambiental comparativa dos cenários da biorrefinaria da manga



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Ressalta-se que a escolha da unidade funcional em termos de receita possibilitou a análise da extração integrada de diversos bioprodutos, a partir de diferentes sistemas de biorrefinarias. Essa análise parece ser mais interessante que a unidade funcional com base na quantidade de matéria-prima processada, usualmente utilizada em ACVs de biorrefinarias, uma vez que possibilita aos administradores dessas empresas conhecer os resultados dos impactos por receita ou lucro obtido pela biorrefinaria (AHLGREN et al., 2013).

A criação de uma biorrefinaria de manga também foi analisada no estudo de Arora et al. (2018), porém apenas em termos econômicos. Nesse estudo foram simulados três modelos para processamento dos coprodutos da manga no *software* SuperPro designer. O primeiro modelo recupera vários produtos (pectina, fenólicos totais, óleo, amido, energia), sendo o mais completo e que serve de base para comparação com os outros dois modelos mais simplificados que recuperam um (pectina) ou dois (pectina e óleo) produtos. O critério para a escolha do modelo mais vantajoso economicamente foram mínimo investimento de capital e

máximo retorno. Assim, o modelo melhor avaliado foi aquele que recuperou dois produtos (pectina e óleo), visto que, em relação ao modelo mais completo, o investimento de capital é 50% menor, a taxa interna de retorno é 8% maior e o período de retorno é 2,4 anos. O estudo de Arora et al. (2018), mostrou que níveis altos de complexidade para modelos de biorrefinarias de manga, isto é, modelos que visam a recuperação máxima de bioprodutos da manga não são vantajosos em termos econômicos. Já no presente estudo, níveis altos de complexidade para modelos de biorrefinaria não se mostraram vantajosos ambientalmente. Em consonância, o trabalho de Tesfaye et al. (2018), que propôs a extração apenas de amido, verificou que este é um projeto viável com uma taxa de retorno de 83% e um período de retorno de 2 anos.

Oliveira (2016) explica que biorrefinarias mais avançadas, com complexidade elevada, podem inibir investimentos. Segundo esse autor, o aumento da complexidade de biorrefinarias ocorre na proporção em que ocorre maior aproveitamento da biomassa, valorização dos resíduos e diversificação dos produtos. Para reduzir este aumento de complexidade, pode-se investigar possíveis mudanças na configuração das biorrefinarias. Isto é, configurações particionadas em pequenas “micro-biorrefinarias” distintas para que dominem uma parte do processo, possibilitando a redução da complexidade total oriunda de fatores tecnológicos, que seriam administrados por um único ator em uma biorrefinaria integrada, mas agora são divididos por vários atores em um sistema de várias “micro-biorrefinarias”. Quando o desenvolvimento de uma biorrefinaria ocorre gradualmente, com modificações que se assemelham a inovações incrementais, o aumento da complexidade também acontece gradativamente. Assim, é possível evitar o problema causado pelo alto nível de complexidade.

### **Análise de incerteza**

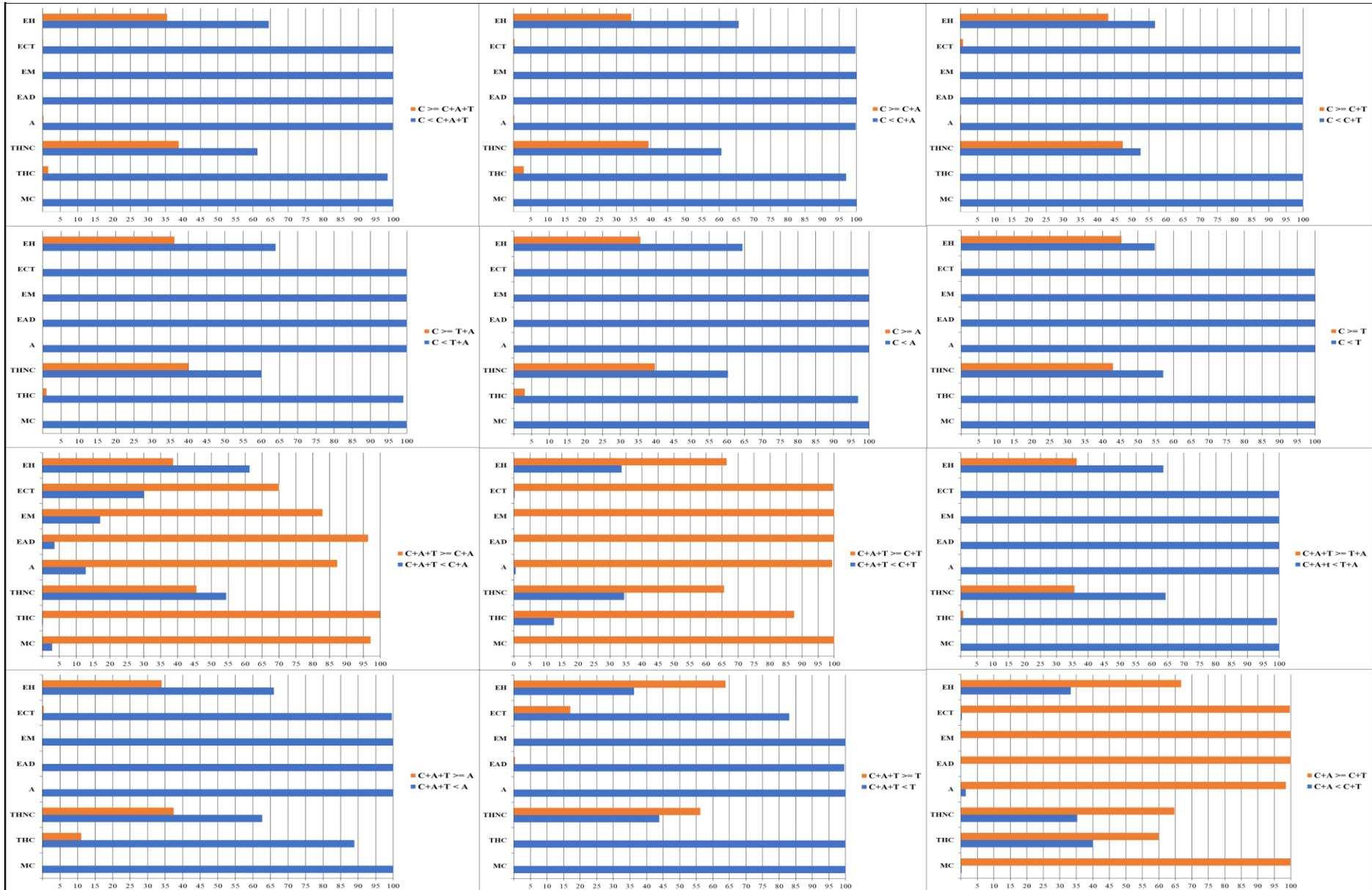
A Figura 25 apresenta o resultado da análise de incerteza feita entre todos os cenários da biorrefinaria, considerando um nível de confiança de 95%. A partir dessa análise, pode-se ter maior confiabilidade no resultado da comparação entre os cenários, uma vez que o impacto não é um valor fixo, mas sim um intervalo de valores prováveis estimados.

