

**LUCAS DE LIMA CASSERES DOS SANTOS**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE LATICÍNIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Natalia dos Santos Renato

Coorientadores: André Pereira Rosa  
Thiago José Florindo

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237a Santos, Lucas de Lima Casseres dos, 1994-  
2021 Avaliação comparativa do impacto de ciclo de vida de  
laticínios / Lucas de Lima Casseres dos Santos. – Viçosa, MG,  
2021.

1 dissertação eletrônica (62 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Natalia dos Santos Renato.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 57-62.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2021.066>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Laticínios. 2. Ciclo de vida do produto. 3. Doce de leite.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.  
II. Título.

CDD 22. ed. 637.1

Bibliotecário(a) responsável: Renata de Fátima Alves CRB6/2578

**LUCAS DE LIMA CASSERES DOS SANTOS**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO IMPACTO DE CICLO DE VIDA DE LATICÍNIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de julho de 2021.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Lucas de Lima Casseres dos Santos  
Autor

  
\_\_\_\_\_  
Natalia dos Santos Renato  
Orientadora

*Aos que vieram antes de mim e àqueles que  
estiveram comigo na minha caminhada me  
apoiando e incentivando até o presente  
momento, sem os quais não seria quem sou  
hoje.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a presença de Deus na minha vida, nos momentos difíceis e nos de glória. Por tudo de bom que Ele me proporciona, pela alegria, saúde, felicidade e aprendizado e pelas provações que, aparentemente não tão boas, me trazem aprendizado, sabedoria e gratidão pelo que me é oferecido. Agradeço pela Sua presença, pela oportunidade e o privilégio de poder evoluir como ser humano e enxergar cada vez mais o meu propósito em vida.

Agradeço imensamente pela presença dos meus pais, por desde pequeno, me educarem, cuidarem de mim, por me deram oportunidades de alcançar meus sonhos e, por me incentivar em tudo. Obrigado também por mostrarem a grande importância de cultivar os bons valores que me passaram para ser um ser humano mais feliz e realizado.

Agradeço a minha família, a meus irmãos, pela parceria, o carinho, cuidado e o apoio, aos meus tios por sempre terem sido a minha rede de apoio por cuidarem de mim, pelo carinho e apoio. Agradeço especialmente a minha querida vó, pelo exemplo de pessoa que ela é, pelo carinho e dedicação a mim e à família e porque sem ela, nada disso seria possível e essa rede não teria sido criada.

Agradeço aos meus amigos que fiz ao longo da vida e àqueles que fiz no período em que estive em Viçosa por todo apoio, incentivo e momentos bons que de alguma forma tornaram o desafio do mestrado mais leve e tranquilo de se lidar.

Agradeço à Professora Natalia Renato pela confiança e oportunidade de desenvolver o mestrado e o projeto sob sua orientação, pelas oportunidades de pesquisa e início à docência oferecidas, apoio, sugestões e suporte até nos momentos difíceis do projeto em decorrência da situação sanitária do país, tornando mais leves até as etapas mais trabalhosas do projeto. Agradeço ao professor André Rosa pela orientação nesse e em outros trabalhos, as dicas valiosas, o cuidado nas revisões, o auxílio no contato a fábrica de laticínios e a disponibilidade em sempre apoiar no que fosse possível. Agradeço ao professor Thiago Florindo por ter auxiliado na descoberta desse tema tão caro que é a Avaliação de Ciclo de Vida, pelas sugestões e críticas

pertinentes ao trabalho e por estimular sempre ir além do simples questionamento nesse tema tão necessário.

Agradeço à fábrica Laticínios Viçosa pela oportunidade de desenvolver a pesquisa com os seus laticínios. Em especial, aos funcionários Matheus, Aristides e Tatiana.

Agradeço aos pesquisadores Clandio Ruviaro e Katia Gutierrez, que gentilmente se disponibilizaram para colaborar na melhoria da qualidade deste trabalho com sugestões e correções. É com muita alegria e honra que recebo suas colocações e participação nesse momento.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

*"The future depends on what you do today".*  
(Mahatma Gandhi)

## RESUMO

SANTOS, Lucas de Lima Casseres dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Avaliação comparativa do impacto de ciclo de vida de laticínios.** Orientadora: Natalia dos Santos Renato. Coorientadores: André Pereira Rosa e Thiago José Florindo.

A produção de laticínios está relacionada a uma série de impactos ambientais, seja pelo consumo de leite ou a energia requerida em sua manufatura. Para quantificar e compreender a origem desses impactos, a avaliação de ciclo de vida é uma das metodologias que vem sendo utilizadas nesse propósito. No entanto, a literatura carece de estudos que avaliem impactos de laticínios de forma comparativa. Somado a isso existem laticínios tradicionais que ainda não foram devidamente avaliados pela metodologia. A partir dessa necessidade, nesse trabalho foi realizada uma avaliação comparativa de ciclo de vida, do tipo cradle-to-gate, de seis laticínios de uma fábrica localizada no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. Em complemento, duas análises de sensibilidade foram feitas para avaliar o grau de influência no perfil ambiental dos produtos a depender do modo de analisar os processos multifuncionais e através do beneficiamento de subprodutos dentro do laticínio. Os resultados obtidos apontaram que, dentre os laticínios estudados, o queijo e a manteiga se sobrepuseram expressivamente aos demais laticínios, o requeijão e o doce de leite apresentam impactos semelhantes, e o iogurte e o leite apresentaram os menores impactos dentre os demais. O aproveitamento dos subprodutos se mostrou como uma forma efetiva de redução de impacto ambiental atribuído aos laticínios, principalmente para o queijo e o requeijão, que tiveram reduzidos seus valores quase à metade. Verificou-se também que o uso de estratégias diferentes para lidar com processos multifuncionais afetou de forma expressiva os resultados dos laticínios, sendo a subdivisão de processos aliada a alocação causal a melhor alternativa frente a alocação por sólidos de leite, por representar melhor a realidade dos fluxos dentro da fábrica. Através dos resultados das investigações feitas nesse trabalho, é possível ter uma melhor compreensão acerca do perfil ambiental de laticínios no Brasil, principalmente os tradicionais, como o doce de leite e o requeijão. Outras contribuições estão na proposição de alternativas para a melhoria do perfil ambiental dos produtos, como o beneficiamento dos subprodutos, e no questionamento ao uso

da alocação por sólidos de leite, que é comum em trabalhos de avaliação de ciclo de vida, e a proposição de uma melhor forma para se avaliar o impacto de laticínios.

Palavras-chave: Laticínios. Avaliação de ciclo de vida. Doce de leite.

## ABSTRACT

SANTOS, Lucas de Lima Casseres dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2021. **Comparative life cycle assessment of dairy products**. Adviser: Natalia dos Santos Renato. Co-advisers: André Pereira Rosa and Thiago José Florindo.

The production of dairy products is related to a series of environmental impacts, either by the milk consumption or the energy required in its manufacture. To quantify and understand the origin of these impacts, life cycle assessment is one method that has been used for this purpose. However, a lack of studies evaluates the impacts of dairy products comparatively. In addition, there are traditional dairies that have not yet been properly evaluated by the method. Based on this, in this study, we conducted a comparative cradle-to-gate life cycle assessment of six dairies from a plant in the municipality of Viçosa, Minas Gerais, Brazil. In addition, two sensitivity analyses were performed to evaluate the influence on the environmental profile of the products depending on the way of analyzing the multifunctional processes and through the processing of by-products within the dairy. The results obtained pointed out that, among the dairy products studied, cheese and butter expressively overlapped the other dairy products, requeijão (spreadable cheese), and dulce de leche presented similar impacts, and yogurt and milk presented the lowest impacts among the others. Using by-products proved to be an effective way of reducing the environmental impact attributed to dairy products, especially for cheese and requeijão, which had their values reduced by almost half. It was also verified that the use of different strategies to deal with multifunctional processes considerably affected the results of the dairies, with the subdivision of processes combined with the causal allocation being the best alternative to the allocation by milk solids because it better represents the reality of the flows inside the factory. Through the results of the investigations done in this work, it is possible to have a better understanding of the environmental profile of dairies in Brazil, especially the traditional ones, such as dulce de leche and cottage cheese. Other contributions are in the proposition of alternatives to improve the environmental profile of the products, such as the processing of by-products, and in the use's questioning of allocation by milk solids, which is common in life cycle assessment studies, and the proposition of a better way to evaluate the impact of dairy products.

Keywords: Dairy products. Life cycle assessment. Dulce de leche.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de avaliação de ciclo de vida aplicada no estudo. ....	20
Figura 2 – Localização geográfica do laticínio no município onde foi realizado o estudo. ....	21
Figura 3 – Fronteiras do sistema do ciclo de vida da produção de laticínios. ....	24
Figura 4 – Desempenho relativo entre laticínios em diferentes categorias de impacto ambiental.....	36
Figura 5 – Contribuição dos impactos dos laticínios considerando o total mensal pela unidade funcional. ....	41
Figura 6 – Relação de impactos dos insumos aos produtos para diferentes categorias de impacto. ....	42
Figura 7 – Relação de impactos dos insumos aos produtos para diferentes categorias de impacto, sem considerar o leite. ....	45
Figura 8 – Influência dos coprodutos na produção dos laticínios. ....	49
Figura 9 – Relação das categorias de impacto para os laticínios em diferentes estratégias de se lidar com a multifuncionalidade. ....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção mensal e características nutricionais dos laticínios avaliados.	22
Tabela 2 – Processos produtivos de insumos desconsiderados na construção do modelo e os produtos que são afetados pela sua ausência.....	26
Tabela 3 – Distribuição percentual dos fluxos para cada processo na fábrica. ....	28
Tabela 4 – Inventário para a produção de laticínios considerando 1 kg de produto final.....	29
Tabela 5 – Fluxos considerados no modelo e seu respectivo processo no banco de dados .....	31
Tabela 6 – Relação de teor de sólidos de leite e total produzido por produto e subproduto para o cálculo da alocação.....	33
Tabela 7 – Resultados da avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida dos diferentes laticínios.....	35
Tabela 8 – Comparativo dos resultados com outros estudos de ACV semelhantes publicados na literatura. ....	37
Tabela 9 – Comparativo do impacto do leite cru do trabalho com outros estudos de ACV brasileiros publicados na literatura.....	44
Tabela 10 – Resultados da avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida de alguns laticínios e seus subprodutos.....	48

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
CML	Centrum voor Milieuwetenschappen
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	International Dairy Federation
ISO	International Organization for Standardization
FPCM	Fat Protein Corrected Milk
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas.
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Teraftalato
PIB	Produto Interno Bruto
PP	Polipropileno

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	16
OBJETIVOS .....	19
1.1.1. Objetivo Geral .....	19
1.1.2. Objetivos Específicos.....	19
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
2.1. Mapeamento do processo produtivo .....	21
2.1.1. Localização da fábrica de laticínios .....	21
2.1.2. Caracterização dos laticínios produzidos.....	22
2.2. Definição do objetivo e escopo da avaliação do ciclo de vida.....	22
2.3. Elaboração do inventário do ciclo de vida dos sistemas de produtos .....	27
2.4. Realização da avaliação de impactos de ciclo de vida .....	31
2.5. Análise de sensibilidade.....	32
2.5.1. Influência dos subprodutos na avaliação dos impactos dos produtos ..	32
2.5.2. Influência da opção de subdivisão de processos multifuncionais em detrimento de apenas alocação .....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
3.1. Comparação entre os impactos dos laticínios.....	35
3.1.1. Queijo Muçarela.....	37
3.1.2. Manteiga .....	38
3.1.3. Iogurte e leite .....	39
3.1.4. Impacto associado à unidade funcional comparado ao da produção mensal .....	40
3.2. Impactos dos insumos .....	41
3.2.1. Impactos do leite cru na produção .....	41
3.2.2. Impactos dos demais insumos sem considerar o leite cru .....	44
3.3. Análise de sensibilidade.....	48
3.3.1. Influência dos subprodutos na avaliação dos impactos dos produtos ..	48
3.3.2. Influência da subdivisão de processo multifuncionais e alocação causal contra apenas alocação por sólidos de leite .....	50
3.4. Sugestões para mitigação de impactos .....	52
3.4.1. Mitigação no insumo principal: o leite .....	52
3.4.2. Mitigação nos insumos secundários: empacotamento e energia.....	53
3.4.3. Mitigação pelo aproveitamento dos subprodutos.....	54
4. CONCLUSÕES .....	56

REFERÊNCIAS.....	57
------------------	----

## 1. INTRODUÇÃO

A pecuária leiteira é um importante ramo do agronegócio brasileiro, devido ao seu valor para a economia nacional (SIMÕES et al., 2020). Em 2020, o valor bruto da produção de leite gerou cerca de R\$ 40,4 bilhões de reais, quantia que representou aproximadamente 0,543% do PIB (BRASIL, 2021; IBGE, 2021). O destaque desse setor no país também se reflete pelo seu desempenho produtivo diante do panorama internacional. No ano de 2020, o Brasil destacou-se como um dos maiores produtores de leite no mundo, ocupando a sexta colocação no cenário mundial, com 25,5 bilhões de litros de leite inspecionados, sendo Minas Gerais o estado com maior produção (EMBRAPA, 2021; FAO, 2021). Além dos benefícios econômicos desta atividade, o leite e seus derivados proporcionam um elevado aporte de nutrientes, energia e saúde para as pessoas desde a infância, constituindo um importante ingrediente para a dieta humana (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2013a). Desse modo, os laticínios apresentam um papel fundamental por contribuir para a segurança alimentar da população (FAO; GDP, 2018; GARCIA; OSBURN; CULLOR, 2019).

No entanto, a produção de laticínios relaciona-se a uma série de passivos ambientais, como a intensificação do efeito estufa, a acidificação do solo, eutrofização dos recursos hídricos e a demanda de energia de fontes fósseis (DJEKIC et al., 2014). Os autores Bacenetti et al. (2016) apresentam que o potencial aquecimento global, de acidificação, de eutrofização e a demanda de energia são alguns dos principais impactos ambientais na produção do leite, devido a produção de alimento para o gado. Já em termos da produção agroindustrial, em sua pesquisa sobre produção de queijo, Santos et al. (2017) apresentam que as atividades mais impactantes envolvem o consumo de energia e a padronização do leite, o primeiro trazendo danos à camada de ozônio e o segundo influenciando expressivamente na intensificação do efeito estufa e demanda de energia de fontes fósseis. De forma a lidar com essas questões, em alguns estudos aponta-se a importância do desenvolvimento de uma cadeia leiteira mais sustentável (CORTÉS et al., 2021; JOUZDANI; GOVINDAN, 2021). Para isso, busca-se o desenvolvimento do setor aliado à uma produção que favoreça o progresso social, redução da pobreza, saúde animal e gere menos impactos negativos ao ambiente (FAO; GDP, 2018).

