

Avaliação das pegadas hídrica e de carbono da amêndoa da castanha de caju processada em minifábricas no estado do Ceará

Pollyana Maria Pimentel Monte^{1*} , Rogério César Pereira de Araújo² , Maria Cléa Brito de Figueirêdo³ 

1 Programa de Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Bloco 902 - Campus do Pici, Fortaleza, Ceará, 60455970.

2 Departamento de Economia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Av. Mister Hull, 2977 - Campus do Pici, Bloco 826. Fortaleza, Ceará, 60440970.

3 Embrapa Agroindústria Tropical, R. Pernambuco, 2270 - Pici, Fortaleza - CE, 60511110.

*Autora para correspondência: pollyanapimentelmonte@gmail.com

Recebido em 15 de setembro de 2021.

Aceito em 04 de janeiro de 2022.

Publicado em 30 de janeiro de 2022.

Resumo - O processamento de castanha de caju é uma atividade tradicional na Região Nordeste do Brasil, com cadeia produtiva formada por grandes e pequenas fábricas, das quais destacam-se as minifábricas. Estudos anteriores analisaram os benefícios técnicos e sociais destas unidades, porém, não consideraram os impactos ambientais da produção da amêndoa. Este trabalho avaliou o perfil de pegada hídrica e a pegada de carbono da amêndoa de caju processada em minifábricas no Ceará, por intermédio da avaliação do ciclo de vida. Consideraram-se a produção agrícola do caju, de amêndoas e dos insumos utilizados na agricultura e agroindústria, com abordagem do berço ao portão. A avaliação foi relativa a 1 kg de amêndoa e mostrou que a pegada de carbono em média foi de 10,92 Kg CO₂eq/Kg de amêndoa, com maior impacto oriundo da produção agrícola (76,9%). A produção em minifábricas foi o processo que mais contribuiu com a pegada hídrica, entre 9,92% e 98,04%. O impacto em minifábricas foi principalmente devido ao uso de embalagem de polietileno. Dentre os cenários analisados, a maior redução da pegada de carbono foi de 11,94% e entre 1,93% e 49,10% no perfil da pegada hídrica, ocorrendo quando o vidro substituiu o polietileno na embalagem de amêndoas.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Amêndoa da castanha de caju. Pequenos produtores.

Evaluation of water and carbon footprints of cashew nuts processing in mini factories at Ceará state

Abstract - The processing of cashew nuts is a traditional activity in the Northeast Region of Brazil, with production chain formed by large and small factories, among which mini factories stand out. While previous studies analyzed the technical and social benefits of these production units, they did not

consider the environmental impacts of cashew nut almonds. This work evaluated the water footprint profile and the carbon footprint of cashew nuts processed in mini factories in Ceará, through the life cycle assessment. Agricultural production of cashew nuts, almonds and inputs used in agriculture and agribusiness were considered, from a “cradle-to-gate” approach. The evaluation was related to 1 kg of almond and showed that the carbon footprint on average was 10.92 Kg CO₂eq/kg of almond, with a greater impact (76.9%) coming from agricultural production. Production in mini factories was the process that most contributed to the water footprint profile, between 9.92% and 98.04%. The impact from nut processing was mainly due to the use of polyethylene packaging. Among the scenarios analyzed, the greatest reduction in carbon footprint was 11.94% and between 1.93% and 49.10% in the water footprint profile, occurring with the substitution of polyethylene for glass in nut packaging.

Keywords: Life cycle assessment. Cashew nut. Small producers.

Evaluación de la huella hídrica y de carbono de la nuez del anacardo procesado en minifábricas del estado de Ceará

Resumen - El procesado de los anacardos es una actividad tradicional en la Región Noreste de Brasil, con una cadena de producción formada por grandes y pequeñas fábricas, entre las que se destacan están las minifábricas. Estudios anteriores analizaron los beneficios técnicos y sociales de estas unidades, sin embargo, no consideraron los impactos ambientales de la producción de la nuez. Este trabajo evaluó el perfil de la huella hídrica y de carbono de los anacardos procesados en minifábricas del Estado de Ceará, a través de la evaluación del ciclo de vida. Se consideró la producción agrícola de anacardos, nueces e insumos utilizados en la agricultura y la agroindustria, con un enfoque de la cuna a la puerta. La evaluación se realizó con lo relativo a 1 kg de nuez y mostró que la huella de carbono en media fue de 10,92 Kg CO₂eq/Kg de la nuez, con el mayor impacto proveniente de la producción agrícola (76,9%). La producción en minifábricas fue el proceso que más contribuyó a la huella hídrica entre un 9,92% y un 98,04%. El impacto en las minifábricas se debió principalmente al uso de embalajes de polietileno. Entre los escenarios analizados, la mayor reducción en la huella de carbono fue de 11,94% y entre el 1,93% y el 49,10% en el perfil de la huella hídrica, ocurriendo cuando el vidrio reemplazó al polietileno en los embalajes de las nueces.

Palabras clave: Evaluación del ciclo de vida. Nueces de anacardo. Pequeños productores.

Introdução

O cultivo do caju (*Anacardium occidentale* L.) e a comercialização de suas amêndoas são realizados em 32 países, com destaque para Vietnã, Índia, Brasil e Indonésia (Oluyole et al. 2017). No Brasil, estas atividades vêm sendo realizadas em regiões de clima quente e seco (Melo et al. 2018), sendo o Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte os estados responsáveis por 90,58% da produção nacional de caju no ano de 2020 (IBGE 2020).

Na produção do caju, obtêm-se coprodutos processados por diferentes segmentos da indústria nacional: a Amêndoa e o Líquido da Casca, ambos extraídos da castanha de caju; e o pedúnculo (falso fruto), a parte comestível. Do pedúnculo, retira-se insumo para fazer suco, polpa e outros produtos, que são comercializados no mercado nacional (Almeida et al. 2017).

A amêndoa e o líquido da casca são os principais produtos comerciais da cajucultura nacional e são tanto exportados como consumidos no mercado interno. No ano de 2017, a amêndoa foi a sétima colocada no ranking de exportações do Brasil (Brainer e Vidal 2020). O líquido da casca tem sido apontado como alternativa renovável para substituição dos compostos derivados do petróleo na fabricação de tintas anticorrosivas, materiais à prova d'água e revestimentos de superfícies (Mapurunga 2019).

A amêndoa é obtida do processamento da castanha de caju, que abrange cadeia produtiva formada por 195 mil produtores agrícolas, cinco grandes fábricas e outras 120 pequenas unidades no Nordeste, chamadas de minifábricas (MF). As MFs são responsáveis pela produção de 22 mil toneladas de castanha (ICB 2020).

A tecnologia empregada nas minifábricas foi proposta pela Embrapa, no ano de 1994, a qual incorporou avanços em equipamentos e processos, permitindo a obtenção de amêndoas em maior proporção e com melhor qualidade, com níveis de processamento adaptados às condições de pequena e média escala de produção (Lima 2017). Dessa forma, essa tecnologia teve como objetivo possibilitar ao pequeno produtor atender à demanda de exportação e ingressar no mercado externo desse produto.

Assim como toda atividade industrial, as MFs também têm potencial de causar impactos ambientais negativos. O uso da casca da castanha de caju para geração de vapor, por exemplo, pode causar efeito prejudicial às vias respiratórias (Josino et al. 2017; Serra et al. 2018), assim como a disposição incorreta das cascas pode gerar carga ambiental poluente aos corpos hídricos.

A ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) vem sendo amplamente utilizada no estudo das pegadas ambientais de processos e produtos, permitindo a identificação de pontos críticos no ciclo de vida de produtos. Essa ferramenta permite a contabilização de aspectos ambientais e o cálculo de possíveis impactos associados a um sistema de produto, por meio da realização de um inventário de entradas e saídas nesse sistema (Bicer et al. 2016; Blanco et al. 2018).

De acordo com a norma ISO 14067, estudos de pegada de carbono de produtos contabilizam as emissões de gases de efeito estufa e avaliam o impacto nas mudanças climáticas, considerando o ciclo de vida do produto. Já a pegada hídrica considera os aspectos e impactos ambientais relacionados ao uso da água no ciclo de vida, de acordo com a norma ISO 14046.

Estudos anteriores abordaram os impactos ambientais da produção agrícola de castanha de caju no Brasil (Figueirêdo et al. 2016) e do processo de extração de amêndoas de caju na Nigéria (Salami 2019). Figueirêdo et al. (2016) avaliaram os impactos da castanha, pedúnculo, goma e madeira oriundos de pomares de cajueiro anão cultivados em sistemas de baixo e alto insumo. Já Salami (2019) investigou os impactos de unidades de processamento de castanha para extração de amêndoas na Nigéria. Entretanto, não estão disponíveis estudos que avaliem a pegada de carbono e hídrica da amêndoa de caju brasileira.

Neste trabalho, avaliaram-se a pegada de carbono e o perfil da pegada hídrica da amêndoa de caju oriunda do processamento de castanha em minifábricas localizadas no estado do Ceará. A crescente demanda internacional por certificação ambiental de produtos e informações sobre pegada hídrica e

de carbono denotam a importância desse trabalho que buscou identificar pontos críticos e investigar possibilidades de redução das pegadas desse produto.