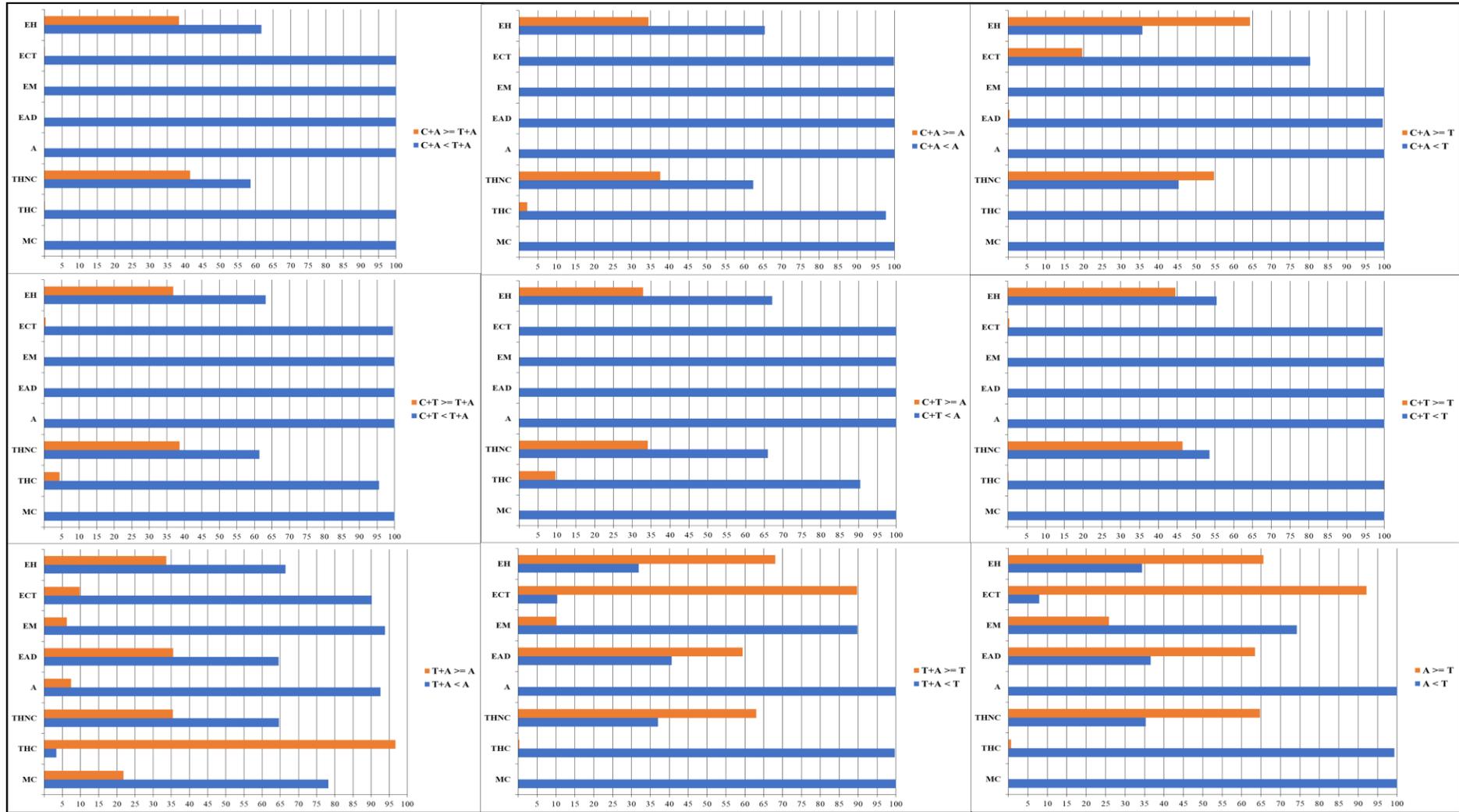
Pode-se notar que o cenário C é menos impactante que todos os outros cenários com nível de confiança de 100% nas categorias MC, A, EAD, EM e ECT. O cenário C+T também apresentou bons resultados, sendo mais impactante apenas que o cenário C. Enquanto os piores cenários, em termos ambientais, foram T, T+A e A. O cenário T foi mais impactante