Uma das metodologias da ecologia industrial indicada para a análise holística de impactos ambientais nos diversos estágios do processo produtivo é a avaliação (ou análise) de ciclo de vida (ACV). Nesta ferramenta considera-se o impacto ambiental dos estágios do ciclo de vida do produto, que podem ser: as extrações e obtenções de matéria prima, a produção de energia, a produção do produto, o seu uso final, o tratamento e a disposição final (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; HELLWEG; MILA I CANALS, 2014). A partir da observação sistematizada oferecida pela ACV é possível avaliar as cargas ambientais das etapas do ciclo de vida dos laticínios em seus processos internos. Com a melhor compreensão da cadeia produtiva à luz do emprego da ACV torna-se possível identificar melhorias em termos de desempenho ambiental no processo produtivo (ABNT, 2014a; LEVY, 2017).

O desenvolvimento da técnica de ACV ao longo das últimas décadas esteve intensamente vinculado ao setor agroindustrial e alimentar. Além disso, com o crescimento da preocupação com a sustentabilidade ambiental da produção de alimentos e pela complexidade na mitigação de seus impactos ambientais, é perceptível o incremento de pesquisas aplicadas e produções científicas com esta temática, o que também tem sido evidente no Brasil (DE SOUZA; BARBASTEFANO; TEIXEIRA, 2017; FRAVAL et al., 2019). O destaque para o uso de ACV em atividades associadas ao agronegócio é apresentado pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia como sendo o quarto setor com maior aplicação dessa técnica, representando 9% dentre todos estudos na área (IBICT, 2015).

A aplicação da técnica de ACV na cadeia de produção de leite e seus derivados vem se consolidando no meio científico. Um reflexo disso são os conhecimentos acerca de produtos derivados do leite que apresentam mais impactos ambientais ao serem produzidos frente a outros, ou ainda os principais impactos relacionados a cada etapa produtiva, além de propostas para reduzir impactos (DJEKIC et al., 2014; MAHATH; MOPHIN KANI; DUBEY, 2019). No entanto, apesar das similaridades em resultados qualitativos, que por muitas vezes se repetem em diferentes continentes, o estudo do desempenho ambiental de forma quantitativa pode diferir espacialmente, uma vez que os cenários da cadeia de produção variam regionalmente (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Desse modo, justifica-se a avaliação de ciclo de vida dos laticínios em diferentes países, pois torna-se

possível compreender melhor a variabilidade regional do produto e entender o seu perfil ambiental como um todo.

No Brasil, já foram realizados estudos de ACV com relação a produção de alguns laticínios, como o queijo e a manteiga (CAMPOS et al., 2019; SANTOS et al., 2017). No entanto, um tópico que ainda carece de uma investigação apurada é a caracterização do perfil ambiental de produtos tradicionais brasileiros como o doce de leite e o requeijão. Ao analisar a literatura, estes produtos ainda não tiveram avaliados seus perfis ambientais através da ACV, sendo esse um ponto necessário ser esclarecido para compreendermos melhor os impactos ambientais de laticínios. Além disso, comparado ao restante do mundo, no Brasil ainda é inexpressivo o número de avaliações comparativas de ciclo de vida que consideram diversos produtos derivados do leite em uma mesma fábrica. Por fim, existe também a necessidade de discutir, dentro do contexto da ACV em laticínios, a melhor forma de se avaliar os fluxos diante do problema da multifuncionalidade e o impacto da valorização dos subprodutos em coprodutos.

Desse modo, nesse trabalho foi realizada uma avaliação do ciclo de vida afim de apresentar uma comparação entre laticínios em uma região do Brasil, considerando seis produtos populares aos brasileiros. Em complemento, análises de sensibilidade foram realizadas a fim de compreender os efeitos que o beneficiamento de subprodutos para coprodutos representa na redução do perfil ambiental e se a forma de lidar com o problema da multifuncionalidade pode influenciar no impacto ambiental final dos laticínios. Com isso, deseja-se auxiliar na percepção da dimensão dos impactos ambientais referentes a produção de diversos derivados do leite e colaborar na proposição de medidas para redução das emissões e de uma produção cada vez mais limpa e sustentável.

## **OBJETIVOS**

### 1.1.1. Objetivo Geral

Realizar uma avaliação comparativa de ciclo de vida para a produção de laticínios em uma agroindústria.

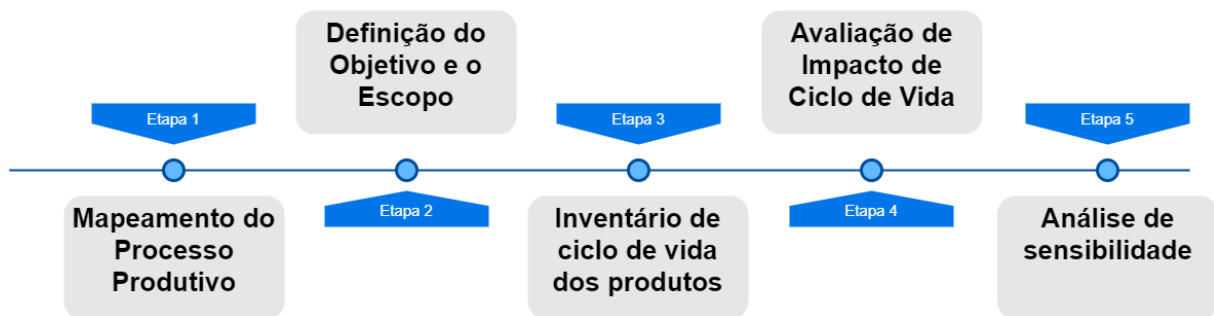
### 1.1.2. Objetivos Específicos

- i. Identificar e comparar as contribuições dos processos e dos produtos na geração de impactos ambientais para o modelo de avaliação de ciclo de vida;
- ii. Analisar a influência do impacto dos subprodutos na produção de determinados laticínios.
- iii. Avaliar como diferentes formas de se lidar com fluxos multifuncionais afetam o perfil ambiental de laticínios.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desenvolvida teve como base as recomendações das normas NBR ISO 14.040/2009 e 14.044/2009 e adotou às orientações do Boletim 479/2015 da Federação Internacional de Laticínios (International Dairy Federation - IDF) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009a, 2009b; IDF, 2015). Desse modo, o estudo subdividiu-se em: (i) mapeamento do processo produtivo, (ii) definição do objetivo e escopo da avaliação de ciclo de vida, (iii) elaboração do inventário de ciclo de vida dos produtos, (iv) realização da avaliação de impacto ambiental e (v) realização da análise de sensibilidade (Figura 1 – Fluxograma da metodologia de avaliação de ciclo de vida aplicada no estudo. Figura 1).

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de avaliação de ciclo de vida aplicada no estudo.



A obtenção dos dados foi feita por meio de entrevistas com os coordenadores de produção e qualidade durante a visita a instalação fabril e comunicação posterior via questionários. Os dados correspondem a uma média da produção mensal do laticínio para o primeiro semestre do ano de 2021. Uma vez coletados, estes foram organizados em planilhas eletrônicas que passaram por revisão pelo funcionário do laticínio e serviram como base para a realização dos cálculos e criação do inventário. A escolha dos dados a serem requisitados no questionário também foi obtida a partir da relação de dados técnicos sugeridos pelo Boletim 479/2015 da IDF (IDF, 2015) e da consulta na literatura sobre o uso da metodologia em laticínios.

## 2.1. Mapeamento do processo produtivo

### 2.1.1. Localização da fábrica de laticínios

A fábrica de laticínios Viçosa é localizada no município de Viçosa, estado de Minas Gerais, estabelecendo-se dentro do campus da Universidade Federal de Viçosa, e situando-se precisamente nas coordenadas 20° 46' 28,866" S, 42° 51' 17,805" W (Figura 2). Sua inauguração e atuação no mercado data da década de 1970, em que se deu início as suas atividades com a produção de leite industrializado. De lá até os dias atuais, sua produção de derivados de leite se expandiu e uma nova fábrica foi inaugurada em 2016 com o intuito de atender ao aumento da demanda por seus produtos. Atualmente, seu portfólio de laticínios consiste principalmente em leite integral, leite desnatado, manteiga, queijo muçarela, iogurte, requeijão e doce de leite; sendo este último vencedor de 10 prêmios que o elegeram o melhor doce de leite brasileiro (FUNARBE, 2021).

Figura 2 – Localização geográfica do laticínio no município onde foi realizado o estudo.



Fonte: autor.

### 2.1.2. Caracterização dos laticínios produzidos

A caracterização dos laticínios é uma etapa importante devido à variabilidade nutricional da composição desses produtos e a sua relevância para comparação com outros alimentos do mesmo gênero. Por essa razão, considerou-se apresentar no trabalho os elementos da relação nutricional dos laticínios estudados (Tabela 1). Alguns laticínios apresentam variações em determinadas características nutricionais devido a produção de mais de um tipo do mesmo produto, como por exemplo iogurte, de diferentes sabores. Considerou-se importante também obter o teor de sólidos de leite de cada laticínio, devido a sua importância para alocações de impacto utilizada na análise de sensibilidade (FEITZ et al., 2007; IDF, 2015). Este indicador representa a quantidade de sólidos no produto proveniente exclusivamente do leite. Para a sua obtenção, calculou-se a razão da quantidade de carboidratos, proteínas e gorduras presentes no produto por uma quantidade de referência do mesmo (ex. 10 g de manteiga), ambos presentes na tabela nutricional de cada laticínio.

Tabela 1 – Produção mensal e características nutricionais dos laticínios avaliados.

Produto	Produção mensal, em kg	%		
		Sólidos de Leite	Proteína	Gordura
Doce de leite	158.400	81,5	10,0	6,5
Iogurte	62.481	6,9 – 27,9 (16,5)	1,8 – 4,7	0,0 – 3,6
Leite	123.823	8,2 – 11,3 (9,5)	3,4	0,0 – 3,1
Manteiga	2.188	84,0	0,0	84,0
Queijo muçarela	8.000	46,3	20,0	23,0
Requeijão	5.200	33,3	10,0	23,3

Fonte: autor.

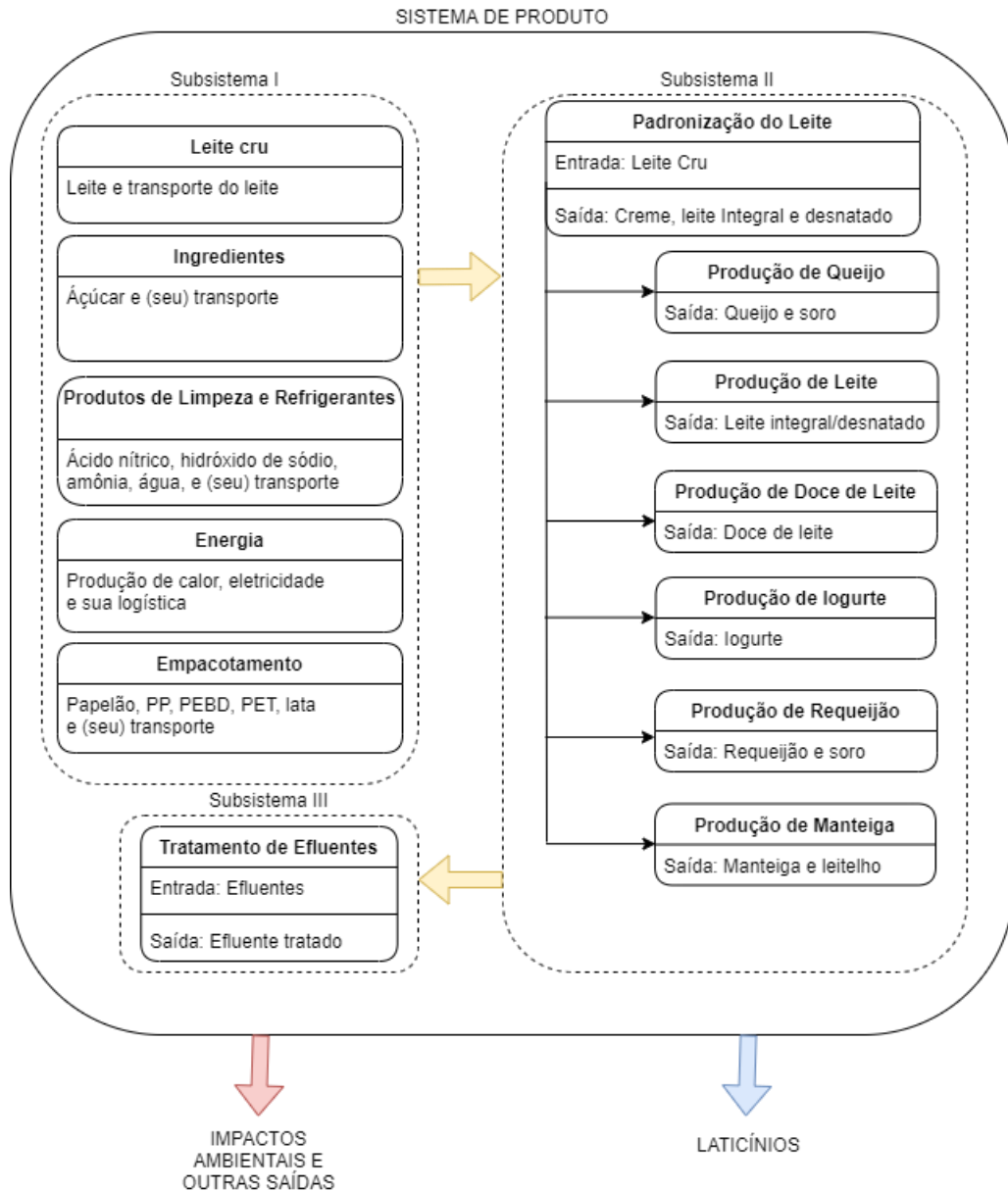
## 2.2. Definição do objetivo e escopo da avaliação do ciclo de vida

A avaliação de ciclo de vida realizada foi do tipo atribucional e teve como objetivo avaliar e comparar os impactos ambientais referentes à produção dos seis laticínios da agroindústria. Para atingir esse objetivo, realizou-se a comparação dos desempenhos ambientais de cada produto e analisou-se os possíveis pontos críticos dentro da produção de cada um. As informações tiveram como público-alvo a própria agroindústria, a fim de permitir a compreensão dos impactos de emissões e avaliar soluções que melhorem o desempenho ambiental dos produtos.