Material e métodos

A avaliação de impactos foi conduzida de acordo com as Normas Técnicas Brasileiras, NBR 14040 e 14044, as quais descrevem os princípios, a estrutura, os requisitos e as orientações, assim como as normas de pegadas de carbono (NBR ISO 14067) e hídrica (NBR ISO 14046).

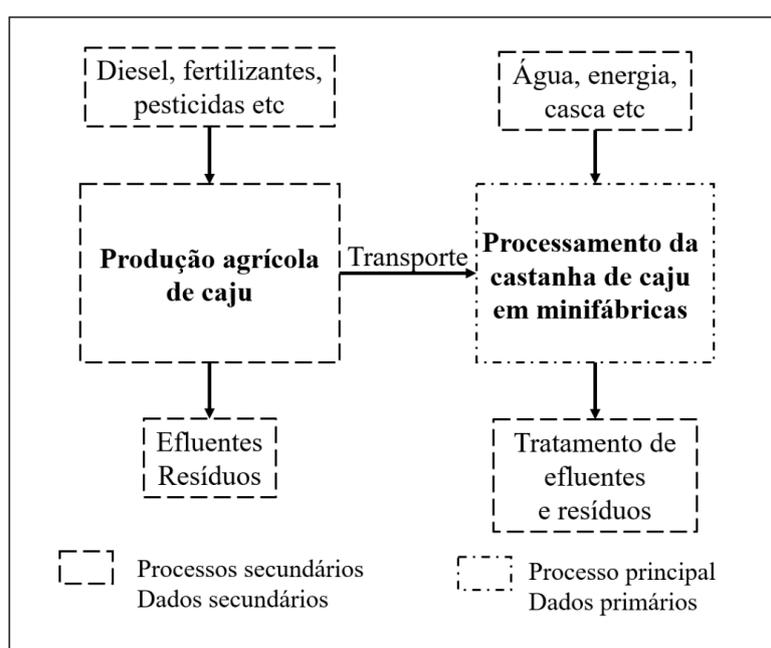
Avaliação do Ciclo de Vida

Este trabalho seguiu as seguintes etapas usualmente associadas a estudos de ACV: i) definição do escopo; ii) coleta de dados de inventário; iii) critérios utilizados para alocação de dados e impactos para produtos e co-produtos, iv) definição de categorias de impacto e métodos de avaliação no estudo das pegadas; v) estratégia para análise de cenários; e vi) Estratégia para análise de incertezas. As considerações feitas nessas etapas estão descritas nos tópicos seguintes.

Definição do escopo

O escopo desse estudo abrangeu a produção agrícola do caju, o processamento da castanha em MFs, a produção dos insumos utilizados na agricultura e agroindústria e o transporte de castanha para as minifábricas, sendo identificados os aspectos ambientais do processo (Figura 1), na abordagem do berço ao portão. Assim, foram consideradas as cadeias de produção e transporte dos insumos, como energia elétrica, água, fertilizantes, defensivos agrícolas e embalagens de polietileno. Neste estudo, as etapas de distribuição, consumo das amêndoas e disposição final da embalagem foram desconsideradas.

Figura 1. Fronteira do Sistema.



Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Os dados de inventário e a avaliação de impactos foram relativos à produção de 1 kg de amêndoa inteira natural, considerando um ano de processamento de castanha.

Coleta de dados de inventário

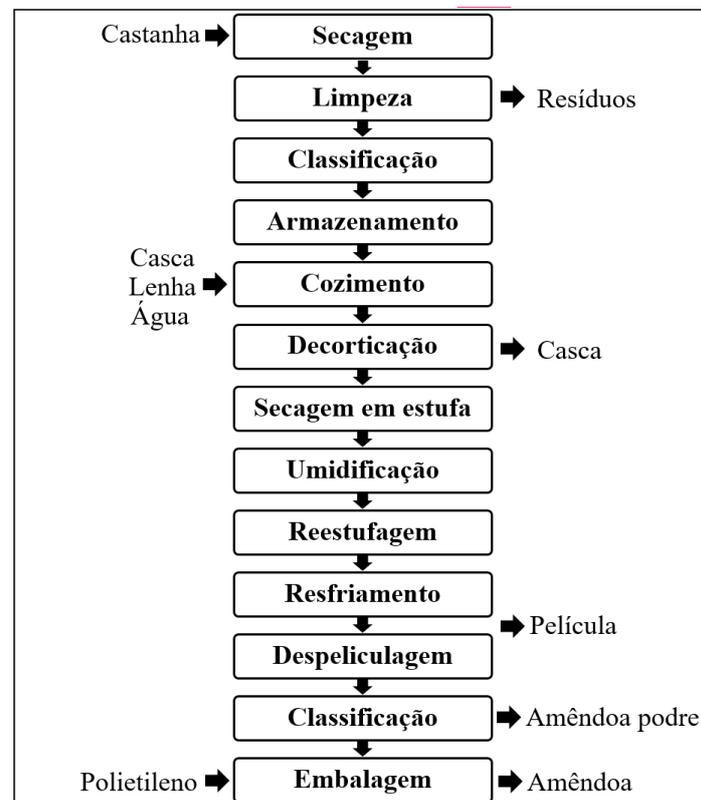
Os dados do processamento de castanha foram coletados em três minifábricas localizadas nos municípios de Ocara e Pacajus, principais polos produtores do estado do Ceará, que contam com 50% das minifábricas existentes (ICB 2020). Esses municípios localizam-se no Maciço de Baturité e Região Metropolitana de Fortaleza, respectivamente, e estão entre os maiores produtores de castanha de caju do estado.

As minifábricas analisadas foram classificadas de acordo com o rendimento da amêndoa por kg de castanha de caju processada: i) rendimento baixo de 0,126 kg de amêndoas/kg de castanha (MFB); ii) rendimento médio de 0,159 kg de amêndoas/kg de castanha (MFM); e iii) rendimento alto de 0,168 kg de amêndoas/kg de castanha (MFA).

As etapas do processamento da castanha assemelharam-se nessas MF, com variações relacionadas à quantidade de insumos e produção de amêndoa. O processamento da castanha de caju nas minifábricas seguiu as etapas de recebimento e secagem, limpeza, cozimento, decorticação, despeliculagem, padronização e comercialização (Figura 2).

Após recebimento, as castanhas foram expostas ao sol, por período de até cinco dias, para redução da umidade. Em seguida, fez-se a limpeza das castanhas, sendo retiradas impurezas como folhas, pedras, areia e pedaços de pedúnculo.

Figura 2. Fluxograma do processamento da castanha de caju em MFs.



Fonte: elaborada pela autora, 2021.

A castanha foi, então, classificada de acordo com o tamanho e direcionada para o cozimento, que ocorreu em vapor úmido de autoclave ou caldeira, tendo como fonte de energia lenha e casca da castanha de caju. Este processo físico permitiu que a amêndoa fosse extraída por tornar a casca facilmente quebrável. Neste trabalho, considerou-se que a lenha utilizada foi proveniente da poda do cajueiro e da renovação do pomar.

Após cozimento, resfriamento e secagem da castanha, fez-se a decorticagem que consistiu em separar a amêndoa da casca, por método manual ou semimecanizado. Também, foi feita a despeliculagem que correspondeu à remoção da película que envolve a amêndoa. Este processo foi feito por meio da sequência de etapas: secagem em estufa, umidificação, nova secagem em estufa e resfriamento. Posteriormente, a amêndoa obtida foi classificada, padronizada e comercializada.

As fontes de energias utilizadas nas três MF para geração de vapor foram a lenha e casca de castanha de caju. Cerca de 30% da casca obtida no processamento foi utilizada para queima e 70% foi vendida para olarias, para serem utilizadas como fonte de energia nos fornos para produção de cerâmicas. De acordo com a literatura, na queima desse material, são liberados dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), gás hidrogênio (H₂), metano (CH₄), gás oxigênio (O₂) e gás nitrogênio (N₂), segundo Alcocer et al. (2015). Na queima da lenha, conforme IPCC (2006), foram gerados CO₂, CH₄ e N₂O (óxido nitroso).

Os dados referentes à produção agrícola de caju foram obtidos de Figueirêdo et al. (2016), para o sistema de baixo insumo na situação de referência. Os inventários da produção de insumos (energia, lenha, embalagem e água) e o transporte destes para as MF, assim como os de tratamento de efluentes líquidos (tratamento secundário) e sólidos (compostagem) foram obtidos da base de dados do *ecoinvent* v. 3.3 (Quadro 1).

Quadro 1. Nome dos insumos na base do *ecoinvent*.

