



AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA COMPARATIVA DE XAMPU
BASEADO EM INGREDIENTES NATURAIS E XAMPU CONVENCIONAL

Giovanna Carneiro Ronzé Pedreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadores: Helen Conceição Ferraz
João Victor Nicolini

Rio de Janeiro
Dezembro de 2023

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA COMPARATIVA DE XAMPU
BASEADO EM INGREDIENTES NATURAIS E XAMPU CONVENCIONAL

Giovanna Carneiro Ronzé Pedreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Orientada por: Prof^a. Helen Conceição Ferraz, D.Sc.

Prof. João Victor Nicolini, D.Sc.

Examinada por: Prof^a. Bettina Susanne Hoffmann, D.Sc.

Prof^a. Alessandra da Rocha Duailibe Monteiro, D.Sc.

Prof^a. Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D.Sc.

Prof^a. Luciana Macedo Brito, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2023

Pedreira, Giovanna Carneiro Ronzé

Avaliação ambiental de ciclo de vida comparativa de xampu baseado em ingredientes naturais e xampu convencional / Giovanna Carneiro Ronzé Pedreira.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2023.

XVIII, 81 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Helen Conceição Ferraz

João Victor Nicolini

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Química, 2023.

Referências Bibliográficas: p. 73-81.

1. Avaliação de ciclo de vida. 2. Xampu *bio-based*. 3. Cosmética natural. 4. Xampu convencional. 5. Sustentabilidade. I. Ferraz, Helen Conceição *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Química. III. Título.

À Alana Oliveira (*in memorian*), a vascaína mais apaixonada que tive o prazer de conhecer e que me inspirou para uma nova forma de atuação na representação discente na Coppe durante a pandemia.

À Silvia Benite de Oliveira (*in memorian*), que sempre despertou a alegria em seus netos e me deu de herança a risada mais contagiante.

A Luiz Carlos Ronze (*in memorian*), que me ensinou a importância da simplicidade na vida.

A Bryan “Dexter” Holland, minha inspiração como músico e cientista.

A minha família e amigas(os), que testemunharam e apoiaram meu processo de amadurecimento nesse mestrado.

*“Água em escassez bem na nossa vez
Assim não resta nem as barata (é memo'!)
Injustos fazem leis e o que resta pr'ocês?
Escolher qual veneno te mata
Pois somos tipo...
Passarinhos
Soltos a voar dispostos
A achar um ninho
Nem que seja no peito um do outro”*

Leandro Roque De Oliveira / Marcos Jose Ferro Levy

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao universo, pelas probabilidades que me fizeram encontrar esse caminho que venho percorrendo e que me fazem continuar andando.

À agência de fomento, CAPES, pelo apoio financeiro à pesquisa. Ao programa Proatec/Uerj pela oportunidade de bolsa em área relacionada à pesquisa em 2023.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) e ao Programa de Engenharia Química (PEQ), pelas experiências que transformaram minha compreensão sobre o potencial de amplitude de uma atuação profissional crítica e pelas oportunidades de construir novas ideias frente aos desafios locais e globais que enfrentamos.

À professora Helen Conceição Ferraz, por sua generosidade e espírito inovador, imprescindíveis às pesquisas interdisciplinares. Agradeço, por acreditar na minha capacidade como pesquisadora, mesmo quando por outros lados, o sentido parecia o contrário. Obrigada por colocar humanidade na sua profissão. Por esse e outros motivos, você é inspiração.

À professora Bettina Susanne Hoffmann, pela disponibilidade de me ensinar sobre Avaliação de Ciclo de Vida com paciência e dedicação, pela compreensão e pelos conselhos para esta jovem pesquisadora, pela disponibilização do *software* e da base de dados e, sobretudo, pelo seu imenso incentivo e contribuição para a realização deste trabalho.

Ao professor João Victor Nicolini, por suas contribuições diretas e precisas, que agregaram à minha formação. Obrigada por aceitar estar junto para os desafios deste trabalho, inerentes à incorporação de uma nova perspectiva dentro de uma área já consolidada.

Ao Professor Eduardo Lima, pela oportunidade que me foi confiada de ser o apoio técnico do laboratório que coordena na Uerj através da bolsa Proatec. Diante de um cenário de pouca perspectiva de atuação na engenharia e na ciência, este trabalho

veio como uma importante virada na valorização profissional que é necessária para a autoestima de nós cientistas.

Ao Laboratório de Engenharia dos Fenômenos Interfaciais (Labefit) pelo acolhimento desde o início da fase de pesquisa, mesmo durante as turbulências de uma jornada pandêmica e até o fim deste intenso ciclo de aprendizado. Ao Marlon e Lucas, pela parceria na monitoria de Fenômenos Interfaciais.

Às pesquisadoras e servidores do Laboratório de Fenômenos Interfaciais e Termodinâmica (LaFIT) e Departamento de Físico-Química da Uerj, que me receberam de braços abertos e dispostos a ensinar. Em especial, agradeço à Patrícia, Wallace, Érika, Mischelle, Erica, Camilla e Maurílio pelos momentos de descontração almoçando ou tomando um café, que tornaram os dias mais leves.

Aos projetos de extensão que participei durante o mestrado: à Escola Piloto Prof. Giulio Massarani (EP), ao Pré-vestibular Social Carlos Chagas Filho (PVSCCF) e ao Núcleo de Assessoria Técnica e Popular (Natep) da Coppe/UFRJ, por me proporcionarem aprendizados e trocas importantes para minha formação profissional de uma maneira diferenciada, através do contato com públicos diversos e com a sociedade de forma geral. Agradeço em especial à Mary (EP) , ao Marlon e à Derlanny, representando os estudantes do PVSCCF, e à Letícia e Levi (Natep).

Aos amigos que fiz na representação discente, no projeto de divulgação científica Bora Fazer Ciência e na universidade, em especial, ao meu então colega e hoje professor Daniel Tinôco, por toda a parceria na militância, que foi de imensa importância para uma nova visão da Coppe para com seus discentes especialmente durante a pandemia. À Tamires, Many, Débora, Luelen e Neanderson, meus agradecimentos por enriquecer tantos debates que fizemos publicamente e pela amizade. À Tamires, por abrir suas portas. À professora Vera Salim, pelo incentivo que me deu a certeza de ir à luta por uma sociedade mais justa mesmo em ambiente tão hostil que vivemos. À Verônica, por compartilhar seus conselhos que me ajudaram a me guiar nesse caminho.

A todos os funcionários da secretaria do PEQ, especialmente a Luciana, pela dedicação e parceria. Às funcionárias terceirizadas Rose e Rosa, pelo incentivo

especialmente na parte das disciplinas, em que elas cotidianamente nos davam palavras de apoio.

À minha mãe, ao meu pai, e minha avó, Cirene, Cláudio e Imar, por terem sempre lutado para dar a mim e a minha irmã uma excelente formação especialmente acadêmica. Obrigada por todo o apoio e, principalmente, por me ensinarem seus valores de uma vida trabalhadora, justa, honesta e sonhadora.

Aos meus familiares, sobretudo minha irmã Julianna, com quem aprendi a compartilhar não só coisas materiais, mas principalmente, conhecimento, conselhos e cumplicidade. À minha tia Petronília e à Nilce, por serem inspirações acadêmicas.

Aos amigos José Claudio e Ludmylla, pelos apoios incondicionais e ombros amigos quando mais precisei. Vocês são parte dessa conquista. À Bia pela generosidade que “não tem tempo ruim”.

Aos profissionais de saúde mental que estiveram comigo desde o início dessa jornada e aos que entraram no meio dela por todo o apoio e ferramentas que vocês me apresentaram para atravessar os momentos mais difíceis desse caminho.

Às bandas The Offspring, Foo Fighters, Pitty, Emicida, Detonautas, CPM 22, Canto Cego e tantas outras, à Juliana Galante, a Palhaça Adelaide, por terem sido não apenas trilha sonora, mas combustível de motivação para encarar a vida, seus desafios, altos e baixos no mestrado. Aos integrantes e fãs da Offspring Rio, em especial Romano, Sancho e Klaus pela energia renovadora proporcionada a cada show. Ao fotógrafo Diego Castanho e à equipe do Offspring por terem escolhido a foto do meu cartaz no Rock in Rio para publicação em suas redes sociais. Nele, eu dizia: “All I Want is to be a Scientist and Rock Singer like Dexter Holland from The Offspring”. Essa publicação mudou a minha vida e sou muito grata a esse momento ter acontecido.

A todas e todos que lutaram pelo retorno da valorização da ciência e educação nas esferas governamentais brasileiras. E a todas e todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho. Desde o sorriso do motorista de ônibus, até os apoios mais inesperados, tudo fluiu para que eu chegasse até aqui. Obrigada a você, cara leitora e leitor, que leu até aqui. Espero que tenham conhecido mais de mim.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CICLO DE VIDA COMPARATIVA DE XAMPU
BASEADO EM INGREDIENTES NATURAIS E XAMPU CONVENCIONAL

Giovanna Carneiro Ronzê Pedreira

Dezembro/2023

Orientadores: Helen Conceição Ferraz

João Victor Nicolini

Bettina Susanne Hoffmann

Programa: Engenharia Química

Diante da emergência climática e em prol da sustentabilidade, a indústria química de cosméticos têm inserido no mercado formulações de xampu com tensoativos e ingredientes de origem natural (*bio-based*). Entretanto, há poucas pesquisas que quantificam estes impactos ambientais, o que motiva o presente trabalho. Nesse sentido, visa-se desenvolver um estudo comparativo entre uma formulação convencional de xampu e uma com a inclusão de ingredientes naturais por meio da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Utilizou-se a base de dados *ecoinvent 3.7* e adotou-se a metodologia para avaliação do impacto ReCiPe *MidPoint* (H) no programa openLCA 1.11. Os resultados da ACV apontam para a diminuição dos impactos ambientais do xampu *bio-based* em relação ao convencional, com potencial de redução de 68% nas mudanças climáticas, 50% na toxicidade humana e 22% na ecotoxicidade terrestre. Para a redução dos impactos das mudanças climáticas, depleção fóssil e de metais e toxicidade humana, sugere-se a diminuição do uso da cadeia petroquímica na formulação do xampu. Destaca-se a influência da escolha do processo de produção do óleo de coco nos impactos ambientais de ambas as formulações. Quanto à depleção de água a presente pesquisa alerta para a necessidade de melhorias no processo do agente regulador de pH para melhor desempenho da formulação *bio-based*. Com isso, conclui-se que a iniciativa de inclusão de produtos naturais em xampus são esforços válidos para a redução de impactos ambientais do setor e que mais pesquisas são requeridas para identificar novos processos em seu ciclo de vida que contribuam para a sustentabilidade.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPARATIVE ENVIRONMENTAL LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIO-BASED SHAMPOO AND CONVENTIONAL SHAMPOO

Giovanna Carneiro Ronz  Pedreira

December/2023

Advisors: Helen Conceio Ferraz

João Victor Nicolini

Department: Chemical Engineering

With regard to the climate emergency scenario, and in favor of sustainability, chemical cosmetics industry has introduced shampoo formulations including bio-based ingredients and surfactants. However, papers that measure these environmental impacts are not often available, which motivates the present work. In this sense, the aim of this study is to develop a comparative study between a conventional shampoo formulation and one with the inclusion of natural ingredients through Life Cycle Assessment (LCA). The *ecoinvent 3.7* database was used and ReCiPe MidPoint (H) methodology was adopted within the software openLCA 1.11. The LCA results point to a reduction in the environmental impacts of bio-based shampoo compared to conventional shampoo, with a potential reduction of 68% in climate change, 50% in human toxicity and 22% in terrestrial ecotoxicity. To reduce the impacts of climate change, fossil and metal depletion and human toxicity, it is suggested to reduce the use of the petrochemical chain in shampoo formulation. The influence of the choice of coconut oil production process of both formulations is highlighted. Regarding water depletion, this research highlights the need for improvements in the pH regulating agent process for better performance of the bio-based formulation. With this, it is concluded that the initiative to include natural products in shampoos are valid efforts to reduce the sector's environmental impacts and that more research is required to identify new processes in their life cycle that contribute to sustainability.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xv
NOMENCLATURA.....	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização e motivação	1
1.2. Objetivos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 Cosméticos e xampus.....	5
2.1.1 Definições	5
2.1.2 Tensoativos	5
2.1.3 Formulação convencional de xampu	7
2.1.4 Impactos ambientais da formulação convencional.....	9
2.1.5 Formulações alternativas de xampu	12
2.2 Coccoil glutamato de sódio	14
2.2.1 Processo de produção do glutamato de sódio.....	17
2.2.2 Processo de produção do ácido graxo de coco	20
2.2.3 Processo de produção do coccoil glutamato de sódio e formulação alternativa de xampu	22
2.3 Avaliação de Ciclo de Vida	23
2.3.1 Definição e normas.....	23
2.3.2 Metodologias de avaliação de impactos ambientais.....	26
2.3.3 Avaliação de Ciclo de Vida de cosméticos	29
3. METODOLOGIA	32
3.1. Declaração de objetivo e escopo.....	32
3.2. Inventário de Ciclo de Vida.....	33
3.2.1. Inventário de Ciclo de Vida para xampu bio-based	35
3.2.2. Inventário de Ciclo de Vida para xampu convencional.....	43
3.3. Avaliação de impacto de ciclo de vida	46
3.3.1. ReCiPe.....	46
3.3.2. Categorias de impacto	47

3.4.	Interpretação dos resultados.....	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1.	Ocupação agrícola da terra	53
4.2.	Mudanças climáticas.....	56
4.3.	Depleção fóssil.....	58
4.4.	Toxicidade humana.....	59
4.5.	Eutrofização marinha.....	61
4.6.	Depleção de metais	62
4.7.	Transformação natural da terra	64
4.8.	Formação de material particulado.....	65
4.9.	Ecotoxicidade terrestre	66
4.10.	Depleção de água	67
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	69
5.1.	Conclusões	69
5.2.	Sugestões	71
6.	ANEXOS.....	72
6.1.	Anexo I: Resultados de todas as categorias de impacto	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Estrutura química do SLES.	6
Figura 2.2 Estrutura química de um tensoativo catiônico (à esquerda) e um anfótero (à direita).....	7
Figura 2.3 Estrutura química do lauril glutamato de sódio (à esquerda) e do lauril glutamato dissódico (à direita).	16
Figura 2.4 Estruturas químicas do glutamato dissódico (à esquerda), glutamato monossódico (centro) e ácido glutâmico (à direita).	17
Figura 2.5 Fluxograma do processo de produção de glutamato monossódico a partir da extração de matérias-primas vegetais. Fonte: elaboração própria a partir da descrição de Sano (2009).	18
Figura 2.6 Mecanismo bioquímico do processo fermentativo de síntese do ácido glutâmico. Sendo: L-Glu, ácido glutâmico; PEP, fosfoenolpiruvato; Pir, piruvato; AcCo, acetilcoenzimaA; OAA,oxaloacetato; Cit,citrato; Icit,isocitrato; Ma,malato; Fu, fumarato; SucCo, succinil-coenzimaA. Fonte: Adaptado de Sano (2009).....	19
Figura 2.7 Fluxograma do processo de produção de glutamato monossódico a partir da síntese fermentativa. Fonte: Adaptado de Maluly (2021) e Ajinomoto (2023).....	20
Figura 2.8 Fluxograma de produção de ácido graxo de coco. Fonte: Adaptado de Gervajio (2005).	21
Figura 2.9 Fluxograma de produção do cocoil glutamato de sódio. Fonte: Elaboração própria a partir da patente de Wang <i>et al.</i> (2016).....	23
Figura 3.1 Processos à montante do cocoil glutamato de sódio. Fonte: Adaptado de Wang (2016).....	35
Figura 3.2 Estrutura química da glicina (à esquerda) e glicinato de sódio (à direita). ...	40
Figura 4.1 Influência da formulação de xampu <i>bio-based</i> na ocupação agrícola da terra.	54
Figura 4.2 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na ocupação agrícola da terra.	55
Figura 4.3 Influência da formulação de xampu <i>bio-based</i> nas mudanças climáticas.....	56
Figura 4.4 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional nas mudanças climáticas.	57
Figura 4.5 Influência da formulação de xampu <i>bio-based</i> na depleção fóssil.	58

Figura 4.6 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na depleção fósfil.	59
Figura 4.7 Influência da formulação de xampu bio-based na toxicidade humana.	60
Figura 4.8 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na toxicidade humana.	61
Figura 4.9 Influência da formulação de xampu bio-based na eutrofização marinha.....	61
Figura 4.10 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na eutrofização marinha.	62
Figura 4.11 Influência da formulação de xampu bio-based na depleção de metais.	63
Figura 4.12 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na depleção de metais.	63
Figura 4.13 Influência da formulação de xampu bio-based na transformação natural da terra.	64
Figura 4.14 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na transformação natural da terra.	64
Figura 4.15 Influência da formulação de xampu bio-based na formação de material particulado.	65
Figura 4.16 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na formação de material particulado.	65
Figura 4.17 Influência da formulação de xampu bio-based na ecotoxicidade terrestre.	66
Figura 4.18 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na ecotoxicidade terrestre.....	66
Figura 4.19 Influência da formulação de xampu bio-based na depleção de água.	67
Figura 4.20 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na depleção de água.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Formulação convencional de xampus (adaptado de Amiralian e Fernandes (2018)).	8
Tabela 2.2 Composição de ácidos graxos do coco virgem, refinado, extravirgem à quente e à frio. Adaptado de (Deen <i>et al.</i> , 2020).	15
Tabela 3.1 Processos do Inventário de Ciclo de Vida.	34
Tabela 3.2 Inventário do processo de produção do glutamato de sódio. Fonte: Adaptado de Nampoothiri e Pandey (1999) e Takuji (2020).	37
Tabela 3.3 Inventário do processo de produção do ácido graxo de coco. Fonte: Adaptado de Gervajio (2005).	38
Tabela 3.4 Inventário do processo de produção do cloreto de ácido graxo de coco. Fonte: Adaptado de Fujita e Ohara (2017).	39
Tabela 3.5 Inventário do processo de produção do glicinato de sódio. Fonte: Adaptado de Shaikh et al. (2014).	40
Tabela 3.6 Inventário do processo de produção do cocoil glutamato de sódio. Fonte: Adaptado de Wang (2016).	41
Tabela 3.7 Inventário da formulação de xampu <i>bio-based</i> . Fonte: Adaptado de Ajinomoto (2011).	42
Tabela 3.8 Inventário da formulação de xampu convencional. Fonte: Adaptado de Golsteijn et al. (2018) e Sampaio e D'águiar (2020).	43
Tabela 3.9 Inventário do processo de manufatura de xampu convencional. . Fonte: Adaptado de Golsteijn et al. (2018) e Sampaio e D'águiar (2020).	45
Tabela 3.10 Comparação entre as substâncias avaliadas em cada formulação de xampu avaliada e suas funções. . Fonte: Adaptado de Ajinomoto (2011), Golsteijn et al. (2018) e Sampaio e D'águiar (2020).	45
Tabela 3.11 Categorias de impacto de ponto médio da metodologia ReCiPe, seus indicadores, fatores de caracterização e unidades. Fonte: Adaptado de Huijbregts <i>et al.</i> (2017).	47
Tabela 4.1 Resultado da AICV para formulação de xampu <i>bio-based</i> e convencional em valores absolutos para cada categoria de impacto estudada.	52
Tabela 6.1 Resultado da AICV para formulação de xampu <i>bio-based</i> e convencional em valores absolutos para todas as categoria de impacto de ReCiPe <i>Midpoint</i> (H).	72

NOMENCLATURA

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida
APG	Alquil poliglucosídeos
CGD	Cocoil glutamato dissódico
CGS	Cocoil glutamato de sódio
CH ₄	Metano
C ₂ H ₃ ClO ₂	Ácido cloroacético
C ₂ H ₅ NO ₂	Glicina
C ₅ H ₈ NO ₄ Na	Glutamato de sódio
C ₁₂ H ₂₃ ClO	Cloreto de ácido láurico
C ₁₇ H ₃₀ NNaO ₅	Lauril glutamato de sódio
CML	
CO ₂	Dióxido de carbono
Coppe	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa em Engenharia
DCB	1,4 diclorobenzeno
EDTA	Ácido etilenodiaminotetracético
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FeSO ₄	sulfato de ferro
GEE	Gases do efeito estufa
Glu	Aminoácido glutâmico

HCl	Ácido clorídrico
HPPC	Higiene Pessoal Perfumaria e Cosméticos
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional para Padronização
Labefit	Laboratório de Engenharia dos Fenômenos Interfaciais
NaCl	cloreto de sódio
NaNO ₃	nitrato de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NH ₃	Amônia
N ₂ O	Óxido nitroso
ReCiPe	
SLES	Lauril éter sulfato de sódio
SLS	Lauril sulfato de sódio
SO ₄ ⁻²	Íon sulfato
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

%(m/m)	Porcentagem em massa por massa
%(m/v)	Porcentagem massa por volume
g	grama
g/L	grama/Litro
kg	quilograma
kJ	quilojoule
kWh	quilowatt-hora
m ³	metros cúbicos (volume)
mg	miligrama
ton	tonelada
pH	Potencial hidrogeniônico

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e motivação

Há consenso científico em relação às perturbações ambientais causadas pelas mudanças climáticas, assim como em relação ao papel do setor industrial nesse contexto. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) revela que o aumento da concentração de gases do efeito estufa (GEEs) de 1750 até 2019 corresponde a 47% para o CO₂, 156% para o CH₄ e 23% para o N₂O (IPCC, 2021).

O volume de produção da indústria de cosméticos e a importância de seus produtos na saúde e bem-estar da população mundial são fatores que motivam pesquisas científicas de caráter social e ambiental na área. Em 2021, foram comercializados globalmente U\$530 bilhões no setor de Higiene Pessoal Perfumaria e Cosméticos (HPPC) (ABIHPEC, 2023). Dentre os produtos produzidos pelo setor de relevância para a saúde e bem-estar humanos, destacam-se sabonetes, xampus e condicionadores, além de produtos com propostas cosmeceúticas, que além de cumprir a função cosmética, agem de forma a minimizar uma questão de saúde, tais como caspas e inflamações no couro cabeludo (Kaul *et al.*, 2018).