No escopo da avaliação, foram considerados os seis laticínios referentes ao portfólio de produtos produzidos, e a unidade funcional utilizada foi de 1 kg de produto final. Adotou-se uma fronteira de sistema do tipo *cradle-to-gate*, em que é considerado o impacto da produção dos insumos, seu transporte até a fábrica e as atividades de produção de produto até a expedição na fábrica (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Diante disso, o sistema se subdivide em 3 sistemas: o de produção e transporte de insumos para a indústria, a fábrica e o sistema de tratamento de efluentes da produção dos produtos (Figura 3).

O primeiro subsistema, ou Subsistema I, consiste na produção e logística de transporte das matérias-primas necessárias para a produção de todos os laticínios, sendo subdivida nas categorias: leite cru, ingredientes, produto de limpeza, gás refrigerante, energia e empacotamento. O Subsistema II compreende a fábrica de laticínios, que recebe os fluxos de matérias primas do subsistema I e os utilizando para seus processos: pasteurização do leite e produção dos laticínios. O primeiro processo realizado na fábrica consiste na recepção de leite cru, sua pasteurização e seu beneficiamento em leite integral, leite desnatado e creme. Uma vez realizado o primeiro processo, o seu fluxo de saída adentra os processos de produção dos laticínios, de acordo com suas necessidades. Por último, o Subsistema III recebe os efluentes de todos os sete processos do Subsistema II.

Figura 3 – Fronteiras do sistema do ciclo de vida da produção de laticínios.



Fonte: autor.

Uma vez que a fábrica produz diferentes produtos que possuem entradas e saídas em comum, foi importante na coleta de dados determinar esses fluxos de maneira que melhor representassem essa realidade. Diante dessa situação de multifuncionalidade de processos, a literatura sugere uma hierarquia de soluções em que se prioriza um desmembramento dos processos, por meio da subdivisão dos processos, e, por outro lado, para casos onde não há essa possibilidade, oferece a oportunidade do uso da alocação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009b; HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Considerando essa

hierarquização, para se obter as informações sobre o uso de insumos e produção de subprodutos, priorizou-se a subdivisão de processos multifuncionais do sistema para a maioria, e para aqueles casos em que não foi possível, fez-se uso de uma alocação causal. Isso foi permitido com o registro da quantidade aproximada de entradas e saídas referente aos sete processos que envolvem a produção dos laticínios (Subsistema II), ou seja, desde o processo de padronização do leite aos processos de produção dos seis demais produtos.

O processo de padronização do leite é uma etapa comum a todos os laticínios, por ser responsável pelo processamento do leite cru recebido das propriedades rurais e produção do creme e leite (integral e desnatado). Isso se dá por meio da pasteurização, padronização e homogeneização que são realizadas no leite cru, conferindo um produto livre de patógenos, padronizado em termos de nutrientes e de melhor qualidade. Uma vez que o processo de padronização oferece múltipla saída de insumos para a produção, se optou pelo uso da alocação dos impactos de cada um deles para o produto ao qual foi destinado. A alocação de impactos sugerida pela literatura em laticínios é a partir dos sólidos de leite presentes no produto (IDF, 2015). Com isso, os impactos das saídas do processo de padronização foram subdivididos de acordo com o teor de sólidos de leite presentes no creme, leite integral e desnatado, conferindo valores distintos de impacto para esses produtos ao entrarem em novos processos.

Além da padronização, existem outros processos que produzem múltiplas saídas, como a produção de queijo, requeijão e manteiga, que produzem subprodutos como o soro e leitelho, esse último produzido apenas pela manteiga. Para esses processos optou-se pela atribuição do impacto dos fluxos apenas ao produto principal (ex. manteiga), uma vez que esses subprodutos são considerados indesejados e no cenário atual são doados para alimentação de suínos em fazendas da região.

As limitações desse estudo de ACV consistiram na desconsideração dos inventários de ciclo de vida de alguns insumos da produção (Tabela 2), na consideração de inventários estrangeiros e no uso de processos semelhantes. A limitação referente a desconsideração de determinados insumos se deu pela pouca influência deles no resultado final do impacto do produto. Por outro lado, o uso de inventários internacionais se deu pela escassez de inventários de processos para o

cenário brasileiro, o que inviabiliza que alguns estudos sejam feitos apenas com informações nacionais. Apesar disso, foi possível utilizar inventários de alguns insumos adequados à realidade regional do estudo. Para obter os inventários, foram utilizados dados do banco de dados Ecoinvent 3 do programa SimaPro versão 9.1.1. Além das limitações citadas, alguns inventários do banco de dados foram adicionados ao modelo para fluxos que tivessem um material ou uma função semelhante. Isso ocorreu, por exemplo, com alguns materiais de embalagem e para o transporte dos insumos até a fábrica.

Tabela 2 – Processos produtivos de insumos desconsiderados na construção do modelo e os produtos que são afetados pela sua ausência

Processos de Produção	Produtos afetados
Infraestrutura	Todos
Equipamentos	Todos
Ingredientes	
Polpa de frutas	logurte
Cloreto de Sódio	Queijo, manteiga e requeijão
Cloreto de Potássio	Queijo
Fermento Lático	logurte e queijo
Coagulante	Queijo
Corante inorgânico	logurte
Embalagem	
Selo de alumínio	logurte, leite, manteiga e requeijão
Resíduos sólidos	Todos

Fonte: autor.

Na avaliação de impactos dos sistemas produtivos utilizou-se a metodologia CML-IA *baseline* V3.06 / *World* 2000, adotando as seguintes categorias de impacto: mudança do clima (kgCO<sub>2</sub>eq), depleção da camada de ozônio (kgCFC11eq), acidificação (kgSO<sub>2</sub>eq), eutrofização (kgPO<sub>4</sub>eq), potencial de formação de oxidantes fotoquímicos (kgC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>eq), depleção abiótica – fontes fósseis (MJ). Essa metodologia de avaliação de impacto e suas categorias de impacto são comuns para estudos de ACV aplicados ao setor de produção de leite e derivados (FINNEGAN; GOGGINS, 2021), sendo assim as mais convenientes para a comparação entre estudos.

### **2.3. Elaboração do inventário do ciclo de vida dos sistemas de produtos**

Os dados coletados sobre a quantidade de cada fluxo na fábrica foram sistematizados em planilhas eletrônicas, nas quais se atribuiu os fluxos para cada processo de produção dos laticínios e para aqueles que atendiam a mais de um produto foi atribuída uma porcentagem correspondente a cada produto. Como ressaltado anteriormente, a lógica da distribuição dessas porcentagens diante de fluxos multifuncionais foi feita utilizando-se duas estratégias: subdivisão de processos e alocação causal. Por meio da subdivisão de processos foram obtidos valores aproximados de determinados fluxos multifuncionais que compõem cada produto, sendo reservada essa estratégia para as seguintes categorias: distribuição de leite e creme por produto, produção de subprodutos, quantidade de açúcar e materiais para empacotamento. Os fluxos relacionados à energia térmica, elétrica, quantidade de amônia, água e produtos de limpeza seguiram uma estratégia por alocação causal, na qual a equipe da fábrica sugeriu porcentagens de cada um desses fluxos a partir do peso que esse fluxo representava para cada produto. Desse modo foi obtida a relação apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição percentual dos fluxos para cada processo na fábrica.

Categoria	Fluxo	Padronização do Leite	Produção de Leite	Produção de Queijo	Produção de Requeijão	Produção de Manteiga	Produção de Iogurte	Produção de Doce de Leite
Efluente	Efluente	25,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	25,00%
Empacotamento	Lata	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%
	Papelão	0,00%	0,00%	0,00%	3,76%	3,08%	33,00%	60,16%
	PEBD	0,00%	19,30%	2,77%	0,00%	0,00%	8,04%	69,90%
	PET	0,00%	11,81%	0,00%	0,00%	0,00%	88,19%	0,00%
	PP	0,00%	0,00%	0,00%	53,39%	46,61%	0,00%	0,00%
	Energia	Eletricidade	0,00%	10,00%	5,00%	3,00%	3,00%	15,00%
	Térmica	6,00%	0,00%	6,00%	6,00%	6,00%	6,00%	70,00%
Ingrediente	Açúcar	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	10,00%	90,00%
	Creme	0,00%	0,00%	0,00%	40,00%	60,00%	0,00%	0,00%
	Leite cru	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	Leite desnatado	0,00%	50,60%	0,00%	49,40%	0,00%	0,00%	0,00%
	Leite integral	0,00%	19,05%	12,70%	2,48%	0,00%	9,90%	55,87%
Limpeza	Ácido nítrico	25,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	25,00%
	Água	25,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	25,00%
	Hidróxido de Sódio	25,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	25,00%
Refrigeração	Amônia	16,00%	16,00%	16,00%	16,00%	16,00%	16,00%	4,00%
Subproduto	Leitelho	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%
	Soro	0,00%	0,00%	75,00%	25,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: autor.

Uma vez que se traçou uma estratégia para determinar a direção dos fluxos para cada processo, considerou-se conveniente também analisar qualitativamente os valores de cada um dos fluxos. Isto foi feito porque determinados insumos foram medidos diretamente, como o caso dos fluxos da categoria empacotamento, em que se pesou o pacote e a embalagem de cada produto, já outros insumos não foram medidos diretamente ou foram calculados via balanço de massa no sistema. Para essa classificação, se utilizou a metodologia sugerida por Santos et al. (2017) que propõe quatro categorias: medido, verificado, estimado e calculado. Com essa classificação pôde-se adicionar ao inventário indicadores qualitativos que transmitissem um grau de confiança do dado de cada fluxo (Tabela 4).

Tabela 4 – Inventário para a produção de laticínios considerando 1 kg de produto final.

Fluxo	Unid.	Padronização do Leite	Produção de Leite	Produção de Queijo	Produção de Manteiga	Produção de Requeijão	Produção de Iogurte	Produção de Doce de Leite	Análise Qualitativa
<b>Entradas</b>									
<i>Empacotamento</i>									
Papelão	kg/kg	-	-	-	0,05288	0,02717	0,01985	0,01427	Medido
PEBD	kg/kg	-	0,00485	0,01075	-	-	0,00400	0,01372	Medido
PET	kg/kg	-	0,00136	-	-	-	0,02008	-	Medido
PP	kg/kg	-	-	-	0,07164	0,03452	-	-	Medido
Lata	kg/kg	-	-	-	-	-	-	0,07845	Medido
<i>Energia</i>									
Eletricidade	kWh/kg	-	0,07208	0,55781	1,22374	0,51490	0,21426	0,36061	Verificado
Energia térmica	MJ/kg	0,34809	-	28,29000	43,52308	103,43882	3,62221	16,66919	Calculado*
<i>Ingredientes</i>									
Lenha	m³/kg	0,00004	-	0,00300	0,00462	0,01097	0,00038	0,00177	Verificado
Açúcar	kg/kg	-	-	-	-	-	0,09603	0,34091	Verificado
Creme	kg/kg	-	-	-	1,64537	0,46154	-	-	Verificado
Leite cru	kg/kg	1,00000	-	-	-	-	-	-	Calculado
Leite desnatado	kg/kg	-	0,13314	-	-	3,09559	-	-	Verificado
Leite Integral	kg/kg	-	0,86686	10,31862	-	-	1,03052	2,29303	Verificado
<i>Limpeza</i>									
Água	kg/kg	0,00065	0,00136	0,02100	0,07678	0,03231	0,00269	0,00265	Verificado
Ácido nítrico	kg/kg	0,00035	0,00073	0,01125	0,04113	0,01731	0,00144	0,00142	Verificado
Hidróxido de Sódio	kg/kg	0,00023	0,00048	0,00750	0,02742	0,01154	0,00096	0,00095	Verificado
<i>Refrigeração</i>									
Amônia	kg/kg	0,000004	0,00002	0,00036	0,0013299	0,00056	0,00005	0,000005	Verificado
<b>Saídas</b>									
Efluente	m³/kg	0,00065	0,00136	0,02100	0,07678	0,03231	0,00269	0,00265	Verificado
Leitelho	kg/kg	-	-	-	0,74224	-	-	-	Verificado
Soro	kg/kg	-	-	9,21780	-	4,72708	-	-	Verificado

\* Os valores de energia térmica utilizados foram calculados a partir da quantidade de lenha.

Fonte: autor.

Com as informações coletadas na fábrica de laticínios, obteve-se que do total de leite cru processado na etapa da padronização, 94,12% eram dedicados à produção de leite integral (a 3,00% de gordura e 3,30% de proteína), 4,97% era utilizado a produção de leite desnatado (a 0,50% de gordura e 3,30% de proteína) e 0,91% era empregue na produção de creme (a 50,0% de gordura). Com essa relação obtida a partir do total mensal desses insumos, inseriu-se no modelo a quantidade

total de leite cru corrigida em termos de gordura e proteína (*fat protein corrected milk* - FPCM). Essa correção foi realizada pois com ela tem-se a capacidade de transmitir para o modelo o impacto que a qualidade nutricional do leite possui, e que deve ser considerado na modelagem (IDF, 2015). Desse modo, considerou-se na formulação FPCM o teor médio de gordura do leite cru recebido pelo laticínio (3,4%), teor médio de proteína (3,3%), e a massa específica média do leite cru recebido, de 1,032 kg/L. A partir disso, pôde-se contabilizar o impacto do leite cru para o laticínio.

O cálculo da quantidade de calor necessária para cada produção foi realizado considerando a quantidade média de lenha utilizada pelo laticínio. Desse modo, obteve-se o valor da energia térmica mensal, em MJ, a partir do produto do volume total de lenha pelo poder calorífico inferior oferecido pelo processo utilizado do Ecoinvent, de 9.430 MJ/m<sup>3</sup>. Para o cálculo e conversão de unidades de demais fluxos utilizaram-se os valores de massa específica apresentados pelo laticínio para os seguintes insumos: leite pasteurizado (1,0317 kg/L), leite desnatado (1,0344 kg/L), manteiga (0,9116 kg/L), e iogurte (1,0540 kg/L). O valor da massa específica do soro utilizado na conversão de litros para quilogramas foi 1,0242 kg/L (TEIXEIRA; FONSECA, 2008), da amônia para refrigeração foi 0,6820 kg/L (CETESB, 2021), e do leiteiro foi apresentado pela fábrica como sendo de 1,0150 kg/L. Por último, na elaboração do inventário consideraram-se os processos que melhor representassem a realidade do funcionamento do laticínio a partir do banco de dados Ecoinvent 3.7.1 (Tabela 5).