Insumo	Nome na base do <i>ecoinvent</i>	Versão
Minifábricas - Entradas		
Água	Water, well, BR	
Produção de energia	Electricity, low voltage {BR} market for Cut-off, U	3.0.1.0
Produção de energia	Electricity, low voltage {BR} electricity production, fotovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted Cut-off, U	3.0.1.0
Transporte	Transport, lorry > 16 t, fleet average RER U	2.2
Polietileno	Polyethylene, linear low density, granulate {GLO} market for Cut off, U	3.0.4.0
Minifábricas - Saídas		
Tratamento de efluente da minifábrica	Wastewater, from residence {RoW} treatment of, capacity 1,1E10/year Cut-off, U	3.0.1.0
Resíduo para compostagem	Biowaste {CH} treatment of, composting Alloc Def, U	3.0.1.1

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

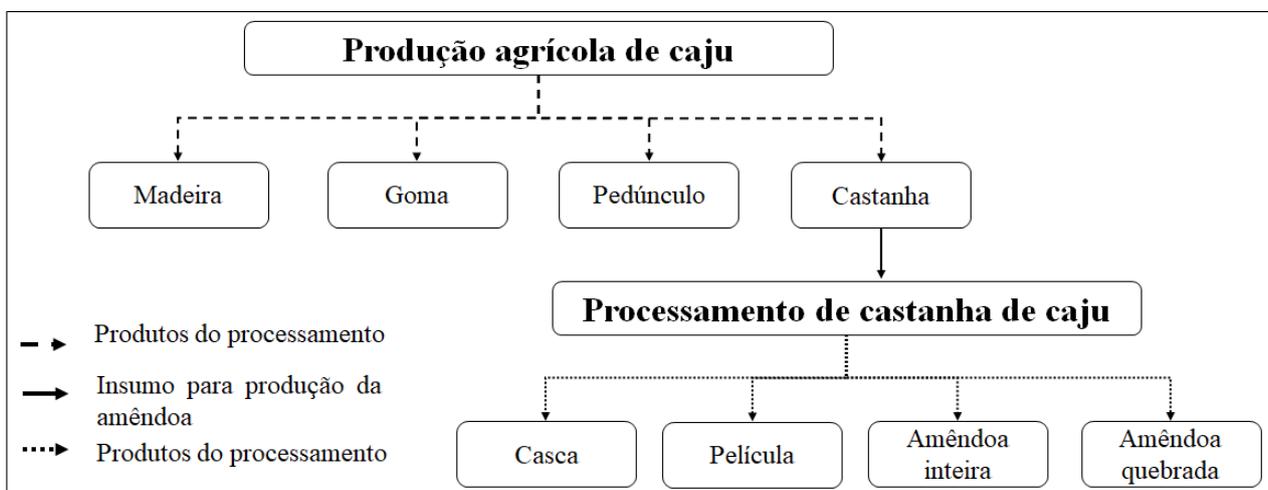
O transporte entre o local a fazenda de caju e a MF que processa a castanha também foi considerado na ACV, por meio da relação entre distância e carga transportada, obtendo-se a unidade tkm (toneladas transportadas por quilômetro). As castanhas de caju que abastecem as MFs se originam de várias

localidades. Na MFM, a distância considerada foi de 270 km, correspondente à distância entre a MF e a cidade com maior produção no estado do CE (Marco), de onde 70% das castanhas são compradas. Considerou-se que os 30% restantes de castanhas foram adquiridos de área agrícola distante 5 km da MF. Na MFA, considerou-se a distância de 15 Km, enquanto na MFB, 10 Km. Essas castanhas de caju são transportadas por caminhões abertos que, em média, possuem capacidade de 16 toneladas.

Critérios utilizados para alocação de dados e impactos para produtos e coprodutos

A alocação consiste em distribuir os impactos de cada processo entre os produtos gerados (Civancik-Uslu et al. 2019). Realizou-se alocação mássica e econômica em dois processos que geram coprodutos (Figura 3): a produção agrícola e o processamento da castanha. Na produção agrícola, considerou-se toda a produção durante a vida útil do pomar, sendo gerados o pedúnculo, a castanha e a madeira. Nas MF, além das amêndoas inteiras, foram gerados os coprodutos casca da castanha de caju, película e amêndoas quebradas. A casca, coproduto obtido em maior quantidade que as amêndoas, apresenta menor valor econômico, sendo vendida para cerâmicas para ser queimada em fornos. Já a película é vendida para fabricação de rações, enquanto as amêndoas inteiras e quebradas foram alocadas em razão da diferença de preço encontrada entre elas, pois o valor de uma amêndoa inteira chega a ter o dobro do dispêndio de uma amêndoa quebrada (Paiva et al. 2006).

Figura 3. Alocação.



Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Os percentuais de alocação aplicados foram obtidos mediante a massa produzida e os valores de venda de cada produto, de acordo com as MF (Tabela 1). De acordo com Figueirêdo et al. (2016), a alocação mássica no sistema de baixo insumo atribuiu 7% dos impactos à castanha, 14% ao pedúnculo e 79% à madeira. Ao empregar a alocação econômica, esses autores atribuíram 51% dos impactos à castanha, 46% ao pedúnculo e 3% à madeira.

Tabela 1. Alocação mássica e econômica.

Produto	Produção (/kg de amêndoa)	Valor Unitário (R\$/kg)	Receita (R\$)	Alocação Mássica (%)	Alocação Econômica (%)
MINIFÁBRICA DE BAIXA PRODUÇÃO (MF_B)					
Casca	4,597	0,2	0,919	75,70	1,15
Película	0,118	0,1	0,012	1,95	0,01
Amêndoa inteira	1	65	65	16,47	81,03
Amêndoa quebrada	0,357	40	14,286	5,88	17,81
Total	6,073	105,3	80,217	100,00	100,00
MINIFÁBRICA DE MÉDIA PRODUÇÃO (MF_M)					
Casca	4,254	0,2	0,851	74,56	1,06
Película	0,094	0,1	0,009	1,65	0,01
Amêndoa inteira	1	65	65	17,53	81,10
Amêndoa quebrada	0,357	40	14,285	6,26	17,83
Total	5,706	105,30	80,146	100,00	100,00
MINIFÁBRICA DE ALTA PRODUÇÃO (MF_A)					
Casca	3,542	0,2	0,708	71,00	0,89
Película	0,089	0,1	0,009	1,79	0,01
Amêndoa inteira	1	65	65	20,05	81,25
Amêndoa quebrada	0,357	40	14,286	7,16	17,85
Total	4,988	105,3	80,003	100,00	100,00

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Definição de categorias de impacto e métodos de avaliação no estudo das pegadas

A pegada de carbono foi mensurada por meio da categoria de Mudanças Climáticas (MC), utilizando-se o método ILCD (JRC 2011). Esse método utiliza como indicador o potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa em relação ao gás carbônico, de acordo com o IPCC (2007) em um período de 100 anos, com resultado expresso em kg CO₂ equivalente (kg CO₂ eq).

O perfil da pegada hídrica considerou as seguintes categorias de impacto e respectivos métodos de avaliação:

i) Escassez Hídrica (EH), avaliada pelo método AWARE (Boulay et al. 2018). Esse método utiliza como indicador a quantidade de água disponível por área e mês após descontado o consumo humano e a necessidade do ecossistema, em relação à média mundial. Essa categoria de impacto decorre do consumo de água e seu resultado é expresso em m³ equivalente (m³ eq);

ii) Toxicidade Humana, Cancerígena (THC) e Não Cancerígena (THNC), e Ecotoxicidade de Água Doce (EcAD) são avaliadas pelo método ILCD (JRC 2011), indicado pela União Europeia (JRC 2011). O método ILCD utiliza o modelo Usetox para avaliação da toxicidade humana e ecotoxicidade e o modelo Eutrend para eutrofização. O modelo Usetox de ponto médio, empregado nesse estudo, considera o efeito na saúde e no ecossistema de mais de mil e duzentas substâncias. Esse modelo tem como indicador para avaliação da toxicidade humana a unidade tóxica comparativa (comparative

toxic unit – CTU) e para avaliação da ecotoxicidade, a unidade tóxica comparativa para ecossistema aquático (comparative toxic unit – CTUe). Esses dois indicadores consideram a fração da substância emitida que entra em contato com o ser humano (CTU) ou espécies aquáticas (CTUe), a resposta do organismo à essa fração e o efeito na saúde humana ou organismo aquático.

iii) Eutrofização de Água Doce (EAD) e Marinha (EM) pelo método ILCD (JRC 2011) que emprega o modelo Eutrend para avaliar o transporte e acúmulo de moléculas de nitrogênio e fósforo em água interiores e marinhas, expressando o impacto na eutrofização de água doce em termos de P equivalente (P eq) e na eutrofização marinha, em termos de N equivalente (N eq).

Utilizou-se o software Simapro, versão 9.1.0.11 para inserção dos dados de inventário do processamento da castanha e avaliação dessas categorias de impacto pelos métodos selecionados.

Estratégia para análise de cenários

Esta análise permite a realização de mudanças tecnicamente possíveis em processos que integram o ciclo de vida do produto ou aspectos metodológicos, verificando-se o efeito dessas mudanças nas pegadas. Neste sentido, fez-se a avaliação dos impactos da produção de amêndoa, por meio da comparação entre uma situação de referência e os cenários alternativos.