que todos os outros cenários em no mínimo 3 categorias, MC, THC e A, com nível de confiança de 100%. O cenário T+A foi mais impactante que os demais cenários pelo menos na categoria THC com 95% de confiança, exceto contra o cenário T. E o cenário A foi menos impactante apenas contra os cenários T e T+A.

Quanto a análise qualitativa da incerteza, identificaram-se as mesmas incertezas relatadas no capítulo 3, uma vez que, foram usados os processos menos impactantes do capítulo 3 para montar os cenários da biorrefinaria. Porém, além dessas, identificou-se ainda a incerteza de cenário, devido à ampla quantidade de cenários que pôde ser elaborada nesse capítulo, variando os resultados em cada um deles. Segundo Gavankar; Anderson e Keller (2015), a incerteza de cenário acontece quando vários resultados são possíveis, porém os processos que levam aos resultados não podem ser modelados estatisticamente.

Figura 25 – Análise de incerteza dos cenários da biorrefinaria





Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

#### 4.4 Conclusão

Neste capítulo foi realizada a comparação dos impactos ambientais potenciais dos cenários da biorrefinaria da manga, a fim de determinar qual acarretaria menor impacto. Constatou-se que o cenário com melhor desempenho ambiental foi o C (beneficiamento da casca), que apresentou melhor relação entre a receita obtida e o nível de complexidade da biorrefinaria.

Ressalta-se que os processos escolhidos para montar um sistema de biorrefinaria estão ainda em nível de laboratório, acarretando em todas as limitações dessa etapa de desenvolvimento, como elevado consumo de energia. Dessa forma, indica-se a simulação desses processos em nível industrial por meio de Software para investigar se é possível reduzir os aspectos ambientais da biorrefinaria da manga.

## 5 CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho foram respondidas duas perguntas: i) quais processos de extração de bioprodutos, a partir da casca e do caroço da manga, são ambientalmente menos impactantes? E, ii) qual cenário de biorrefinaria a partir da casca e do caroço da manga gera o menor impacto ambiental?

Assim, para a primeira pergunta verificou-se que os processos menos impactantes foram: Ultrassom para a extração de pectina, ESP para extração de CF, extração acetosolv com equipamentos alternativos para a lignina, e a extração isolada para o amido.

Após essa análise, foi possível responder a segunda pergunta, para a qual encontrou-se que o cenário que beneficia apenas a casca para a biorrefinaria da manga acarreta em um menor potencial de impacto ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ABDALLA, A.E.M.; DARWISH, S.M.; AYAD, E.H.E.; EL-HAMAHMY, R.M. Egyptian mango by-product 1: Compositional quality of mango seed kernel. **Food Chemistry**, v. 103, n. 4, p. 1134–1140, 2007.
- ACSELRAD, H. Discursos da sustentabilidade urbana. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, n. 1, p. 79, 1999.
- AGROENERGIA, Embrapa. **Biorrefinarias**. Embrapa Agroenergia-Fôlder/Folheto /Cartilha (INFOTECA-E), 2011.
- AHLGREN, S. *et al.* **LCA of biorefineries - Identification of key issues and methodological recommendations**. Report No 2013:25, p. 81, 2013, f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels, Suécia. Disponível em: <http://f3centre.se/>. Acesso em: 25 set. 2019.
- AJILA, C.M.; NAIDU, K.A.; BHAT, S.G.; PRASADA RAO, U.J.S. Bioactive compounds and antioxidant potential of mango peel extract. **Food Chemistry**, v. 105, n. 3, p. 982–988, 2007.
- ANDREUCCETTI, C.; CARVALHO, R.A.; GROSSO, C.R.F. Gelatin-based films containing hydrophobic plasticizers and saponin from *Yucca schidigera* as the surfactant. **Food Research International**, v. 43, n. 6, p. 1710–1718, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO/TR 14047**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: exemplos ilustrativos de como aplicar a ABNT NBR ISO 14044 a situações de avaliação de impacto. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ARORA, A.; BANERJEE, J.; VIJAYARAGHAVAN, R.; MACFARLANE, D.; PATTI, A.F. Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery. **Industrial Crops and Products**, v. 116, p. 24-34, 2018.
- ARVANITOYANNIS, I. S.; KASSAVETI, A. Starch – Cellulose Blends. *In*: YU, Long (Org.). **Biodegradable Polymer Blends and Composites from Renewable Resources**. Nova Jersey, EUA: Ed John Wiley & Sons, 2009. p. 17-53.
- BANERJEE, J.; SINGH, R.; VIJAYARAGHAVAN, R.; MACFARLANE, D.; PATTI, A.F.; ARORA, A. Bioactives from fruit processing wastes: green approaches to valuable chemicals. **Food Chemistry**, v. 225, p. 10–22, 2017.
- BARR, W. J.; LANDIS, A. E. Comparative life cycle assessment of a commercial algal multiproduct biorefinery and wild caught fishery for small pelagic fish. **The International**

**Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 5, p. 1141–1150, 2017.

BAUMBERGER, S.; LAPIERRE, C.; MONTIES, B.; DELLA VALLE, G. Use of kraft lignin as filler for starch films. **Polymer Degradation and Stability**, v. 59, n. 1–3, p. 273–277, 1998.

BERARDINI, N.; FEZER, R.; CONRAD, J.; BEIFUSS, U.; CARLE, R.; SCHIEBER, A. Screening of mango (*Mangifera indica* L.) cultivars for their contents of flavonol O- and xanthone C-glycosides, anthocyanins, and pectin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 5, p. 1563–1570, 2005.

BERARDINI, N.; KNODLER, M.; SCHIEBER, A.; CARLE, R. Utilization of mango peels as a source of pectin and polyphenolics. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 6, n. 4, p. 442–452, 2005.

BERNIER, E.; LAVIGNE, C.; ROBIDOUX, P. Y. Life cycle assessment of kraft lignin for polymer applications. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 520–528, 2013.

BOLDRIN, A.; BALZAN, A.; ASTRUP, T. Energy and environmental analysis of a rapeseed biorefinery conversion process. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 3, n. 2, p. 127–141, 2013.

BORCHARDT, M.; POLTOSI, L.A.C.; SELBITTO, M.A.; PEREIRA, G.M. Considerações sobre ecodesign: Um estudo de caso na indústria eletrônica automotiva. **Ambiente e Sociedade**, v. 11, n. 2, p. 341–353, 2008.

BOULAY, A. M.; BARE, J.; BENINI, L.; BERGER, M.; LATHUILLIERE, M.J.; MANZARDO, A.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NUÑEZ, M.; PASTOR, A.V.; RIDOUTT, B.; OKI, T.; WORBE, S.; PFISTER, S. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 2, p. 368–378, 2018.

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C.S.L.; MORRIS, V. A. da S. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria**, v. 19, n. 2, p. 735–750, 2015.

CANTERI, M. H. G.; MORENO, L.; WOSIACKI, G.; SCHEER, A.P. Pectin: From raw material to the final product. **Polimeros**, v. 22, n. 2, p. 149–157, 2012.

CASA ONU BRASIL. **Agenda 2030**. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em: 24 set. 2019

CAVALCANTE, Márcia Maria da Silva. **Extração de polifenóis, mangiferina e pectina da casca de manga (*Mangifera indica* L.) cv. Tommy Atkins utilizando sistema pressurizado**. 2018. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Relatório anual de 2010. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2013.

CHEN, L.; TANG, C.; NING, N.; WANG, C.; FU, Q.; ZHANG, Q. Preparation and properties of chitosan/lignin composite films. **Chinese Journal of Polymer Science**, v. 27, n. 05, p. 739-746, 2009.

CHERUBINI, F.; JUNGMEIER, G. LCA of a biorefinery concept producing bioethanol, bioenergy, and chemicals from switchgrass. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 1, p. 53–66, 2010.

COMMISSION, E. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for life cycle assessment**, Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, Luxembourg, 2011.

CORDEIRO, E.M.S.; NUNES, Y.L.; MATTOS, A.L.A.; ROSA, M.F.; SOUSA FILHO, M.S.M.; ITO, E.N. Polymer biocomposites and nanobiocomposites obtained from mango seeds. **Macromolecular Symposia**, v. 344, n. 1, p. 39–54, 2014.

CORONA, A.; AMBYE-JENSEN, M.; VEGA, G.C.; HAUSHILD, M.Z.; BIRKVED, M. Techno-environmental assessment of the green biorefinery concept: Combining process simulation and life cycle assessment at an early design stage. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 100–111, 2018.

DE'NOBILI, M.D.; PÉREZ, C.D.; NAVARRO, D.A.; STORTZ, C.A.; ROJAS, A.M. Hydrolytic Stability of l-(+)-Ascorbic Acid in Low Methoxyl Pectin Films with Potential Antioxidant Activity at Food Interfaces. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 1, p. 186–197, 2013.

DETDUANGCHAN, N.; SRIDACH, W.; WITTAYA, T. Enhancement of the properties of biodegradable rice starch films by using chemical crosslinking agents. **International Food Research Journal**, v. 21, n. 3, p. 1225–1235, 2014.

DOHERTY, W. O. S.; MOUSAVIOUN, P.; FELLOWS, C. M. Value-adding to cellulosic ethanol: Lignin polymers. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 2, p. 259–276, 2011.

DU, W.X.; OLSEN, C.W.; AVENA-BUSTILLOS, R.J.; FRIEDMAN, M.; MCHUGH, T.H. Physical and antibacterial properties of edible films formulated with apple skin polyphenols. **Journal of Food Science**, v. 76, n. 2, p. 149–155, 2011.