Tabela 5 – Fluxos considerados no modelo e seu respectivo processo no banco de dados

<b>Categoria</b>	<b>Fluxo</b>	<b>Processo no Banco de dados (Ecoinvent 3.7.1)</b>
<i>Entrada</i>		
Empacotamento	Papelão	market for carton board box production, with gravure printing   carton board box production, with gravure printing   APOS, U - GLO
	PEBD	market for packaging film, low density polyethylene   packaging film, low density polyethylene   APOS, U
	PET	market for polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade   polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade   APOS, U - GLO
	PP	market for polypropylene, granulate   polypropylene, granulate   APOS, U - GLO
	Lata	Tin {GLO}  market for   APOS, U
Energia	Eletricidade	market for electricity, low voltage   electricity, low voltage   APOS, U - BR-South-eastern grid
	Energia térmica	heat production, mixed logs, at furnace 100kW   heat, central or small-scale, other than natural gas   APOS, U - RoW
Refrigeração	Amônia	market for ammonia, anhydrous, liquid   ammonia, anhydrous, liquid   APOS, U - RoW
Ingredientes	Açúcar	market for sugar, from sugarcane   sugar, from sugarcane   APOS, U - GLO
	Creme	Processo criado pelo autor
	Leite cru	market for cow milk   cow milk   APOS, U - GLO
	Leite desnatado	Processo criado pelo autor
	Leite integral	Processo criado pelo autor
Limpeza	Água	tap water production, direct filtration treatment   tap water   APOS, U - BR
	Ácido nítrico	market for nitric acid, without water, in 50% solution state   nitric acid, without water, in 50% solution state   APOS, U - RoW
	Hidróxido de sódio	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   APOS, U - GLO
<i>Saída</i>		
Efluente	Efluente	treatment of wastewater from potato starch production, capacity 1.1E10l/year   wastewater from potato starch production   APOS, U - GLO
Subprodutos	Leitelho	Processo criado pelo autor
	Soro	Processo criado pelo autor

Fonte: autor.

## 2.4. Realização da avaliação de impactos de ciclo de vida

Esta etapa consistiu na avaliação de impactos de ciclo de vida dos diferentes sistemas de produtos modelados no SimaPro e da interpretação dos respectivos resultados e comparação com a literatura consultada. Sua importância foi de

apresentar não só os resultados dos desempenhos ambientais dos diferentes sistemas de produtos, como também por oferecer resultados para a análise de sensibilidade posterior e informar quanto a possíveis erros nos resultados. A partir desses resultados, foi possível apresentar graficamente e por meio de tabelas seus desempenhos para as diferentes categorias de impacto propostas e realizar comparação do desempenho dos produtos para cada categoria investigada.

Os dados processados foram utilizados na produção do modelo da avaliação de impacto de ciclo de vida desse estudo. Desenvolveu-se a pesquisa no programa SimaPro versão 9.1.1 *Faculty*, em que foram inseridas informações sobre o objetivo e escopo do trabalho, inventário de ciclo de vida, avaliação de impacto de ciclo de vida e análise de sensibilidade.

## **2.5. Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade representa uma importante e necessária contribuição na avaliação de ciclo de vida da agroindústria, uma vez que esta etapa no ciclo de vida da produção de laticínios apresenta alguns pontos críticos na produção desses produtos (DJEKIC et al., 2014; SANTOS et al., 2017). Por meio dessa análise é possível relacionar a mudança no desempenho ambiental dos laticínios de acordo com a alteração de elementos dentro da avaliação de impacto de ciclo de vida, tais como a presença de subprodutos e como a forma de alocação ou a forma de lidar com os fluxos do sistema refletem impactos aos produtos.

### **2.5.1. Influência dos subprodutos na avaliação dos impactos dos produtos**

A produção de subprodutos é um elemento presente no presente estudo de caso, de modo que há a produção de soro na fabricação de queijo e requeijão e de leiteiro na de manteiga. Uma vez que esses subprodutos não têm uso comercial para o laticínio, e também não são desejados, considerou-se no modelo que o impacto de sua produção estaria atrelado ao impacto do produto principal daquele processo. Desse modo, essa consideração resulta na alocação de todos impactos da produção desses potenciais subprodutos aos produtos principais, o que poderia ser revertido se estes subprodutos fossem beneficiados e considerados como coprodutos no laticínio.

Diante desse contexto, foi realizada uma análise de sensibilidade para verificar o grau de redução de impacto gerado pela devida alocação de impactos para o soro e leiteiro, considerando um cenário de aproveitamento deles como coprodutos para o laticínio.

Para a análise de sensibilidade, considerou-se o volume de produção do soro e leiteiro para cada sistema de produto em que há produção desses subprodutos. Além disso, considerou-se uma alocação de impacto por sólidos de leite presente em cada um deles (Tabela 6). As informações relativas a quantidade de sólidos de leite presentes nos subprodutos foi obtida na literatura (FEITZ et al., 2007; TEIXEIRA; FONSECA, 2008), exceto pela massa específica do leiteiro que foi oferecida pelo laticínio como sendo 1,015 kg/L.

Tabela 6 – Relação de teor de sólidos de leite e total produzido por produto e subproduto para o cálculo da alocação.

Processo	Produto	Sólidos de Leite	Produção (kg)	Alocação
Produção de Manteiga	Manteiga	84%	2.400	0,89839
	Leiteiro	13%	1.600	0,10161
Produção de Queijo	Queijo	46%	8.000	0,44200
	Soro	6%	73.742	0,55800
Produção de Requeijão	Requeijão	33%	5.200	0,53778
	Soro	6%	24.582	0,46222

Fonte: autor.

### 2.5.2. Influência da opção de subdivisão de processos multifuncionais em detrimento de apenas alocação

A subdivisão de processos multifuncionais é uma opção sugerida para a avaliação de ciclo de vida como a mais adequada em comparação a alocação (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Isso se dá pelo fato de destacar de forma real os fluxos que ocorrem dentro de sistemas com múltiplas saídas de produtos, indicando a parcela aproximada de insumo que entra em cada produto. Outras estratégias utilizadas são a expansão do sistema e a alocação causal, que são alternativas quando não é possível a subdivisão de processos. Apesar dessas estratégias, muitos estudos realizam a ACV utilizando a alocação relacionadas a características físicas ou econômicas, pelo fato de não terem informações suficientes

a respeito do quanto de insumo é direcionado para cada produção ou terem apenas informações gerais sobre o quanto entra de insumo e o quanto de produto é produzido (DJEKIC et al., 2014; FEITZ et al., 2007).

Diante dessa questão, realizou-se uma análise de sensibilidade para verificar o grau da variação nos resultados obtidos com a modelagem, comparando os resultados feitos com subdivisão de processos multifuncionais e alocação causal contra os resultados de alocação feita exclusivamente por teor de sólidos de leite, que é a sugerida em situações de alocação (IDF, 2015). Com essa análise é possível identificar se uma investigação mais genérica das entradas e saídas do laticínio não altera de forma expressiva os resultados comparado a uma forma mais detalhada e próxima a realidade dos fluxos.

Na realização dessa análise, considerou-se a modelagem com o uso da subdivisão de processos multifuncionais e a alocação causal como o cenário padrão e o cenário alternativo foi o que considerou apenas alocação por teor de sólidos. No cenário padrão foram consideradas as informações oferecidas pela equipe de produção de quanto de insumo era ofertado para cada produto. Já no cenário alternativo foi considerado a fórmula da alocação por teor de sólidos e os dados de entrada foram a quantidade de produto e seu respectivo teor de sólidos de leite, obtidos por meio da sua tabela nutricional (Tabela 1). É importante ressaltar que os processos que são comuns a todos os produtos são alocados considerando todos os produtos durante cálculo das porcentagens da alocação, como por exemplo uso de eletricidade. De outro modo, processos mais específicos são considerados no cálculo da alocação somente os produtos que tem o insumo na receita, como por exemplo adição de açúcar, em que só o iogurte e o doce de leite são afetados. Esta última medida foi tomada para evitar que fossem alocados impactos de ingredientes a produtos que não os contém em sua receita.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A falta de um consenso no oferecimento de valores que quantifiquem o impacto ambiental da produção de laticínios gera a necessidade de se investigar o perfil ambiental destes produtos. Para comparar os impactos ambientais dos laticínios considerados neste trabalho, foi realizada a avaliação de ciclo de vida de forma comparativa no programa SimaPro, utilizando a metodologia CML-IA *baseline* V.306 com as seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, depleção abiótica – fontes fósseis, depleção da camada de ozônio, e oxidação fotoquímica.

#### 3.1. Comparação entre os impactos dos laticínios

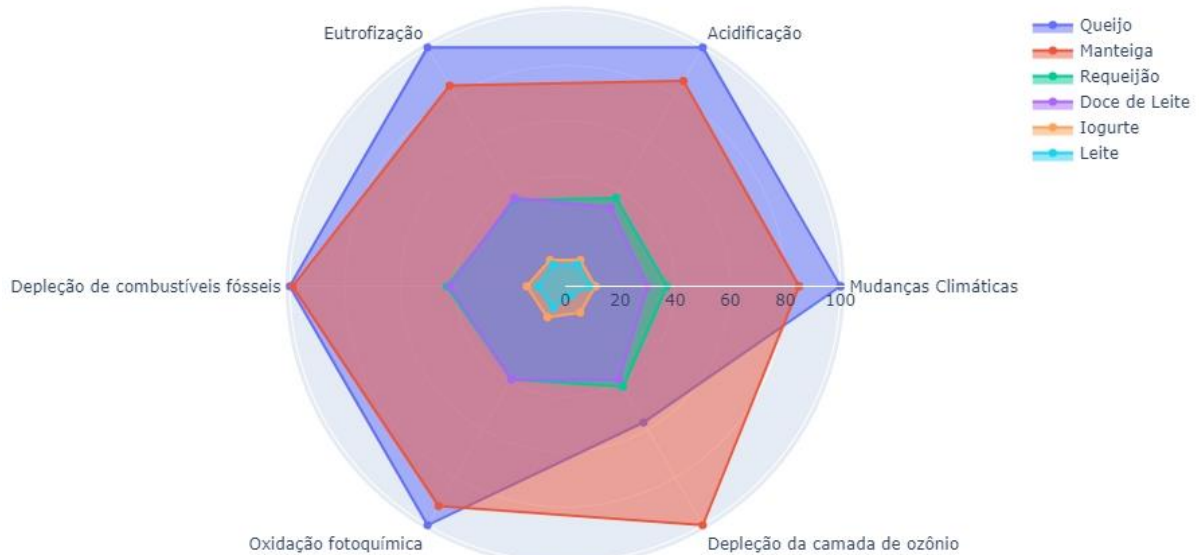
Com a simulação no programa, observou-se (Tabela 7) o desempenho ambiental dos produtos para diferentes categorias de impacto analisadas, além do desempenho relativo entre eles (Figura 4). Para todas as categorias avaliadas, o leite apresentou o menor impacto dentre os seis laticínios avaliados. Em contrapartida, o queijo muçarela destacou-se como o produto de maior impacto. Desse modo, a ordem decrescente de impactos por produtos foi: queijo, manteiga, requeijão, doce de leite, iogurte e leite.

Tabela 7 – Resultados da avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida dos diferentes laticínios.

Produto	Mudanças Climáticas (kgCO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Eutrofização (kgPO <sub>4</sub> eq)	Depleção Abiótica (MJ)	Depleção da Camada de Ozônio (kgCFC-11eq)	Oxidação Fotoquímica (kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)
Doce de Leite	4,830	0,036	0,023	25,790	2,25E-07	3,39E-03
Iogurte	1,820	0,012	0,007	8,568	7,50E-08	9,81E-04
Leite	1,545	0,010	0,006	6,055	5,42E-08	3,19E-04
Manteiga	13,888	0,093	0,051	60,061	5,32E-07	8,61E-03
Queijo	16,306	0,109	0,061	60,947	5,77E-07	4,88E-03
Requeijão	5,959	0,040	0,022	25,997	2,28E-07	3,65E-03

Fonte: autor.

Figura 4 – Desempenho relativo entre laticínios em diferentes categorias de impacto ambiental.



Os laticínios avaliados tiveram um desempenho equivalente ou abaixo dos apresentados em um dos estudos mais relevantes na ACV de vários laticínios (DJEKIC et al., 2014), com exceção apenas para o queijo que apresentou resultados superiores. O impacto do leite e do iogurte estiveram dentro da faixa dos valores encontrados para mudanças climáticas, já para potencial de acidificação e eutrofização estiveram abaixo dos valores encontrados, exceto para o iogurte que está dentro do intervalo de valores encontrados pelos autores. Por outro lado, a manteiga apresentou valores consideravelmente inferiores aos dos autores para as três categorias analisadas, que foram 20,69 ~ 21,30 kgCO<sub>2</sub>eq (mudanças climáticas), 0,2636 ~ 0,2658 kgSO<sub>2</sub>eq (potencial de acidificação) e 0,145 ~ 0,1248 kgPO<sub>4</sub>eq (potencial de eutrofização) (DJEKIC et al., 2014). Além disso, todos os produtos apresentaram potencial de depleção na camada de ozônio menor que os produtos apresentados por Djekic et al. (2014), que foram em uma ordem de 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-5</sup> kgRC11eq enquanto os avaliados neste estudo estiveram na faixa de 10<sup>-7</sup> e 10<sup>-8</sup> kgCFC11eq. Na Tabela 8, apresenta-se o comparativo dos resultados aqui obtidos com os de outros trabalhos relevantes para o segmento de avaliação de impacto de ciclo de vida de laticínios e que também fizeram uso do método CML.

Tabela 8 – Comparativo dos resultados com outros estudos de ACV semelhantes publicados na literatura.

Produto	Referência	Mudanças Climáticas (kgCO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Eutrofização (kgPO <sub>4</sub> eq)	País
Iogurte	<i>Presente estudo</i>	1,820	0,012	0,007	Brasil
	González et al. (2013)*	1,776	0,029	0,010	Portugal
	Üçtuğ et al. (2019)*	4,210	0,070	0,242	Turquia
Leite	<i>Presente estudo</i>	1,545	0,010	0,006	Brasil
	Fantin et al. (2012)**	1,500	0,010	0,007	Itália
	González et al. (2013)	1,740	0,031	0,009	Portugal
	Rafiee et al. (2016)	0,946	0,008	-	Irã
Manteiga	<i>Presente estudo</i>	13,888	0,093	0,051	Brasil
	Nilsson et al. (2010)	9,600	0,076	0,060	Reino Unido
	Nilsson et al. (2010)	9,000	0,092	0,044	Alemanha
	Nilsson et al. (2010)	7,200	0,050	0,044	França
Queijo	<i>Presente estudo</i>	16,306	0,109	0,061	Brasil
	González et al. (2013)	7,490	0,180	0,065	Portugal
	González et al. (2013)	9,530	0,095	0,055	Espanha

\*cradle-to-grave

\*\*cradle-to-distribution center

Fonte: autor.

### 3.1.1. Queijo Muçarela

Os valores obtidos na avaliação do queijo foram maiores que dos demais laticínios, exceto pela manteiga que apresentou valores próximos. A categoria de impactos na qual teve impacto relativamente maiores aos demais foi a de mudanças climáticas, e aquela em que mais se aproximou aos demais produtos foi depleção da camada de ozônio.