Dentre os principais produtos de HPPC na categoria de cuidados de cabelos está o xampu. Sua principal função é a limpeza do couro cabeludo e por isso, seu ingrediente de maior relevância é o tensoativo. A presença de surfactantes para cumprir seu papel de limpeza gera impacto ambiental nos efluentes líquidos (Kumar *et al.*, 2022). Por sua vez, a grande quantidade de substâncias petroquímicas para cumprir outras funções no produto implica relação da indústria cosmética convencional com o cenário de impactos ambientais descritos anteriormente. Logo, mudanças na composição que melhorem o desempenho ambiental de xampus são necessárias conforme argumentam Bom *et al.* (2019) e Fonseca-Santos *et al.* (2015).

A nível global, nota-se a existência de certos esforços governamentais para uma agenda de desenvolvimento sustentável. Incorporando o desenvolvimentismo ao conceito de sustentabilidade, o encontro da Comissão Mundial de Meio Ambiente e

Desenvolvimento culminou na elaboração de um material amplamente divulgado que se tornou base para o conceito de desenvolvimento sustentável como é entendido hoje. Ao definir o conceito como: “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” o relatório "Nosso Futuro Comum" apresentado em 1987 pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento agrega a dimensão das gerações futuras, que é de fundamental importância para atuar no presente. Além disso, ao atribuir as dimensões social e econômica, além da esperada dimensão ambiental, a ideia de um meio ambiente integrado à sociedade passa a se difundir com mais frequência. Outros autores apontam também para mais dimensões, como a cultural e a essência humana (Fantinatti *et al.*, 2014). Pensar o meio ambiente e a vida humana de forma integrada é fundamental para construir soluções que incluam qualidade de vida para todos e respeito ao meio ambiente, que não nos leve a cenários catastróficos.

Porém, na indústria de cosméticos, ainda que a palavra sustentável esteja presente em suas propagandas e nas diretrizes apresentadas por diversas empresas, o uso dos termos “cosméticos verdes”, “sustentáveis” e/ou “naturais” não condizem necessariamente com menores impactos ambientais (Bom *et al.*, 2019). Existem muitos cosméticos que se rotulam dessa maneira, inclusive com certificações, porém, em contrapartida há poucos artigos na literatura que quantificam esses impactos. Tal discrepância entre tecnologia em nível de comercialização e de pesquisa aponta para a urgência e necessidade de estudos científicos que quantifiquem os impactos ambientais de produtos cosméticos para que haja debate e, posteriormente, consenso sobre as melhores estratégias para redução dos impactos ambientais da indústria de cosméticos.

Dessa forma, ferramentas de avaliação de impacto ambiental constituem-se como instrumentos relevantes a serem utilizados pela indústria química, pois conhecer os impactos ambientais de uma fábrica ou processo de forma categorizada e quantificada, permite identificar os setores que necessitam de mudanças significativas em sua estrutura, contribuindo para a mudança de paradigma tecnológico apresentado anteriormente. O Sistema de Gestão Ambiental, o Estudo de Impacto Ambiental e a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) são exemplos de ferramentas consolidadas atualmente para avaliação de impacto ambiental.

Dentre essas ferramentas, a ACV se destaca por propiciar uma visão do processo na avaliação dos impactos ambientais. A ACV permite quantificar impactos ambientais e viabiliza a identificação das etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço que mais contribuem para as categorias de impacto, sendo assim uma ferramenta que auxilia tomadas de decisão (Heijungs, 2014). As análises podem ser feitas “portão a portão”, isto é, avaliando os impactos estritamente no escopo de uma fábrica, por exemplo, ou do “berço ao túmulo”, na qual são avaliados os impactos desde a produção da matéria-prima, passando por etapas de manufatura, embalagens, armazenamento, distribuição até chegar na disposição final e fim de vida. Atualmente, com a atuação de profissionais interdisciplinares é possível montar processos complexos em softwares especializados, que permitem a partir de dados de entrada fornecidos pelo usuário e de bases de dados, além da escolha do método de avaliação, calcular os impactos ambientais.

Diante das demandas dos movimentos socioambientais que visam combater a crise climática de forma sistêmica, um estudo que quantifique impactos ambientais de um produto do setor de HPPC que é amplamente utilizado mundialmente se constitui como uma parcela dos esforços dentre tantos outros realizados pela comunidade científica e que juntos, dão contribuições necessárias para a resolução coletiva e de forma sistêmica do problema.

Diante da expressa necessidade da indústria química de realizar uma mudança de paradigma tecnológico, este estudo visa contribuir com uma etapa deste processo: a de quantificar os impactos ambientais de possíveis novas composições de um cosmético a fim de contribuir para a otimização dessa mudança. Além disso, motivado pela existência de variadas certificações no mercado que não necessariamente implicam menor impacto ambiental do produto, a presente pesquisa almeja contribuir para ampliar o conhecimento científico do assunto, através de um estudo de caso.

Além disso, devido a existência de poucos estudos que quantificam impactos ambientais da cosmética natural em comparação com estudos que propõem formulações alternativas, a relevância desse estudo acontece na medida em que os resultados dos cálculos realizados ajudam a compreender melhor as categorias de impacto ambientais afetadas pelas formulações cosméticas petroquímicas e baseadas em ingredientes naturais e, assim, ser possível atuar de forma científica na dimensão ambiental da sustentabilidade.

Finalmente, a realização de uma pesquisa acadêmica em torno da resolução de problemas cotidianos, tal como a problemática dos impactos ambientais de cosméticos, amplamente utilizados pela população brasileira, está em consonância com a ideia de integração entre ensino e pesquisa tal como proposto por Freire (2019), o que também motiva a realização deste trabalho.

1.2. Objetivos

Como objetivo geral a presente pesquisa visa desenvolver um estudo comparativo entre uma formulação sintética convencional de xampu e uma formulação de xampu com inclusão de ingredientes naturais por meio da ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

Os objetivos específicos são realizar a modelagem das formulações de xampu convencional e com ingredientes naturais no programa openLCA; calcular as pegadas ambientais do xampu sintético e do xampu com ingredientes naturais através da ACV e comparar os ciclos de vida das duas formulações, identificando os principais impactos ambientais dos processos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Cosméticos e xampus

2.1.1 Definições

A indústria cosmética, subárea da indústria química, compõe um dos setores de HPPC. Neste mercado, o Brasil desempenha papéis importantes como exportador e importador, ocupando a 4ª posição no ranking de mercado consumidor (Euromonitor, 2021) Destacam-se na quarta posição entre produtos de HPPC mais consumidos no país os de cuidados com cabelo, tais como xampus, condicionadores, máscaras de tratamento e cremes de pentear (ABIHPEC, 2023).

Xampus são produtos cosméticos que possuem como função principal a limpeza dos fios de cabelo e do couro cabeludo. Por limpeza compreende-se a necessidade de remoção de impurezas, oleosidade e células mortas de pele da região (Amiralian e Fernandes, 2018). Para isso, com o desenvolvimento da indústria petroquímica, o agente de limpeza e principal ingrediente do xampu corresponde a tensoativos sintéticos oriundos dessa indústria, tal como o lauril éter sulfato de sódio (SLES), conhecido por seu baixo custo e sua capacidade de produção de espuma. A composição do xampu líquido convencional dos séculos XX e XXI pode incluir, além de água e tensoativos primário e secundário, reguladores de viscosidade, reguladores de pH, umectantes, agentes formadores de filme, conservantes e fragrâncias, que serão detalhados na seção 2.1.3 da presente dissertação.

2.1.2 Tensoativos

Tensoativos são substâncias químicas que podem ser naturais ou sintéticas que são caracterizadas por diminuir a tensão interfacial (contato entre duas fases condensadas, como líquido-líquido ou líquido-sólido) ou superficial (contato entre uma fase condensada e outra vapor, como líquido-gás). Isso ocorre porque tensoativos possuem em sua estrutura uma parte polar e outra apolar, capazes de interagir ativamente com interfaces hidrofílicas e hidrofóbicas a partir de suas afinidades químicas e, assim, podendo facilitar a formação de emulsões, molhabilidade, detergência e/ou formação de espuma (Holmberg et al., 2002).

é o cloreto de dialquil dimetil amônio. A Figura 2 apresenta o exemplo de um tensoativo catiônico.

Já os tensoativos anfóteros são aqueles que, em função do pH, se comportam como tensoativos aniônicos ou catiônicos. Em xampus, o pH é em geral na faixa de 5,0 a 6,0, de forma que os anfóteros com ponto isolétrico abaixo dessa faixa se comportam como aniônicos, atuando de forma mais suave, com menor poder de limpeza, sendo utilizados como tensoativos secundários em formulações convencionais. São exemplos de tensoativos anfóteros a cocoamidopropilbetaína, apresentado na Figura 2.2, e o cocoil glutamato de sódio, assim como as betaínas e tensoativos oriundos de aminoácidos de forma geral.

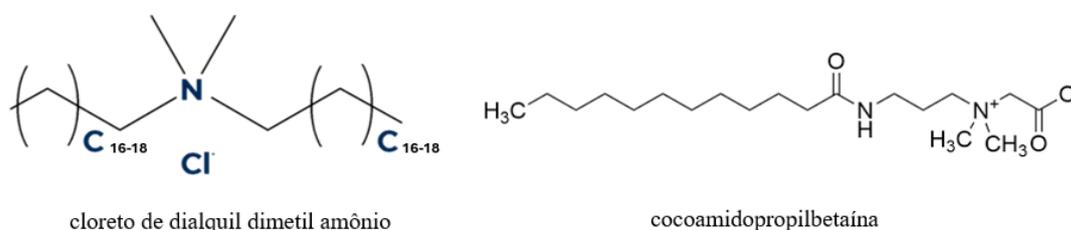


Figura 2.2 Estrutura química de um tensoativo catiônico (à esquerda) e um anfótero (à direita).

Finalmente, tensoativos não iônicos não liberam íons em solução aquosa, porém conferem estabilidade à espuma e efeito condicionante. Por isso, são utilizados em formulações convencionais com outra função. São exemplo de tensoativos não iônicos em xampus: álcoois graxos etoxilados, amidas e alcanolamidas de ácidos graxos.

2.1.3 Formulação convencional de xampu

O xampu convencional é uma emulsão óleo em água (O/A) constituído por uma série de ingredientes majoritariamente sintéticos. Sua longa lista de ingredientes inclui tensoativos, reguladores de viscosidade e pH, umectantes, formadores de fio, conservantes e fragrâncias. A Tabela 2.1 mostra a função, um exemplo de composição química e a faixa de concentração mássica de uma fórmula típica de xampu.

Tabela 2.1 Formulação convencional de xampus (adaptado de Amiralian e Fernandes (2018)).

Função	Exemplo de composição	Faixa de concentração (%m/m)
Veículo	água	qsp 100,00
Tensoativo primário	SLES	23-25,00
Cotensoativos	cocoamidopropilbetaína	2-7,00
Sobre-engordurante	dietanolamina de ácido graxo de coco	2-3,00
Espessante	hidroxietil celulose, cloreto de sódio ou diestearato de polietilenoglicol	1-3,00
Sequestrante	EDTA tetrasódico	0,05-0,10
Regulador de pH	ácido cítrico ou hidróxido de sódio	qs para pH 5,5-6,0
Umectante	glicerina	0,3-0,5
Agente de condicionamento	goma guar	0,1-0,3
Formador de filme	silicone	0,5-2,00
Conservante	ácido benzoico ou ácido sórbico	
Fragância	perfumes ou óleos essenciais	0,3-0,5

Em formulações convencionais os tensoativos primários são aniônicos. Logo, em meio aquoso, liberam grupos de cargas negativas que interagem com as cargas também negativas do cabelo em pH levemente ácido, o que permite a abertura da cutícula - a camada mais externa do fio capilar. Isso ocorre em virtude da ampliação da carga negativa da dupla camada elétrica a interface sujeira/fio, o que aumenta as forças repulsivas entre as superfícies e, assim, proporciona a limpeza dos fios (Cornell, 2018). Já os cotensoativos, em geral anfóteros, possuem função de limpeza combinada e mais suave, uma vez que a atração é mais fraca (Amiralian e Fernandes, 2018).

Espessantes são substâncias químicas responsáveis por aumentar a viscosidade do produto em sua fase contínua, contribuindo para estabilizar a emulsão (McClements, 2016). Por sua vez, regulares de pH permitem que emulsão atinja o pH adequado para a abertura das cutículas e limpeza do fio mesmo após a adição de diversas outras substâncias.

Umectantes possuem a função de facilitar a absorção de água pelos fios de cabelo limpo e são utilizados uma vez que a limpeza com tensoativos aniônicos está associada a um aspecto de ressecamento do cabelo. São utilizadas substâncias higroscópicas como a glicerina para cumprir tal função. Já os formadores de filme são componentes químicos que ficam depositados nos fios após a limpeza, de forma externa e superficial, conferindo brilho e maciez, que são preferências do consumidor (Amiralian e Fernandes, 2018).

Conservantes são compostos sintéticos que são adicionados à formulação a fim de conferir maior tempo de prateleira ao produto, evitando interferências microbiológicas. Finalmente, a fragrância, que pode ser sintética ou natural são utilizadas para caracterizar o cheiro do xampu (Amiralian e Fernandes, 2018).

A sustentabilidade dos xampus líquidos convencionais utilizados mundialmente é um tema investigado pelas principais empresas produtoras, tais como a L’Oreal, a Unilever e Procter and Gamble, como demonstra o estudo de Golsteijn *et al.* (2018). Através da definição de uma formulação virtual representativa de xampus utilizados na Europa, a associação da indústria de cosméticos no referido continente, conhecida como Cosmetics Europe, propôs regras categóricas para a pegada ambiental de xampus. A formulação estudada incluiu tensoativos aniônicos, anfóteros e não-iônicos, além de agentes de viscosidade, conservantes, regulador de pH, fragrância, formador de filme, agente de condicionamento e veículo (Golsteijn *et al.*, 2018). Devido à globalização, observa-se a estreita similaridade entre as composições comercializadas no Brasil e na Europa. Em termos de uso, obtenção de matérias-primas e fim de vida do produto, existe diferença significativa entre as localidades, o que confere a necessidade de pesquisas regionais.

2.1.4 Impactos ambientais da formulação convencional

O quinto relatório do IPCC mostra que as contribuições do setor industrial em 2010 ultrapassaram 30% das emissões globais de gases do efeito estufa, parcela maior do que a do setor de transporte (Fischedick *et al.*, 2014). No que tange à responsabilidade da indústria para atingir as metas estipuladas pelo Acordo de Paris, é imprescindível analisar a indústria química e suas principais categorias de impactos

ambientais. Historicamente, a indústria química relaciona-se fundamentalmente com a utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia desde o carvão na primeira revolução industrial, até a utilização do petróleo não apenas como energia, mas também como matéria-prima desde 1920.

A atual dependência da indústria química em relação ao petróleo é evidenciada através da projeção do crescimento de sua extração e produção brasileira em 104% até 2050 em relação à produção de 2016 e a baixa utilização de energias renováveis apesar do amadurecimento destas tecnologias, correspondendo a 25% do potencial energético do país no horizonte de 2050 (EPE, 2018).

Dentre os impactos ambientais da indústria petroquímica destacam-se a toxicidade de seus resíduos emitidos no solo, água e ar, emissão de gases do efeito estufa e a contaminação de águas e poluição dos oceanos (Mariano, 2005). Tais impactos colocam em risco a maioria dos limites planetários propostos por Rockström *et al.* (2009), como a perda da biodiversidade, mudanças climáticas, interferência em ciclos biogeoquímicos, acidificação dos oceanos, degradação da camada de ozônio, mudanças no uso da água doce e poluição química, que têm sido continuamente estudados (Steffen *et al.*, 2015).

Além disso, diversas áreas da indústria química são diretamente afetadas pela petroquímica por utilizarem seus insumos para fabricar seus produtos e que, portanto, acabam associando-se indiretamente aos impactos ambientais da primeira. Portanto, as indústrias de agroquímicos, polímeros, tintas, lubrificantes, alimentos, farmacêutica e cosmética são afetadas pela petroquímica e configuram-se como dependentes ao petróleo.

Nesse sentido, a indústria cosmética é uma das áreas de atuação da engenharia química e de processos que ao longo do século XX cresceu economicamente a nível global com base em matérias-primas derivadas da petroquímica, tais como petrolatos, óleos minerais, silicones e parafinas (IBD, 2014). Nos dias atuais, mesmo com a retomada da chamada cosmética natural, tal dependência ainda se faz presente, conforme apontam pesquisas mercadológicas realizadas na última década (Sebrae, 2016).

A formulação europeia convencional de xampu apresenta as mudanças climáticas, a depleção de água, a depleção de recursos fósseis e a ecotoxicidade da água doce como principais categorias de impacto ambiental afetadas (Golsteijn *et al.*, 2018). A discussão apresentada pelos pesquisadores associa as categorias de mudanças climáticas e depleção de água à fase de uso do consumidor durante o banho e a ecotoxicidade da água doce ao fim de vida da fórmula. Já a depleção fóssil é atribuída à energia utilizada pelos consumidores europeus no banho e ao combustível utilizado na etapa de distribuição e transporte do xampu e produção de ingredientes (Golsteijn *et al.*, 2018). Por outro lado, a literatura apresenta diversos estudos direcionados à busca de formulações alternativas por meio do uso de ingredientes naturais visando a redução dos impactos ambientais.

A depleção de água é um impacto ambiental que merece especial atenção na indústria cosmética, uma vez que está presente em toda sua cadeia de produção, desde o uso de água para produção das matérias-primas, passando pela água utilizada nos processos de aquecimento na manufatura e limpeza de equipamentos industriais, até a presença majoritária da água na formulação e seu uso no banho (Aguiar *et al.*, 2022). Nesse sentido, pesquisas para melhoria das propriedades físico-químicas para a rinsabilidade de xampus e análise de alternativas como xampus sólidos têm sido realizadas.

Além disso, os impactos ambientais na indústria cosmética tem sido estudados pelas óticas da produção de microplásticos (Kozłowska *et al.*, 2019), disposição final de embalagens e impacto na vida marinha (Vargas *et al.*, 2022). Algumas pesquisas sobre a problemática do microplástico têm recebido destaque e divulgação na mídia para o público-geral. Com reportagens, documentários e publicações nas redes sociais chamando a atenção para o impacto dos microplásticos na vida marinha e na saúde humana, a parcela de consumidores de cosméticos preocupados com a questão aumentou nos últimos anos, juntamente com uma demanda por cosméticos sustentáveis (Sebrae, 2020) na última década.

No caso dos parabenos, conservantes comumente utilizados em xampus, a literatura aponta para seu impacto na saúde humana, por ser absorvido rapidamente pela pele, e ambiental, por contaminar a cadeia alimentar. A fim de substituir sua função

antimicrobiana Nowak *et al.* (2020) sugere a utilização de ingredientes naturais na composição de cosméticos, tais como óleos essenciais e extratos de plantas.

Diante desse cenário, cresce o mercado e a busca científica e industrial por formulações de xampus com ingredientes de origem natural, a fim de reduzir a dependência com a indústria petroquímica e mitigar impactos ambientais e à saúde humana. Essas composições têm sido denominadas *bio-based* na literatura, isto é, de base biológica.

2.1.5 Formulações alternativas de xampu

Para as formulações alternativas de xampu, considerando o papel central dos surfactantes em sua composição, cientistas e empresas concentram esforços na busca de tensoativos *bio-based*. Luengo *et al.* (2020) apontam para o crescente uso de alquil poliglucosídeos (APG) em xampus como alternativa. O baixo custo de produção, origem vegetal a partir de açúcar, amido e óleos, biodegradabilidade e sua estrutura química não-iônica tornam os APGs atrativos para pesquisa e desenvolvimento na área de HPPC (Luengo *et al.*, 2020).

Saponinas, que são surfactantes naturais obtidas através de extratos vegetais, são componentes historicamente utilizados pela humanidade para a higienização dos cabelos. No entanto, seu alto custo de produção comparado às opções convencionais é uma barreira econômica à sua aplicação em escala industrial (Beerling, 2014).

São exemplos de surfactantes *bio-based*: o sulfato de coco de sódio, cocoil glutamato dissódico, cocoil glutamato de sódio, coco-glucosídeo tartrato de sódio, lauril lactilato de sódio e lauril sulfosuccinato dissódico (Organic Monitor, 2013). Derivado dos ácidos graxos de coco, o sulfato de coco de sódio apresenta alta espumabilidade. No entanto, a presença do sulfato confere ao produto maior potencial de irritabilidade da pele. Já os tensoativos cocoil glutamato dissódico e de sódio apresentam além da capacidade de limpeza suave, propriedades condicionantes e emolientes, evitando o ressecamento do cabelo. Suas matérias-primas são os ácidos graxos de coco e aminoácido glutâmico obtido através do processo de fermentação vegetal. Os demais

surfactantes citados no parágrafo em geral são utilizados de forma combinada a fim de conferir maior suavidade e espumabilidade à emulsão (Beerling, 2014).

Biossurfactantes também são tensoativos pesquisados para aplicações cosméticas. Sintetizados a partir de matérias-primas naturais como substratos para microorganismos, essa classe de tensoativos possui a vantagem de manter suas propriedades físico-químicas a maiores faixas de pH e temperatura, o que é interessante para o cenário brasileiro, além de apresentar biodegradabilidade e baixa toxicidade, o que estimula pesquisas na área. No entanto, o baixo rendimento da fermentação e a necessidade da etapa de purificação levam ao alto custo do processo, configurando-se como a principal barreira para aplicação em escala industrial atualmente (Drakontis e Amin, 2020). Pesquisadores demonstram a expectativa de crescimento da produção de biossurfactantes a partir de avanços nos projetos de reatores e tecnologias de recuperação de produtos (De *et al.*, 2015).

No que tange à sustentabilidade, o termo tem sido abraçado pela indústria cosmética, o que pode ser observado com o crescimento de selos relacionados a uma melhor relação da produção com a natureza. Para transmitir esta ideia, os termos “cosmético natural”, “cosmético verde” e *bio-based* tem sido utilizados. Nesse sentido, é preciso ressaltar que a utilização de tais termos (cientificamente e comercialmente) é apenas um indicativo da inclusão de algum ingrediente natural na fórmula, e/ou a inserção de uma prática sustentável em sua cadeia de produção. Dessa forma, é possível encontrar cosméticos com todos seus ingredientes de origem natural, porém, é importante frisar que, cientificamente, não existem xampus isentos de impactos ambientais.