ESPADA-BELLIDO, E.; FERREIRO-GONZÁLEZ, M.; CARRERA, C.; PALMA, M.; BARROSO, C.G.; BARBERO, G.F. Optimization of the ultrasound-assisted extraction of anthocyanins and total phenolic compounds in mulberry (*Morus nigra*) pulp. **Food Chemistry**, v. 219, p. 23–32, 2017.

FAOSTAT. **Crops**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>. Acesso em: 24 set. 2019.

FARIA, E. de O.; PIRES, A. de A. Economia circular e bioeconomia: como as abordagens se relacionam? **7th International Workshop - Advances in Cleaner Production**, 2018.

FURLANETO, F de P. B.; SOARES, A. A. V. L.; BERTANI, R. M. de A. Caracterização técnica e econômica da Manga 'TOMMY ATKINS'. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 12, n. 2,

2015.

FIGUEIRÊDO, M.C.B.; ARAÚJO, L.F.P.; ROSA, M.F.; DE MORAIS, L.F.S.; PAULINO, W.D.; GOMES, R.B. Impactos ambientais da carcinicultura de águas interiores. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 231–240, 2006.

FILHO, S. **Biorrefinaria: um conceito sustentável para agregação de valor a resíduos**. v. I, p. 98–105, 2011.

FIORENTINO, G.; RIPA, M.; MELLINO, S.; FAHD, S.; ULGIATI, S. Life cycle assessment of Brassica carinata biomass conversion to bioenergy and platform chemicals. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 174–187, 2013.

FREIRE, A.L.F.; JÚNIOR, C.P.A.; ROSA, M.F.; NETO, J.A.A.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. Environmental assessment of bioproducts in development stage: The case of fiberboards made from coconut residues. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 230–241, 2017.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* **Overview and methodology. Data v2.0 (2007). Ecoinvent report No.1**. Ecoinvent Centre, 2007.

FRISCHKNECHT, R. *et al.* The ecoinvent database: overview and methodological framework. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 10, n. 1, p. 3–9, 2005.

GARRIDO-SUÁREZ, B.B.; GARRIDA, G.; DELGADO, R.; BOSCH, F.; RABI, M. del C. A mangifera indica L. extract could be used to treat neuropathic pain and implication of mangiferin. **Molecules**, v. 15, n. 12, p. 9035–9045, 2010.

GAVANKAR, S.; ANDERSON, S.; KELLER, A. A. Critical Components of Uncertainty Communication in Life Cycle Assessments of Emerging Technologies: Nanotechnology as a Case Study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 3, p. 468–479, 2015.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N.M.P.; HULTINK, E.J. The Circular Economy – A new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757–768, 2017.

GIESEN, C. Van Der; CUCURACHI, S.; GUINÉE, J.; KRAMER, G.J.; TUKKER, A. A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120904, 2020.

GOEDKOOP, M. *et al.* Introduction to LCA with SimaPro 7. **PRé Consultants, The Netherlands**, 2008.

GOLD-SMITH, F.; FERNANDEZ, A.; BISHOP, K. Mangiferin and cancer: Mechanisms of action. **Nutrients**, v. 8, n. 7, p. 16–20, 2016.

GÓMEZ-GUILLÉN, M.C.; IHL, M.; BIFANI, V.; SILVA, A.; MONTERO, P. Edible films made from tuna-fish gelatin with antioxidant extracts of two different murta ecotypes leaves (*Ugni molinae* Turcz). **Food Hydrocolloids**, v. 21, n. 7, p. 1133–1143, 2007.

HENRIQUE, M. A.; SILVÉRIO, H.A.; NETO, W.P.F.; PASQUINI, D. Valorization of an

agro-industrial waste, mango seed, by the extraction and characterization of its cellulose nanocrystals. **Journal of Environmental Management**, v. 121, p. 202–209, 2013.

HETHERINGTON, A.C.; BORRION, A.L.; GRIFFITHS, O.G.; MCMANUS, M.C. Use of LCA as a development tool within early research: Challenges and issues across different sectors. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 1, p. 130–143, 2014.

HONG, J.; ZHOU, J.; HONG, J. Environmental and economic impact of furfuralcohol production using corncob as a raw material. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 5, p. 623–631, 2015.

IACOVIDOU, E.; MILLWARD-HOPKINS, J.; BUSCH, J.; PURNELL, P.; VELIS, C.A.; HAHLADAKIS, J.N.; ZWIRNER, O.; BROWN, A. A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1279–1288, 2017.

IACOVIDOU, E.; VELIS, C.A.; PURNELL, P.; ZWIRNER, O.; BROWN, A.; HAHLADAKIS, J.; MILLWARD-HOPKINS, J.; WILLIAMS, P.T. Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 910–938, 2017.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Produção Agrícola Municipal-PAM. **Informações diversas**. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 24 set. 2019.

INGRAO, C.; FACCILONGO, N.; DI GIOIA, L.; MESSINEO, A. Food waste recovery into energy in a circular economy perspective: A comprehensive review of aspects related to plant operation and environmental assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 869–892, 2018.

JUNGMEIER, G. *et al.* The biorefinery complexity index. In: **IEA-Bioenergy Task**. 2014. p. 36.