O queijo é um dos laticínios com maior número de estudos em ACV, ao lado do leite e do iogurte (FINNEGAN; GOGGINS, 2021). Considerando estudos com a mesma metodologia de avaliação de impactos (CML), ao comparar o queijo do presente trabalho aos realizados com os queijos galego e maduros portugueses, observa-se que os valores aqui obtidos foram maiores que os da Espanha e de Portugal, para as categorias de mudanças climáticas e próximos para as demais categorias (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2013b, 2013d). Acredita-se que a razão do impacto de maior do produto brasileiro frente ao português possa ser devido a quantidade de leite maior presente no brasileiro e ainda o fato do queijo português

alocar parte de seus impactos ao soro. Outra razão para o maior destaque do produto do presente estudo é devido ao elevado impacto da produção de leite presente no banco de dados, uma vez que o estudo do queijo galego apresenta quantidade maior de leite que o do presente estudo e, por outro lado, apresenta menor impacto em algumas categorias mesmo sem alocar parte dos impactos ao soro.

Considerando exclusivamente o impacto de mudanças climáticas, o queijo do presente estudo apresentou valores superiores a 7,203 kgCO<sub>2</sub>eq, obtido na Irlanda (FINNEGAN et al., 2017b) e de 5,300 kgCO<sub>2</sub>eq, observado no Canadá (VERGÉ et al., 2013). Por outro lado, o queijo do presente trabalho apresentou valor próximo ao obtido em outro estudo brasileiro, no qual reportou-se o resultado de 14,447 kgCO<sub>2</sub>eq (SANTOS et al., 2017). Acredita-se que as principais razões que justifiquem essa diferença seja a alocação escolhida em alguns desses trabalhos, em que parte do impacto do queijo foi transferido para um coproduto, como produção de proteína isolada do soro.

### 3.1.2. Manteiga

A manteiga apresentou valores relativos de 84 a 99% aos valores de impacto do queijo e foi o laticínio que apresentou maior impacto para a categoria oxidação fotoquímica. Apesar de elevados, seus valores de impacto estiveram de acordo com o apresentado na literatura. A caracterização da manteiga por autores é muito variável, e isso se deve a diversos fatores, como o tipo de alocação, características físicas e químicas dos produtos, metodologia de avaliação de impacto, bem como as características regionais e configuração de fronteiras do sistema do modelo.

Para mudanças climáticas, o valor da manteiga esteve acima dos apresentados em outro estudo realizado no Brasil, que variaram de 1,258 a 5,816 kgCO<sub>2</sub>eq (CAMPOS et al., 2019), no entanto, próximo a média apresentada na Irlanda, com 9,68 kgCO<sub>2</sub>eq (FINNEGAN et al., 2017b), e países europeus e da América do Norte, que variaram na faixa de 8,080 a 16,930 kgCO<sub>2</sub>eq (LIAO et al., 2020). Considerando trabalhos que utilizam a metodologia de avaliação de impacto CML, os valores obtidos para mudanças climáticas e potencial de acidificação estiveram um pouco acima dos apresentados para o Reino Unido, Alemanha e França, que variaram de 7,200 a 9,600 kgCO<sub>2</sub>eq e 0,050 a 0,090 kgSO<sub>2</sub>eq, respectivamente. Em

contraponto, para o potencial de eutrofização o valor da manteiga esteve entre os valores apresentado de 0,040 a 0,060 kgPO<sub>4</sub>eq (NILSSON et al., 2010).

### 3.1.3. Iogurte e leite

O iogurte e o leite possuem impactos menores comparados aos demais produtos. Ambos apresentaram valores próximos como ocorrido em outros estudos que os avaliaram (DJEKIC et al., 2014, 2019). Para valores de mudanças climáticas, nosso estudo indicou valores aproximados ao de Djekic et al. (2019), de 1,511 kgCO<sub>2</sub>eq para o leite e 1,672 kgCO<sub>2</sub>eq para o iogurte. Comparando outras categorias desse estudo, os valores do presente estudo estiveram próximos aos valores para as demais categorias em comum.

O iogurte apresentou um padrão de impactos semelhante ao do leite, exceto pela depleção de camada de ozônio. Em relação a literatura, seus valores estiveram próximos dos avaliados por outros estudos que utilizaram a mesma metodologia de avaliação de impacto usada no presente estudo. Quando analisado um estudo de ACV de iogurte em Portugal, observa-se um valor menor que o encontrado neste trabalho para o indicador de mudanças climáticas, já para potencial de acidificação e eutrofização, os valores do iogurte português foram maiores (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2013c). Avaliando-se um estudo de produção de iogurte na Turquia, verifica-se que para todas as categorias em comum, no presente estudo obtiveram-se valores próximos e inferiores, sendo a maior diferença a categoria de mudanças climáticas (ÜÇTUĞ; ATLUĞKOYUN; İNALTEKIN, 2019).

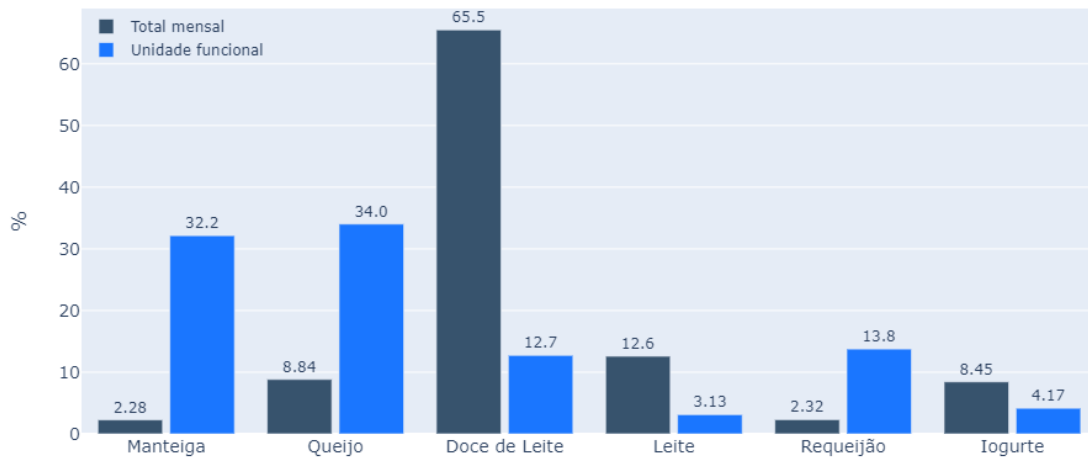
Comparando-se os impactos da produção de leite na fábrica com um estudo para leite UHT que utilizou a metodologia CML (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2013a), é possível verificar que no estudo foram obtidos valores próximos, mas acima do presente estudo para todas as categorias em comum. Os impactos de mudanças climáticas, potencial de acidificação e de eutrofização foram, respectivamente, 1,740kgCO<sub>2</sub>eq, 0,03128 kgSO<sub>2</sub>eq, e 0,00943 kgPO<sub>4</sub>eq, por exemplo. Naturalmente, esta comparação deveria sugerir valores maiores para o leite UHT, uma vez que este produto apresenta um processamento maior que o leite pasteurizado avaliado neste trabalho. Considerando o leite pasteurizado, outro estudo, que utilizou a metodologia CML, oferece como valores de impacto de 0,946 kgCO<sub>2</sub>eq, 0,084kgSO<sub>2</sub>eq e 1,48x10<sup>-7</sup>kgCFC11eq (RAFIEE et al., 2016). Comparados a esse estudo iraniano, os

resultados aqui obtidos foram superiores substancialmente. Apesar disso, outro estudo realizado no mesmo país sugeriu resultados mais próximos e superiores ao presente estudo, com valor de 1,57 kgCO<sub>2</sub>eq (DANESHI et al., 2014). Por fim, nossos resultados também estão de acordo com um dos trabalhos pioneiros na investigação da produção industrial de leite, que apresentou valores de 1,05 kgCO<sub>2</sub>eq, para mudanças climáticas, e 0,00531 kgPO<sub>4</sub>eq, para potencial de eutrofização (HOSPIDO; MOREIRA; FEIJOO, 2003).

#### 3.1.4. Impacto associado à unidade funcional comparado ao da produção mensal

O doce de leite apresentou valores próximos ou similares aos impactos do requeijão, sendo comparativamente menor ou igual em todas categorias. Embora o doce seja o quarto produto de maior impacto, essa constatação se fundamenta na atribuição da soma de todos os seus impactos normalizados em referência a unidade funcional adotada nesse estudo (1kg de produto final). Ao considerarmos o impacto referente ao total de quilogramas de produto produzidos por mês – multiplicando o impacto relativo à unidade funcional pelo total de produto produzido mensalmente – o doce de leite se destaca como o primeiro colocado dentre os demais laticínios (Figura 5). De outro modo, ainda sob essa análise, o requeijão apresenta um desempenho inferior a quase todos os demais produtos, o que é explicado pela baixa quantidade produzida comparada aos demais. De maneira inversa à relação apresentada para unidade funcional, a manteiga, que se destacava como o segundo mais impactante, se apresenta como o laticínio menos poluente nessa análise que considera o impacto gerado pelo produto para a fábrica no mês. Também de modo inverso, o leite e o iogurte, que apresentavam menores impactos relativos aos demais, se sobressaem como segundo e quarto mais impactantes, respectivamente.

Figura 5 – Contribuição dos impactos dos laticínios considerando o total mensal pela unidade funcional.



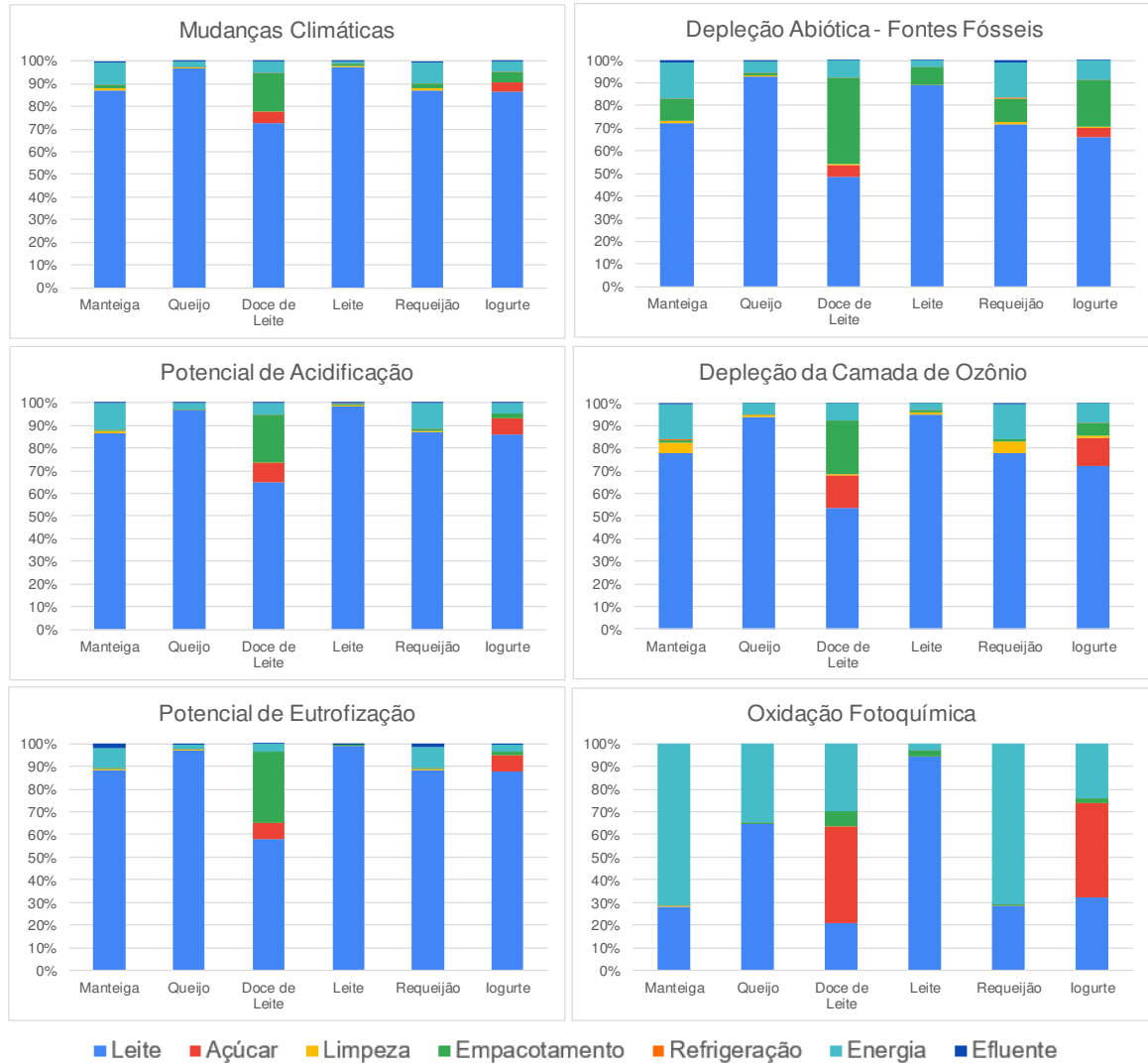
Fonte: autor.

## 3.2. Impactos dos insumos

### 3.2.1. Impactos do leite cru na produção

A quantidade de insumos derivados do leite cru empregados na produção de cada produto foi o fator decisivo na determinação do impacto dos laticínios (Figura 6). Os impactos ambientais referentes a etapa de produção de leite variaram na faixa de 20,7 a 99,0% do total dos laticínios, afetando menos o potencial de oxidação fotoquímica do doce de leite e mais o potencial de eutrofização do leite industrializado. Observou-se que a utilização do leite cru influenciou principalmente as categorias de mudanças climáticas, potencial de acidificação e potencial de eutrofização dos laticínios. O impacto do leite para essas categorias apresentou-se na faixa de 72,6% a 97,5% para mudanças climáticas; 65,0% a 98,5% para potencial de acidificação; e 57,6% a 99,0% para potencial de eutrofização. Além disso, o produto que teve suas categorias de impacto mais afetadas pela presença do leite cru foram o leite industrializado e o queijo, em contrapartida, aquele que apresentou menor relação foi o doce de leite. Desse modo, os resultados indicaram que, de maneira geral, o leite cru é um insumo determinante no impacto do laticínio, se sobrepondo a todos os demais insumos para a maioria das categorias estudadas, e em menor grau para a categoria de oxidação fotoquímica.

Figura 6 – Relação de impactos dos insumos aos produtos para diferentes categorias de impacto.



Fonte: autor.