No entanto, não é trivial alcançar a performance de um cosmético tradicional apenas com ingredientes naturais ou sustentáveis (Bom *et al.*, 2018), tendo em vista as diferenças nas propriedades de textura, espumabilidade, estabilidade, desembaraço e suavidade dos cabelos entre formulações sintéticas e *bio-based* até então estudadas (Luengo *et al.*, 2020). Com isso, há tanto o desafio de melhorar a performance de cosméticos *bio-based*, como a estratégia de se utilizar apenas um ou alguns ingredientes sustentáveis na composição do produto (Secchi *et al.*, 2016). Assim, avaliar quantitativamente a sustentabilidade na indústria cosmética se faz necessário para desenvolver estratégias que reduzam seus impactos ambientais.

Bom *et al.* (2018) revela que boa parte da sustentabilidade em cosméticos depende de seus ingredientes e que um dos maiores desafios é a substituição por ingredientes sustentáveis que atendam às funções esperadas, sejam seguros e se apresentem em formulações estáveis. Em seu estudo, os pesquisadores também alertam que a associação de produtos sintéticos a impactos ambientais maiores e produtos naturais a apenas efeitos positivos não são necessariamente verdadeiras. Para isso, mais estudos comparativos são necessários, dada a complexidade da questão (Bom *et al.*, 2018).

Comercialmente, observa-se no Brasil a presença de xampus *bio-based* no mercado através de produtos anunciados como sustentáveis, orgânicos e/ou veganos. Empresas de grande, médio e pequeno porte apresentam formulações alternativas em seus portfólios. Grandes corporações como a Ajinomoto sugerem composições de xampu a partir de seus surfactantes *bio-based* (Ajinomoto, 2011). No entanto, mesmo com a tecnologia tendo avançado a nível de distribuição, a quantificação de seus impactos ambientais é pouco conhecida.

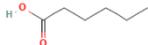
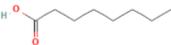
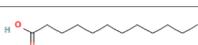
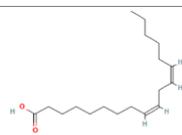
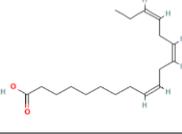
2.2 Cocol glutamato de sódio

O cocol glutamato de sódio é um tensoativo de origem natural que têm sido utilizado como alternativa aos surfactantes convencionais de origem petroquímica em formulações de xampu. Suas principais matérias-primas vegetais são o óleo de coco, dos quais se extraem os ácidos graxos que fornecem os grupos alquil à fórmula final, e o açúcar, que ao ser fermentado origina o ácido glutâmico, a partir do qual se obtém o grupamento glutamato do tensoativo (Beerling, 2014).

O ácido graxo de coco é constituído por uma série de ácidos graxos, com cadeias a partir de 6 até 18 carbonos. Portanto, não é possível representá-lo com uma única estrutura química. O ácido graxo presente em maior proporção mássica é o ácido láurico que compõe cerca de 50% do óleo de coco cru, refinado e extravirgem obtidos por extração a quente ou a frio (Deen *et al.*, 2020). O ácido graxo com segunda maior faixa de proporção nestas categorias é o ácido mirístico, que corresponde a aproximadamente 20% do conjunto (Deen *et al.*, 2020). Os demais estão distribuídos em parcelas menores conforme representado na Tabela 2.2. Dessa forma, considera-se na presente pesquisa a

representação da estrutura química do cocoil glutamato de sódio por meio do lauril glutamato de sódio.

Tabela 2.2 Composição de ácidos graxos do coco virgem, refinado, extravirgem à quente e à frio. Adaptado de (Deen *et al.*, 2020).

Ácido graxo	Estrutura química	Óleo de coco	Óleo de coco refinado	Óleo de coco extravirgem (extração à quente)	Óleo de coco extravirgem (extração à frio)
Ácido capríco (C6:0)		-	0.02	0.35	0.45
Ácido caprílico (C8:0)		9.60	7.24	7.87	7.10
Ácido cáprico (C10:0)		6.40	5.25	6.07	5.55
Ácido láurico (C12:0)		51.50	50.90	49.55	50.00
Ácido mistérico (C14:0)		19.10	21.30	17.03	18.01
Ácido palmítico (C16:0)		6.90	9.22	8.02	7.05
Ácido esteárico (C18:0)		1.10	0.38	2.71	2.42
Ácido linoleico (C18:1)		4.30	4.81	7.01	7.26
Ácido linolênico (C18:2)		1.10	0.81	1.39	1.66

A Figura 2.3 mostra a estrutura química do lauril glutamato de sódio (LGS) e seu correspondente lauril glutamato dissódico (LGD). Sua parte apolar acompanhada de um grupo carbonila é derivada do ácido láurico, enquanto sua parte polar, com amida secundária e grupamentos oxigenados é derivada do glutamato. As massas molares do LGS e LGD são 351.4 g/mol e 373.4 g/mol respectivamente.

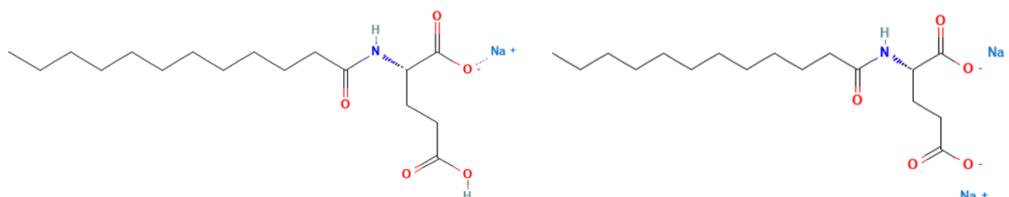


Figura 2.3 Estrutura química do lauril glutamato de sódio (à esquerda) e do lauril glutamato dissódico (à direita).

Na indústria de HPPC, o cocoil glutamato de sódio (CGS) é utilizado em sabonetes líquidos para o corpo, mãos e rosto, removedores de maquiagem, sabonetes em barra e xampus (Ajinomoto, 2016). Além disso, na área farmacêutica e dermatológica, o CGS é utilizado na composição de produtos antiacne (Conforti *et al.*, 2020).

No mercado brasileiro, uma formulação A de xampu *bio-based* contendo o CGD apresenta em sua composição: água (veículo), lauril metil isotianato de sódio, lauril glucosídeo, coco glucosídeo e cocoil glutamato dissódico (surfactantes principais) cocoamidopropilbetaína (cotensoativo), extratos vegetais e poliquartenium-10 (agentes de condicionamento), ácido cítrico (regulador de pH), sorbato de potássio e benzoato de sódio (conservantes) e fragrância. Como segundo exemplo da presença do CGD na indústria cosmética nacional, a formulação B de xampu *bio-based* apresenta água (veículo), lauril glucosídeo, CGD, coco glucosídeo, cocoamidopropilbetaína e lauril metil isotianato de sódio (tensoativos), extratos vegetais e poliquartenium-10 (agentes de condicionamento), glicerina vegetal (agente umectante), fragrância, ácido cítrico (regulador de pH), hidroxietilcelulose (regulador de viscosidade), benzoato de sódio e sorbato de potássio (conservantes) e borossilicato de cálcio e sódio e dióxido de titânio (agentes de proteção solar).

2.2.1 Processo de produção do glutamato de sódio

O ácido glutâmico é um dos 20 aminoácidos existentes, estruturas funcionais que compõem as proteínas. Como é produzido pelo organismo, pertence à classe dos aminoácidos não essenciais e por possuir cadeia lateral com carga negativa devido à presença do grupo carboxila, é um aminoácido ácido. Abreviado por Glu ou E, sua forma ionizada é o glutamato, podendo ser representado pelo glutamato monossódico ou dissódico ilustrados na Figura 2.4. Também referido na literatura por L-glutamato dissódico, a massa molar do composto é 191,09 g/mol. O glutamato atua no organismo humano como regulador enzimático, além de ser um e substrato doador de energia. Sua aplicação mais conhecida é na indústria alimentícia.

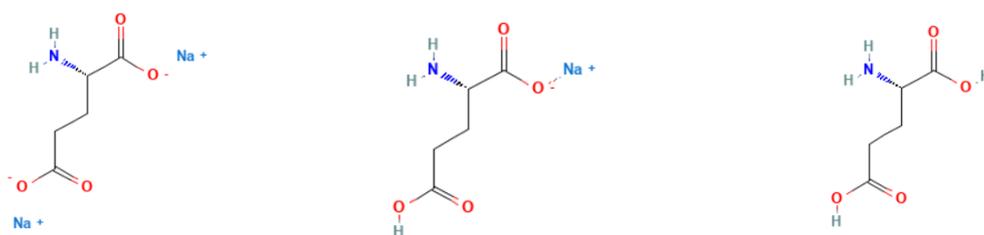


Figura 2.4 Estruturas químicas do glutamato dissódico (à esquerda), glutamato monossódico (centro) e ácido glutâmico (à direita).

No Japão do início do século XX, o químico Ikeda identificou em fontes naturais substâncias que conferiam o sabor umami aos alimentos, que veio a ser reconhecido décadas depois como o quinto gosto básico. Uma desses compostos é o glutamato, que em sua forma livre, pode ser encontrado em fontes biológicas tais como tomate maduro, batata e alho (Alvarado-Ortiz e Petrushina, 2021). Na década de 1910, a produção do Glu ocorreu via extração de matérias-primas vegetais. O processo possuía cinco etapas principais como ilustrado na Figura 2.5. A partir da extração da proteína vegetal, realizava-se uma hidrólise com ácido clorídrico a fim de quebrar as ligações peptídicas e obter aminoácidos. Posteriormente, a etapa de filtração permitia a separação dos carboidratos e subprodutos da reação do concentrado, precursor do produto de interesse. À jusante ocorriam as fases de cristalização e neutralização com bicarbonato de sódio até atingir pH 7 e o glutamato monossódico cristalizado (Sano, 2009).

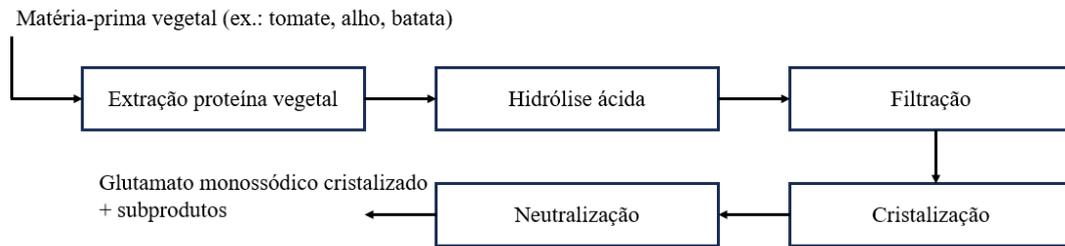


Figura 2.5 Fluxograma do processo de produção de glutamato monossódico a partir da extração de matérias-primas vegetais. Fonte: elaboração própria a partir da descrição de Sano (2009).

No entanto, devido à alta demanda mundial pelo composto no setor de alimentos e às problemáticas associadas à utilização de ácido clorídrico no processo, a produção atual de glutamato mono ou dissódico ocorre por meio de processos fermentativos biotecnológicos em larga escala (Alvarado-Ortiz e Petrushina, 2021). Em 1985, uma das fábricas da empresa Ajinomoto no Brasil tornou-se a maior produtora de glutamato monossódico no mundo (Ajinomoto Co., 2023).

O processo fermentativo consiste no fornecimento de glicose oriunda da cana-de-açúcar, mandioca, beterraba, milho ou de outras matérias-primas vegetais como substrato para microorganismos de cepas específicas de bactérias ou de alguns fungos. Dentre as bactérias corineformes, gram-positivas e não patogênicas que produzem ácido glutâmico incluem-se os gêneros *Corynebacterium glutamicum*, *Brevibacterium lactofermentum* e *Brevibacterium flavum* (Maluly *et al.*, 2021).

A Figura 2.6 esquematiza a bioquímica do processo fermentativo de síntese do ácido glutâmico. A produção do Glu ocorre por meio de uma série de reações do metabolismo do ciclo de Krebs, que ao chegar na molécula α -cetoglutárico reage com a amônia através da glutamato desidrogenase para gerar o produto de interesse. O gene YggB é estudado como possível mecanismo para transporte do Glu para fora do microorganismo passando pela membrana celular (Sano, 2009).

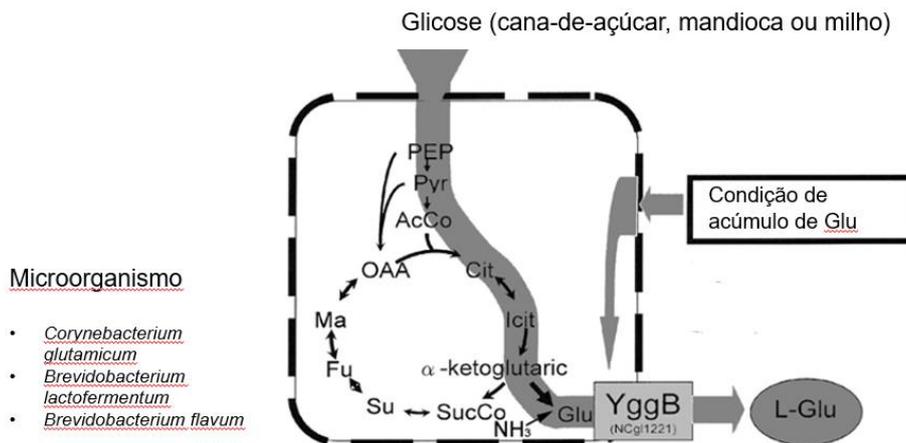


Figura 2.6 Mecanismo bioquímico do processo fermentativo de síntese do ácido glutâmico. Sendo: L-Glu, ácido glutâmico; PEP, fosfoenolpiruvato; Pir, piruvato; AcCo, acetilcoenzimaA; OAA,oxaloacetato; Cit,citrato; Icit,isocitrato; Ma,malato; Fu, fumarato; SucCo, succinil-coenzimaA. Fonte: Adaptado de Sano (2009).

O atual processo de produção do glutamato foi patenteado pela maior fabricante de aminoácidos em 2023, a empresa Ajinomoto Co. A viabilidade econômica e vantagem ambiental do processo permitiu que demais empresas se utilizem de processos fermentativos similares (Maluly, 2021). Nesse sentido, ele pode ser descrito por duas fases, conforme ilustrado na Figura 2.7. A primeira fase engloba as etapas de purificação e fermentação da glicose, originando um caldo fermentado, que ao ser cristalizado, separado e neutralizado (para ionização com o íon sódio), culmina na produção do glutamato monossódico. Por sua vez, na segunda fase, o produto é clarificado, filtrado e novamente cristalizado para conferir maior pureza. Como subprodutos obtém-se um licor, que se torna matéria-prima na produção de fertilizantes. A massa cristalizada é encaminhada para as etapas de secagem, clarificação, embalagem para então ser distribuída aos estabelecimentos (Ajinomoto, 2023).

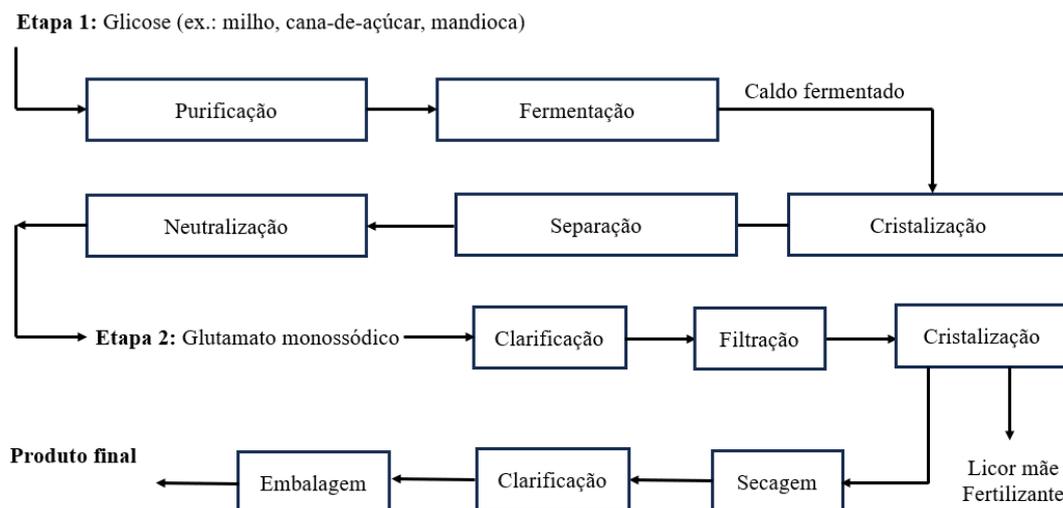


Figura 2.7 Fluxograma do processo de produção de glutamato monossódico a partir da síntese fermentativa. Fonte: Adaptado de Maluly (2021) e Ajinomoto (2023).

A produção mundial de glutamato monossódico ultrapassa os 2 milhões de toneladas e o amadurecimento da tecnologia fermentativa permitiu a ampliação de suas aplicações, incluindo a indústria de HPPC e de fertilizantes.

2.2.2 Processo de produção do ácido graxo de coco

O óleo de coco é um produto natural e processado a partir da polpa do coco (*Cocos nucifera*) com aplicação na indústria alimentícia, cosmética e de uso popular. Sua composição química corresponde majoritariamente a um conjunto de ácidos graxos conforme apresentado no início desta seção 2.2.

Em 2020, sua produção mundial atingiu 2,6 milhões de toneladas, com o Brasil sendo o 14º país em termos de produção de óleo de coco, com 14,2 mil toneladas produzidas (FAO, 2023). No entanto, a produção de óleo de coco se concentra em países da Ásia, conforme revela Tabela 2.3. Filipinas, Indonésia, Índia e Vietnã somaram aproximadamente 80% do volume de produção de 2020.

Tabela 2.3 Produção de óleo de coco em ton por país em 2020. Fonte: FAO (2023).

Ranking	País	Produção de óleo de coco em toneladas (FAO, 2020)
1	Filipinas	965200.00
2	Indonésia	599000.00
3	Índia	339000.00
4	Vietnã	176717.12
5	México	132300.00

São processos para obtenção dos ácidos graxos de coco a destilação, a desestabilização de emulsão e as prensagens seca ou úmida (quente ou a frio). O processo de destilação, conforme ilustra a Figura 2. 8 consiste na passagem do óleo de coco e vapor d'água em uma coluna de destilação, a fim de separar as fases aquosa e os ácidos graxos. Em alta temperatura e pressão e por meio do condensador e refervedor, os ácidos graxos isolados são recuperados no topo da coluna (Gervajio, 2005).

Já os processos de extração à seco consistem na utilização de prensas hidráulica, de parafuso ou cunha e à jusante o uso dos processos de refinamento com degomagem, branqueamento e deodorização (Patil e Benjakul, 2018). Finalmente, para síntese do cloreto de ácido graxo de coco, é necessário reagir o ácido graxo com tricloreto de fósforo, seguido de uma etapa de purificação.

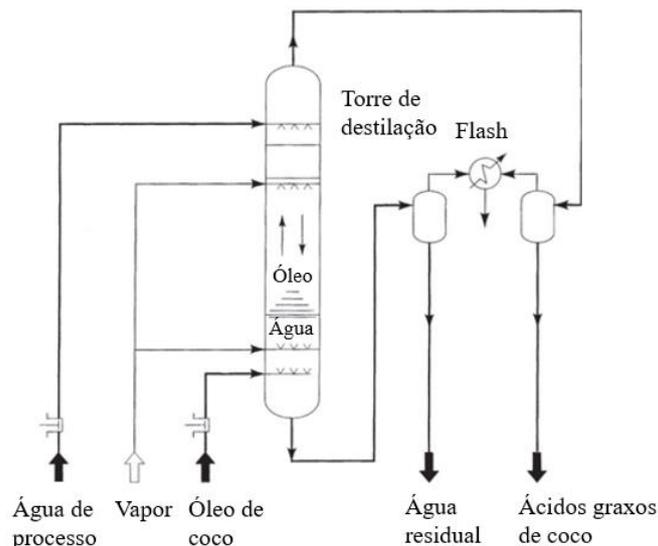


Figura 2.8 Fluxograma de produção de ácido graxo de coco. Fonte: Adaptado de Gervajio (2005).

2.2.3 Processo de produção do cocoil glutamato de sódio e formulação alternativa de xampu

Embora a produção de glutamato de sódio seja consolidada, especialmente na área alimentícia, a complexidade dos processos bioquímicos estimulam pesquisas e patentes que buscam por melhores rendimentos microbiológicos, além de compreender os mecanismos de reação. Para o cocoil glutamato de sódio em particular, cuja aplicação é em área cosmética, sobre a qual as empresas que produzem aminoácidos tem se debruçado cada vez mais na última década, o processo de produção é encontrado através de patentes depositadas e concedidas.

A síntese de CGS a partir de solventes polares como acetona e tetrahidrofurano aumenta a taxa de conversão, porém aumenta o custo do processo por tornar necessária uma etapa complexa de purificação à jusante. Por sua vez, o uso de um agitador de alta potência em solvente aquoso aumenta a conversão para 85%, acompanhado de maior custo de energia e as consequências da produção de espuma, que torna o processo mais complexo a nível industrial, além de diminuir o efeito de mistura. Além disso, a utilização de água como solvente implica em conversão baixa de reação de síntese do tensoativo, em torno de 70%. Dessa forma, a empresa Nanjinguashi Chemical propôs em 2016 uma alternativa para aumentar a conversão do CGS em meio aquoso e sem agitação de alta potência com a adição de reagentes secundários que favorecessem a reação principal.

A patente de Wang *et al.* (2016) descreve em seis etapas a produção do tensoativo cocoil glutamato de sódio visando aplicações cosméticas conforme ilustrado na Figura 2.9. As duas primeiras etapas correspondem às adições dos reagentes principais: o glutamato de sódio e o cloreto de ácido graxo de coco. A terceira etapa consiste na adição do hidróxido de sódio a fim de controlar o pH da reação, o mantendo básico entre 10 e 11. A inovação da patente consiste em sua quarta etapa: a adição de um sal de aminoácido secundário, o glicinato de sódio em meio aquoso e proporção mássica de 14,6%. Finalmente, após um aumento de temperatura no tempo de 1 hora, obtém-se o cocoil glutamato de sódio em uma concentração de 2,9% e a 85% de taxa de conversão.