A situação de referência considerou a alocação mássica, produção agrícola de caju em sistema de baixo insumo (Figueirêdo et al. 2016), processamento da castanha nos três tipos de MFs (MF_B , MF_M e MF_A) e embalagem das amêndoas em sacos de polietileno. Analisaram-se as três MFs inventariadas nessa situação de referência (Quadro 2).

Nos cenários alternativos ao de referência, considerou-se a produção na MFM, modificando-se um dos seguintes aspectos: i) critério de alocação (mássico ou econômico); ii) sistema de produção agrícola (alto ou baixo insumo); iii) distância entre a unidade de produção agrícola e a MFM (Quadro 2); e tipo de embalagem (polietileno ou vidro). De acordo com Figueirêdo et al. (2016), muitos produtores de caju empregam sistema de baixo insumo no uso de fertilizantes e defensivos, com produção semi-extrativista. Com relação ao transporte de castanhas, considerou-se que a MFM poderia ser adquirida em regiões próximas, a uma distância de 100 km.

Quadro 2. Situação de referência e cenários alternativos na avaliação de impactos do OAC.

Cenários	Descrição dos cenários				
	Produção Agrícola	Transporte		Processamento da castanha	
Situação de referência (SR)	Sistema de baixo insumo, alocação mássica (Figueirêdo et al. 2016)	10 km	275 km	15 km	MF_B , MF_M e MF_A com alocação mássica, embalagem de polietileno
Cenário 1 (C1)	Sistema de baixo insumo, alocação econômica (Figueirêdo et al. 2016)	275 km			MF_M , alocação econômica, embalagem de polietileno
Cenário 2 (C2)	Sistema de alto insumo, alocação mássica (Figueirêdo et al. 2016)	275 km			MF_M , alocação mássica, embalagem de polietileno
Cenário 3 (C3)	Sistema de baixo insumo, alocação mássica (Figueirêdo et al. 2016)	100 km			MF_M , alocação mássica, embalagem de polietileno, com redução no transporte

Cenários	Descrição dos cenários		
	Produção Agrícola	Transporte	Processamento da castanha
Cenário 4 (C4)	Sistema de baixo insumo, alocação mássica (Figueirêdo et al. 2016)	275 km	MF _M , alocação mássica, embalagem de vidro

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Estratégia para a análise de incertezas

Para determinação do desvio padrão nos dados de inventário, empregou-se a Matriz Pedigree e considerou-se que esses dados tinham distribuição log-normal (Frischknecht et al. 2007). A análise de incerteza utilizou o método de Monte Carlo, com 1.000 simulações.

Esta análise, realizada no software Simapro, foi utilizada com dois objetivos: i) geração de valores de impacto mínimos, médios e máximos por categoria e ii) comparação entre a situação de referência (A) e os cenários (B) para identificar reduções ou aumentos significativos nos impactos. Neste segundo caso, considerou-se significativa a diferença entre A e B, quando o número de casos em que o valor do impacto de $A-B > 0$, em relação as 1.000 simulações, foi igual ou maior a 95% (Guo e Murphy 2012).

Resultados e discussão

Análise de Inventário

O inventário das MFs mostrou que a água foi requerida em maior quantidade na etapa do cozimento e nas MFB e MFM (Tabela 2). Já o maior uso de energia elétrica ocorreu na MFM, uma vez que tem maior emprego de equipamentos elétricos, nas etapas de decorticação e secagem em estufa. O maior valor do parâmetro de transporte (1,19 tkm) foi observado na MFM, em razão da maior distância percorrida pela castanha da área agrícola até essa MF.

A fonte de energia utilizada nas três MFs foi a lenha. Em duas delas (MFM e MFB), a casca de castanha de caju, proveniente da etapa de decorticação, foi usada como fonte de energia, por meio da queima em caldeira.

Como saídas das MFs, observou-se a liberação de efluentes, em maior quantidade na MFM e MFB. Em relação aos resíduos sólidos, a MFA obteve maior geração na etapa de limpeza, pela presença da maior quantidade de materiais provenientes do campo e amêndoas podres.

Quanto às emissões atmosféricas, as MF com uso de lenha e casca de castanha de caju apresentaram maior emissão de gases, em decorrência da queima, como metano e dióxido de carbono, gases do efeito estufa (Alcocer et al. 2015), sendo prejudicial ao meio ambiente e à saúde da população (Serra et al. 2018). Já a MFA não apresentou emissão de CO, H₂, O₂ e N₂, pois não fez uso da casca como fonte de energia.

Tabela 2. Inventário das três minifábricas visitadas.

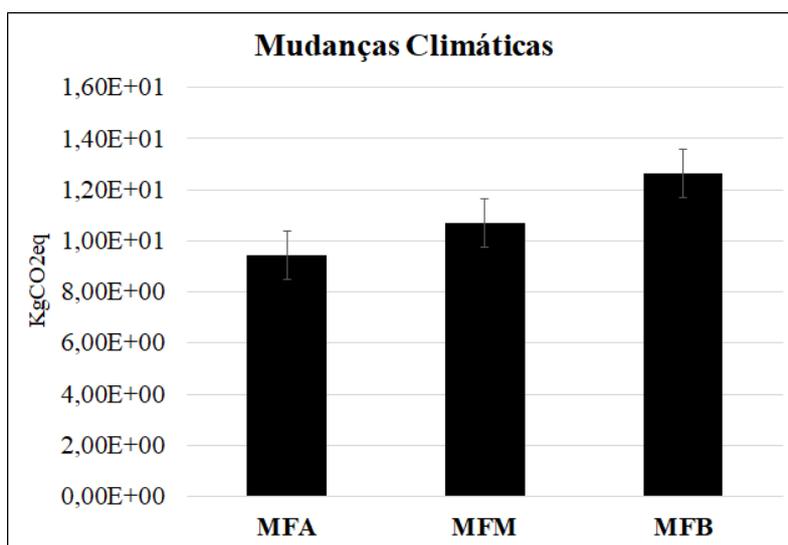
Produto	Minifábricas (MFs)			Unidade
	MF _B	MF _M	MF _A	
PRODUÇÃO				
Casca	4,59E+00	4,25+00	3,54+00	Kg
Película	1,18E-01	9,40E-01	8,90E-02	Kg
Amêndoa inteira	1,00E+00	1,00+00	1,00+00	Kg
Amêndoa quebrada	3,57E-01	3,57E-01	3,57E-01	Kg
ENTRADAS				
Castanha	7,89+00	6,27+00	5,95+00	Kg
Lenha	3,20E-03	9,42E-03	2,94E-04	m ³
Casca	1,59+00	3,14E-01	-	Kg
Água	4,70E-03	4,70E-03	3,57E-03	m ³
Energia elétrica	3,47E-02	3,45E-01	8,93E-03	KWh
Transporte	7,90E-02	1,19+00	8,93E-02	tkm
Embalagem de Polietileno	4,64+00	4,64+00	4,64+00	Kg
SAÍDAS				
Emissões para o ar				
Vapor de água	3,31E-03	3,29E-03	2,60E-03	m ³
CO ₂	2,14+00	9,25E-02	1,63E-01	Kg
CO	1,27E-01	1,03E+00	-	Kg
H ₂	4,30E-02	8,40E-03	-	Kg
CH ₄	2,35E-01	4,51E-02	4,37E-04	Kg
O ₂	1,88E-01	3,77E-02	-	Kg
N ₂	2,15E-01	4,19E-02	-	Kg
N ₂ O	6,20E-05	1,84E-04	5,83E-06	
Efluente líquido para tratamento	1,40E-03	1,40E-03	1,00E-03	m ³
Resíduo para compostagem	2,29E-01	2,59E-01	9,64E-01	Kg

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Pegada de Carbono e Perfil da Pegada Hídrica na Situação de Referência