Os laticínios receberam diferentes insumos derivados do leite cru. Destes, aquele que apresentou maior impacto foi o leite integral a 3,0% de gordura, seguido pelo creme e o leite desnatado. O leite integral apresentou alocação de impacto 50,0 vezes maior que o leite desnatado, já o creme 2,3 vezes maior. Isso se deu pelo fato de utilizarmos na metodologia uma alocação por sólidos de leite, que ponderou os impactos desse insumo segundo as suas quantidades e porcentagem de teor de sólidos de leite. Deste modo, os produtos que recebem leite desnatado, como por exemplo o requeijão e parte do leite industrializado, apresentaram uma relação inferior de impacto por litro de leite – devido ao reduzido teor de sólidos e baixa quantia

produzida. De outro modo, o restante dos produtos que recebeu leite integral ou creme tiveram uma relação maior de impacto por insumo derivado do leite recebido.

Em quase 20 anos de estudos de ACV aplicadas aos laticínios, autores demonstraram que a fase da produção de leite cru nas fazendas é a que confere maior impacto aos laticínios (DJEKIC et al., 2014; EIDE, 2002; FANTIN et al., 2012; ÜÇTUĞ; ATLUĞKOYUN; İNALTEKIN, 2019). Um estudo semelhante a este trabalho avaliou o impacto do queijo em outra região do Brasil e confirmou que o leite era o insumo que mais impactou na produção. Além disso, no estudo apontou-se que a participação do leite na composição dos impactos foi em uma faixa aproximada de 70 a 98% para as categorias avaliadas (SANTOS et al., 2017). Por essa razão, é importante ressaltarmos novamente o quanto a produção de leite cru afeta o ciclo de vida de laticínios, sendo assim uma etapa necessária dentro das estratégias para redução de impactos desses produtos, uma vez que também fornece seu ingrediente principal.

Apesar da pesquisa de ACV em indústrias de laticínios no Brasil ainda ser incipiente, comparada aos países do norte global – que tradicionalmente investigam esse tópico – os poucos estudos realizados sugerem valores menores que o habitual encontrado na literatura. Uma vez que no presente estudo utilizaram-se dados do inventário Ecoinvent, os resultados aqui podem estar superestimados frente a realidade brasileira. O inventário de leite cru apresentado pelo Ecoinvent possui resultados de impacto que refletem a realidade dos países África do Sul e Canadá (ECOINVENT, 2020). Por outro lado, estudos realizados na região Sul do Brasil (DE LÉIS, 2013; DE LÉIS et al., 2015; SEÓ et al., 2017) e no estado de Minas Gerais (MACIEL, 2019, 2021) indicaram valores inferiores aos do inventário presente na base de dados do Ecoinvent (Tabela 9). Desse modo, o impacto dos laticínios avaliados nesse estudo poderia ser inferior aos apresentados, sendo um ponto que pode ser investigado em estudos futuros.

Tabela 9 – Comparativo do impacto do leite cru do trabalho com outros estudos de ACV brasileiros publicados na literatura

Referência	Mudanças Climáticas (kgCO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Eutrofização (kgPO <sub>4</sub> eq)
<i>Presente estudo</i> (baseado no Ecoinvent)	1,429	9,64E-03	5,60E-03
de Leis et al. (2013)			
Confinamento	0,776	1,27E-02	5,44E-03
Semiconfinado	1,065	6,62E-03	1,36E-02
À pasto	1,013	7,73E-03	4,07E-03
Maciel et al. (2020)			
Com tratamento por digestão anaeróbia	0,881	4,20E-03	1,60E-03
Sem tratamento por digestão anaeróbia	1,202	2,40E-03	1,80E-03

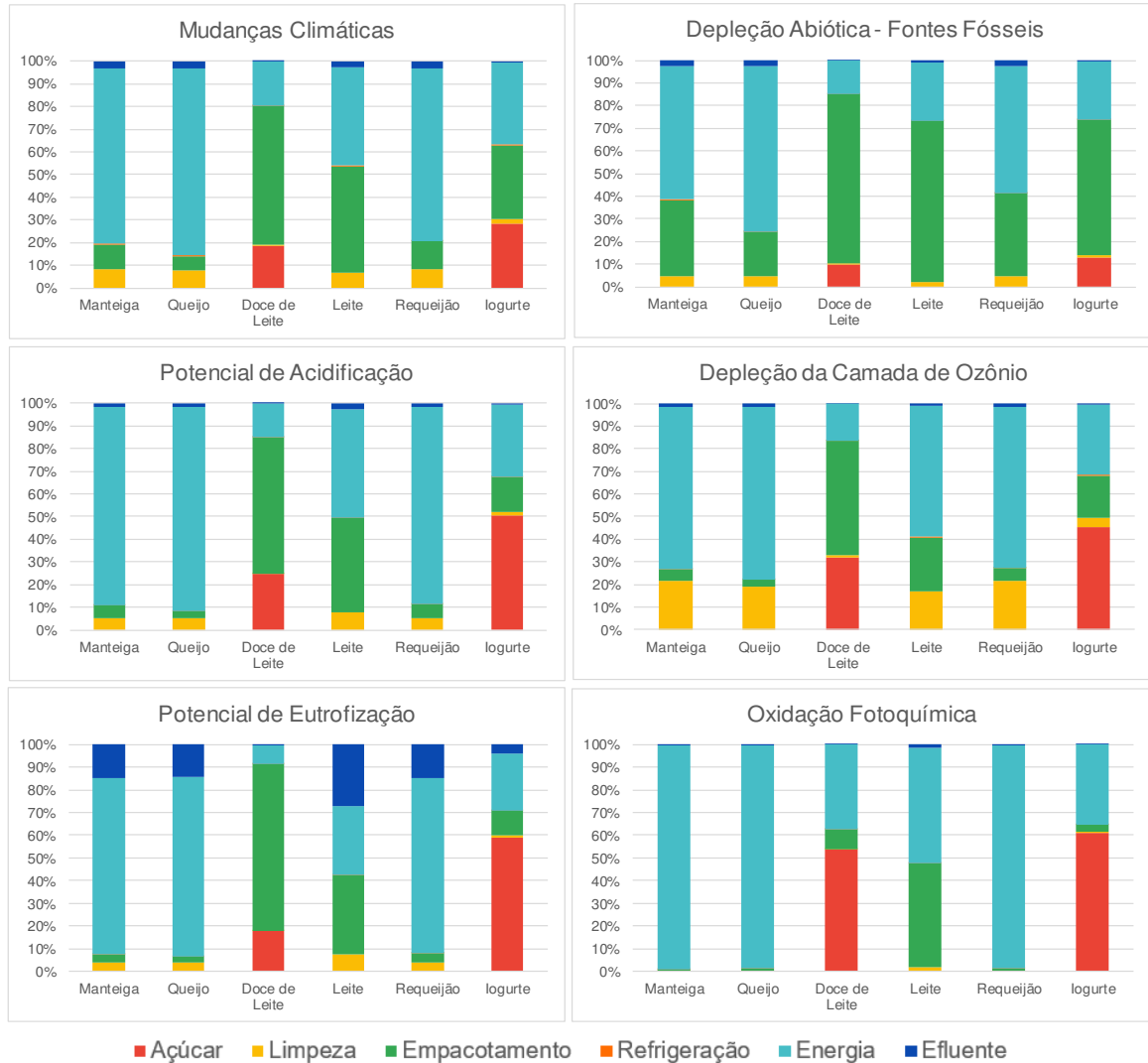
Fonte: autor.

Além do leite cru, houve outros insumos que afetaram o perfil ambiental dos laticínios, com destaque para as fontes de energia, materiais de embalagem e o açúcar. As fontes de energia representaram 0,31 a 70,6% da composição de impacto dos produtos, atuando principalmente em oxidação fotoquímica. Os insumos de empacotamento influenciaram com pouco menos de 0,20 a 38,3%, com destaque na categoria de depleção abiótica de fontes fósseis. Por fim, o açúcar apresentou impactos que variaram de 4,39 a 42,6%, apresentando destaque na categoria oxidação fotoquímica. É possível observar que, apesar de pequenos para algumas categorias, estes fluxos influenciam de forma expressiva. Ainda assim, para compreendermos melhor a contribuição desses e dos demais fluxos de insumos se convém analisá-los sem a consideração dos insumos gerados pelo leite cru, para se facilitar a análise dos impactos relativos deles.

### 3.2.2. Impactos dos demais insumos sem considerar o leite cru

Desconsiderando o fluxo de leite cru, é possível também avaliar os impactos ambientais gerados pelos demais insumos na produção dos laticínios. Dessa maneira, observamos que aqueles que mais contribuíram para as categorias estudadas foram o consumo de energia e de materiais para o empacotamento dos produtos. Mais precisamente, a ordem decrescente de influência no impacto pelos demais insumos foi energia, empacotamento, açúcar, limpeza, tratamento de efluentes e refrigeração (Figura 7).

Figura 7 – Relação de impactos dos insumos aos produtos para diferentes categorias de impacto, sem considerar o leite.



Fonte: autor.

Dentro dos insumos energéticos, o uso de energia térmica foi o fluxo que mais influenciou nos impactos da maioria dos produtos. Com exceção do leite industrializado – que não foi considerado o uso da energia térmica na sua linha de produção de forma direta, a contribuição da energia térmica variou de 8,90% a 96,4%, sendo o menor valor para a categoria de eutrofização para o produto doce de leite, e o maior para a categoria de oxidação fotoquímica para o requeijão. A energia térmica influenciou sobretudo às categorias de oxidação fotoquímica e acidificação, por outro lado a sua menor atuação foi em depleção abiótica e da camada de ozônio. Os

produtos que foram mais afetados pela energia térmica foram a manteiga e o requeijão e os que menos foram influenciados foram o doce de leite e iogurte.

A energia elétrica foi um fluxo que esteve presente em todos os produtos. Apesar de ter contribuído menos que a energia térmica, a eletricidade foi o segundo fluxo que mais afetou os produtos, desconsiderando para essa análise o leite. Sua parcela de contribuição para energia nas categorias variou de 18,9 a 50,3%, sendo a menor participação em eutrofização e a maior em depleção da camada de ozônio. Os produtos que foram mais afetados pela eletricidade foram o leite, seguido pelo queijo. Já a sua menor contribuição foi para o doce de leite. As categorias que a eletricidade mais influenciou foram depleção da camada de ozônio e aquecimento global e a que menos foi afetada foi eutrofização.

Após o leite, a energia é considerada um dos insumos que mais contribuem para a maioria das categorias de impacto na produção de laticínios, principalmente na parte agroindustrial do processo (STANCHEV et al., 2020). Um estudo que avaliou a produção de laticínios sob uma perspectiva *cradle-to-grave* identificou que a energia térmica seguida pela elétrica afetaram de forma expressiva o perfil ambiental dos produtos na etapa da produção do leite ao expedição dos produtos no laticínio, afetando principalmente as categorias de mudanças climáticas e acidificação, como também ocorreu em nosso trabalho (FINNEGAN et al., 2017a). Um dos estudos que avaliou laticínios para o Brasil também identificou que, ao desconsiderar o leite e o seu processamento, a energia térmica e o uso de eletricidade foram os principais pontos críticos da produção do produto (SANTOS et al., 2017).

Dentro do fluxo de insumos, em nosso estudo, os materiais de empacotamento representaram uma parcela notável de influência no impacto dos produtos, apresentando até maior relevância que a energia para alguns produtos, como o doce de leite. As categorias mais afetadas foram depleção abiótica de fontes fósseis e mudanças climáticas, por outro lado a menos afetada foi oxidação fotoquímica. Os produtos que tiveram maior influência desse fluxo foram o doce de leite e o leite, e o que apresentou menor foi o queijo. Dentre os materiais utilizados no empacotamento, os que mais contribuíram foram as latas utilizadas apenas pelo doce de leite. Outro material que chegou próximo aos valores da lata foi o polietileno de baixa densidade (PEBD), que, no entanto, é utilizado por quatro produtos, incluindo o

doce de leite de 5 kg. Por último, o material que apresentou menor impacto dentre os demais utilizados foi o papelão.

Alguns estudos sobre avaliação de ciclo de vida em produção de laticínios também apontaram os materiais de empacotamento como um ponto crítico que afeta a maioria das categorias, tendo a categoria mudanças climáticas como uma das mais afetadas (STANCHEV et al., 2020; VASILAKI et al., 2016). Assim como nosso estudo, os autores González-García *et al.* (2013c) identificaram, em seu estudo sobre ACV na produção de iogurte, que uma das categorias mais afetadas é a depleção abiótica, estando isso relacionado à origem de algumas embalagens ser de fontes fósseis. Com relação ao Brasil, embora a pesquisa de ACV sobre materiais de empacotamento e novos materiais de embalagem para alimentos ainda seja incipiente, há indícios de que esses campos estarão em franco desenvolvimento para os próximos anos, podendo caminhar juntos nesse processo (BARROS et al., 2019).

O impacto dos demais fluxos se deu sobretudo pelo açúcar e em menor proporção pelos produtos de limpeza e efluentes. Além disso, o fluxo que menos afetou os produtos foi o de refrigeração por amônia. O açúcar, presente no doce de leite e iogurte, teve grande influência em algumas categorias de impacto, se sobrepondo à soma dos demais fluxos de insumos nas categorias de acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica. Comparado ao doce de leite, o iogurte apresentou maiores impactos relacionados ao uso dessa matéria prima. Com relação ao uso de produtos de limpeza, estes insumos afetaram principalmente as categorias de aquecimento depleção da camada de ozônio e mudanças climáticas. Dos materiais de limpeza, o hidróxido de sódio apresentou uma influência próxima, porém superior ao ácido nítrico, além disso teve um destaque na categoria depleção na camada de ozônio, em que variou de 3,70% a 18,6% do total do impacto dos produtos. Assim como o uso da amônia para refrigeração, o uso da água para limpeza representou baixa influência para todas as categorias, com valores abaixo de 1,00%. Por último, o fluxo de saída representado pelo efluente da produção afetou principalmente a categoria de potencial de eutrofização, com 0,30% para o doce de leite e 27,0% para o leite.