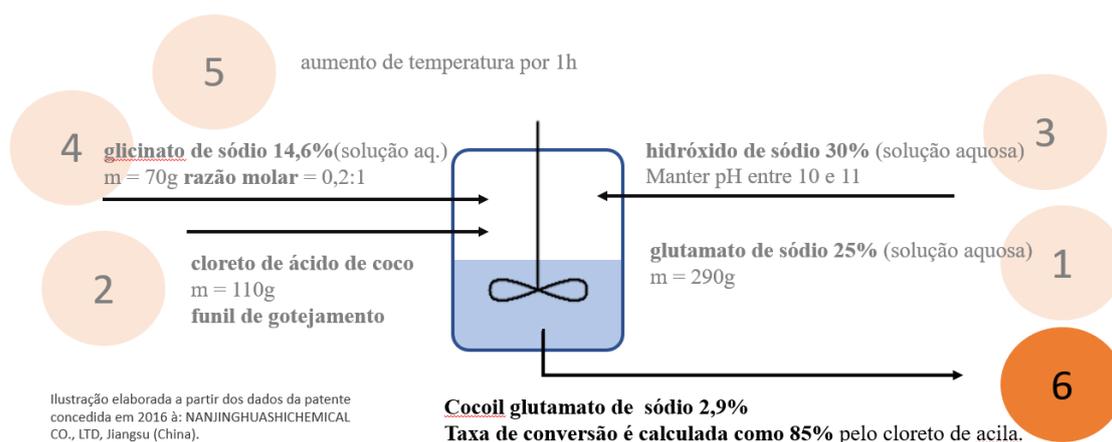


Figura 2.9 Fluxograma de produção do cocoil glutamato de sódio. Fonte: Elaboração própria a partir da patente de Wang *et al.* (2016).

Para fabricação da formulação alternativa de xampu, líquida e incluindo ingredientes naturais, se faz necessário misturar os tensoativos e demais compostos essenciais para a formulação descritos na seção 2.1.5 em um misturador. O processo pode ocorrer de forma contínua ou em batelada.

2.3 Avaliação de Ciclo de Vida

2.3.1 Definição e normas

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) consiste em uma ferramenta de cálculo de impactos ambientais e sociais. Desenvolveu-se a partir da década de 60 e atualmente é amplamente utilizada em diversas áreas do conhecimento (He e Yu, 2020).

A ideia de ACV foi criada ao final dos anos 60 nos EUA e Europa. No entanto, divergências entre metodologias elaboradas por consultores diferentes levaram a resultados diferentes. A partir do final dos anos 90, o interesse científico no assunto (tanto na metodologia, quanto nas comparações ambientais) cresceu em publicações. O primeiro artigo sobre ACV foi publicado em 1993 no Journal of Cleaner Production. Em 1996, foi criada a primeira revista dedicada à ACV pela editora Springer,

International Journal of Life Cycle Assessment. Desde o final dos anos 90, sociedades e associações buscaram uma padronização a respeito da ACV. Desde os anos 2000, a mais aceita é a norma ISO (Russel et al., 2005).

Segundo a norma ISO 14040, a “avaliação de ciclo de vida” é definida por: “compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida”. Nesse sentido, a ACV é constituída de quatro fases que se retroalimentam: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos (AICV); e interpretação, conforme ilustrado na Figura 2.10.

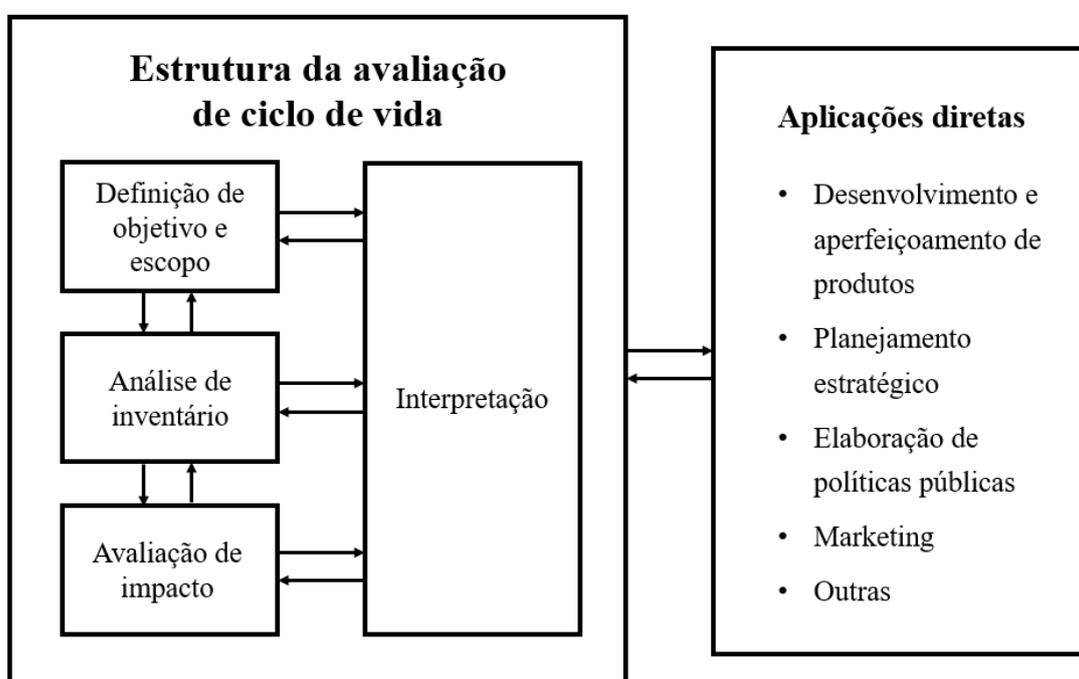


Figura 2.10 Fases de uma ACV. Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014).

Para permitir a análise crítica de uma ACV, seu objetivo deve ser bem definido e conter as motivações da pesquisa, sua aplicação e público-alvo. Os responsáveis pelo estudo devem incluir também no objetivo se há intenção de divulgação dos resultados para comparações. O escopo, por sua vez, traduz de forma técnica e quantitativa os objetivos da ACV. No escopo, definem-se as fronteiras e o sistema de produto investigado, sua unidade funcional, categorias de impacto ambientais avaliadas e a metodologia de AICV, as considerações do estudo bem como suas limitações, a descrição dos dados necessários e sua forma de obtenção e o formato como os resultados serão apresentados (ABNT, 2014).

O sistema de produto é o conjunto de processos interligados que são estudados. Na engenharia química, seu análogo é um fluxograma de processo. Os processos, por sua vez, são constituídos de fluxos técnicos e ambientais, de entrada e saída de matéria e energia. Analogamente, a unidade funcional definida em uma ACV atua como a base de cálculo de um balanço de massa ou energia. A utilização da unidade funcional permite uma comparação proporcional dos impactos ambientais de diferentes produtos. Nota-se que tais conceitos devem estar apresentados de forma precisa no relatório final, no entanto, a retroalimentação entre as quatro fases de uma ACV permite que ao longo do estudo, objetivos e escopos sejam atualizados de acordo com as oportunidades e limitações encontradas no processo (ABNT, 2014).

A fase de análise de inventário está associada diretamente à obtenção dos dados de entrada que alimentam o estudo de impacto ambiental. Dados se referem às quantidades de matéria-prima e energia de entrada e saída dos processos, bem como o conhecimento das substâncias químicas e facilidades físicas necessárias, além das emissões ambientais se for o caso (ABNT, 2014). Os dados podem ser obtidos de forma primária, isto é, diretamente da fábrica ou do laboratório e/ou podem ser coletados a partir da literatura científica por meio de artigos, e/ou patentes, além de dados fornecidos por instituições governamentais ou empresariais disponibilizados ao público.

A fase de avaliação de impactos é responsável pela quantificação dos impactos ambientais a partir dos dados alimentados pela etapa de análise do inventário, que por sua vez estão vinculados ao objetivo e escopo do estudo. Tal cálculo permite vincular os dados de entrada às categorias de impacto ambiental estudadas, fornecendo então indicadores para a compreensão da relevância de cada categoria. Diversos métodos de AICV estão disponíveis, assim como cada grupo de pesquisa pode propor sua metodologia (ABNT, 2014). Devido ao seu caráter subjetivo, esta etapa de escolha da AICV é determinante para a ACV e será detalhada na seção de 2.3.3.

Finalmente, a fase da interpretação consiste em encontrar as relações entre as definições iniciais, os dados de entrada e os impactos ambientais calculados a fim de fornecer considerações científicas que permitam a tomada de decisões em prol da redução dos impactos ambientais de forma estratégica. Segundo a norma ISO 14040, a interpretação deve ser “compreensível, completa e consistente” para que o objetivo seja atingido.

Os resultados obtidos a partir de uma AICV são extensos e, devido a sua complexidade, podem ser de difícil compreensão, especialmente para as pessoas em posição de tomada de decisão em governos e empresas. Nesse sentido, Vargas-Gonzalez *et al.* (2019) desenvolveram uma lista de fatores ponderados baseados em Limites Planetários. A utilização desses fatores pode ajudar na interpretação dos resultados de uma ACV de cosméticos. Na seção a seguir, serão discutidas as metodologias de AICV.

2.3.2 Metodologias de avaliação de impactos ambientais

A escolha da metodologia de AICV é primordial para que a ACV atinja seu objetivo. Nesse sentido, é possível que cada área da ciência possa optar por metodologias distintas na medida em que as variáveis avaliadas se adequam em seus respectivos contextos. Dentre as diversas metodologias de AICV, treze métodos se destacam: CML, Eco-indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI, USEtox e IMPACT World+ (Mendes *et al.*, 2016).

Há uma lacuna de métodos de AICV proposto por grupos de pesquisa brasileiros e latinoamericanos, o que até o momento torna necessária a utilização adaptada de métodos originalmente formulados para demandas de outras regiões, inclusive alguns planejados por órgãos responsáveis por políticas públicas de seus respectivos países. No entanto, alguns métodos apresentam categorias de impacto de aplicação global, o que permite a utilização por outras regiões desde que justificada a escolha. Nesse sentido, Mendes *et al.* (2016) apresentam os métodos CML 2002, EDIP 97, EPS 2000, USETox e IMPACT World+ como possíveis para utilização em pesquisas regionalizadas no Brasil em determinadas categorias de impacto.

Os métodos de AICV podem ser caracterizados acerca de seu nível de avaliação de impacto como métodos de *midpoint*, *endpoint* ou combinado. A abordagem *midpoint* realiza a utilização de indicadores ao longo dos processos ambientais não incluindo o ponto final da categoria analisada. Já a abordagem *endpoint* utiliza como indicador os pontos finais do mecanismo ambiental avaliado. É possível também utilizar o método

midpoint para algumas categorias de impacto da AICV e o *endpoint* para outras categorias de uma mesma AICV. Esse tipo de metodologia é classificado como combinada. Dentre os principais métodos de AICV a abordagem *midpoint* é a mais utilizada por apresentar menores incertezas em suas definições (Mendes *et al.*, 2016).

Os Ministérios da Fazenda, Economia, Transporte e Agricultura da Holanda financiaram o estudo que produziu um manual de ACV para aplicação das normas ISO. Deste manual surgiu a metodologia CML, baseada na abordagem *midpoint* e que apresenta as seguintes categorias de impacto de abrangência global: depleção de recursos abióticos, depleção de recursos bióticos, uso da terra, mudança climática, depleção do ozônio estratosférico, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática (água doce), ecotoxicidade aquática (marinha), ecotoxicidade terrestre, além das seguintes categorias de impacto de abrangência na Europa: formação de foto-oxidantes e acidificação. Teses nas temáticas de engenharia química e civil da COPPE/UFRJ utilizam o método CML para suas respectivas AICV (Belisario, 2020; Faria, 2021; Monteiro, 2018).

Numa parceria público-privada de entidades suecas, foi desenvolvido a metodologia *Environmental Priority Strategies in product development* (EPS 2000). Com abordagem *endpoint*, o método é direcionado para a comparação do ciclo de vida de dois produtos a fim de auxiliar a tomada de decisão. As categorias de impacto globais são: saúde humana, expectativa de vida, morbidade grave e sofrimento, morbidade, incômodo grave, incômodo, ambiente natural, capacidade de produção agrícola, capacidade de produção de madeira, capacidade de produção de peixe e carne, capacidade de cátions de base, capacidade de produção de água potável, consumo de recursos naturais, esgotamento de reservas de elementos, esgotamento de reservas fósseis (gás), esgotamento de reservas fósseis (petróleo), esgotamento de reservas fósseis (carvão) e esgotamento de recursos minerais (Mendes *et al.*, 2016).

Em esforços de universidades, governo e indústrias dinamarquesas, foi elaborada o método de AICV *Environmental Design of Industrial Products* (EDIP), que em suas versões mais recentes apresenta aplicações mais regionalizadas. Com abordagem *midpoint*, a versão EDIP 97 tem como categorias de impacto globais: aquecimento global, depleção de ozônio, acidificação, enriquecimento de nutrientes, formação de

ozônio fotoquímico, toxicidade humana, ecotoxicidade, consumo de recursos e ambiente de trabalho.

Por sua vez, o método USEtox é de abordagem *midpoint* e foi desenvolvido por iniciativa da ONU para a especificidade dos impactos de substâncias tóxicas. As categorias de alcance global são: toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce.

Unindo esforços de países europeus e norte-americanos, a metodologia IMPACT World+ tem a proposta de permitir a análise de impacto regionalizado em todo o globo, o que é feito a partir da associação de diferentes métodos com abordagem combinada (*midpoint* e *endpoint*). São suas categorias de impacto globais: toxicidade humana, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozônio, aquecimento global, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da água, uso da terra e uso de recursos.

Finalmente, a metodologia ReCiPe também dá continuidade a métodos anteriores (CML e Eco-indicador 99) com o diferencial de realizar uma abordagem combinada. Suas categorias de impacto de alcance global são: mudança climática, depleção de ozônio, esgotamento de recursos fósseis, esgotamento de recursos minerais, esgotamento de recursos de água doce; e de alcance na Europa são: eutrofização (água doce e marinha), toxicidade humana, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de matéria particulada, ecotoxicidade (terrestre, água doce, marinha), uso do solo agrícola, uso do solo urbano. O método ReCiPe tem sido utilizado em estudos da área de engenharia química, tais como tratamento de efluentes (Tourinho, 2014) e cosméticos (Sampaio e D'Águiar, 2020).

Dessa forma, dentre as metodologias de AICV disponíveis, para pesquisas de engenharia química e cosméticos os seguintes critérios de escolha podem ser adotados para obtenção de resultados representativos: possuir significativas categorias de impacto de alcance global; utilização de abordagem *midpoint* ou combinada a fim de evitar incertezas; utilização por pesquisas da área de cosméticos e correlatas para viabilizar melhores comparações. Nesse sentido, os métodos CML, IMPACT World e ReCiPe se destacam entre os demais.

2.3.3 Avaliação de Ciclo de Vida de cosméticos

Ao longo das últimas duas décadas, o termo “*Sustainability*”, “*Greenhouse gas emissions*” e “*Climate change*” tem recebido cada vez mais espaço e menção em artigos científicos relacionados à ACV (He e Yu, 2020). À medida que os relatórios do IPCC desnudam a gravidade da situação climática do planeta em decorrência da ação antrópica, mais esforços científicos são direcionados para a avaliação dos impactos ambientais, na qual a ACV consolidou-se como uma das principais ferramentas. Estudos que relacionam a ACV à pegada de carbono, mudança climática e ecologia industrial são crescentes e merecem atenção, uma vez que apontam para a tentativa de minimizar os impactos da atividade humana no planeta.

A pesquisa de Monteiro (2018) analisa a contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável. Utilizando as metodologias CML-IA e ReCiPe *Midpoint* (E) de avaliação de impactos no software SimaPro, Monteiro conclui que o uso de catalisador no processo pode não ser benéfico para pirólise de resíduos poliméricos ao se avaliar que o ganho de desempenho é pequeno quando comparado aos impactos ambientais gerados. Além disso, seus resultados revelam a competitividade da reciclagem química frente a outras técnicas. Dessa forma, o impacto ambiental gerado a partir de embalagens de cosméticos tem potencial de redução com a aplicação da técnica de reciclagem química. O estudo de caso desenvolvido por Civancik-Uslua et al. (2019) corrobora que a reciclagem do plástico da embalagem de cosméticas diminui os impactos ambientais.

A respeito do impacto potencial de produtos de cuidados pessoais no ambiente aquático, a revisão de Brausch e Rand (2011) alerta sobre o grande volume de produtos de cuidado pessoal lançados, seus possíveis efeitos da toxicidade aguda e crônica e sua capacidade de bioacumulação. Em cosméticos, é comum a utilização de parabenos e filtros UV, que podem ter efeitos endócrinos (Brausch e Rand, 2011). Dessa forma, a ecotoxicidade é uma categoria de impacto relevante ao se avaliar o fim de vida de cosméticos.

Golsteijn *et al.* (2015) em seu estudo avalia as fases do ciclo de vida com maior impacto para cada produto detergente. Os que envolvem consumo de água pelo

consumidor apresentam essa fase como impacto considerável. Os demais (sprays e alvejantes) apresentam maior impacto na embalagem plástica, transporte para o varejista, ingredientes específicos e o tipo de surfactante pode fazer diferença).

O trabalho de Secchi *et. al.* (2016) revela que em algumas categorias de impacto os cosméticos com ingredientes de origem natural podem apresentar resultados piores que os tradicionais. Esse artigo troca apenas dois componentes da formulação de um creme facial com fator de proteção solar para duas inovações bio-based. No entanto, para atingir especificações do produto, são adicionadas substâncias da cadeia do petróleo. O bio-based vem do aproveitamento do resíduo da produção de azeite de oliva. O foco do estudo foi da obtenção da matéria-prima até a produção (pós-produção foram considerados iguais para as três formulações comparadas. Os resultados mostram que em alguns aspectos os ingredientes *bio-based* podem ser piores que o tradicional. Em outros, o produto *bio-based* apresenta melhor resultados. Foram feitas análises de sensibilidade com transporte e outros, simulação Monte Carlo e ACV com dois métodos de avaliação de impacto diferentes, mostrando a incerteza de algumas variáveis como metal pesado.

Martinez *et al.* (2017) apresentou a ACV de um creme de mistura *bio-based*, avaliando o impacto do óleo de palma e dando sugestões de ecodesign. Esse artigo faz a ACV de um creme de mistura que contém 3 ingredientes: água, óleo de argan e o biosurfactante a base de óleo de palma. A modelagem para obtenção do biosurfactante é detalhada. Artigo foca na agricultura e os resultados mostram impacto maior na parte de transportes e depois na embalagem. Levam em consideração inclusive o transporte do consumidor até sua casa. Mas a composição é simplificada. O impacto do óleo vegetal é calculado em cenários baseline e alternativos, e o artigo mostra as influências.

Um desafio apresentado pela literatura de estudos de impactos ambientais na indústria de cosméticos é a dificuldade de encontrar dados primários. Dados primários são dados obtidos diretamente do processo analisado, como por exemplo a vazão de entrada de componentes de um xampu e quantidade de energia utilizada para o funcionamento dos equipamentos estudados. Na ausência de dados primários, a fim de garantir o caráter científico da pesquisa, é necessário explicitar considerações e hipóteses, com base nos melhores dados possíveis encontrados na literatura.

Na engenharia química, a Avaliação de Ciclo de Vida tem sido incluída nas metodologias científicas, especialmente em relação a estudos comparativos de diferentes processos (Monteiro, 2018 e Tourinho, 2014). Já na subárea de cosméticos com ingredientes naturais, a Avaliação de Ciclo de Vida tem se mostrado uma ferramenta eficaz para quantificar impactos de formulações cosméticas alternativas e comparar com as formulações convencionais (Secchi *et al.*, 2016).

Dessa forma, neste capítulo foram apresentadas a fundamentação teórica, as problemáticas ambientais relacionadas à produção de xampu convencionais e foram discutidas os processos químicos de possíveis alternativas *bio-based* a esse cenário. Além disso, ao demonstrar a incorporação da ferramenta de avaliação de ciclo de vida na perspectiva da engenharia no setor de cosméticos, a presente revisão bibliográfica e fundamentação teórica argumenta a necessidade desta pesquisa, que se propõe a avaliar e quantificar de forma comparativa os impactos de uma formulação convencional e outra com a inclusão de ingredientes naturais de xampus, contribuindo, assim, para a investigação na literatura a respeito das principais áreas de atuação para redução de impactos ambientais desse produto.

3. METODOLOGIA

3.1. Declaração de objetivo e escopo

O objetivo principal deste estudo de ACV é realizar uma análise comparativa dos impactos ambientais mais significativos entre uma formulação sintética convencional de xampu e uma formulação de xampu com inclusão de ingredientes naturais. Este trabalho também possui como objetivo apresentar o inventário de ciclo de vida de uma formulação de xampu *bio-based* a partir de dados de artigos, patentes e documentos publicizados. O público-alvo desta ACV é a comunidade acadêmica com interesse em estudos ambientais no setor de HPPC, assim como cidadãos, entidades da sociedade civil e empresas que possuam o desejo de compreender de forma quantitativa os impactos ambientais de xampu com ingredientes naturais que possui como tensoativo principal o CGS a fim de tomar o estudo como referência para suas escolhas pessoais e/ou de negócio.

Para tal, o escopo desta ACV para ambas as formulações é do berço ao portão de fábrica, incluindo, no caso do xampu *bio-based*, a produção de glutamato monossódico, ácido graxo de coco, glicinato de sódio e cloreto de ácido graxo de coco para a produção do tensoativo principal: o cocoil glutamato de sódio. Como unidade funcional, considera-se uma “uma lavagem de cabelos de comprimento médio durante o banho no Brasil”, o que foi definido como 10,46 g utilizando como referência o artigo de Golsteijn *et al.* (2018). Como as duas formulações estudadas são líquidas, os hábitos de consumo são similares e por isso, optou-se por utilizar a mesma referência mássica para análise comparativa.