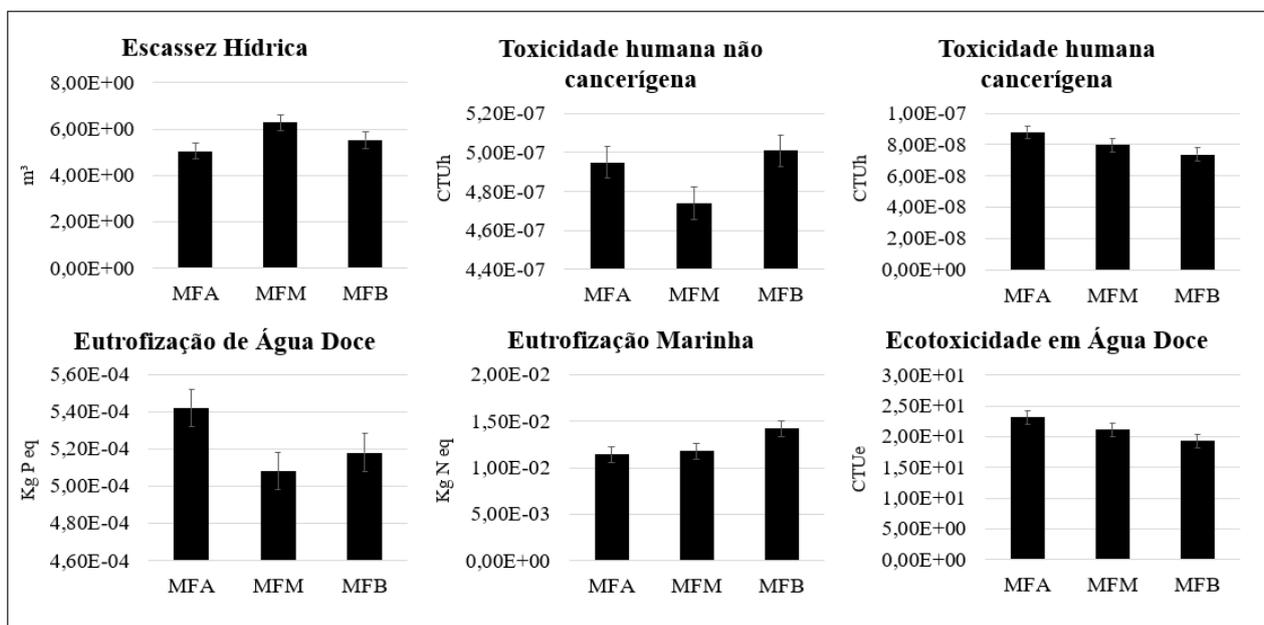
Com relação a pegada de carbono, a minifábrica que obteve maior pegada foi a MFB, com impacto nas mudanças climáticas de 12,64 KgCO₂ eq, sendo superior à MFA em 1,94 KgCO₂ eq e em 3,41 Kg CO₂ eq a MFM (Figura 4). Já o perfil da pegada hídrica variou de acordo com a categoria avaliada, com escassez hídrica variando entre 5,05 e 6,27 m³, respectivamente, nas MFA e MFM, enquanto ecotoxicidade em água doce variou entre 19,302 e 23,154 CTUe, nas MFB e MFA (Figura 5).

Figura 4. Pegada de Carbono da amêndoa de caju nas MFs.



MFA: minifábrica de alto rendimento, MFM: minifábrica de médio rendimento, MFB: minifábrica de baixo rendimento.
Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Figura 5. Perfil da Pegada Hídrica da amêndoa de caju nas minifábricas.



MFA: minifábrica de alto rendimento, MFM: minifábrica de médio rendimento, MFB: minifábrica de baixo rendimento.
Fonte: elaborada pela autora, 2021.

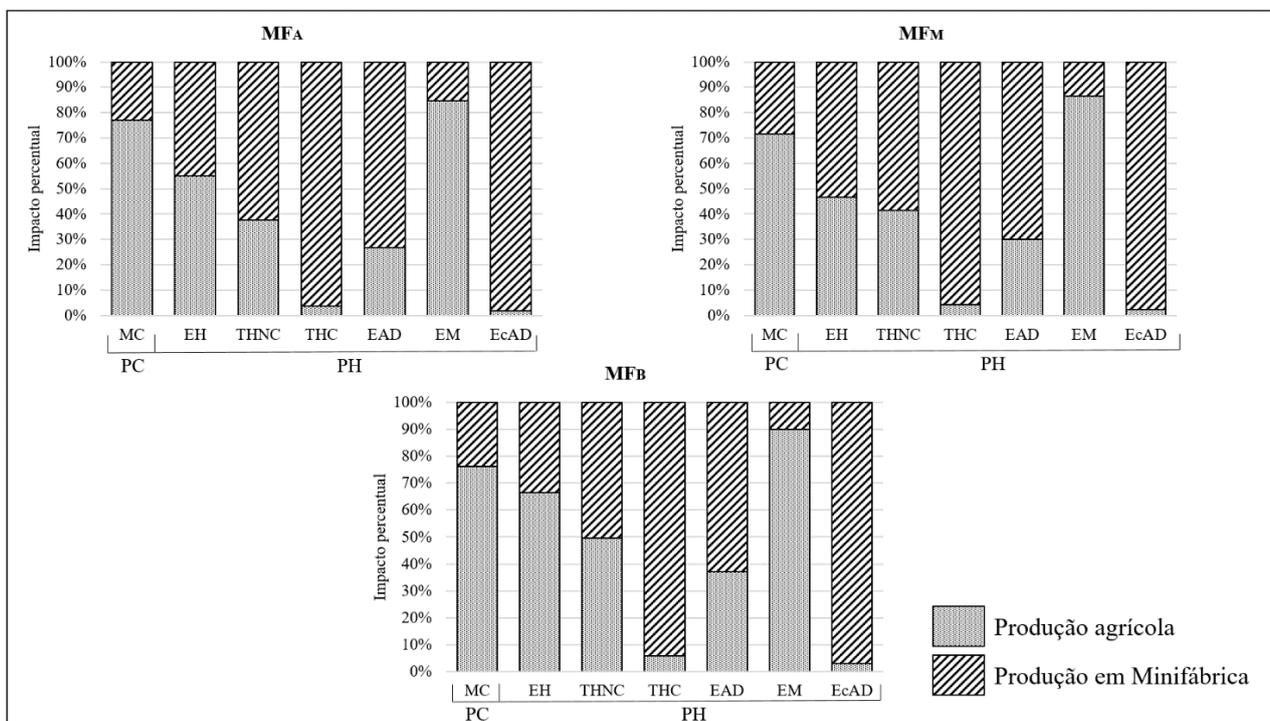
Na MFA, houve redução na pegada de carbono com relação à MFM, e redução no perfil da pegada hídrica, nas categorias de escassez hídrica e eutrofização marinha. A MFB gerou aumento na pegada de carbono em comparação à MFM, pelo maior requerimento de castanhas na produção agrícola. Na análise do perfil da pegada hídrica, os resultados da MFB foram superiores aos da MFM, em toxicidade humana não cancerígena, eutrofização de água doce e marinha. Observou-se que a produção agrícola respondeu pelo maior percentual da pegada de carbono em todas as MF (Figura

6). A produção de caju contribuiu com 76,9% na MFA, 76,1% na MFB e 71,5% na MFM. Esse maior impacto encontrado na produção agrícola ocorreu principalmente devido à mudança no uso do solo, quando se passou de caatinga para pomar de cajueiro anão (Figueirêdo et al. 2016).

Ao considerar apenas a produção agrícola da castanha na situação de referência, a pegada de carbono da castanha variou entre 7,26 e 9,62 Kg CO₂ eq/Kg. Esse valor foi elevado em comparação ao estudo de Venkat (2012), que na avaliação da amêndoa na Califórnia, encontrou resultados que variaram entre 3,50 e 4,00 Kg CO₂ eq/Kg de amêndoa na produção convencional e entre 3,00 e 3,50 Kg CO₂ eq/Kg de amêndoa na produção orgânica. Enquanto os resultados de Marvinney et al. (2015), na avaliação do mesmo produto, obtiveram emissão de 3,12 a 2,67 Kg CO₂ eq/ Kg de caroço de amêndoa e coprodutos associados, sendo esses resultados inferiores aos encontrados nesses estudos. Bartzas et al. (2017) encontraram a emissão de 2.009 Kg CO₂ eq/t de amêndoa com casca na Grécia, valor menos elevado do que o encontrado neste trabalho. Esses valores são inferiores aos do cenário 2 deste estudo, que utiliza maior quantidade de fertilizantes e pesticidas no sistema de alto insumo de produção de castanha, de acordo com Figueirêdo et al. (2016), com emissão de 8,77 Kg CO₂ eq/kg de castanha.

No perfil de pegada hídrica, a produção em minifábricas foi a maior impactante na maioria das categorias em relação à produção agrícola, com exceção da eutrofização marinha e escassez hídrica. O perfil da pegada hídrica variou de 13,5% e 97,7% na MFM, dependendo da categoria de impacto analisada. Na MFA, visualizaram-se resultados similares, com valores entre 15,2% e 98,0%. Enquanto na MFB, a PH variou entre 9,6% e 96,8%.

Figura 6. Contribuição dos processos nas pegadas de carbono e hídrica da amêndoa de caju nas minifábricas analisadas.



PC – Pegada de Carbono; PH – Perfil da Pegada Hídrica; MC – mudanças climáticas; EH – escassez hídrica; THNC – toxicidade humana não cancerígena; THC – toxicidade humana cancerígena; EAD – eutrofização de água doce; EM – eutrofização marinha; EcAD – ecotoxicidade de água doce. MFA: minifábrica de alto rendimento, MFM: minifábrica de médio rendimento, MFB: minifábrica de baixo rendimento.