### 3.3. Análise de sensibilidade

#### 3.3.1. Influência dos subprodutos na avaliação dos impactos dos produtos

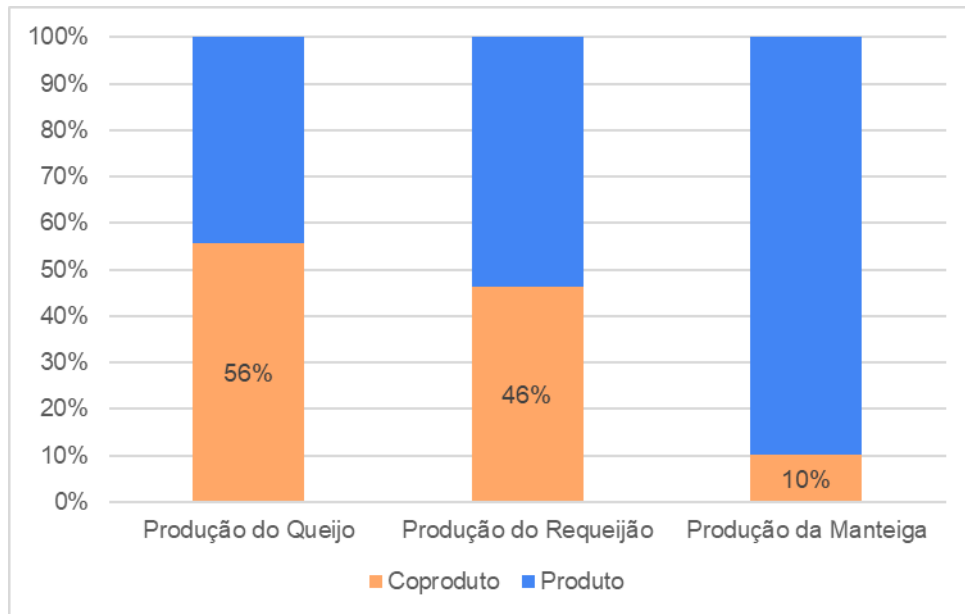
A produção de queijo, requeijão e manteiga na fábrica gera subprodutos. Os dois primeiros laticínios produzem soro de leite e o último gera o leiteiro. Nesse trabalho, considerou-se apenas os impactos da produção dos produtos principais. Assim, o impacto na produção do volume de soro e leiteiro durante o processamento dos produtos principais foi todo atribuído a eles. Com essa análise de sensibilidade, pretende-se identificar qual seria a redução no impacto dos produtos principais, em um cenário alternativo em que os subprodutos são aproveitados como coprodutos e os impactos de sua produção são apropriadamente atribuídos a eles. Desse modo, realizando a modelagem, se obteve a relação dos valores dos impactos dos produtos já com o abatimento do impacto referente aos candidatos a coprodutos (Tabela 10). Na Figura 8, é apresentada uma relação percentual dos resultados dos impactos ambientais para o soro e leiteiro comparado com os respectivos produtos principais.

Tabela 10 – Resultados da avaliação de impacto ambiental de ciclo de vida de alguns laticínios e seus subprodutos.

Produto	Mudanças Climáticas (kgCO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Acidificação (kgSO <sub>2</sub> eq)	Potencial de Eutrofização (kgPO <sub>4</sub> eq)	Depleção Abiótica (MJ)	Depleção da Camada de Ozônio (kgCFC11eq)	Oxidação Fotoquímica (kgC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)
Soro (Queijo)	9,099	0,061	0,034	34,008	3,22E-07	2,72E-03
Queijo	7,207	0,048	0,027	26,939	2,55E-07	2,16E-03
Soro (Requeijão)	2,754	0,018	0,010	12,016	1,05E-07	1,69E-03
Requeijão	3,205	0,021	0,012	13,980	1,23E-07	1,96E-03
Leiteiro	1,411	0,009	0,005	6,103	5,41E-08	8,75E-04
Manteiga	12,477	0,084	0,046	53,958	4,78E-07	7,74E-03

Fonte: autor.

Figura 8 – Influência dos coprodutos na produção dos laticínios.



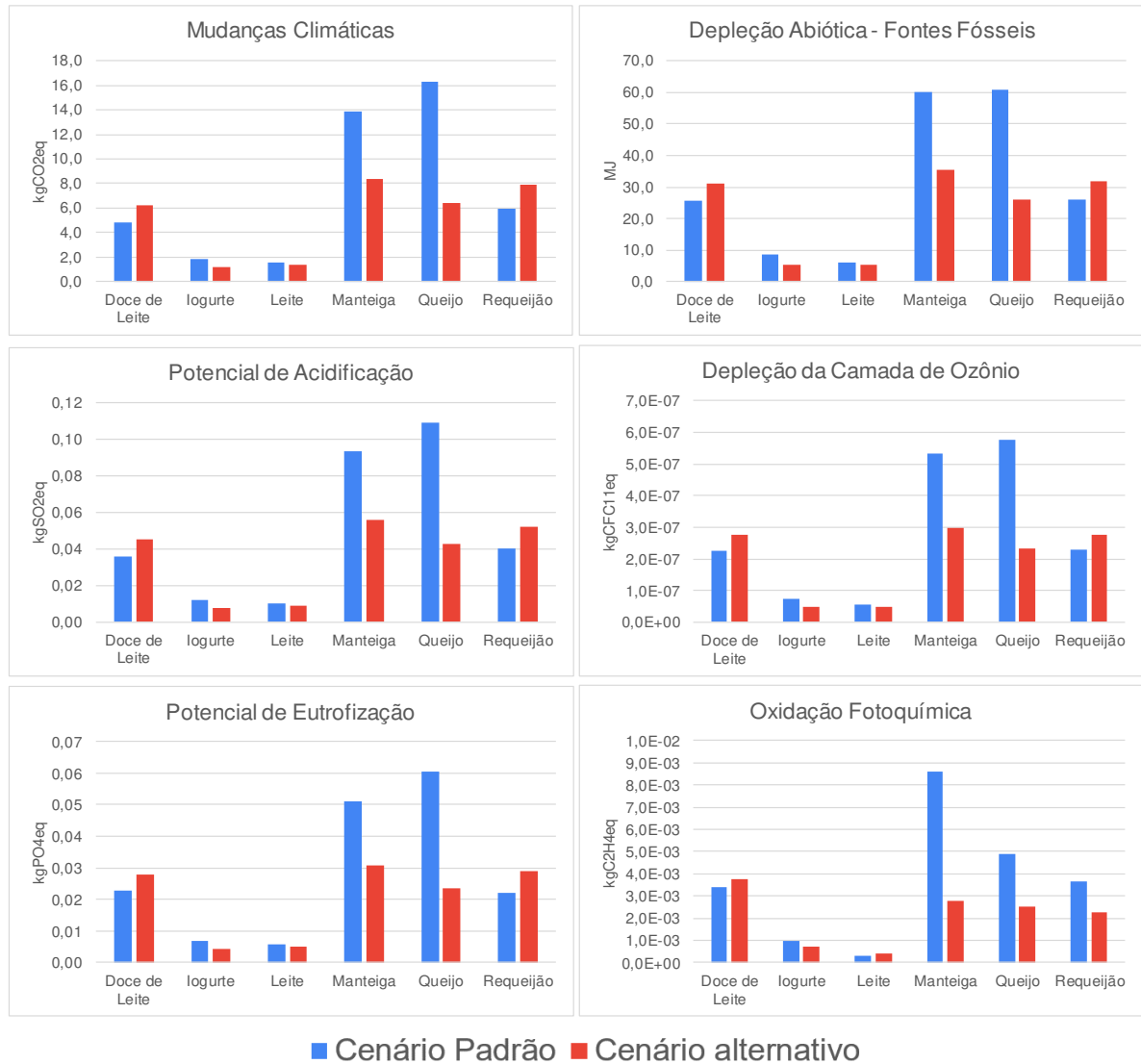
Fonte: autor.

O cenário alternativo apresentou como é expressivo o valor dos impactos ambientais dos coprodutos e que a sua consideração pode alterar substancialmente a forma de encararmos o perfil ambiental da produção do produto principal. A partir do momento em que se tratou o soro como coproduto, foi possível identificar que o impacto dele afetou a produção do produto principal numa quantidade próxima ou superior ao valor do produto principal. Por outro lado, observou-se que o leite não influencia nos impactos no processo de produção da manteiga numa proporção alta semelhante ao soro, representando apenas 10% de influência na produção de manteiga. O que explica a variação desses impactos é a alocação de impactos utilizada, que foi determinada pelo total de produto produzido e seu respectivo teor de sólidos de leite. Uma vez que na produção de queijo e requeijão há uma elevada produção de soro, o fator de alocação para as duas produções foi alto para este coproduto. Da mesma forma, o baixo fator de alocação justifica o impacto do leite ser inferior ao da manteiga, uma vez que se produz menos e tem teor de sólidos baixo. Desse modo, o cenário alternativo representa uma oportunidade de redução considerável dos impactos dos laticínios, principalmente do queijo e requeijão.

### 3.3.2. Influência da subdivisão de processo multifuncionais e alocação causal contra apenas alocação por sólidos de leite

A realização de uma avaliação de ciclo de vida em um laticínio implica em lidar com processos com múltiplas saídas – ou seja, com a multifuncionalidade de processos. Existem diferentes estratégias para lidar com essa situação, sendo comum nos estudos optarem por aquela adequada à disponibilidade de dados. Nos casos em que se apresenta maior detalhamento de dados cabe utilizar a subdivisão de processos multifuncionais, por outro lado quando não há possibilidade de subdividir os fluxos é indicado utilizar a alocação, e a alocação por sólidos de leite é uma das mais indicadas (IDF, 2015). Para avaliar a capacidade que a escolha das estratégias tem em influenciar o perfil ambiental dos produtos realizamos essa análise de sensibilidade, em que se comparou (i) o cenário padrão de subdivisão de processos multifuncionais e alocação causal ao (ii) cenário alternativo de alocação por teor de sólidos de leite.

Figura 9 – Relação das categorias de impacto para os laticínios em diferentes estratégias de se lidar com a multifuncionalidade.



Fonte: autor.

Com a análise de sensibilidade foi possível perceber que o uso de alocação por sólidos de leite difere do quadro comparativo de impactos dos produtos apresentado no cenário padrão, oferecendo mais impactos para produtos de maior produção e maior teor de sólidos (Figura 9). O cenário alternativo gerou uma alocação de impactos principalmente para o doce de leite, pela sua alta quantidade produzida mensalmente e seu elevado teor de sólidos de leite. Por outro lado, o produto não apresentou um aumento substancial no seu perfil ambiental, uma vez que sua

produção é grande, o que amortiza o impacto relativo à sua unidade funcional. De maneira geral, houve uma redução dos impactos dos produtos. O queijo e a manteiga apresentaram uma variação expressiva, que pode ser observada pela diminuição quase pela metade do valor apresentado no cenário padrão. Já o leite e o iogurte, que têm elevada produção e os menores teores de sólidos apresentaram impactos menores, mas próximos ao cenário padrão. Esses resultados indicam que a alocação por sólidos de leite pode apresentar valores não compatíveis com um cenário mais próximo a realidade (cenário padrão), devendo-se ter atenção que o uso da alocação, pois apesar de facilitar a modelagem pode ocasionar em valores distantes da realidade.

### **3.4. Sugestões para mitigação de impactos**

#### **3.4.1. Mitigação no insumo principal: o leite**

Os resultados desse trabalho apontaram que o leite é um dos principais fluxos responsáveis pelos impactos ambientais dos laticínios. Uma vez que o leite é um insumo indispensável para a produção desses produtos, é importante considerarmos estratégias de mitigação dos impactos que esta matéria prima traz consigo. Dentre os principais fluxos relacionados a produção de leite observados no modelo, a forma de alimentação dos animais foi o maior contribuinte na composição dos impactos. Os estudos de ACV voltados para gado de leite, tanto no Brasil como no mundo, apontam de forma geral que a origem dos impactos do leite é principalmente devido à alimentação do gado (DE LÉIS et al., 2015; THOMASSEN et al., 2008), o que está de acordo com o observado no modelo deste trabalho. Da mesma maneira, na produção de gado de corte brasileira, estudos indicam que a alimentação é um fator decisivo para o impacto do produto final (FLORINDO et al., 2017; RUVIARO et al., 2016). Dentre as principais estratégias que os estudos de ACV sugerem para reduzir o impacto da alimentação do gado é um planejamento nutricional adequado e no correto manejo da adubação do pasto, evitando lixiviação de nutrientes não absorvidos ou volatilização de amônia do fertilizante utilizado (DE LÉIS et al., 2015; EIDE, 2002; WANG et al., 2019)

Como complemento a alimentação, outros estudos sugerem ainda que a forma do manejo do gado e de seus dejetos influencia também no impacto final do leite para algumas categorias, como mudanças climáticas e potencial de acidificação (BACENETTI et al., 2016; MACIEL, 2019). Por isso, uma estratégia de mitigação nesse sentido é estimular a adoção de tratamentos sanitariamente adequados para os dejetos e efluentes das propriedades. Desse modo, é possível reduzir emissões de amônia e metano gasoso, comum em esterqueiras a céu aberto (BACENETTI et al., 2016). Uma sugestão de tratamento possível para os efluentes é através da digestão anaeróbia de seus resíduos, sendo necessária avaliar a viabilidade caso a caso pelo produtor. A digestão anaeróbia pode permitir uma redução no perfil ambiental do leite, uma vez que é uma medida efetiva na mitigação de impactos ambiental para essa etapa do ciclo de vida dos laticínios (BACENETTI et al., 2016).

A partir dessas reflexões, considerou-se como uma estratégia de mitigação para os impactos ambientais na produção leite, avaliar e categorizar os produtores que fornecem essa matéria prima de modo a compreender a sua produtividade, a forma de manejo do gado e de seus dejetos. Atuar sugerindo melhoria na nutrição dos rebanhos e quando necessário sugerindo formas de adequar sanitariamente o manejo dos dejetos. Essa tarefa pode ser desenvolvida através de projetos em parceria com institutos de pesquisa e extensão rural da região, como EMATER e EMBRAPA, e a própria universidade junto ao laticínio. Por fim, a estratégia implicará em externalidades positivas para a produção e reduzirá o impacto ambientais dos produtos para as categorias estudadas.

#### 3.4.2. Mitigação nos insumos secundários: empacotamento e energia

Uma vez consideradas estratégias de mitigação do impacto do leite, devemos nos ater a quantidade de impactos nos laticínios que é originada pelo uso de energia e de embalagens, que são dois insumos que possuem relevância na distribuição de impactos aos laticínios. Como pôde ser visto, dentro dos fluxos de energia se destacou principalmente a térmica e nos de empacotamento destacaram-se as latas e o PEBD, sendo então esses insumos levados em conta nas estratégias de mitigação sugeridas por este estudo. Considerando a energia térmica, Santos *et al.* (2017) sugere que uma forma de redução dos impactos desse tipo de fluxo pode ser feita por meio do uso de

fontes de energia menos poluentes, como o resíduo de pallets de madeira em desuso e outros resíduos de madeira como alternativa à lenha, e outras fontes fósseis. Já com relação às embalagens, uma oportunidade de redução do impacto do ciclo de vida pode ser através do uso de embalagens produzidas a partir de material de origem biológica, em substituição aos polímeros sintéticos (LICCIARDELLO, 2017)

Avaliando as estratégias propostas para os estudos apresentados, considerou-se que uma alternativa para o laticínio com relação a energia seria o aproveitamento de biomassa residual gerada durante a operação do laticínio. Uma oportunidade para essa forma de mitigação seria via aproveitamento do lodo desidratado obtido no tratamento do efluente da indústria de laticínios. No entanto, para isso será necessário um estudo de viabilidade técnica e econômica do uso desse resíduo como material para a queima ou biodigestão para produção de biogás. Esse tipo de uso poderia reduzir a demanda de lenha, aproveitando-se o potencial energético do lodo. A depender da viabilidade, outras possibilidades de biomassa residual podem ser utilizadas, como resíduo de madeira. Outro ponto importante a ser considerado é a eficiência do uso do calor nos processos, de modo a evitar desperdícios no uso durante a produção dos laticínios. Com essas medidas, poderá se obter então uma redução nas categorias de impacto que são afetadas pelo uso da energia térmica.