Como se trata de uma pesquisa focada na investigação dos impactos ambientais da formulação, definem-se no escopo do estudo análises focadas diretamente na influência de cada ingrediente da formulação alternativa. A escolha do tensoativo principal da formulação *bio-based* foi embasada através de prospecção da literatura demonstrada na revisão bibliográfica e corroborada pela sua presença em diversos produtos no mercado brasileiro atualmente.

O programa utilizado para a realização da ACV é o *openLCA*. Por sua vez, a base de dados utilizada é a *ecoinvent 3.7*. Considerações e simplificações necessárias para a realização do estudo serão detalhadas na seção de descrição do inventário de ciclo de vida.

O método de AICV escolhido foi o ReCiPe Midpoint (H). Suas categorias de impacto são dezoito e incluem ocupação agrícola da terra, mudanças climáticas, depleção fóssil, ecotoxicidade de água doce, eutrofização de água doce, toxicidade humana, radiação ionizante, ecotoxicidade marinha, eutrofização marinha, depleção de metais, transformação natural da terra, depleção de ozônio, formação de particulados, oxidação fotoquímica, acidificação terrestre, ocupação da terra urbana e depleção de água. No entanto, nem todas são significativas para os impactos ambientais, de forma que a presente ACV interpreta os resultados das categorias mais relevantes. Os resultados de todas as categorias de impacto podem ser encontrados no Anexo I. Uma análise preliminar realizada no *openLCA* mostra que as categorias de impacto ambientais significativas são: ocupação agrícola da terra, mudanças climáticas, depleção fóssil, toxicidade humana, eutrofização marinha, depleção de metais, transformação natural da terra, formação de particulados, ecotoxicidade terrestre e depleção de água. Portanto, essas são as categorias de impacto avaliadas nesta ACV.

3.2. Inventário de Ciclo de Vida

Como esta ACV comparativa é focada no estudo da formulação, os elementos centrais do inventário de ciclo de vida são os tensoativos primários dos xampus analisados. Considerando que xampus convencionais e alternativos estão presentes no mercado de HPPC brasileiro em um setor de alta competitividade no qual as empresas através de suas peças publicitárias demonstram sua busca pelo aumento de sua parcela de consumidores, não é trivial encontrar dados primários de chão de fábrica. Considerando também justamente o grande apelo de menores impactos ambientais propagado pelo *marketing* e a escassez de dados primários, ACVs de tais produtos se fazem ainda mais necessárias. Assim, justifica-se a necessidade de buscar dados em fontes como artigos, patentes, documentos de empresas publicizados e produções acadêmicas, além de bases de dados de inventário. Os resultados de ACV a partir de

dados secundários devem ser analisados com ciência da limitação da ausência de dados primários. A relevância científica está na interpretação destes resultados, que revelam potenciais gargalos da produção e que são capazes de indicar a direção da atuação para redução dos impactos ambientais, atendendo aos objetivos da ACV.

Nesse sentido, a Tabela 3.1 apresenta os processos do ICV elaborado por este estudo, associando ao tipo de fonte, autor e ano de publicação. Os processos foram definidos a partir de prospecção da literatura tendo como elemento central o tensoativo primário da formulação. A produção do tensoativo primário da formulação *bio-based*, o cocoil glutamato de sódio (CGS), é descrita na patente de Wang de 2016. Esta patente requer o uso de reagentes que não estão presentes na base *ecoinvent*, o que direciona a busca para os processos de produção de tais substâncias. O uso do CGS como tensoativo em formulações de xampu é relativamente novo quando comparado com a uso alimentício do glutamato de sódio e, por isso, é coerente que a fonte de dado do CGS seja uma patente e do glutamato de sódio seja uma combinação entre artigo e patente. Cada processo foi inserido no programa openLCA e serão descritos nas próximas seções.

Tabela 3.1 Processos do Inventário de Ciclo de Vida.

Processos (substâncias ou composições)	Tipo de fonte	Autor/Empresa	Ano
Glutamato de sódio	Artigo e Patente	Madhavan Nampoothiri e Ashok Pandey (Artigo). Takuji Ueda (Ajinomoto Co.)	1999 (artigo) e 2020 (patente)
Ácido graxo de coco	Artigo	Gervajio	2005
Cloreto de ácido de coco	Patente	Hiroya Fujita e Shinji Ohara (NOF Corporation)	2017
Glicinato de sódio	Artigo	Shaikh et al.	2014
Cocoil glutamato de sódio	Patente	Changguo Wang (Nanjing Huashi New Material Co.)	2016
Formulação xampu bio-based	Documento	Ajinomoto	2011
Formulação xampu convencional	Artigo e Produção acadêmica	Golsteijn et al. e Sampaio e D'águiar	2018 e 2020

3.2.1. Inventário de Ciclo de Vida para xampu bio-based

Para produção do tensoativo primário da formulação de xampu *bio-based*, foi necessário buscar os processos de produção apresentados na Figura 3.1. Os três principais reagentes para a produção do CGS são o glutamato de sódio, o cloreto de ácido graxo de coco e o glicinato de sódio. A produção do cloreto de ácido graxo de coco requer à montante, o conhecimento do processo de produção do ácido graxo de coco. Dessa forma, cada um destes processos será descrito a seguir para a elaboração do ICV.

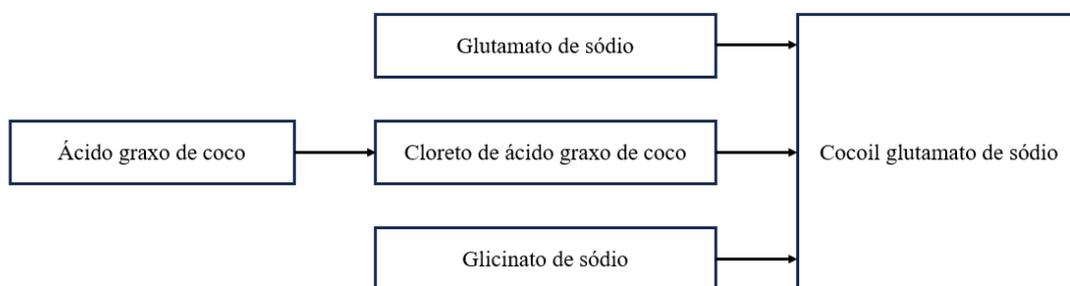


Figura 3.1 Processos à montante do cocoil glutamato de sódio. Fonte: Adaptado de Wang (2016).

Conforme apresentado no item 2.2.1 do capítulo 2, o processo atual processo de produção do glutamato de sódio é por fermentação, com sua rota já consolidada de forma geral. São observadas diversas patentes depositadas por diferentes empresas buscando aprimoramentos do processo, das quais a patente da Ajinomoto (2020) foi definida como base para compreensão da rota fermentativa para esta ACV. Ukeda (2020) mostra que além da utilização de substratos como açúcar, álcoois como metanol podem ser utilizados.

Uma limitação de estudos de ACV que envolvem a fermentação está relacionada à ausência de dados microbiológicos em bases de dados e a complexidade da obtenção de dados primários de chão de fábrica. Isso ocorre porque as bases de dados trabalham com substâncias químicas amplamente utilizadas de forma mundial, tais como *commodities*, enquanto microorganismos possuem alta especificidade. Por esse motivo, a entrada de microorganismo para a fermentação foi desconsiderada nessa ACV. Isto

não é um impedimento para o cálculo do impacto, uma vez que a composição do substrato e os dados do processo são representativos do processo.

A pesquisa de Nampoothiri e Pandey (1998) foi resultado de uma parceria entre Índia e Brasil que resultou na proposição de condições ótimas para obtenção de uma solução ácido glutâmico por meio de fermentação da mandioca. A fermentação obteve taxas satisfatórias de conversão de glicose em ácido glutâmico a partir de um meio enriquecido com nutrientes propostos pelos pesquisadores. As condições para a conversão máxima de 66,3% apontada pelo estudo são de temperatura de 30°C, agitação de 180 rpm por 40h e pH 7,5 em modo descontínuo alimentado, produzindo uma solução de 25,0 g/L de glutamato em um biorreator de 5L operando com 2,5L de fermentado.

O meio pesquisado por Nampoothiri e Pandey apresenta para uma batelada alimentada é enriquecido com 0,7g de nitrato de sódio, 0,12g de fosfato monopotássico, 1ml de solução mineral contendo 1mg de cada componente a seguir: sulfato de ferro heptahidratado, sulfato de manganês, sulfato de manganês heptahidratado, sulfato de zinco hexahidratado e cloreto de sódio. Na base *ecoinvent*, estão disponíveis os processos do NaCl, NaNO₃ e FeSO₄. Dessa forma, essas substâncias foram inseridas no programa de forma direta. Para os demais componentes da solução mineral, inexistentes na base, foi adotada a simplificação como a substância com maior similaridade química, isto é, considerando como sulfato de ferro.

O processo de produção do glutamato de sódio nesse inventário foi modelado para a produção de 2,5L de solução de glutamato a 25% (m/v). O substrato de mandioca foi simplificado para açúcar, presente na base *ecoinvent*, utilizando como fonte dados globais. Para dados de calor, foi calculada a quantidade de calor necessária para a temperatura de operação do biorreator. Os dados de eletricidade foram obtidos através dos cálculos de horas de operação do processo a partir do consumo de energia elétrica encontrado no trabalho de Dalri-Cecato *et al.* (2019). Por sua vez, os dados da fábrica são uma simplificação da ordem de grandeza, considerando o que glutamato pode ser produzido a partir da fermentação de álcool, conforme apresentado por Ukeda (2020). A Tabela 3.2 detalha as entradas explicadas acima, informando o processo *ecoinvent* utilizado e sua fonte (*provider*).

Tabela 3.2 Inventário do processo de produção do glutamato de sódio. Fonte: Adaptado de Nampoothiri e Pandey (1999) e Takuji (2020).

Entradas	Processo <i>ecoinvent 3.7</i>	Quantidade	Unidade	Fonte
calor	heat, district or industrial, natural gas	52.33	kJ	heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW
eletricidade	electricity, low voltage	50	J	electricity voltage transformation from medium to low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR
fábrica	ethanol fermentation plant	1.00E-10		ethanol fermentation plant construction ethanol fermentation plant Cutoff, U - RoW
substrato-açúcar	glucose	12.50	g	market for glucose glucose Cutoff, U - GLO
substrato-minerais	iron sulfate	4.00	mg	market for iron sulfate iron sulfate Cutoff, U - RoW
substrato-NaCl	sodium chloride, powder	1.00	mg	market for sodium chloride, powder sodium chloride, powder Cutoff, U - GLO
substrato-NaNO ₃	sodium nitrate	0.70	mg	market for sodium nitrate sodium nitrate Cutoff, U - GLO
substrato-meio aquoso	water, deionised	2.49	kg	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U
Saídas	Processo <i>ecoinvent 3.7</i>	Quantidade	Unidade	Fonte
Glutamato de sódio (25%)	modelado	2.5	kg	

Por sua vez, para a produção do ácido graxo de coco, necessário para a etapa à jusante de obtenção de cloreto de ácido graxo de coco, os dados do inventário foram coletados através do artigo de Gervajio (2005). Das possíveis formas de extração do ácido graxo de coco a partir do óleo de coco apresentadas na seção 2.2.2, optou-se pela destilação a alta temperatura e pressão em um único estágio em contracorrente contínua. Operando em torno de 250°C e 5.000 kPa, é adicionada água ao processo para realizar a destilação do óleo. A temperatura alta dispensa a utilização de catalisadores e de dispositivos mecânicos para forçar o contato entre as fases aquosa e oleosa, uma vez que favorece a transferência de massa e de calor. É possível extrair 99% dos ácidos graxos presentes no óleo (Gervajio, 2005). A Tabela 3.3 detalha os valores das utilidades do processo, informando o processo *ecoinvent* utilizado e a fonte escolhida para o ICV.

Tabela 3.3 Inventário do processo de produção do ácido graxo de coco. Fonte: Adaptado de Gervajio (2005).

Entradas	Processo <i>ecoinvent</i> 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
óleo de coco cru	coconut oil, crude	1	ton	market for coconut oil, crude coconut oil, crude Cutoff, U - GLO
vapor	steam, in chemical industry	190	kg	market for steam, in chemical industry steam, in chemical industry Cutoff, U - RoW
água de resfriamento	tap water	3	m ³	market for tap water tap water Cutoff, U - BR
eletricidade	electricity, low voltage	10	<u>kWh</u>	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR
água de processo	tap water	0.6	m ³	market for tap water tap water Cutoff, U - BR
Saídas	Processo <i>ecoinvent</i> 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
ácido graxo de coco	modelado	0.99	ton	

Para obtenção de dados relativos à produção do cloreto de ácido graxo de coco, a patente depositada pela NOF Corporation (2017) foi utilizada como referência. A proposta da patente consiste em obter cloreto de ácido graxo a partir da reação do ácido graxo com tricloreto de fósforo mediante três etapas: a primeira de reação, a segunda de purificação e a terceira de enriquecimento (Hiroya, 2017).

Os dados de entrada para esse processo do ICV foram obtidos a partir do exemplo do ácido láurico apresentado pela patente, uma vez que é o componente mais presente no ácido graxo de coco. Neste exemplo, um destilador de película fina operando a 85°C, 1333 Pa a uma vazão de 300 g/h é utilizado para obter cloreto de ácido láurico (451,2 g). Como consideração, o tricloreto de fósforo é simplificado para cloreto de fósforo, disponível na base *ecoinvent*. A Tabela 3.4 detalha as entradas do processo de produção do cloreto de ácido graxo de coco, assim como seus respectivos processos e fontes na base de dados.

Tabela 3.4 Inventário do processo de produção do cloreto de ácido graxo de coco.
Fonte: Adaptado de Fujita e Ohara (2017).

Entradas	Processo <i>ecoinvent 3.7</i>	Quantidade	Unidade	Fonte
ácido graxo de coco	modelado	400.00	g	2. Ácido graxo de coco
cloreto de fósforo	phosphorous chloride	131.90	g	market for phosphorous chloride phosphorous chloride Cutoff, U - RoW
calor	heat, district or industrial, gas	78.00	kJ	heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW
Saídas	Processo <i>ecoinvent 3.7</i>	Quantidade	Unidade	Fonte
cloreto de ácido de coco	modelado	452.40	g	
subproduto de ácido fosfórico	modelado	79.50	g	

O glicinato de sódio é um reagente secundário necessário para a produção do cocoil glutamato de sódio de acordo com a patente de Wang (2016). Diferentemente do glutamato, o glicinato de sódio não é majoritariamente produzido por fermentação. O artigo de Shaikh *et al.* (2014) demonstra a produção de glicinato de sódio em soluções de diferentes proporções molares a partir da reação de glicina com hidróxido de sódio em proporção equimolar. Por sua vez, a produção de glicina é encontrada na base *ecoinvent*, a partir da reação de ácido cloroacético com amônia, conforme reação a seguir. A estrutura química da glicina e do glicinato de sódio é ilustrada na Figura 3.2.

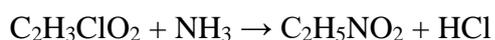


Figura 3.2 Estrutura química da glicina (à esquerda) e glicinato de sódio (à direita).

Dessa forma, a Tabela 3.5 mostra os dados de entrada e saída do processo de produção do glicinato de sódio com seus respectivos processos e fontes *ecoinvent* tomando como referência o artigo de Shaikh *et al.* (2014).

Tabela 3.5 Inventário do processo de produção do glicinato de sódio. Fonte: Adaptado de Shaikh et al. (2014).

Entradas	Processo <i>ecoinvent</i> 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
glicina	glycine	75.07	g	glycine production glycine Cutoff, U - RoW
hidróxido de sódio	sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	80.00	g	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
água deionizada	water, deionised	509.66	g	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW
Saídas	Processo <i>ecoinvent</i> 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
glicinato de sódio (14,6%)	modelado	664.73	g	

Conforme descrito na seção 2.2.3 da revisão bibliográfica, a patente de Wang (2016) apresenta uma forma de produção do CGS sem necessitar de altas temperaturas e etapas de recuperação. A reação principal utiliza do glutamato de sódio e do cloreto de ácido de coco (representado na reação a seguir por cloreto de ácido láurico ($C_{12}H_{23}ClO$) por simplificação) para obter como produto o cocoil glutamato de sódio:



A inovação da patente está no aumento da taxa de conversão da reação principal a partir da introdução de uma reação secundária. Para isso, adiciona-se glicinato de sódio em meio aquoso. A Tabela 3.6 detalha as entradas do processo de produção do CGS, assim como seus respectivos processos e fontes na base de dados.

Tabela 3.6 Inventário do processo de produção do cocoil glutamato de sódio. Fonte: Adaptado de Wang (2016).

Entradas	Processo ecoinvent 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
glutamato de sódio (25%)	modelado	290.00	g	1. Glutamato de sódio
cloreto de ácido de coco	modelado	110.00	g	3. Cloreto de ácido graxo de coco
hidróxido de sódio (30%)	sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	15.00	g	market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state sodium hydroxide, without water, in 50% solution state Cutoff, U - GLO
água	water, deionised	10.00	g	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U
Glicinato de sódio (14,6%)	modelado	70.00	g	4. Glicinato de sódio
calor	heat, district or industrial, natural gas	21.00	kJ	heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW
Saídas	Processo ecoinvent 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
cocoil glutamato de sódio (25%)	modelado	495	g	

Finalmente, para a construção do inventário da formulação *bio-based* de xampu foi utilizado como referência um documento da empresa Ajimoto, disponível em seu site (referência). Com grande influência no mercado alimentício na produção de aminoácidos, a empresa atua em outros setores, dentre eles a cosmética, sintetizando surfactantes para utilização em diversos produtos de HPPC. Uma de suas proposições se refere à formulação de xampu *bio-based* com uma combinação de tensoativos produzidos pela empresa. Como simplificações deste estudo de ACV, devido às similaridades químicas e de processo de produção, o processo fonte dos tensoativos secundários foram considerados equivalentes ao de cocoil glutamato de sódio.

Dessa forma, a Tabela 3.7 mostra os dados de entrada e saída do processo de produção da formulação *bio-based* de xampu estudada com seus respectivos processos e fontes *ecoinvent* tomando como referência o documento da Ajinomoto (2011).

Tabela 3.7 Inventário da formulação de xampu *bio-based*. Fonte: Adaptado de Ajinomoto (2011).

Entradas	Processo <i>ecoinvent</i> 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
cocoil glutamato de sódio (25%)	modelado	20.00	g	5. Cocoil glutamato de sódio
lauril glucosídeo	modelado	9.00	g	5. Cocoil glutamato de sódio
lauril sulfoacetato de sódio	modelado	4.00	g	5. Cocoil glutamato de sódio
gliceril caprato	glycerin distillate bottom	3.00	g	glycerin distillate bottom, Recycled Content cut-off glycerin distillate bottom Cutoff, U - GLO
lauril arginina	modelado	0.40	g	5. Cocoil glutamato de sódio
ácido cítrico	citric acid	0.50	g	market for citric acid citric acid Cutoff, U - GLO
água	water, deionised	63.10	g	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U
Saídas	Processo <i>ecoinvent</i> 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
xampu bio-based	modelado	100.00	g	6. Formulação xampu

3.2.2. Inventário de Ciclo de Vida para xampu convencional

Para o ICV do xampu convencional foram utilizadas duas referências principais. A primeira é o artigo de Golsteijn *et al.* (2018), que desenvolve regras de categoria de pegada ambiental de produto (PEFCR, do inglês *Product Environmental Footprint Category Rules*) para xampus. Tal estudo é uma iniciativa da associação de empresas *Cosmetics Europe*, a fim de estabelecer regras em comum que permitam facilitar as tomadas de decisão a partir de estudos de pegadas ambientais. A fim de conferir maior grau de regionalização da presente ACV, foi utilizada como referência para este ICV o estudo de Sampaio e D'águiar (2020), que a partir de Golsteijn *et al.* (2018), assume hipóteses que tornam a formulação mais próxima do mercado brasileiro. No presente estudo, foi realizada a simplificação em relação ao componente diestearato de etilenoglicol, agente perolizante. A Tabela 3.8 apresenta os dados de entrada da formulação de xampu convencional.

Tabela 3.8 Inventário da formulação de xampu convencional. Fonte: Adaptado de Golsteijn *et al.* (2018) e Sampaio e D'águiar (2020).

Entradas	Processo ecoinvent 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
SLS	fatty alcohol sulfate	1.30	g	market for fatty alcohol sulfate fatty alcohol sulfate Cutoff, U - GLO
Cocoamidopropil betaína	fatty alcohol	0.80	g	fatty alcohol production, from coconut oil fatty alcohol Cutoff, U - RoW
Cocoamido MEA	non-ionic surfactant	0.13	g	market for non-ionic surfactant non-ionic surfactant Cutoff, U - GLO
Dimeticona	polydimethylsiloxane	0.10	g	market for polydimethylsiloxane polydimethylsiloxane Cutoff, U - GLO
Propilenoglicol	propylene glycol, liquid	0.10	g	market for propylene glycol, liquid propylene glycol, liquid Cutoff, U - RoW

Entradas	Processo ecoinvent 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
Ácido clorídrico	hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	0.08	g	allyl chloride production, reaction of propylene and chlorine hydrochloric acid, without water, in 30% solution state Cutoff, U - RoW
Fragâncias	chemical, organic	0.05	g	market for chemical, organic chemical, organic Cutoff, U - GLO
Poliquartenium-10	polyacrylamide	0.04	g	market for polyacrylamide polyacrylamide Cutoff, U - GLO
Benzoato de sódio	benzoic-compound	0.03	g	market for benzoic-compound benzoic-compound Cutoff, U - GLO
água	water, deionised	7.38	g	market for water, deionised water, deionised Cutoff, U - RoW
Saídas	Processo ecoinvent 3.7	Quantidade	Unidade	Fonte
xampu convencional	Modelado	10.00	g	

De forma análoga, para a manufatura de xampu convencional, foram utilizados como referência Sampaio e D'águiar (2020) e Gol *et al* (2018). Para a presente ACV, foi realizada a adaptação e simplificação em relação à embalagem terciária, uma vez que o presente estudo não inclui a fase da embalagem do ciclo de vida em seu escopo. A Tabela 3.9 apresenta os dados de entrada e saída do processo de manufatura de xampu convencional e seus respectivos processos e fontes na base de dados.