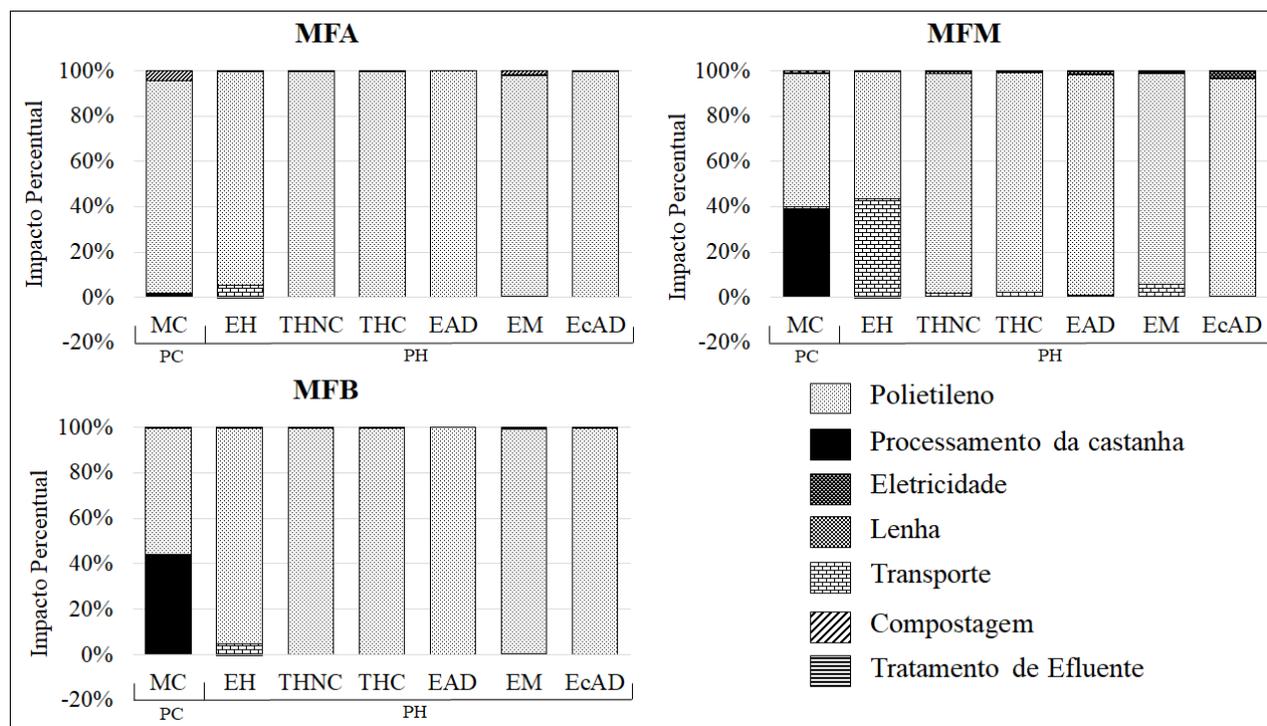
Fonte: elaborada pela autora, 2021.

A análise de contribuição focada nas etapas do processamento da castanha na MFM mostrou que a embalagem de polietileno acarretou maior impacto em ambas as pegadas (Figura 7). Na avaliação da pegada de carbono, 58,6% do impacto da MFM foi advindo do polietileno, por meio da produção do etileno e eletricidade utilizada; a queima de lenha e casca apresentou 39,0% de emissões de metano e monóxido de carbono.

Na avaliação da pegada hídrica a produção de polietileno se destacou pela eletricidade e pelo tratamento do efluente gerado na sua produção, além do impacto devido ao carvão requerido para o mercado de etileno e à utilização de cobre para construção da fábrica. A cadeia do polietileno contribuiu entre 56,1% e 97,6% na MFM com essa pegada, de acordo com a categoria de impacto analisada.

O transporte também contribuiu com impacto na pegada hídrica, principalmente, em razão da eletricidade no processo. O transporte contribuiu com 43,6% do impacto em escassez hídrica, enquanto o impacto em eutrofização marinha correspondeu a 5,62%, em razão do uso do etileno, nitrogênio e eletricidade utilizada para o transporte no processo produtivo.

Figura 7. Contribuição dos insumos e tratamento de resíduos nas MFs.



PC – Pegada de Carbono; PH – Perfil da Pegada Hídrica; MC – mudanças climáticas; EH – escassez hídrica; THNC – toxicidade humana não cancerígena; THC – toxicidade humana cancerígena; EAD – eutrofização de água doce; EM – eutrofização marinha; EcAD – ecotoxicidade de água doce. MFA: minifábrica de alto rendimento, MFM: minifábrica de médio rendimento, MFB: minifábrica de baixo rendimento.

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

O polietileno é um componente químico, derivado dos combustíveis fósseis e de difícil degradação no meio ambiente. É usado amplamente para embalagem de itens alimentares, em função da durabilidade, resistência, estabilidade, facilidade de processamento e manuseio e baixa permeabilidade (Martin et al. 2021).

É preocupação também a degradação final do polietileno após uso como embalagem, pois gera micro plásticos, partículas de polímero sintético ou fibras com diâmetro menor que 5 mm. Esses compostos

representam fontes de contaminação ambiental por serem diminutos o suficiente a ponto de permitir a fácil ingestão pela biota. Por consequência, a integridade dos organismos da cadeia alimentar fica comprometida pela contaminação, especialmente por compostos orgânicos (Martín *et al.* 2021).

A cadeia do polietileno gerou impacto nas mudanças climáticas de 1,78 Kg CO₂ eq/Kg de amêndoa. Esse valor é similar ao encontrado para a resina PET (2,44 kg CO₂eq/Kg, de acordo com Webb *et al.* (2013).

Neste estudo, o processamento da castanha acarretou impacto nas mudanças climáticas de 2,17 (MFA) e 3,04 (MFM) Kg CO₂ eq/ Kg de amêndoa, devido, principalmente, às emissões de metano e monóxido de carbono na etapa de cozimento. Salami (2019) avaliou o impacto nas mudanças climáticas do processamento da castanha de caju na Nigéria, com abordagem do portão ao portão, ou seja, avaliando apenas a etapa de produção de amêndoas, obtendo 0,04 Kg CO₂eq/Kg de amêndoa. A diferença entre os valores encontrados neste estudo e o obtido por Salami (2019) ocorreu pela contabilização das emissões da produção agrícola e da queima da lenha e da casca de caju no processamento da castanha nesse estudo, que geram gases do efeito estufa. Salami (2019) identificou o impacto no ciclo de vida, devido à eletricidade utilizada, que também foi impacto visualizado neste estudo, porém, em menor quantidade, se comparados às emissões da queima, além de desconsiderar as emissões da produção agrícola.

Análise de Cenários

A análise de cenários (Figura 8) mostrou redução da pegada de carbono (impacto nas mudanças climáticas) e perfil da pegada hídrica (impactos na escassez hídrica, toxicidade humana, ecotoxicidade e eutrofização), quando se utilizou do vidro (C4) e menor distância entre fazenda e agroindústria de processamento de castanha (C3), em relação à situação de referência (Figura 6). Quando a alocação econômica foi empregada (C1) e se utilizou do sistema de alto insumo na produção agrícola (C2), ocorreu aumento das pegadas.

Na pegada de carbono no cenário 1, houve aumento de 59,2 KgCO₂ eq na emissão em comparação à situação de referência. Este impacto deve-se à alocação, uma vez que a castanha na alocação econômica tem maior preço e gera maior receita anual. Na pegada hídrica, observou-se resultado semelhante, com aumento em todas as categorias de impacto.