KHOSHNEVISAN, B.; RAFIEE, S.; TABATABAEI, M.; GHANAVATI, H.; MOHTASEBI, S.S.; RAHIMI, V.; SHAFIEI, M.; ANGELIDAKI, I.; KARIMI, K. Life cycle assessment of castor-based biorefinery: a well to wheel LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 9, p. 1788–1805, 2017.

KIST, B. B. *et al.* **Anuário da Fruticultura Brasileira 2018**. [S.l: s.n.], 2018.

KLOCK, U. *et al.* Química da madeira. **Fupec, Curitiba**, 2005.

KUMAR, M.; ATANASSOV, I.; TURNER, S. Functional analysis of cellulose synthase (CESA) protein class specificity. **Plant Physiology**, v. 173, n. 2, p. 970–983, 2017.

LACERDA, M. A. D. de; LACERDA, R. D. de; ASSIS, P. C. D. O. A participação da fruticultura no agronegócio brasileiro. **Revista De Biologia E Ciências Da Terra**, v. 4, p. 1–9, 2004.

LIARD, G.; LESAGE, P.; SAMSON, R.; STUART, P.R. Systematic assessment of triticale-based biorefinery strategies: environmental evaluation using life cycle assessment. **Biofuels**,

**Bioproducts and Biorefining**, v. 12, p. S60–S72, 2012.

LIMPISOPHON, K.; TANAKA, M.; OSAKO, K. Characterisation of gelatin-fatty acid emulsion films based on blue shark (*Prionace glauca*) skin gelatin. **Food Chemistry**, v. 122, n. 4, p. 1095–1101, 2010.

LORENZO, J. M.; GONZÁLEZ-RODRIGUEZ, R.M.; SÁNCHEZ, M.; AMADO, I.R.; FRANCO, D. Effects of natural (grape seed and chestnut extract) and synthetic antioxidants (butylatedhydroxytoluene, BHT) on the physical, chemical, microbiological and sensory characteristics of dry cured sausage “chorizo”. **Food Research International**, v. 54, n. 1, p. 611–620, 2013..

MACARTHUR, E. Towards the Circular Economy Vol. 1. **Journal of Industrial Ecology**, v. 1, n. 1, p. 4–8, 2013.

MAIA DE SOUZA, D.; BRAGA, T.; FIGUEIRÊDO, M.C.B.; MATSUURA, M.I.S.F.; DIAS, F.R.T.; UGAYA, C.A.L. Life cycle thinking in Brazil: challenges and advances towards a more comprehensive practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 3, p. 462–465, 2016.

MAISUTHISAKUL, P.; GORDON, M. H. Antioxidant and tyrosinase inhibitory activity of mango seed kernel by product. **Food Chemistry**, v. 117, n. 2, p. 332–341, 2009.

**Mango Tree Tommy Atkins Variety Grafted**. Disponível em:

<[https://plantogram.com/product/mango\\_tommy\\_atkins/](https://plantogram.com/product/mango_tommy_atkins/)>. Acesso em: 24 set. 2019.

MATHIAS, João. 6 dúvidas sobre o plantio de manga. **Revista Globo Rural | GR Responde**. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/vida-na-fazenda/gr-responde/noticia/2016/10/6-duvidas-sobre-o-plantio-de-manga.html> Acesso em: 24 set. 2019.

MOUCO, M. A. do C. **Cultivo da Mangueira**. 2015. Disponível em: <http://spo.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 25 set. 2019.

MATKOWSKI, A.; KUS, P.; GORALSKA, E.; WOZNIAK, D. Mangiferin – a Bioactive Xanthonoid, not only from Mango and not just Antioxidant. **Mini-Reviews in Medicinal Chemistry**, v. 13, n. 3, p. 439–455, 2013.

MELO, P. E. F.; SILVA, A.P.M.; MARQUES, F.P.; RIBEIRO, P.R.V.; SOUZA FILHO, M.S.M.; BRITO, E.S.; LIMA, J.R.; AZEREDO, H.M.C. Antioxidant films from mango kernel components. **Food Hydrocolloids**, v. 95, p. 487–495, 2019.

MERLI, R.; PREZIOSI, M.; ACAMPORA, A. How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 703–722, 2018.

MIYAMOTO, H. *et al.* Electronic devices. **Wide Bandgap Semiconductors: Fundamental Properties and Modern Photonic and Electronic Devices**, v. 0, n. 18, p. 231–280, 2007.

MONI, S. M.; MAHMUD, R.; HIGH, K.; CARBAJALES-DALE, M. Life cycle assessment of emerging technologies: A review. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 52–63, 2020.

MORAIS, T.C.; ARRUDA, B.R.; MAGALHÃES, H.S.; TREVISAN, M.T.S.; VIANA, D.A.; RAO, V.S.; SANTOS, F.A.S. Mangiferin ameliorates the intestinal inflammatory response and the impaired gastrointestinal motility in mouse model of postoperative ileus. **Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology**, v. 388, n. 5, p. 531–538, 2015.

MÜLLER CARNEIRO, J.; DIAS, A.F.; BARROS, V.S.; GIONGO, V.; MATSUURA, M.I.S.F.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. Carbon and water footprints of Brazilian mango produced in the semiarid region. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 4, p. 735–752, 2019.