Tabela 3.9 Inventário do processo de manufatura de xampu convencional. . Fonte: Adaptado de Golsteijn et al. (2018) e Sampaio e D'águiar (2020).

Entradas	Processo <i>ecoinvent 3.7</i>	Quantidade	Unidade	Fonte
fábrica	chemical factory, organics	1.04E-10	item	market for chemical factory, organics chemical factory, organics Cutoff, U - GLO
eletricidade	electricity, low voltage	0.12	MJ	market for electricity, low voltage electricity, low voltage Cutoff, U - BR
calor	heat, district or industrial, natural gas	0.18	MJ	heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical heat, district or industrial, natural gas Cutoff, U - RoW
água	tap water	0.39	kg	market for tap water tap water Cutoff, U - BR
xampu convencional		259.00	g	Xampu convencional
Saídas	Processo <i>ecoinvent 3.7</i>	Quantidade	Unidade	Fonte
xampu convencional	modelado	259.00	g	
água residual	wastewater, average	3.60E-04	m3	market for wastewater, average wastewater, average Cutoff, U - RoW

Assim, a Tabela 3.10 resume o esquema comparativo entre as formulações de xampus estudadas, associando componentes às suas respectivas funções no produto.

Tabela 3.10 Comparação entre as substâncias avaliadas em cada formulação de xampu avaliada e suas funções. . Fonte: Adaptado de Ajinomoto (2011), Golsteijn et al. (2018) e Sampaio e D'águiar (2020).

Função	Xampu <i>bio-based</i>	Xampu convencional
Surfactante	cocoil glutamato de sódio	SLS
Co-surfactantes	lauril glucosídeo, lauril sulfoacetato de sódio	cocoamidopropilbetaína, cocoamidoMEA
Regulador de viscosidade	gliceril caprato	polipropilenoglicol
Regulador de pH	ácido cítrico	ácido clorídrico
Conservante	-	benzoato de sódio

3.3. Avaliação de impacto de ciclo de vida

Para a fase de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV), o ICV elaborado foi introduzido no programa aberto e gratuito *openLCA* em sua versão 1.11. A base de dados *ecoinvent 3.7* regionalizada foi utilizada. Dentre as metodologias de AICV apresentadas na seção 2.3.3, optou-se pela *ReCiPe Midpoint (H)*.

3.3.1. ReCiPe

A metodologia *ReCiPe*, bastante utilizada em estudos de engenharia química e ambiental, se apresenta como um método harmonizado de avaliação do impacto do ciclo de vida a ponto médio (*midpoint*) e final (*endpoint*) (Huijbregts *et al*, 2017). Para a presente ACV, foi escolhida a abordagem de *midpoint*, por considerar mais dados e assim ser mais precisa. A abordagem *endpoint* incorpora mais considerações, o que seria indesejado para a presente pesquisa em sua fase atual.

Dentre as categorias de impacto de ponto médio da metodologia *ReCiPe*, os caminhos de danos incluem o aumento em casos de doenças respiratórias, aumento em vários tipos de câncer, aumento em outras doenças e da má nutrição, dano a espécies que vivem em água doce, em ambiente terrestre e marinho, aumento do custo de extração e de óleo, gás e carvão. Para a abordagem *endpoint*, essas categorias se traduzem em danos à saúde humana, danos ao ecossistema e danos a disponibilidade de recursos (Huijbregts *et al*, 2017).

Em relação às perspectivas temporais disponíveis na metodologia *ReCiPe*, a perspectiva hierarquista (H) foi escolhida em relação à individualista (I) e igualitária (E). A escolha de uma perspectiva implica na escolha dos fatores de ponderação nos cálculos de impacto ambiental. A individualista aplica fatores de ponderação otimistas no que tange à capacidade de adaptação humana. Já a perspectiva igualitária aplica fatores que consideram o maior tempo disponível para adaptação humana aos impactos. Finalmente, a perspectiva hierarquista aplica fatores de ponderação entre a visão individualista e igualitária, tendo como referência consensos da comunidade científica.

3.3.2. Categorias de impacto

A Tabela 3.11 revela de forma sintetizada os indicadores, fatores de caracterização do ponto médio e suas unidades das respectivas categorias de impacto *midpoint* da metodologia ReCiPe (Huijbregts *et al.*, 2017).

Tabela 3.11 Categorias de impacto de ponto médio da metodologia ReCiPe, seus indicadores, fatores de caracterização e unidades. Fonte: Adaptado de Huijbregts *et al.* (2017).

Categoria de impacto	Indicador	Fator de caracterização no ponto médio	Abreviação em inglês	Unidade
Mudanças climáticas	Aumento da força radiativa infravermelho	Potencial de aquecimento global	GWP	kg CO ₂ para o ar
Depleção de ozônio	diminuição do ozônio estratosférico	Potencial de depleção da camada de ozônio	ODP	kg CFC-11 para o ar
Radiação ionizante	aumento da dose absorvida	Potencial de radiação ionizante	IRP	kBq Co-60 para o ar
Formação de material particulado fino	PM _{2.5} aumento da ingestão da população	Potencial de formação de partículas	PMFP	kg PM _{2.5} para o ar
Formação de oxidantes fotoquímicos: qualidade do ecossistema	aumento do ozônio troposférico (AOT40)	Potencial de formação de oxidantes fotoquímicos: ecossistemas	EOFP	kg NOx para o ar
Formação de oxidantes fotoquímicos: saúde humana	aumento da ingestão pela população de ozônio troposférico (M6M)	Potencial de formação de oxidante fotoquímico: humanos	HOFP	kg NOx para o ar

Categoria de impacto	Indicador	Fator de caracterização no ponto médio	Abreviação em inglês	Unidade
Acidificação terrestre	aumento de prótons em solos naturais	Potencial de acidificação terrestre	TAP	kg SO ₂ para o ar
Eutrofização de água doce	aumento de fósforo na água doce	Potencial de eutrofização da água doce	FEP	Kg N para água doce
Eutrofização marinha	aumento de nitrogênio inorgânico dissolvido na água marinha	Potencial de eutrofização marinha	MEP	Kg N para o mar
Toxicidade humana: cancerígena	aumento do risco de incidência de doenças oncológicas	Potencial de toxicidade humana	HTPc	kg 1,4- DCB para o ar urbano
Toxicidade humana: não-cancerígena	aumento do risco de incidência de doenças não cancerígenas	Potencial de toxicidade humana	HTPnc	kg 1,4- DCB para o ar urbano
Ecotoxicidade terrestre	aumento ponderado pelo risco em solos naturais	Potencial de ecotoxicidade terrestre	TETP	kg 1,4- DCB para solo industrial
Ecotoxicidade de água doce	aumento ponderado pelo risco em águas doces	Potencial de ecotoxicidade em água doce	FETP	kg 1,4- DCB para água doce
Ecotoxicidade marinha	aumento ponderado pelo risco na água marinha	Potencial de ecotoxicidade marinha	METP	kg 1,4- DCB para o mar
Uso da terra	ocupação e transformação integrada no tempo	Potencial de ocupação de terras agrícolas	LOP	m ² x ano (terra de cultivo anual)

Categoria de impacto	Indicador	Fator de caracterização no ponto médio	Abreviação em inglês	Unidade
Uso da água	aumento de água consumida	Potencial de consumo de água	WCP	m ³ de água consumida
Depleção de metais	diminuição do teor de minério	Potencial excedente de minério	SOP	kg Cu
Depleção fóssil	valor de aquecimento superior	Potencial de combustível fóssil	FFP	kg petróleo

Em relação à ocupação agrícola da terra e transformação natural da terra, seus potenciais impactos ocorrem devido à mudança do uso da terra que pode gerar uma perda de habitat e/ou à intensificação do uso da terra, que leva tanto à perda de habitat como à perturbação do solo. Assim, existe o risco de desaparecimento de espécies e dano ao ecossistema. Sua unidade de medição é m² x ano de ocupação da terra (Huijbregts *et al*, 2017).

A categoria de impacto de mudanças climáticas está associada na metodologia ReCiPe à emissão de GEEs. Tal emissão acarreta aumento da concentração de GEEs na atmosfera, o que aumenta as forças radioativas e conseqüentemente a temperatura global, conforme alerta os relatórios do IPCC. As conseqüências desse aumento incluem a mudança no cenário de doenças e enchentes, na distribuição de biomas e fluxo dos rios, o que afeta, respectivamente a saúde humana, o desaparecimento de espécies terrestres e aquáticas. Sua unidade é expressa em kg CO₂-equivalente (Huijbregts *et al*, 2017).

A categoria de impacto de depleção fóssil se refere ao uso de petróleo bruto, gás natural, carvão e seus derivados. Sua extração implica na diminuição de sua disponibilidade, no entanto, este não é o ponto avaliado pela categoria e sim, o aumento de custo que sua depleção gera. Sua unidade é kg de petróleo-equivalente (Huijbregts *et al*, 2017).

Já a categoria de impacto toxicidade humana está vinculada à emissão de substâncias químicas potencialmente tóxicas. O aumento de sua concentração no ambiente reflete na incorporação por seres humanos, o que pode causar doenças e potenciais danos à saúde humana. Segmentados pela possibilidade de causar câncer ou não, sua unidade é kg de 1,4 DCB emitidos para o ar. Relacionada à categoria de toxicidade, a ecotoxicidade terrestre avalia a quantidade de 1,4 DCB-equivalente emitida para solos industriais (Huijbregts *et al*, 2017).

A eutrofização marinha ocorre quando nutrientes, tais como fósforo e nitrogênio, em excesso chegam ao mar e interferem na quantidade de oxigênio dissolvido, gerando um desequilíbrio no ecossistema. Assim, a vida de espécies marinhas é colocada em risco, aumentando sua mortalidade e os danos ao ecossistema marinho. Assim como na toxicidade humana, sua unidade é expressa em kg de 1,4 DCB, no entanto, sua especificidade implica em tal unidade medida em relação na disposição no mar (Huijbregts *et al*, 2017).

De forma análoga à depleção fóssil, a categoria de depleção de metais está associada ao aumento do custo potencial de extração. A diminuição da disponibilidade dos minerais acarreta aumento do custo dos metais produzidos segundo o estudo de Vieira *et al*. (2016). Sua unidade é expressa em kg de cobre (Huijbregts *et al*, 2017).

No que tange à formação de material particulado fino, a metodologia ReCiPe entende tais substâncias como uma mistura orgânica e inorgânica complexa, com diâmetros menores que 2.5 μm (PM_{2.5}). Nesse sentido, a categoria de impacto se associa com a emissão de óxidos de nitrogênio, amônia, dióxido de enxofre, além dos PM_{2.5} na atmosfera, alterando sua composição química. A disponibilidade de tais substâncias no ar torna os seres humanos mais propensos a sua ingestão, o que implica aumento da mortalidade e danos à saúde humana (Zelm e Huijbregts, 2017). Sua unidade é expressa em kg de PM₁₀-equivalentes emitidos para o ar é (Huijbregts *et al*, 2017).

Finalmente, a categoria de impacto da depleção de água está associada ao seu consumo, isto é, sua evaporação, incorporação em produtos, transferida ou descartada, o que a torna indisponível na bacia de origem (Verones e Huijbregts, 2017). Dessa forma, pode haver danos à saúde humana na medida em que água se torna indisponível para irrigação, o que pode causar má nutrição. A depleção de água também pode afetar a

diversidade da flora e conseqüentemente das espécies terrestres. Além disso, a mudança no fluxo dos rios pode interferir nas espécies marinhas. Sua unidade é expressa em m³ de água consumida (Huijbregts *et al*, 2017).

3.4. Interpretação dos resultados

Para a fase da ACV de interpretação dos resultados, adota-se uma visão crítica, isenta de conflitos de interesses entre os atores do cenário. São levados em consideração as pesquisas já disponíveis na literatura e trabalhos acadêmicos nas áreas de ACV de cosméticos de forma geral, bem como ACV que tem como objeto de estudo processos químicos apresentados nos capítulos de revisão bibliográfica e fundamentação teórica, bem como no presente capítulo de metodologia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os resultados da AICV são apresentados e sua discussão corresponde à fase da interpretação da ACV. A quantificação dos impactos ambientais correspondentes a uma lavagem de cabelos médios no Brasil pelo xampu *bio-based* estudado e pelo xampu convencional é apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Resultado da AICV para formulação de xampu *bio-based* e convencional em valores absolutos para cada categoria de impacto estudada.

Categoria de impacto ambiental	Impacto xampu <i>bio-based</i>	Impacto xampu convencional	Unidade	Impacto <i>bio-based</i> em relação ao convencional
Ocupação agrícola da terra	4.95E-03	6.94E-03	m ² a	-29%
Mudanças climáticas	3.80E-03	1.20E-02	kg CO ₂ -Eq	-68%
Depleção fóssil	7.80E-04	4.33E-03	kg oil-Eq	-82%
Toxicidade humana	3.58E-03	7.17E-03	kg 1,4-DCB-Eq	-50%
Eutrofização marinha	3.15E-05	4.50E-05	kg N-Eq	-30%
Depleção de metais	2.60E-04	1.39E-03	kg Fe-Eq	-81%
Transformação natural da terra	2.19E-05	2.37E-05	m ²	-8%
Formação de material particulado	1.11E-05	4.25E-05	kg PM10-Eq	-74%
Ecotoxicidade terrestre	3.03E-03	3.89E-03	kg 1,4-DCB-Eq	-22%
Depleção de água	1.68E-05	2.02E-09	m ³	832250%

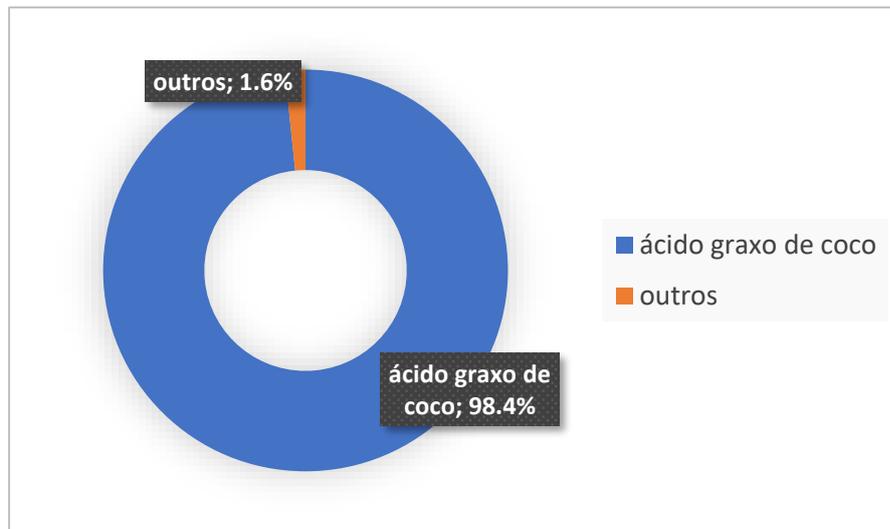
A Tabela 4.1 revela que a formulação *bio-based* pesquisada possui melhor desempenho ambiental em 9 das 10 categorias de impacto analisadas. Em 7 das 10 categorias, seus impactos são pelo menos 25% menores do que a formulação e manufatura convencional, e em metade das categorias, os valores demonstram uma redução de 50% dos impactos ambientais. A única categoria em que isso não ocorre é a depleção de água, em que a formulação *bio-based* apresenta um impacto superior numa ordem de grandeza de 10^4 , o que é muito significativo e requer uma análise dos principais processos que geram tão disparidade, o que é aprofundado na seção 4.10.

De forma geral, os resultados absolutos da quantificação dos impactos ambientais apontam para uma performance promissora da formulação com inclusão de ingredientes naturais. A fim de compreender mais profundamente os processos, a seguir os resultados serão discutidos em seus valores proporcionais, permitindo a identificação dos ingredientes da formulação e fases dos processos que levam a tais resultados.

4.1. Ocupação agrícola da terra

A utilização de ingredientes de origem natural, especialmente vegetal, nas formulações de xampu indica a possibilidade de impactos na categoria de ocupação agrícola da terra devido à mudança do uso da terra durante o processo de cultivo, o que pode interferir no habitat e no solo, conforme apresentado na seção 3.3.2. Com um impacto ambiental 29% menor do que o da formulação convencional de xampu na categoria de ocupação agrícola da terra, a influência de cada ingrediente da composição *bio-based* nesta categoria é apresentada na Figura 4.1.

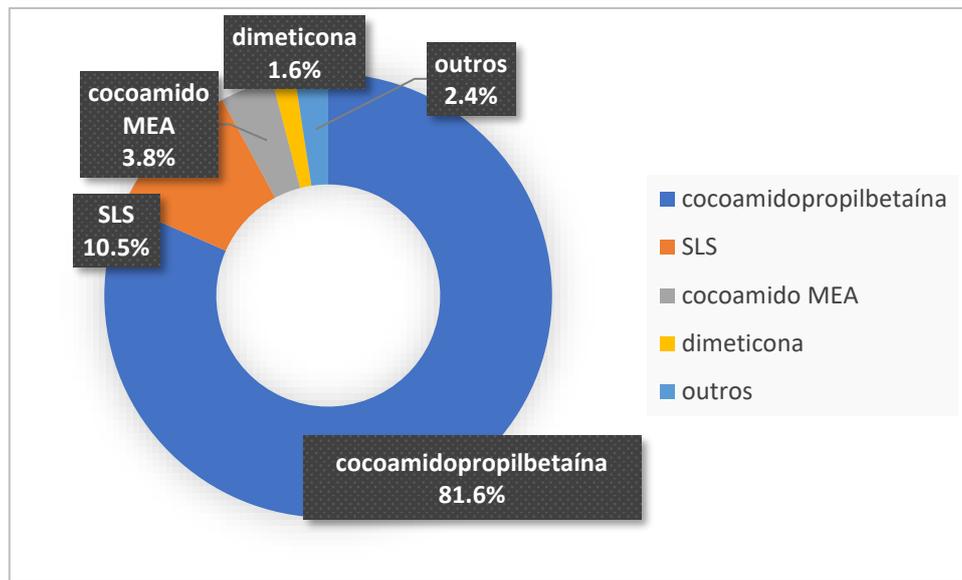
Figura 4.1 Influência da formulação de xampu *bio-based* na ocupação agrícola da terra.



A Figura 4.1 revela que o processo de produção do ácido graxo de coco é o mais significativo, quase que de forma isolada, para o impacto na ocupação agrícola da terra. Investigando as contribuições à montante, nota-se que tal impacto ocorre devido à produção de óleo de coco, ingrediente que necessita de ampla área de terra para cultivo. As contribuições do impacto na base *ecoinvent* estão associadas à produção do óleo nas Filipinas e na Indonésia, os dois países que mais forneceram o ingrediente ao mundo em 2020 (FAO, 2023).

Ainda assim, seu impacto em termos absolutos é menor do que o xampu convencional, o que é um aspecto positivo para a inovação da formulação alternativa. Isso mostra que, isoladamente e de forma comparativa, a inclusão de ingredientes vegetais na formulação de um xampu não é um indicativo direto de maior impacto na ocupação agrícola. A compreensão da cadeia produtiva de ambas as formulações se faz necessária para discutir o dado quantitativo obtido pela AICV. A influência dos ingredientes e manufatura do xampu convencional nesta categoria de impacto é ilustrada na Figura 4.2.

Figura 4.2 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na ocupação agrícola da terra.



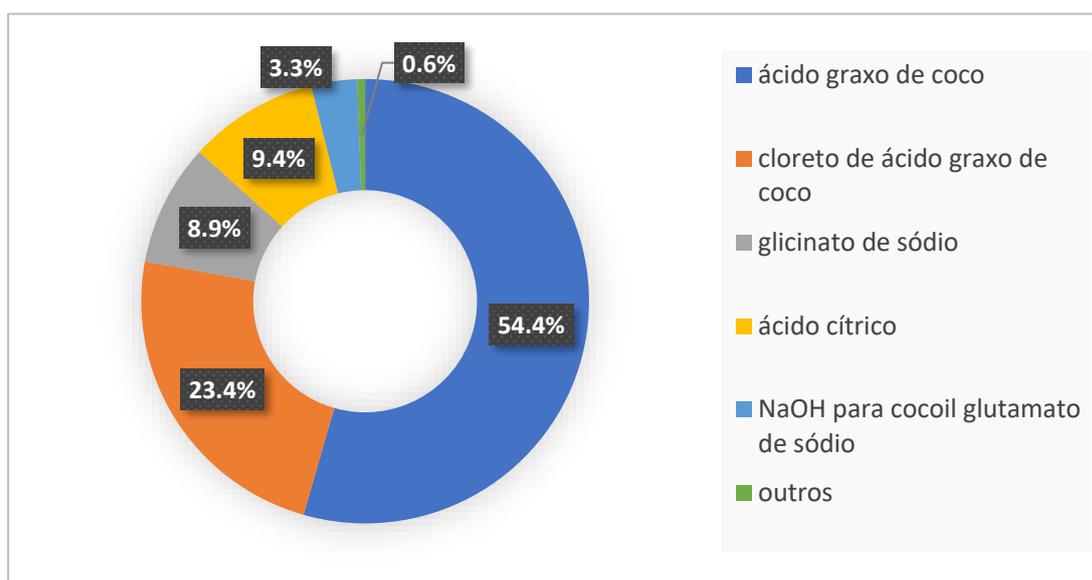
A Figura 4.2 mostra uma influência mais diversificada no xampu convencional em relação ao *bio-based*. No entanto, um dos ingredientes também se apresenta de maneira mais significativa, tendo a cocoamidopropil betaína (tensoativo secundário) uma contribuição de 82% no impacto. O segundo componente com maior contribuição é o tensoativo principal, SLS, com 10% no impacto. Dessa forma, 96% desta categoria de impacto no xampu convencional é atribuído aos tensoativos.

Observando os processos à montante no openLCA, verifica-se novamente a produção de óleo de coco em destaque, somando ao total 85% do impacto. Isso ocorre, pois a base *ecoinvent* considera em seus processos de álcool graxo e álcool graxo sulfatado (considerações assumidas conforme apresentado no capítulo de metodologia), a utilização de óleo de coco como fonte de matéria-prima. Entretanto, a cadeia à montante possui diferenças em relação à do xampu *bio-based*, pois os processos utilizados no convencional possuem contribuição da produção de surfactantes européia. Dessa forma, os resultados de ambos os produtos corroboram para a influência da produção dos surfactantes na ocupação agrícola da terra e apontam para uma melhor utilização do recurso pelo xampu *bio-based*, com processo produtivo baseado na Ásia.