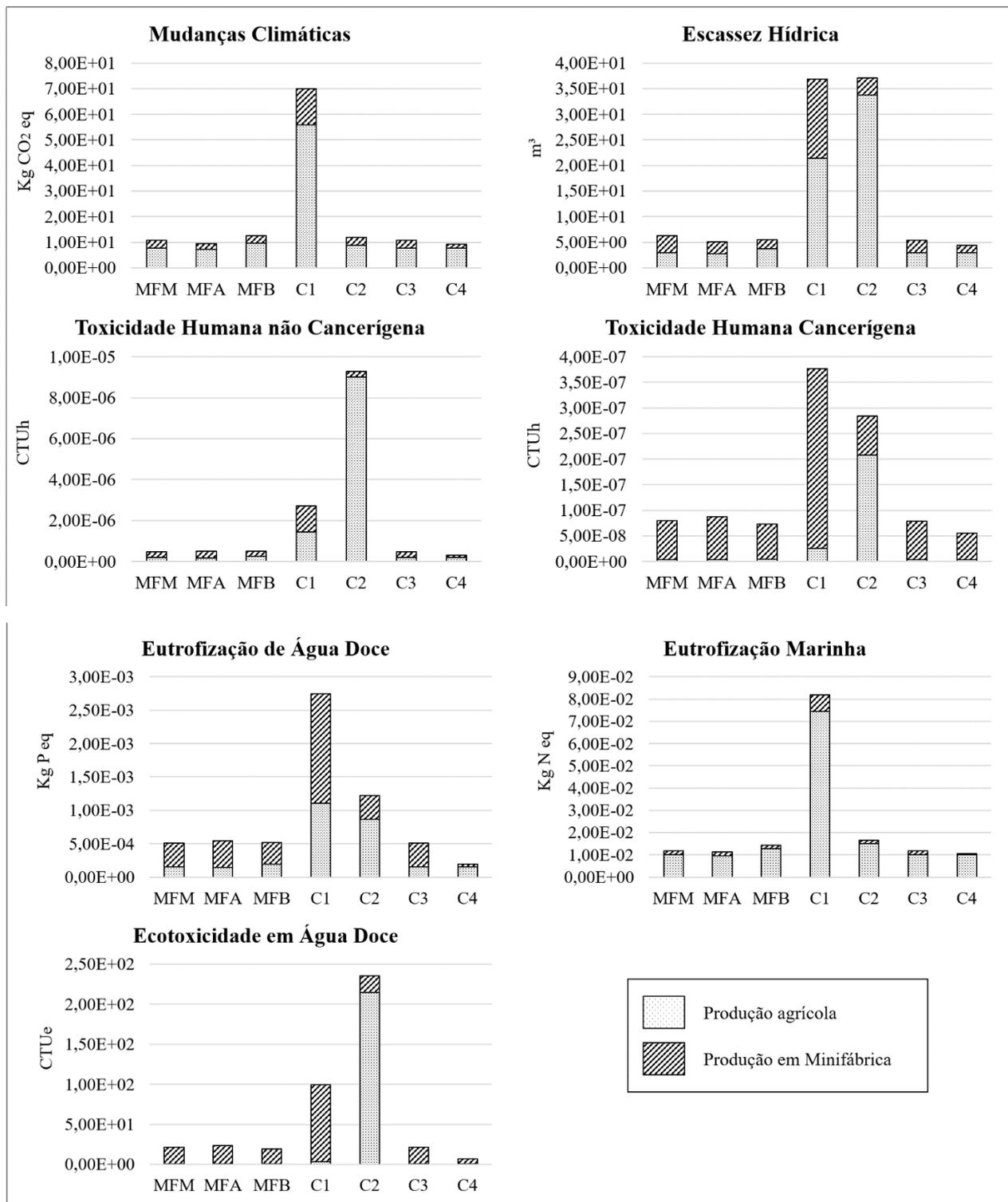
No cenário 2, observou-se o maior impacto no perfil da pegada hídrica, com a utilização do sistema de alto insumo na produção de caju (Figueirêdo *et al.* 2016). Neste cenário, o uso de fertilizantes foi superior e, conseqüentemente, o impacto ambiental da produção agrícola aumentou. Esses resultados são corroborados por estudos de outros produtos agroindustriais. Li *et al.* (2021), ao avaliar os impactos da produção agrícola de algumas culturas como batata, feijão, arroz, trigo, milho e criação de ovinos, suínos e caprinos, também apontou as emissões provenientes da produção de fertilizantes químicos como as mais relevantes. Khanali *et al.* (2018), ao avaliar a produção do óleo de canola, identificaram a fase agrícola como o ponto mais impactante na produção, em virtude das emissões provenientes do uso de fertilizantes e consumo de diesel nas operações agrícolas.

O cenário 3, no qual a distância de transporte foi de 100 km, ofereceu redução em todas as categorias de impactos. Uma menor distância no transporte de castanha corresponde ao menor valor da unidade de tkm, tornando esse cenário menos impactante. Isto mostra a importância da compra de matéria-prima ocorrer em regiões produtoras mais próximas.

No último cenário (C4), observou-se a troca do material usado para embalagem. Como substituto, de acordo com a avaliação do ciclo de vida, o uso do vidro como embalagem resultou em menor

pegada de carbono e perfil de pegada hídrica. Isto se deveu principalmente à redução no consumo de energia com a troca do polietileno pelo vidro.

Figura 8. Comparação de cenários.



MFA: minifábrica de alto rendimento, MFM: minifábrica de médio rendimento, MFB: minifábrica de baixo rendimento, C1: cenário 1, C2: cenário 2, C3: cenário 3, C4: cenário 4

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Simon et al. (2016) avaliaram o vidro como impacto ambiental benéfico para todas as categorias de impacto (exceto para uso do solo), pela reciclagem e por tratar-se de material reciclado de excelente qualidade. De acordo com Ferrara et al. (2020), os impactos encontrados relacionados à embalagem de vidro são o tratamento para os resíduos de vidro e resíduos de papel gráfico, o transporte para as embalagens de vidro e a eletricidade requerida na fabricação. Esses autores identificaram os impactos do vidro em razão do peso e grande consumo de energia para produção, pois o processo de derretimento do vidro ocorre a uma temperatura que varia de 1400 a 1600 °C.

A alternativa para minimizar o impacto, de acordo com Point et al. (2012) é reduzir o peso de garrafas de vidro em cerca de 30%, o que pode resultar em reduções entre 2% e 10% de impactos do ciclo de vida do vinho. Além disso, Ponstein et al. (2019) destacaram que ao combinar o uso de frascos mais leves com o reaproveitamento de frascos de vidro por cinco vezes, reduz-se o impacto total do potencial de aquecimento global em 38%.

Análise de incertezas na comparação da situação de referência com os cenários

A análise de incerteza foi utilizada para verificar se havia diferença significativa entre os cenários e a situação de referência, com nível de significância de 95% (Tabela 4). Observou-se que C1 e C2 são os mais impactantes e apresentam diferença significativa em relação à situação de referência para a maioria das categorias de impacto analisadas neste estudo, exceto na categoria de escassez hídrica, no C1, e mudanças climáticas, no C2. O cenário 4 foi o melhor cenário dentre os analisados, com diferenças significativas, principalmente, em eutrofização de água doce e ecotoxicidade em água doce, em relação a situação de referência.

Tabela 4. Análise de incerteza na comparação entre a situação de referência e cada cenário avaliado.

Cenários	Categorias de impacto	Unidade	Análise de Erro (% em que A-B>0)
Cenário 1	MC	Kg CO ₂ eq	100,00
	EH	m ³	83,00
	THNC	CTUh	100,00
	THC	CTUh	100,00
	EAD	Kg P eq	100,00
	EM	Kg N eq	100,00
	EcAD	CTUe	100,00
Cenário 2	MC	Kg CO ₂ eq	80,00
	EH	m ³	99,90
	THNC	CTUh	100,00
	THC	CTUh	100,00
	EAD	Kg P eq	100,00
	EM	Kg N eq	99,00
	EcAD	CTUe	100,00

Cenários	Categorias de impacto	Unidade	Análise de Erro (% em que A-B>0)
Cenário 3	MC	Kg CO ₂ eq	49,7
	EH	m ³	4,50
	THNC	CTUh	45,5
	THC	CTUh	38,2
	EAD	Kg P eq	49,50
	EM	Kg N eq	49,6
	EcAD	CTUe	48,1
Cenário 4	MC	Kg CO ₂ eq	0,7
	EH	m ³	36,8
	THNC	CTUh	2,5
	THC	CTUh	22,00
	EAD	Kg P eq	0,00
	EM	Kg N eq	29,4
	EcAD	CTUe	0,00

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Conclusão

Este trabalho mostrou que a produção de um quilo de amêndoa de caju gera uma pegada de carbono entre 9,23 KgCO₂ eq e 12,64 KgCO₂ eq, de acordo com o tipo de minifábrica analisado (baixa, média ou alta produção). Já o perfil de pegada hídrica variou de 5,05 m³ a 6,27 m³ para escassez hídrica, de 3,30E-09 a 4,38E-09 para toxicidade humana cancerígena, de 1,87E-07 a 2,48E-07 para toxicidade humana não cancerígena, de 19,302 CTUe a 23,154 CTUe para ecotoxicidade, de 9,68E-03 a 1,02E-02 para eutrofização marinha e de 1,45E-04 a 1,92E-04 para eutrofização em água doce.

A minifábrica de alto rendimento (MFA) apresentou menor pegada de carbono. Porém, nenhum tipo de minifábrica se sobressaiu no perfil de pegada hídrica, com um tipo ou outro gerando menor impacto de acordo com a categoria de impacto avaliada nesse perfil.

Este trabalho também mostrou que a produção agrícola é muito relevante no cômputo final da pegada de carbono da amêndoa de caju, mesmo tendo sido considerado um sistema de produção de baixo insumo. Na análise de cenário, investigou-se o impacto do sistema de alto insumo que se mostrou pior para essa pegada. Embora o sistema de alto insumo resultou em maior produtividade, esse aumento não compensou as emissões e possíveis impactos associados ao maior uso de insumos. Recomenda-se em futuros estudos a análise de impacto de sistemas de produção agrícola conservacionistas, que integrem o pomar de caju com pecuária, leguminosas, gramíneas e/ou produção florestal para avaliar o potencial de redução dessa pegada na produção de caju.

A análise do perfil de pegada hídrica da amêndoa de caju mostrou que os impactos ocorrem principalmente no processamento da castanha nas minifábricas para maioria das categorias consideradas. Esses impactos são oriundos da cadeia de produção das embalagens de polietileno. Observou-se ser possível reduzir significativamente os impactos nessas categorias (entre 45,7% e 49,1%) substituindo embalagens de polietileno por vidro.