Com relação às embalagens, a sugestão para a redução dos impactos ambientais poderá ser através da implementação de embalagens alternativas de base biológica, para o caso do polietileno. No caso da lata, uma forma de reduzir o impacto seria com a substituição dessa embalagem por outra com um impacto menor, o que, deveria ser avaliado também a sua viabilidade uma vez que é uma embalagem tradicional do produto.

#### 3.4.3. Mitigação pelo aproveitamento dos subprodutos

De forma geral, os impactos ambientais dos produtos apresentaram-se dentro dos valores esperados para cada um. No entanto, pôde-se perceber através da análise de sensibilidade realizada que há oportunidades de redução dos impactos dos produtos que apresentam subprodutos durante o seu processo produtivo. Para alguns desses produtos, como o queijo e o requeijão, há uma redução próxima ou maior que

a metade dos valores atuais. Desse modo, uma forma de reduzir mais o perfil ambiental desses produtos é através do beneficiamento destes subprodutos para que sejam coprodutos. Com o beneficiamento do soro e do leiteiro, os atuais impactos que não são contabilizados para eles e destinados exclusivamente para os produtos principais poderão ser transferidos para os coprodutos, reduzindo assim o total dos impactos ambientais presentes no queijo, requeijão e manteiga. Dessa maneira, o perfil ambiental destes produtos se assemelhará ainda mais com os fornecidos pela literatura que focam exclusivamente na produção do produto principal.

Essa forma de mitigação já foi sugerida em alguns estudos que apontam uma redução expressiva no impacto do produto quando se deixa de atribuir o impacto de um coproduto que faz parte desse processo (CABRAL et al., 2020; FLYSJÖ et al., 2011). Para o caso em questão, os coprodutos mais comuns observados são proteína isolada de soro de leite, também conhecido como *whey powder*, e o leiteiro em pó, conhecido como *buttermilk powder*. Um estudo realizado com queijo galego na Espanha apresentou que o aproveitamento do soro para produção de proteína isolada pode representar uma importante redução no perfil ambiental do queijo em categorias como eutrofização e depleção da camada de ozônio. Esse aproveitamento, no entanto, deverá ser feito com atenção as cargas ambientais que surgirão na produção desse novo coproduto, principalmente as relacionadas ao uso de energia (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2013d). Desse modo, é possível através do aproveitamento do soro e o leiteiro obtermos uma redução no impacto dos produtos que mais geram impacto por quilo produzido no laticínio.

#### 4. CONCLUSÕES

Nesse estudo, o impacto ambiental associado à produção de seis laticínios foi comparado e calculado por meio da metodologia de avaliação de ciclo de vida. Além disso, foram propostas duas análises de sensibilidade para investigar a influência no perfil ambiental dos produtos a partir da valorização dos subprodutos em coprodutos e da forma de se lidar com o problema da multifuncionalidade. Apresentou-se no estudo que a ordem decrescente de impactos por produtos foi: queijo, manteiga, requeijão, doce de leite, iogurte e leite. Conforme apresentado em outros estudos, observou-se que a produção de leite cru é o maior ponto crítico da produção dos laticínios, assim como a energia e o empacotamento. A valorização de subprodutos para coprodutos representou uma redução dos impactos presentes nos produtos principais, sendo expressiva no caso do soro, dada a sua grande produção. Com relação a estratégia de se lidar com a multifuncionalidade, observou-se que o uso somente da alocação por sólidos de leite, apesar de facilitar a modelagem, pode oferecer valores afastados da realidade, e que podem ser melhor representados pelo uso da subdivisão de processos aliada à alocação causal. Com isso, tem-se que as principais contribuições desse trabalho são:

- i. Oferecer uma melhor compreensão dos impactos ambientais de laticínios no Brasil;
- ii. Apresentar o perfil ambiental de dois produtos tradicionais (doce de leite e requeijão) ainda não explorados em outros estudos na literatura de avaliação de ciclo de vida;
- iii. Apresentar o grau de influência que o beneficiamento do subproduto em coproduto tem na redução dos impactos de outros produtos;
- iv. Questionar a qualidade dos resultados oferecidos com o uso apenas da alocação por sólidos de leite em estudos de avaliação de ciclo de vida em laticínios.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14044: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- BACENETTI, J. et al. Anaerobic digestion and milking frequency as mitigation strategies of the environmental burden in the milk production system. **Science of The Total Environment**, v. 539, p. 450–459, jan. 2016.
- BARROS, M. V. et al. Mapping of main research lines concerning life cycle studies on packaging systems in Brazil and in the world. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 8, p. 1429–1443, 8 ago. 2019.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Valor Bruto da Produção - Lavouras e Pecuária - Brasil**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/valor-da-producao-agropecuaria-de-2020-e-estimado-em-r-848-6-bilhoes/202010VBPRESUMOUFs.pdf/view>>.
- CABRAL, C. F. S. et al. Environmental Life Cycle Assessment of goat cheese production in Brazil: a path towards sustainability. **LWT**, v. 129, n. May, p. 109550, jul. 2020.
- CAMPOS, S. et al. Avaliação comparativa da pegada de carbono de margarina e manteiga produzidas no Sul do Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 93–100, fev. 2019.
- CETESB. **Ficha de Informação de Produto Químico - Amônia anidra**. Disponível em: <[https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=AM%D4NIA ANIDRA](https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=AM%D4NIA%20ANIDRA)>. Acesso em: 13 jun. 2021.
- CORTÉS, A. et al. Pursuing the route to eco-efficiency in dairy production: The case of Galician area. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124861, fev. 2021.
- DANESHI, A. et al. Greenhouse gas emissions of packaged fluid milk production in

- Tehran. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 150–158, out. 2014.
- DE LÉIS, C. M. **Desempenho ambiental de três sistemas de produção de leite no Sul do Brasil pela abordagem de Avaliação do Ciclo de Vida**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- DE LÉIS, C. M. et al. Carbon footprint of milk production in Brazil: a comparative case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 1, p. 46–60, 29 jan. 2015.
- DE SOUZA, C. G.; BARBASTEFANO, R. G.; TEIXEIRA, R. C. Life cycle assessment research in Brazil: characteristics, interdisciplinarity, and applications. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 2, p. 266–276, 16 fev. 2017.
- DJEKIC, I. et al. Environmental life-cycle assessment of various dairy products. **Journal of Cleaner Production**, v. 68, p. 64–72, abr. 2014.
- DJEKIC, I. et al. Main environmental impacts associated with production and consumption of milk and yogurt in Serbia – Monte Carlo approach. **Science of The Total Environment**, v. 695, p. 133917, dez. 2019.
- ECOINVENT. **Ecoinvent 3.7.1 dataset documentation - milk production, from cow - GLO**. Zurich: [s.n.].
- EIDE, M. H. Life cycle assessment (LCA) of industrial milk production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 7, n. 2, p. 115, mar. 2002.
- EMBRAPA. **Anuário Leite 2021**. Juiz de Fora: [s.n.]. Disponível em: <embrapa.br/gado-de-leite>.
- FANTIN, V. et al. Life cycle assessment of Italian high quality milk production. A comparison with an EPD study. **Journal of Cleaner Production**, v. 28, p. 150–159, jun. 2012.
- FAO. Dairy market review. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, n. April, p. 1–13, 2021.
- FAO; GDP. **Climate change and the global dairy cattle sector – The role of the dairy sector in a low-carbon future**. Rome: [s.n.].
- FEITZ, A. J. et al. Generation of an industry-specific physico-chemical allocation matrix: Application in the dairy industry and implications for systems analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 2, p. 109–117, 14 mar.

2007.

FINNEGAN, W. et al. Environmental impacts of milk powder and butter manufactured in the Republic of Ireland. **Science of The Total Environment**, v. 579, p. 159–168, fev. 2017a.

FINNEGAN, W. et al. Global warming potential associated with dairy products in the Republic of Ireland. **Journal of Cleaner Production**, v. 163, p. 262–273, out. 2017b.

FINNEGAN, W.; GOGGINS, J. Environmental impact of the dairy industry. In: **Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 129–146.

FLORINDO, T. J. et al. Carbon footprint and Life Cycle Costing of beef cattle in the Brazilian midwest. **Journal of Cleaner Production**, v. 147, p. 119–129, mar. 2017.

FLYSJÖ, A. et al. How does co-product handling affect the carbon footprint of milk? Case study of milk production in New Zealand and Sweden. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 5, p. 420–430, 7 jun. 2011.

FRAVAL, S. et al. Life Cycle Assessment of Food Products. In: **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**. [s.l.] Elsevier, 2019. v. 3p. 488–496.

FUNARBE. **Linha do Tempo**. Disponível em:

<<https://produtosviciosa.org.br/linhadotempo/>>. Acesso em: 23 maio. 2021.

GARCIA, S. N.; OSBURN, B. I.; CULLOR, J. S. A one health perspective on dairy production and dairy food safety. **One Health**, v. 7, n. March, p. 100086, jun. 2019.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Using Life Cycle Assessment methodology to assess UHT milk production in Portugal. **Science of the Total Environment**, v. 442, p. 225–234, 2013a.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental performance of a Portuguese mature cheese-making dairy mill. **Journal of Cleaner Production**, v. 41, p. 65–73, fev. 2013b.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental life cycle assessment of a dairy product: the yoghurt. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 4, p. 796–811, 25 maio 2013c.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Environmental Life Cycle Assessment of a Galician cheese: San Simon da Costa. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 253–262, ago. 2013d.

HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment**.

Cham: Springer International Publishing, 2018.

HELLWEG, S.; MILA I CANALS, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109–1113, 6 jun. 2014.

HOSPIDO, A.; MOREIRA, M. T.; FEIJOO, G. Simplified life cycle assessment of galician milk production. **International Dairy Journal**, v. 13, n. 10, p. 783–796, jan. 2003.

IBGE. **Indicadores IBGE - Contas nacionais trimestrais Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, 2021. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/><http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf><https://www.unhcr.org/publications/manuals/4d9352319/unhcr-protection-training-manual-european-border-entry-officials-2-legal.html?query=excom> 1989>

IBICT. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia-Ibict**,. Brasília: [s.n.].

IDF. **Bulletin of the International Dairy Federation 479/2015 Bulletin of the International Dairy Federation 479/2015**. Brussels: [s.n.].

JOUZDANI, J.; GOVINDAN, K. On the sustainable perishable food supply chain network design: A dairy products case to achieve sustainable development goals. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123060, jan. 2021.

LIAO, X. et al. Large-scale regionalised LCA shows that plant-based fat spreads have a lower climate, land occupation and water scarcity impact than dairy butter. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2020.

LICCIARDELLO, F. Packaging, blessing in disguise. Review on its diverse contribution to food sustainability. **Trends in Food Science & Technology**, v. 65, p. 32–39, jul. 2017.

MACIEL, A. M. **Life cycle assessment of milk production**. [s.l.] Universidade Federal de Juiz de Fora, 2019.

MACIEL, V. G. **Anais do VII Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**. (V. G. Maciel, Ed.)Anais do VII Congresso Brasileiro em Gestão do Ciclo de Vida. **Anais...**Gramado, RS: UFRGS, 2021Disponível em: <[www.ufrgs.br/gcv2020](http://www.ufrgs.br/gcv2020)>

- MAHATH, C. S.; MOPHIN KANI, K.; DUBEY, B. Gate-to-gate environmental impacts of dairy processing products in Thiruvananthapuram, India. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, n. September 2018, p. 40–53, fev. 2019.
- NIGR, E. M. et al. Comparando os impactos ambientais dos processos de produção industrial e artesanal do doce de leite por meio de análise do ciclo de vida. **Engevista**, v. 17, n. 3, p. 358, 26 fev. 2015.
- NILSSON, K. et al. Comparative life cycle assessment of margarine and butter consumed in the UK, Germany and France. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 9, p. 916–926, 26 nov. 2010.
- RAFIEE, S. et al. Sustainability evaluation of pasteurized milk production with a life cycle assessment approach: An Iranian case study. **Science of The Total Environment**, v. 562, p. 614–627, ago. 2016.
- RUVIARO, C. F. et al. Economic and environmental feasibility of beef production in different feed management systems in the Pampa biome, southern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 60, p. 930–939, jan. 2016.
- SANTOS, H. C. M. et al. Life cycle assessment of cheese production process in a small-sized dairy industry in Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 4, p. 3470–3482, 21 fev. 2017.
- SEÓ, H. L. S. et al. Avaliação do Ciclo de Vida na bovinocultura leiteira e as oportunidades ao Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 221–237, 19 jan. 2017.
- SIMÕES, A. R. P. et al. Dynamic impacts of farm-level technology adoption on the Brazilian dairy supply chain. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 23, n. 1, p. 71–84, jan. 2020.
- STANCHEV, P. et al. Multilevel environmental assessment of the anaerobic treatment of dairy processing effluents in the context of circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121139, jul. 2020.
- TEIXEIRA, L. V.; FONSECA, L. M. Perfil físico-químico do soro de queijos mozzarella e minas-padrão produzidos em várias regiões do estado de Minas Gerais. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 60, n. 1, p. 243–250, fev. 2008.
- THOMASSEN, M. A. et al. Attributional and consequential LCA of milk production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 4, p. 339–349, 1

jun. 2008.

ÜÇTUĞ, F. G.; ATLUĞKOYUN, A. İ.; İNALTEKİN, M. Environmental life cycle assessment of yoghurt supply to consumer in Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 215, p. 1103–1111, abr. 2019.

VASILAKI, V. et al. Water and carbon footprint of selected dairy products: A case study in Catalonia. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 504–516, dez. 2016.

VERGÉ, X. P. C. et al. Carbon footprint of Canadian dairy products: Calculations and issues. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 9, p. 6091–6104, set. 2013.

WANG, L. et al. Life cycle assessment of 36 dairy farms with by-product feeding in Southwestern China. **Science of The Total Environment**, v. 696, p. 133985, dez. 2019.