4.2. Mudanças climáticas

No que tange às emissões de GEEs e potencial de aquecimento global medidos em kgCO₂ equivalente pela categoria de impacto ambiental de mudanças climáticas, a influência de cada ingrediente da formulação de xampu com inclusão de ingredientes naturais é mais diversificada, como mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 Influência da formulação de xampu *bio-based* nas mudanças climáticas.

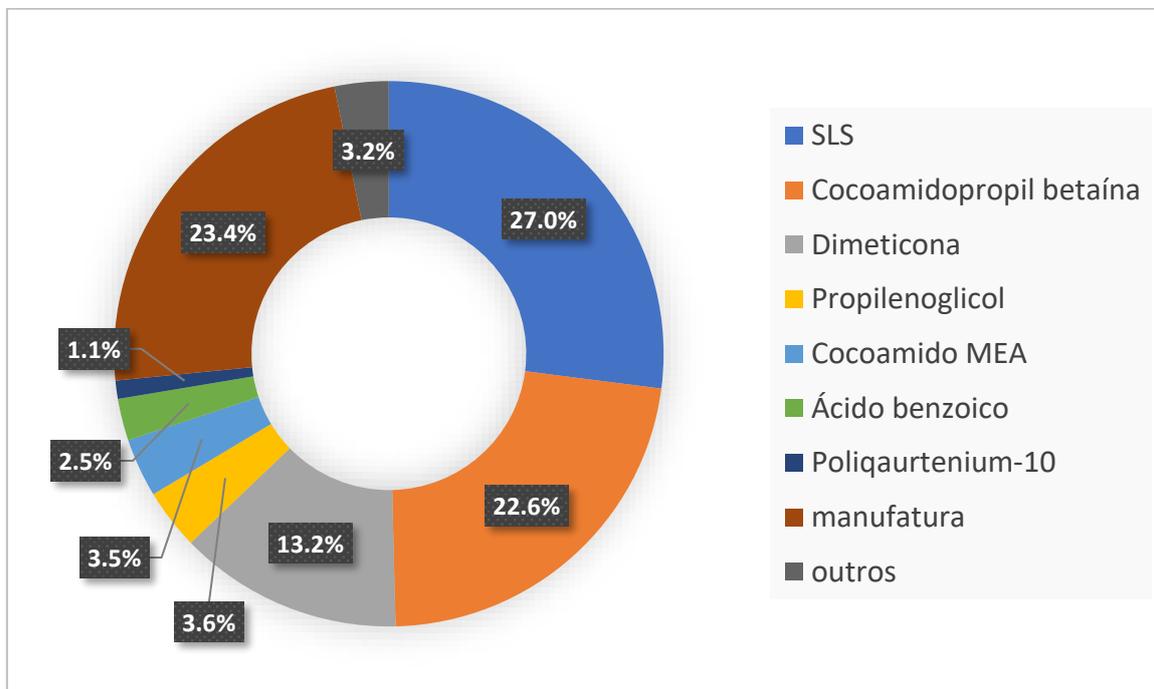


À luz deste resultado, a contribuição do ácido graxo de coco está relacionada à produção de óleo de coco e às emissões de GEEs associadas à mudança do uso da terra. Por sua vez, o cloreto de ácido graxo de coco utilizado para a produção do surfactante natural tem potencial de impacto no aquecimento global devido ao processo de produção de fósforo para o cloreto de fósforo, seu insumo de entrada. Finalmente, o ácido cítrico presente na formulação tem sua parcela de 9% de impacto nas mudanças climáticas que pode ocorrer devido ao uso do carvão em sua produção na China. Estes processos possuem emissões de GEEs associadas que correspondem a uma redução de emissões de 68% quando comparada ao xampu convencional.

A Figura 4.4 mostra a influência de cada ingrediente da formulação e manufatura de xampu convencional nas mudanças climáticas. Com contribuições diversificadas, a produção dos tensoativos corresponde à metade das emissões. A análise à montante revela que os insumos de origem petroquímica influenciam diretamente nos resultados através do processo de produção das olefinas utilizadas para a produção de álcoois graxos. A produção de propileno, etileno de origem fóssil também contribui para a emissão de GEEs relacionadas aos demais ingredientes mostrados na Figura 4.4.

Por sua vez, a fase de manufatura contribui com 23% dos impactos devido a emissões de GEEs associadas à geração de eletricidade e construção da fábrica. Dessa forma, a queda de 68% dos impactos ambientais relativos a mudanças climáticas, que aponta o xampu *bio-based* com melhor indicador nesta categoria, ocorre principalmente devido à forte presença da cadeia petroquímica no xampu convencional.

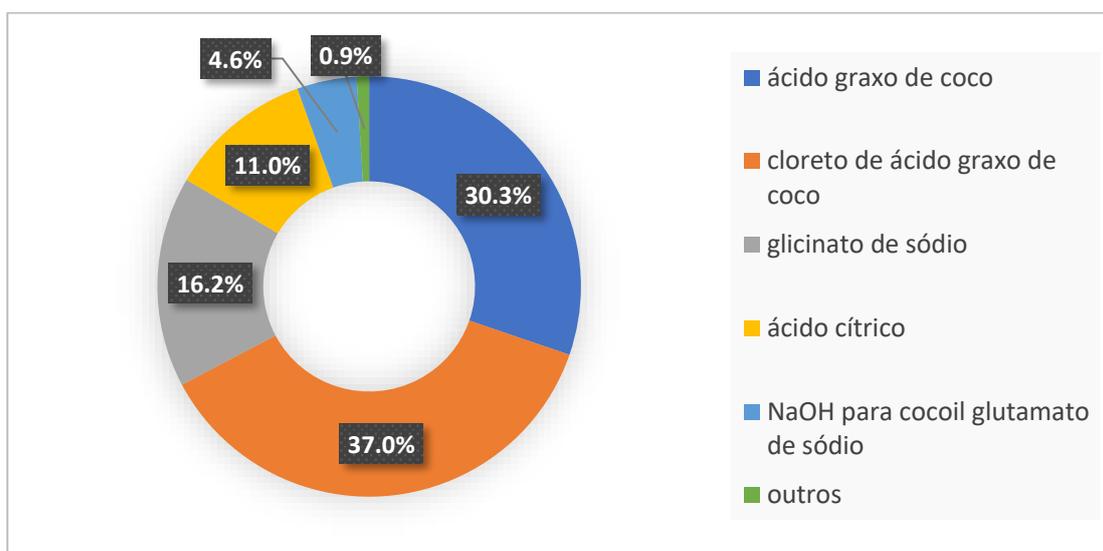
Figura 4.4 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional nas mudanças climáticas.



4.3. Depleção fóssil

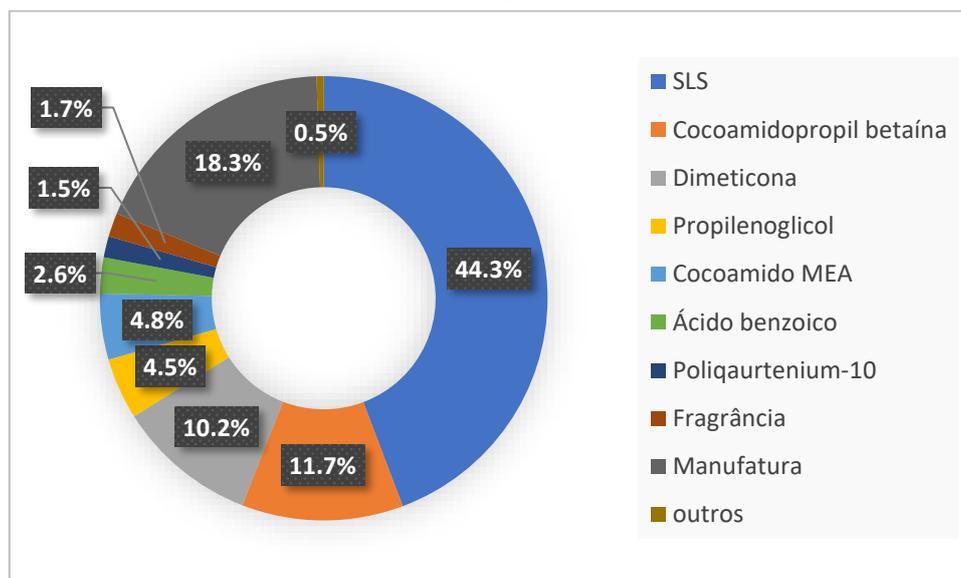
A depleção fóssil avalia o uso de petróleo bruto, gás natural, carvão e seus derivados, sendo medida em kg de petróleo equivalente, conforme discutido na seção 3.3.2. A Figura 4.5 mostra como o xampu *bio-based* se desempenha na categoria, indicando que a maior parcela de perda de recursos fósseis se refere à produção de fósforo necessário ao cloreto de ácido graxo de coco. O maquinário do processo do óleo de coco nas Filipinas contribui para o impacto relativo ao ácido graxo de coco. Já a produção de ácido cloroacético necessária à glicina contribui para a depleção fóssil relativa ao glicinato de sódio. Além disso, o processo de produção do ácido cítrico na China surge novamente com uma parcela relevante de 11% da categoria para o xampu *bio-based*.

Figura 4.5 Influência da formulação de xampu *bio-based* na depleção fóssil.



Por sua vez, a Figura 4.6 mostra como a composição e manufatura do xampu convencional influenciam no uso dos recursos fósseis e consequentemente no aumento dos custos. Com maiores impactos dos tensoativos e da fase de manufatura, tal contribuição ocorre devido à influência direta da cadeia petroquímica nesses processos. Além disso, é importante notar que existe uma parcela de contribuição de 12% de impacto devido à produção de óleo de coco, vinculada ao co-surfactante cocoamidopropilbetaína.

Figura 4.6 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na depleção fóssil.



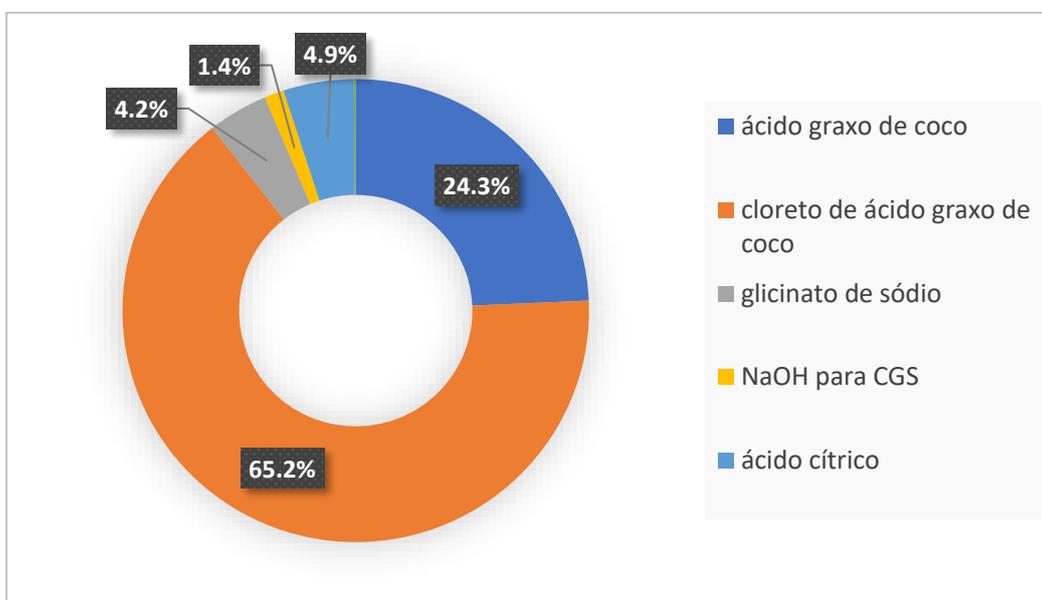
Na depleção fóssil, a formulação alternativa se destaca com a redução de 82% em relação à convencional. Ainda que seus impactos ambientais sejam substancialmente menores, os resultados exemplificam que a cadeia produtiva de formulações com inclusão de ingredientes naturais não estão isentas da utilização de recursos fósseis considerando a matriz energética e modo de produção em que vivemos, reforçando a tese de que não há impactos ambientais nulos.

4.4. Toxicidade humana

O potencial de impacto na toxicidade humana é representado pela emissão de 1,4 diclorobenzeno emitido ao ar. Embora as formulações de xampu não apresentem componentes nocivos à saúde humana, a análise da cadeia produtiva à montante revela processos em que essa categoria de impacto se torna relevante. Dessa forma, a toxicidade não está atrelada ao uso do xampu e sim aos seus processos associados à manufatura e produção de ingredientes.

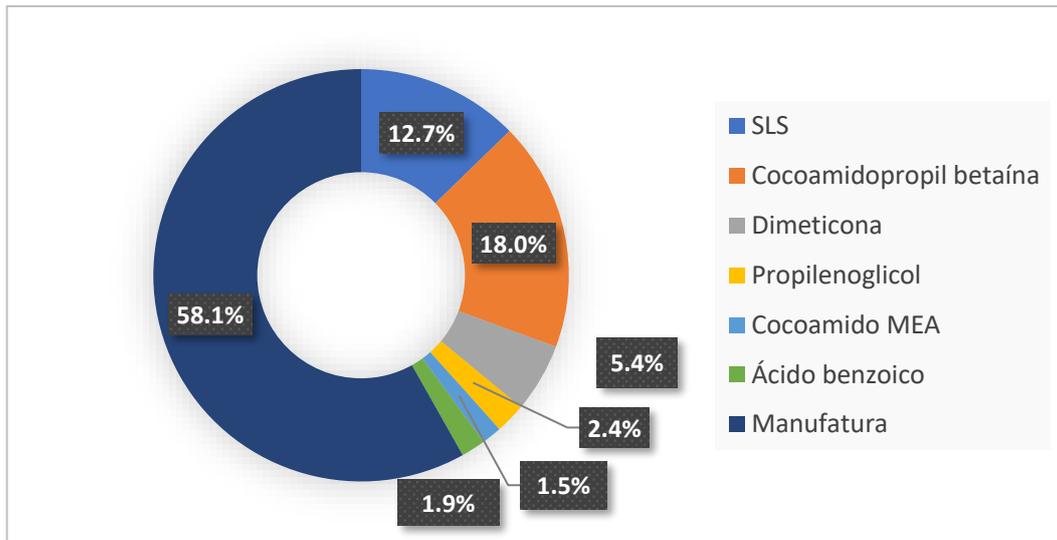
A Figura 4.7 mostra que na categoria de toxicidade humana, a produção de cloreto de ácido graxo de coco possui maior parcela de contribuição para a formulação *bio-based*, o que está associado a emissões de componentes tóxicos ao meio ambiente na produção de cloreto de fósforo. Além disso, o sistema de treliças na produção do óleo de coco contribui para os 24,3% de impacto relativos ao ácido graxo de coco. A produção de ácido cloroacético para o glicinato de sódio e a produção de ácido cítrico também contribuem para a toxicidade humana em menor proporção, de 4,2% e 4,9%, respectivamente.

Figura 4.7 Influência da formulação de xampu bio-based na toxicidade humana.



Por sua vez, a Figura 4.8 revela que a manufatura possui maior peso (58,1%) para a toxicidade associada ao xampu convencional. Realizando a análise à montante, verifica-se que isso ocorre devido ao processo da eletricidade, o qual necessita em sua cadeia de produção na geração de energia elétrica de alta voltagem de lignito, uma matéria-prima com potencial poluente. Comparativamente, o impacto da formulação *bio-based* é 50% menor que do xampu convencional.

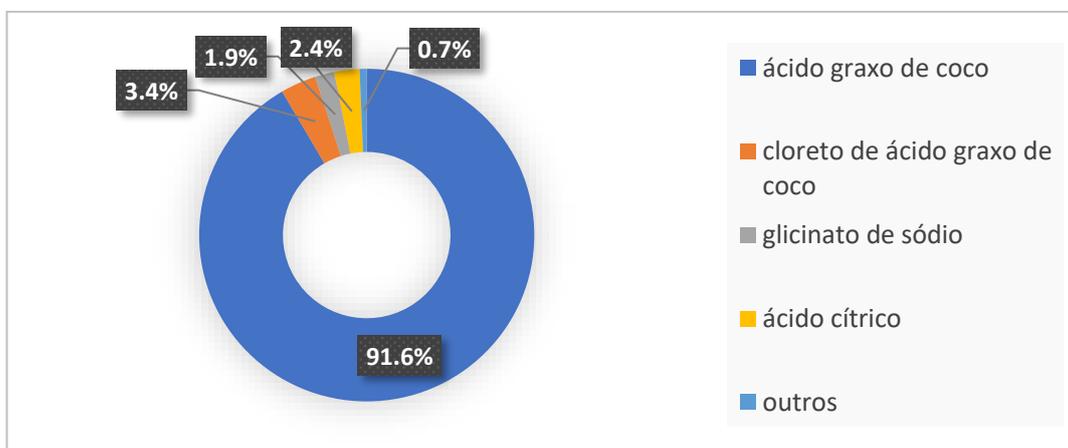
Figura 4.8 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na toxicidade humana.



4.5. Eutrofização marinha

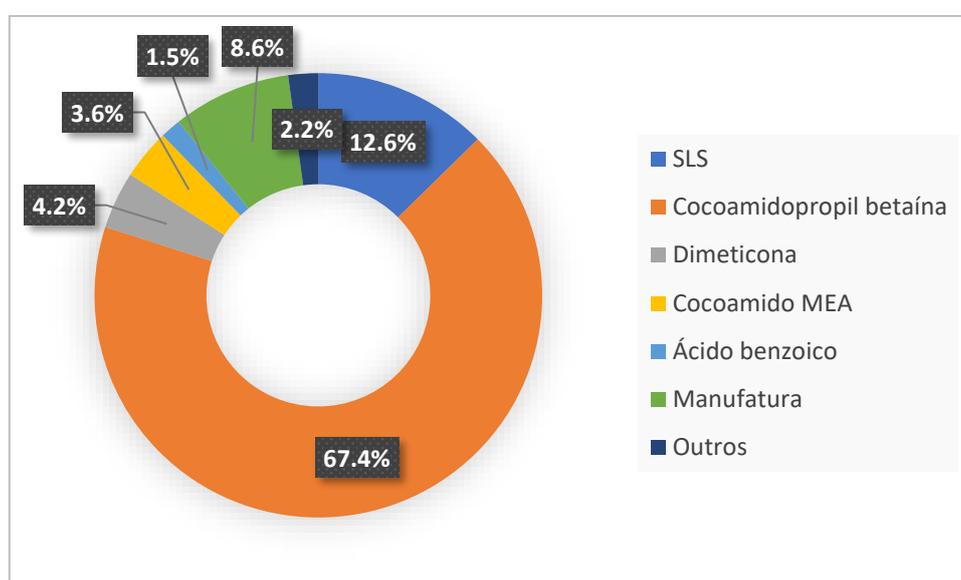
No que tange à interação com o sistema marinho e a conexão dos impactos ambientais com o ciclo do nitrogênio, na categoria de eutrofização marinha, o impacto da formulação *bio-based* é 30% menor que do xampu convencional. A Figura 4.9 mostra que na categoria, a produção de ácido graxo de coco contribui majoritariamente para os impactos da formulação *bio-based*, o que está associado à produção de óleo de coco e suas etapas de descascagem nas Filipinas e Indonésia.

Figura 4.9 Influência da formulação de xampu bio-based na eutrofização marinha.



Já a Figura 4.10 mostra que a cocoamidopropilbetaína possui parcela significativa no impacto do xampu convencional nesta categoria, que também está associada à produção de óleo de coco. No entanto, na formulação convencional de xampu, a produção de olefinas e demais processos petroquímicos e de eletricidade contribuem para a eutrofização marinha.

Figura 4.10 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na eutrofização marinha.



4.6. Depleção de metais

Medida pela diminuição do teor de cobre, na categoria de depleção de metais, existe uma contribuição diversificada nos impactos para ambas as formulações conforme ilustram as Figuras 4.11 para a *bio-based* e Figura 4.12 para a convencional. Na formulação alternativa, a maior contribuição vem do ácido graxo de coco, que por sua vez revela influência da produção de óleo de coco novamente. Já na formulação convencional, a maior contribuição para a depleção de metais é oriunda da construção da fábrica.

Figura 4.11 Influência da formulação de xampu bio-based na depleção de metais.