Por fim, conclui-se que é importante adotar a abordagem de ciclo de vida no estudo de pegadas ambientais de produtos pois permite identificar pontos críticos e atuar de forma eficiente na redução dos impactos em toda cadeia de produção. Essa abordagem aplicada ao estudo da amêndoa de caju revelou a importância de redução das emissões de gases de efeito estufa na produção de caju e de mudança no tipo de embalagem das amêndoas para melhoria do desempenho ambiental desse produto. Uma análise focada em apenas parte da cadeia de produção seria pouco eficiente para obtenção da pegada de carbono e perfil da pegada hídrica da amêndoa de caju.

Agradecimentos

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida (132183/2019-6) e à Embrapa Agroindústria Tropical, pela disponibilização de infraestrutura e equipamentos para a realização do artigo.

Participação dos autores: Todos os autores participaram do processo de planejamento, escrita, revisão e correção do texto.

Aprovação ética ou licenças de pesquisa: O trabalho não teve a necessidade de apresentar licenças de aprovações éticas.

Disponibilidade dos dados: Os dados utilizados nesta pesquisa estão disponíveis na plataforma de dados ecoinvent, disposta no software SimaPro. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/#1598281291261-311ce343-ec92>

Agência de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudo (132183/2019-6) concedida à Pollyana Maria Pimentel Monte.

Conflito de Interesses: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Referências

- Alcocer JCA, Duarte JBF, Pereira MC, Oliveira MLM, Lima RKC, Benevides D, Barros G. 2015. Mass and Energy Balance of a Cashew Nut Shell Gasification Pilot Unit Utilized in Power Generation. *IEEE Latin America Transactions* 3(10). DOI: [10.1109/TLA.2015.7387239](https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7387239).
- Almeida LHF, Cordeiro SA, Pereira RS, Couto LC, Lacerda KWS. 2017. Viabilidade econômica da produção de caju (*Anacardium occidentale* L.). *Nativa*, Sinop 5(1):9-15. DOI:[10.5935/2318-7670.v05n01a02](https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05n01a02)
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017. NBR 14046: Gestão ambiental — Pegada hídrica — Princípios, requisitos e diretrizes. Rio de Janeiro, 39 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2015. NBR 14067: Gases de efeito estufa – Pegada de carbono de produtos – Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação. Rio de Janeiro, 62 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. NBR 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 22 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2009. NBR 14044: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 46 p.
- Bartzas G, Vamuka D, Komnitsas K. 2017. Comparative life cycle assessment of pistachio, almond and apple production. *Information Processing in Agriculture* 4:188–198. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.04.001>
- Bicer Y, Dincer I, Zamfirescu C, Vezina G, Raso F. 2016. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production* 135:1379-1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.023>

Blanco CF, Marques A, Bodegom PMV. 2018. An integrated framework to assess impacts on ecosystem services in LCAdemonstrated by a case study of mining in Chile. *Ecosystem Services* 30:211-219. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.11.011>

Boulay A, Bare J, Benini L, Berger M, Lathuillière MJ, Manzardo A, Margni M, Motoshita M, Núñez M, Pastor AV, Ridoutt B, Oki T, Worbe S, Pfister S. 2018. 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* 23:368–378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>

Brainer MSCP, Vidal MF. 2020. Cajucultura. *Caderno Setorial ETENE*, n. 114(5).

Civancik-Uslu D, Puig R, Ferrer, L, Fullana-i-Palmer P. 2019. Influence of end-of-life allocation, credits and other methodological issues in LCA of compounds: An in-company circular economy case study on packaging. *Journal of Cleaner Production* 212:925-940. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.076>

Ferrara C, Zigarelli V, De Feo G. 2020. Attitudes of a sample of consumers towards more sustainable wine packaging alternatives. *Journal of Cleaner Production* 271. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122581

Figueirêdo MCB, Potting J, Serrano LAL, Bezerra MA, Barros VS, Gondim RS, Nemeck T. 2016. Environmental assessment of tropical perennial crops: the case of theBrazilian cashew. *Journal of Cleaner Production* 112:131–140. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.134>

Frischknecht R, Jungbluth N, Althaus HJ, Doka G, Heck T, Hellweg S, Hirschier R, Nemecek T, Rebitzer G, Spielmann M, Wernet G. 2007. Overview and Methodology. *Ecoinvent report*, n. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

Guo M, Murphy RJ. 2012. LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis. *Science of The Total Environment* 435-436:230-243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.006>

IBGE. Produção de Castanha de Caju. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6588#resultado>>. Acesso em 28 jun. 2021.

INSTITUTO CAJU BRASIL. Boletim ICB N° 07. Disponível em: <https://cajubrasil.org/wp-content/uploads/2020/05/Boletim-ICB_7.pdf>. Acesso em 19 out. 2020.

IPCC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. IGES, Eggleston Published, Japan.

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Josino JB, Serra DS, Gomes MDM, Cavalcante FSA. 2017. Changes of respiratory system in mice exposed to PM4.0 or TSP from exhaust gases of combustion of cashew nut shell. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 56:1-9. DOI: 10.1016/j.etap.2017.08.020

JRC - European Commission. 2011. Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. 1 ed.

Khanali M, Mousavi SA, Sharifi M, Nasab FK, Chau K. 2018. Life cycle assessment of canola edible oil production in Iran: A case study in Isfahan province. *Journal of Cleaner Production* 196:714-725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.217>

Li M, Liu S, Sun Y, Liu Y. 2021. Agriculture and animal husbandry increased carbon footprint on the Qinghai-Tibet Plateau during past three decades. *Journal of Cleaner Production* 278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123963>

Lima ED. 2017. Processamento integral dos principais componentes do cajueiro e seus resíduos através de uma cadeia de biorrefinaria suportada energeticamente por painel fotovoltaico. 2017. 125 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

- Mapurunga S. Líquido da casca da castanha-de-caju: de subproduto do agronegócio a protagonista da química. Disponível em: <<https://agencia.ufc.br/liquido-da-casca-da-castanha-de-caju-de-subproduto-do-agronegocio-a-protagonista-da-quimica/>>. Acesso em 19 mar. 2020.
- Martín C, Fajardo C, Costa G, Sánchez-Fortún S, Andrés MDS, González F, Nande M, Mengs G, Martín M. 2021. Bioassays to assess the ecotoxicological impact of polyethylene microplastics and two organic pollutants, simazine and ibuprofen. *Chemosphere* 274. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.129704](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129704)
- Martin EJP, Oliveira, DSBL, Oliveira LSBL, Bezerra BS. Life cycle comparative assessment of pet bottle waste management options: A case study for the city of Bauru, Brazil. *Waste Management* 119:226–234. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.041>
- Marvinney E, Kendall A, Brodt S. 2015. Life cycle-based assessment of energy use and greenhouse gas emissions in almond production, part II: uncertainty analysis through sensitivity analysis and scenario testing. *Journal of Industrial Ecology* 19(6):1019-1029. <https://doi.org/10.1111/jiec.12333>
- Melo CFA, Braga FFS, Oliveira HAL, Almeida MN. 2018. Desafios em uma propriedade familiar de produção de caju no interior do Nordeste. *Brazilian Journal of Development* 4(6):3135-3146.
- Oluoyole KA, Agbeniyi SO, Ayegbonyin KO. 2017. Competitiveness of Cashew Production in Nigeria. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry* 4:1-7.
- Paiva FFA, Silva Neto RM, Pessoa PFAP, Leite LAS. 2006. Processamento de castanha de caju. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, Coleção Agroindústria Familiar, 53 p.
- Point E, Tyedmers P, Naugler C. 2012. Life cycle environmental impacts of wine production and consumption in Nova Scotia, Canada. *Journal of Cleaner Production* 27:11-20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.035>
- Ponstein HJ, Meyer-Aurich A, Prochnow A. 2019. Greenhouse gas emissions and mitigation options for German wine production. *Journal of Cleaner Production* 212:800-809. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.206>
- Salami HAA. 2019. Comparative Life Cycle Assessment of Energy Use in Major Agro-processing Industries in Nigeria. *Journal of Energy Research and Reviews* 3:1-11. DOI: [10.9734/JENRR/2019/v3i430102](https://doi.org/10.9734/JENRR/2019/v3i430102)
- Serra DS, Escossio AP, Silva GM, Brasil, PF, Araújo RS, Oliveira MLM, Leal-Cardoso, JH, Cavalcante FSA. 2018. Total particulate matter from combustion of cashew nut shell exacerbates lung injury in ova-induced asthma model. *International Journal of Development Research* 8:19400-19409.
- Venkat K. 2012. Comparison of twelve organic and conventional farming systems: a life cycle greenhouse gas emissions perspective. *Journal of Sustainable Agriculture* 36:620-649. <https://doi.org/10.1080/10440046.2012.672378>
- Webb HK, Arnott J, Crawford RJ, Ivanova EP. 2013. Plastic degradation and its environmental implications with special reference to poly(ethyleneterephthalate). *Polymers* 5:1–18. <https://doi.org/10.3390/polym5010001>



Esta obra está licenciada com uma *Licença Creative Commons Atribuição Não-Comercial 4.0 Internacional*.