NASCIMENTO, D. M.; DIAS, A.F.; JÚNIOR, C.P.A.; ROSA, M.F.; MORAIS, J.P.S.; FIGUEIREDO, M.C.B. A comprehensive approach for obtaining cellulose nanocrystal from coconut fiber. Part II: Environmental assessment of technological pathways. **Industrial Crops and Products**, v. 93, p. 58–65, 2016.

NAWAB, A.; ALAM, F.; HAQ, M.A.; LUTFI, Z.; HASNAIN, A. Mango kernel starch-gum composite films: Physical, mechanical and barrier properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 98, p. 869–876, 2017.

NÚÑEZ-FLORES, R.; GIMÉNEZ, B.; FERNÁNDEZ-MARTÍN, F.; LÓPEZ-CABALLERO, M.E.; MONTERO, M.P.; GÓMEZ-GUILLÉN, M.C. Physical and functional characterization of active fish gelatin films incorporated with lignin. **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 1, p. 163–172, 2013.

OLIVEIRA, A.V.; DA SILVA, A.P.M.; BARROS, M.O.; SOUZA FILHO, M.S.M.; ROSA, M.F.; AZEREDO, H.M.C. Nanocomposite Films from Mango Kernel or Corn Starch with Starch Nanocrystals. **Starch/Staerke**, v. 70, n. 11–12, 1 nov. 2018.

OLIVEIRA, Bruna Cristina. **Complexidade em biorrefinarias**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PAWELZIK, P.; CARUS, M.; HOTCHKISS, J.; NARAYAN, R.; SELKE, S.; WELLISCH, M.; WEISS, M.; WICKE, B.; PATEL, M.K. Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials - Reviewing methodologies and deriving recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 211–228, 2013.

PECK, P.; BENNETT, S.J.; BISSETT-AMESS, R.; LENHART, J.; MOZAFFARIAN, H. Examining understanding, acceptance, and support for the biorefinery concept among EU policy-makers. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 3, n. 3, p. 361–383, 2009.

PENHASI, A.; MEIDAN, V. M. Preparation and characterization of in situ ionic cross-linked pectin films: Unique biodegradable polymers. **Carbohydrate Polymers**, v. 102, n. 1, p. 254–260, 2014.

PÉREZ-MATEOS, M.; MONTERO, P.; GÓMEZ-GUILLÉN, M. C. Formulation and stability of biodegradable films made from cod gelatin and sunflower oil blends. **Food Hydrocolloids**, v. 23, n. 1, p. 53–61, 2009.

PÉREZ, S.; BERTOFT, E. The molecular structures of starch components and their

contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. **Starch/Staerke**, v. 62, n. 8, p. 389–420, 2010.

PIEMONTE, V. Wood Residues as Raw Material for Biorefinery Systems: LCA Case Study on Bioethanol and Electricity Production. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 20, n. 2, p. 299–304, 2012.

PRIETO-SANDOVAL, V.; JACA, C.; ORMAZABAL, M. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 179, p. 605–615, 2018.

RAHIMI, V.; KARIMI, K.; SHAFIEI, M.; NAGHAVI, R.; KHOSHNEVISAN, B.; GHANAVATI, H.; MOHTASEBI, S.S.; RAFIEE, S.; TABATABAEI, M. Well-to-wheel life cycle assessment of Eruca Sativa-based biorefinery. **Renewable Energy**, v. 117, p. 135-149, 2018.

RENOUF, M. A.; PAGAN, R. J.; WEGENER, M. K. Bio-production from Australian sugarcane: An environmental investigation of product diversification in an agro-industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 87–96, 2013.

ROHELLA, R.S.; SAHOO, N.; PAUL, S.C.; CHOUDHURY, S.; CHAKRAVORTTY, V. Thermal studies on isolated and purified lignin. **Thermochimica Acta**, v. 287, n. 1, p. 131–138, 1996.

SAADE, M. R. M.; GOMES, V.; DA SILVA, M.G.; UGAYA, C.M.L.; LASVAUX, S.; PASSER, A.; HABERT, G. Investigating transparency regardingecoinvent users' system model choices. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 1, 2019.

SAMPAIO, A.P.C.; SOUZA FILHO, M.S.M.; CASTRO, A.L.A.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. Life cycle assessment from early development stages: the case of gelatin extracted from tilapia residues. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 5, p. 767–783, 2017.

SANTOS, Ênio Rafael de Medeiros. **Extração, caracterização e avaliação bioativa do extrato de Rumex acetosa**. 2013. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SANTOS, M.F.N. dos; BATTISTELLE, R.A.G.; HOTI, C.Y.; JULIOTI, P.S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **GEPROS. Gest. prod. oper. sist.**, n. 2, p. 57, 2011.

SARTINI, G. G. P. O. Organic Waste Management in Latin America : Challenges and Advantages of the Main Treatment Options and Trends. **United Nations: Environment Programme**, 2017.

SEBRAE. **O cultivo e o mercado da manga**. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-da-manga,90f5438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 24 set. 2019.

SEMEDO, Ana Catarina Jorge. **Compostos bioativos de Opuntia ficus indica**. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Controle da Qualidade e Toxicologia dos Alimentos) - Faculdade

de Farmácia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2012.

SILALERTRUKSA, T.; PONGPAT, P.; GHEEWALA, S. H. Life cycle assessment for enhancing environmental sustainability of sugarcane biorefinery in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 140, p. 906–913, 2017.

SILVA, A. P. M.; OLIVERIA, A.V.; PONTES, S.M.A.; PEREIRA, A.L.S.; SOUZA FILHO, M.S.M.; ROSA, M.F.; AZEREDO, H.M.C. Mango kernel starch films as affected by starch nanocrystals and cellulose nanocrystals. **Carbohydrate Polymers**, v. 211, n. November 2018, p. 209–216, 2019.

SILVA, G. A. S.; CAVALCANTI, M. T.; ALMEIDA, M. C. B. D. M. Utilização do amido da amêndoa da manga Tommy Atkins como espessante em bebida láctea Use of starch of almond of Tommy Atkins mango as thickener for dairy beverages. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. v.17, n. 12, p. 1326–1332, 2013.

SILVA, R. de ARAÚJO e; BRÍGIDA, A.I.S.; ROSA, M.F.; NETO, M.S.; SPINOSA, W.A.; FILHO, E.B.S.; FIGUEIRÊDO, M.C.B. An approach for implementing ecodesign at early research stage: A case study of bacterial cellulose production. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, p. 122-245, 2020.

SILVEIRA, M. A. Gestão estratégica para a sustentabilidade organizacional: capital humano e os processos de inovação e aprendizagem. **Gestão da sustentabilidade organizacional: Inovação, aprendizagem e capital humano**, p. 21-46, 2012.

SOGI, D. S.; SIDDIQ, M.; GREIBY, I.; DOLAN, K.D. Total phenolics, antioxidant activity, and functional properties of “Tommy Atkins” mango peel and kernel as affected by drying methods. **Food Chemistry**, v. 141, n. 3, p. 2649–2655, 2013.

SOLÍS-FUENTES, J. A.; DURÁN-DE-BAZÚA, M. del C. Mango (*Mangifera indica* L.) Seed and Its Fats. **Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention**, p. 741–748, 2011.

SONWAI, S.; KAPHUEAKNGAM, P.; FLOOD, A. Blending of mango kernel fat and palm oil mid-fraction to obtain cocoa butter equivalent. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 10, p. 2357–2369, 2014.

SOUZA, C.G. de; RODRIGUES, T.H.S.; SILVA, L.M.A.; RIBEIRO, P.R.V.; BRITO, E.S. Sequential extraction of flavonoids and pectin from yellow passion fruit rind using pressurized solvent or ultrasound. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 4, p. 1362–1368, 2018.

SPIRIDON, I.; TEACA, C. A.; BODIRLAU, R. Preparation and characterization of adipic acid-modified starch microparticles/plasticized starch composite films reinforced by lignin. **Journal of Materials Science**, v. 46, n. 10, p. 3241–3251, 2011.

SUDHARSAN, K.; MOHAN, C.C.; BABU, P.A.S.; ARCHANA, G.; SABINA, K.; SIVARAJAN, M.; SUKUMAR, M. Production and characterization of cellulose reinforced starch (CRT) films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 83, p. 385–395, 2016.

TESFAYE, T.; JAHAKIMU, J.K.; CHAVAN, R.B.; SITHOLE, B.; RAMJUGERNATH, D. Valorisation of mango seed via extraction of starch: preliminary techno-economic analysis. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 1, p. 81–94, 2018.

THIRUGNANASAMBANDHAM, K.; SIVAKUMAR, V.; PRAKASH MARAN, J. Process optimization and analysis of microwave assisted extraction of pectin from dragon fruit peel. **Carbohydrate Polymers**, v. 112, p. 622–626, 2014.

UIHLEIN, A.; SCHEBEK, L. Environmental impacts of a lignocellulose feedstock biorefinery system: An assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 5, p. 793–802, 2009.

VENZKE, Cláudio Senna. O ecodesign no setor moveleiro do Rio Grande do Sul. **Revista Eletrônica de Administração**, v. 8, n. 6, 2002.

VERÇOSA, F.G.; SOUZA FILHO, M.S.M.; PEREIRA, V.A.; AZEREDO, H.M.C. Extração de lignina do tegumento de mangas. **Embrapa Agroindústria Tropical-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2019.

VIEIRA, P.A.F.; QUEIROZ, J.H.; VIEIRA, B.C.; MENDES, F.Q.; BARBOSA, A.A.; SIALINO MULLER, E.S.; SANT'ANA, R.C.O.; MORAES, G.H.K. Caracterização química do resíduo do processamento agroindustrial da manga (*Mangifera indica* L.) var. Ubá. **Alimentos e Nutrição**, v. 20, n. 4, p. 617–623, 2009.

WANG, M.; HUANG, B.; FAN, C.; ZHAO, K.; HU, H.; XU, X.; PAN, S.; LIU, F. Characterization and functional properties of mango peel pectin extracted by ultrasound assisted citric acid. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2016.

WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016.

WU, J.; CHEN, S.; GE, S.; MIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Q. Preparation, properties and antioxidant activity of an active film from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) skin gelatin incorporated with green tea extract. **Food Hydrocolloids**, v. 32, n. 1, p. 42–51, 2013.