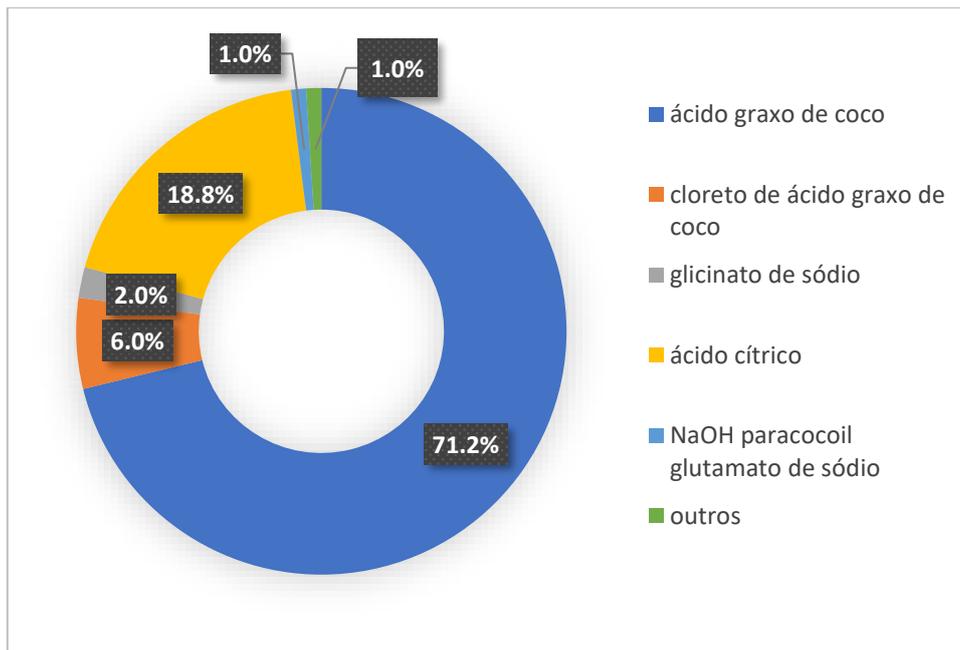
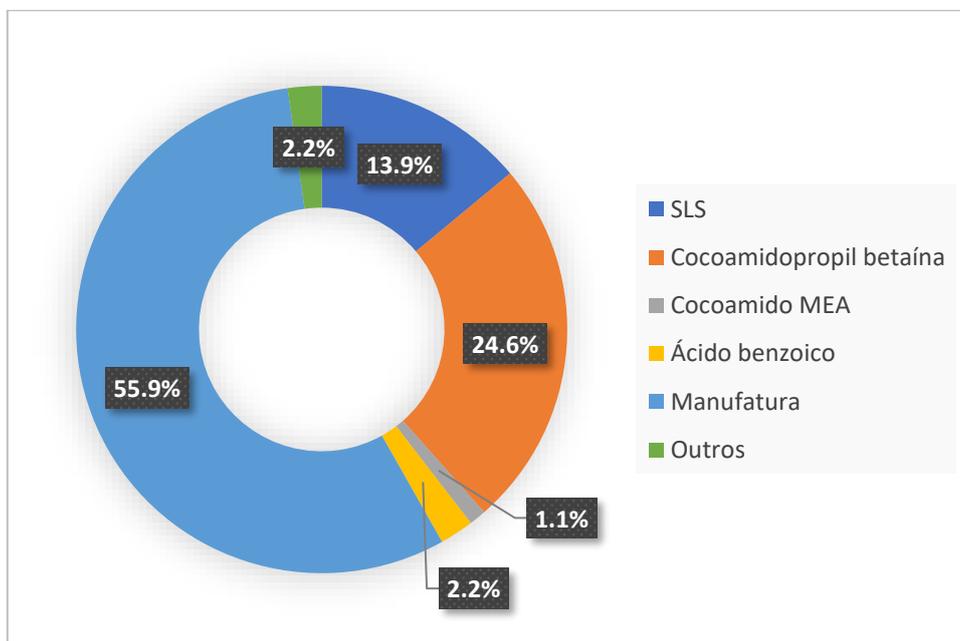


Figura 4.12 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na depleção de metais.



4.7. Transformação natural da terra

Na categoria de impacto transformação natural da terra, para o xampu *bio-based*, conforme ilustrado na Figura 4.13, a contribuição majoritária é da produção do óleo de coco necessária para o ácido graxo de coco. Já para a formulação convencional, a Figura 4.14 aponta para o mesmo processo de origem do impacto, porém devido à cocoamidopropil betaína. É válido ressaltar que nessa categoria, a redução dos impactos é de 8% colocando em comparação as duas formulações.

Figura 4.13 Influência da formulação de xampu bio-based na transformação natural da terra.

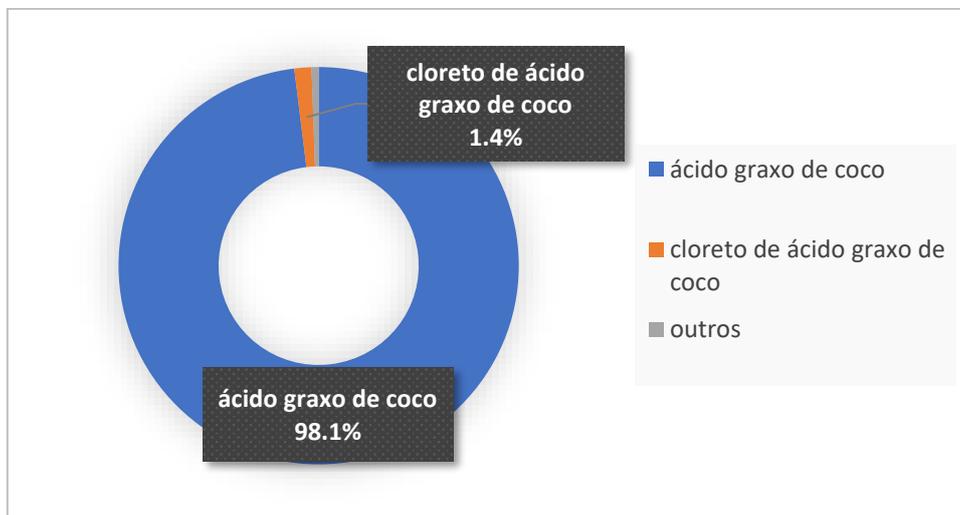
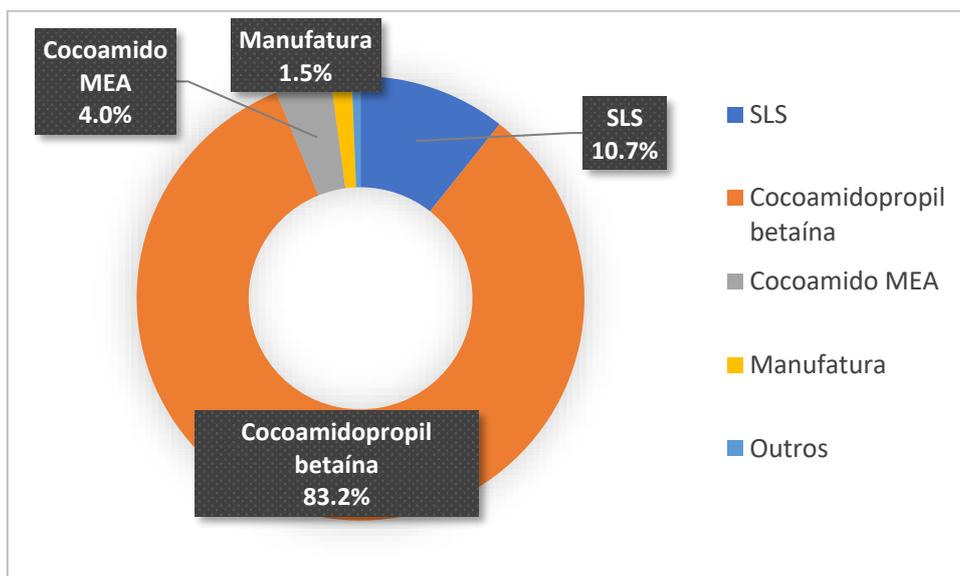


Figura 4.14 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na transformação natural da terra.



4.8. Formação de material particulado

Na categoria de impacto formação de material particulado, para o xampu *bio-based*, a Figura 4.15 ilustra a contribuição do ácido graxo de coco. Por sua vez, além da contribuição do óleo de coco para a formulação convencional, a Figura 4.16 mostra a influência da manufatura, que ocorre devido à eletricidade, para o impacto. A redução dos impactos é de 74% comparando o xampu *bio-based* com o convencional.

Figura 4.15 Influência da formulação de xampu bio-based na formação de material particulado.

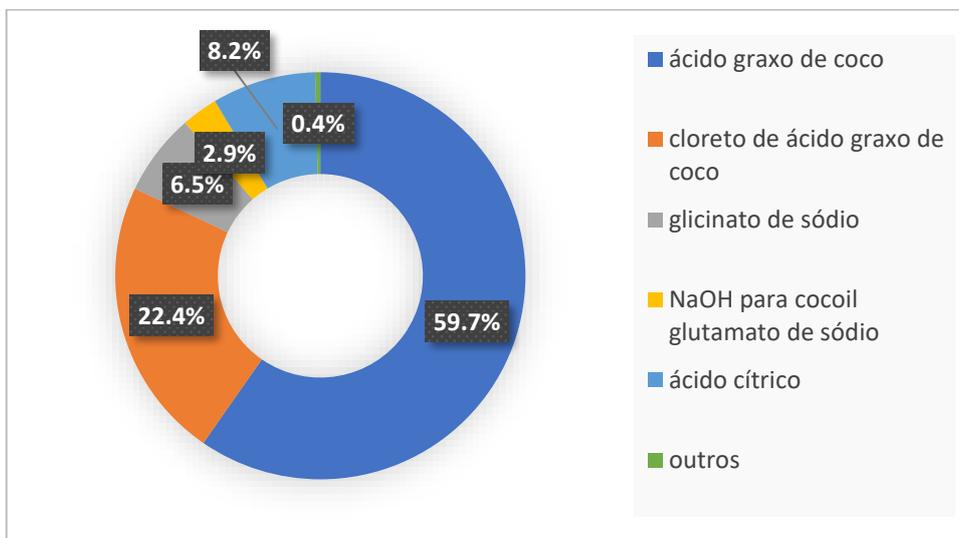
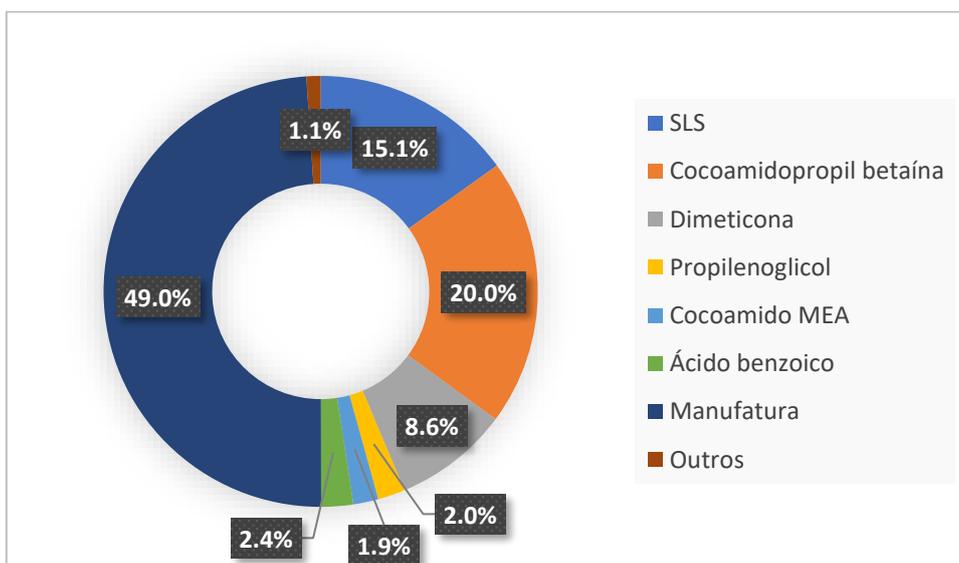


Figura 4.16 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na formação de material particulado.



4.9. Ecotoxicidade terrestre

Quanto ao potencial de poluição da água doce, a Figura 4.17 revela a contribuição quase majoritária do ácido graxo de coco para o impacto da ecotoxicidade terrestre na formulação com inclusão de ingredientes naturais. Já a Figura 4.18 mostra que a cocoamidopropil betaína possui maior impacto para a formulação convencional. Novamente, com a influência do óleo de coco, a redução dos impactos entre as duas formulações de xampu é 22%.

Figura 4.17 Influência da formulação de xampu bio-based na ecotoxicidade terrestre.

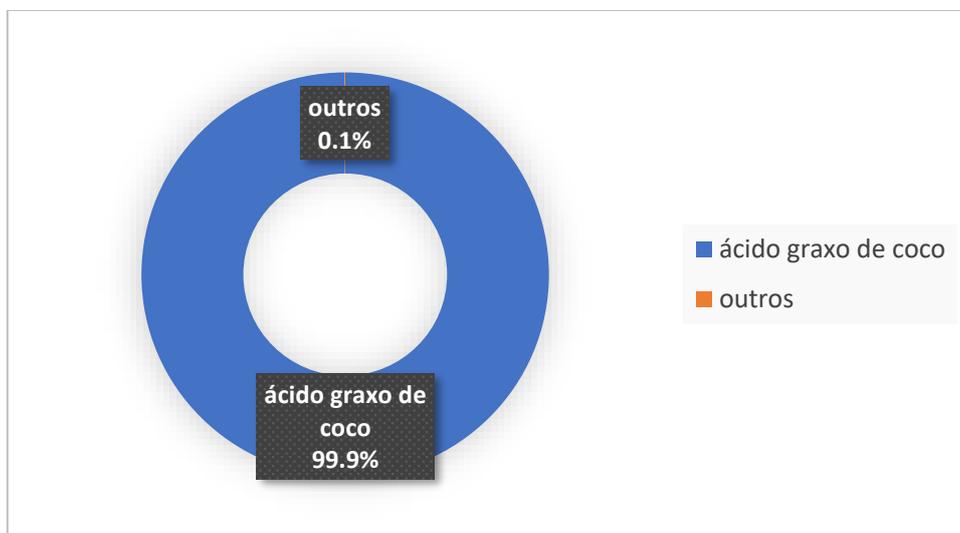
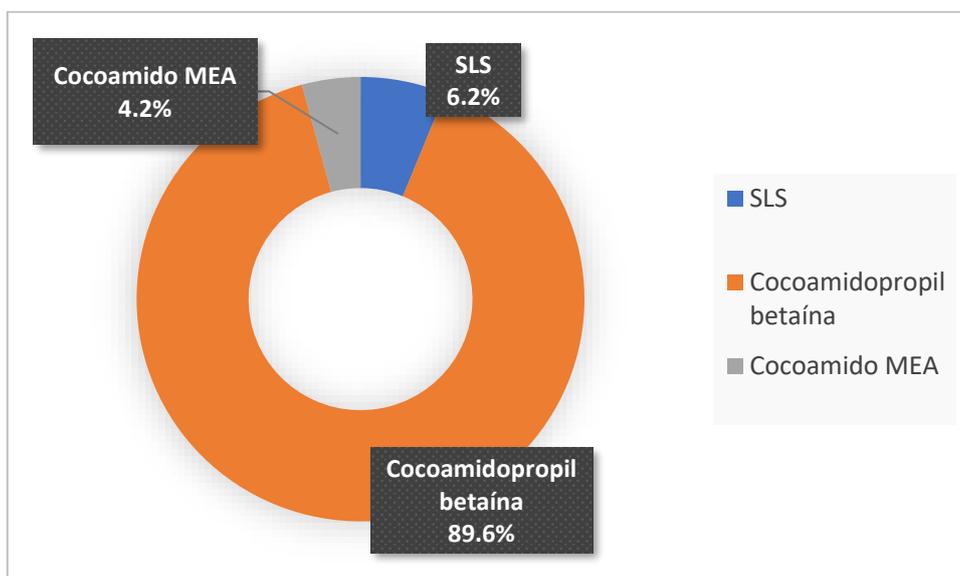


Figura 4.18 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na ecotoxicidade terrestre.



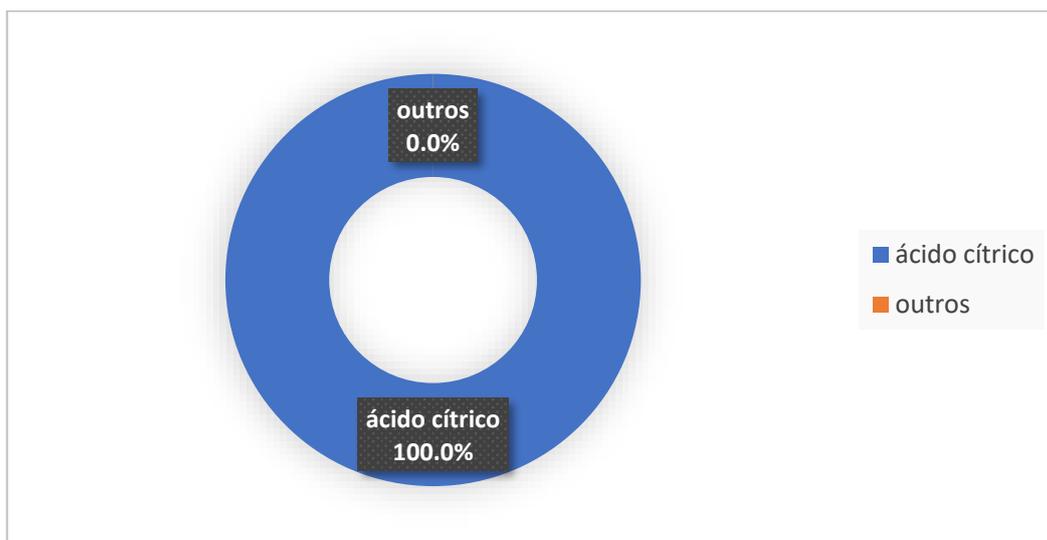
4.10. Depleção de água

A depleção de água envolve seu consumo sem recuperação a posteriori, isto é, o recurso não fica mais disponível. Esta categoria de impacto é a única dentre as estudadas que apresenta resultado bastante desfavorável em relação à performance ambiental do xampu *bio-based*.

Investigando as possíveis causas, verificou-se a influência majoritária do ácido cítrico, agente regulador de pH do xampu com inclusão de ingredientes naturais. Nesse sentido, é pertinente estudar tanto a nível de bancada quanto à nível de ACV outras possibilidades de substâncias capazes de regular viscosidade que causem menor impacto ao meio ambiente.

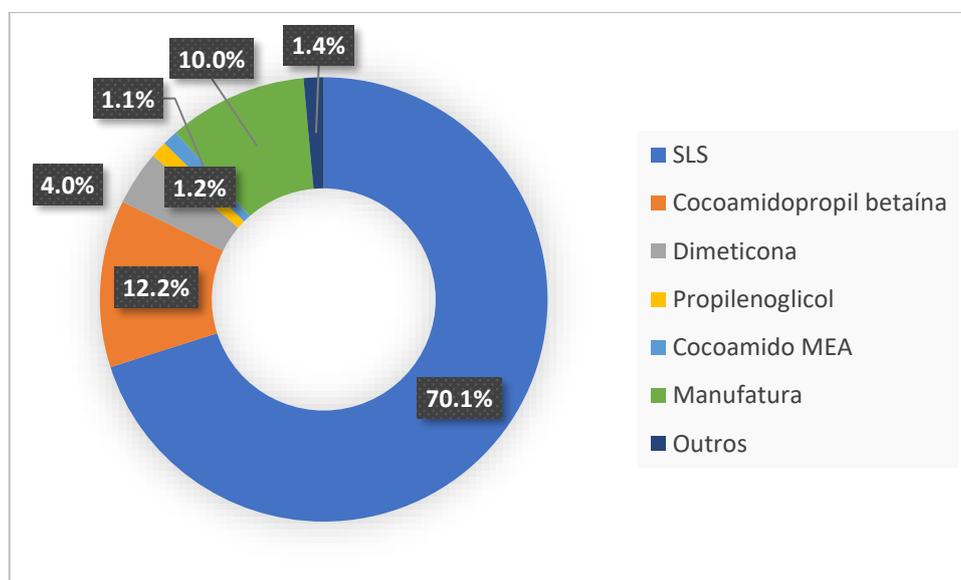
Além disso, outra perspectiva é avaliar a possibilidade de regionalização da produção de ácido cítrico, uma vez que seu processo de produção realizado na China utilizado pela base *ecoinvent* possui contribuição em outras categorias de impacto. A Figura 4.19 mostra a influência da formulação de xampu *bio-based* na depleção de água.

Figura 4.19 Influência da formulação de xampu bio-based na depleção de água.



Em relação ao xampu convencional, a Figura 4.20 mostra que o consumo de água é demandado principalmente para a produção do tensoativo principal, o SLS, correspondendo a 70,1% do impacto, além das contribuições de outros ingredientes da formulação e da própria manufatura do xampu convencional. Estes resultados mostram que tanto a nível da cadeia petroquímica, como da cadeia produtiva bio-based, a depleção de água é uma categoria de impacto ambiental significativa.

Figura 4.20 Influência da formulação e manufatura de xampu convencional na depleção de água.



5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Ao final desta dissertação, obteve-se êxito em realizar um estudo comparativo entre uma formulação convencional de xampu e uma formulação de xampu *bio-based* por meio da ferramenta de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Essa pesquisa se une e contribui para os esforços acadêmicos de quantificar impactos ambientais da indústria química dos cosméticos, a fim de prover bases para tomadas de decisão sustentáveis em sua cadeia de produção.

Verificou-se que a formulação de xampu *bio-based* estudada possui boa performance ambiental, com redução dos impactos ambientais superior a 50% em relação ao convencional nas categorias depleção fóssil, depleção de metais, formação de material particulado e mudanças climáticas e com diminuição de até 50% nas categorias eutrofização marinha, ocupação agrícola da terra, ecotoxicidade terrestre e transformação natural da terra. Entre os ingredientes da formulação bem como seus processos de manufatura, esta ACV revelou o destaque da contribuição da produção do óleo de coco nas Filipinas e Indonésia necessário para a fabricação do surfactante *bio-based* no percentual de impactos ambientais.

Em relação aos impactos ambientais da formulação de xampu convencional, a presente pesquisa mostrou que os tensoativos possuem maior parcela de contribuição quando comparados aos demais ingredientes, o que ocorre tanto por serem as substâncias em maior proporção na formulação tanto pelos processos à montante em seu ciclo de vida. Em todas as categorias de impacto analisadas foi possível observar a influência dos processos da cadeia petroquímica nos seus valores absolutos, o que em conjunto com os resultados da formulação *bio-based* aponta como sentido da sustentabilidade nas etapas de produção dos ingredientes e manufaturas do ciclo de vida do xampu para soluções menos vinculadas à indústria fóssil tradicional e mais voltadas para matérias-primas vegetais.

A redução em 29% dos impactos ambientais na ocupação agrícola da terra pelo xampu *bio-based* indica que a produção de óleo de coco nas Filipinas e Indonésia

interfere menos no uso da terra quando comparada a processos que incluem a fabricação em outros países. Isso mostra que mesmo incluindo mais ingredientes de origem vegetal é possível reduzir os impactos de ocupação agrícola da terra a depender da escolha do processo.

Quanto à toxicidade humana, esta ACV comparativa revelou a capacidade da formulação alternativa de xampu reduzir em 50% os impactos que são gerados pela convencional. No que tange à ecotoxicidade terrestre, a formulação com inclusão de ingredientes naturais performa melhor ambientalmente reduzindo em 22% do impacto, através da escolha mais adequada do processo de produção do óleo de coco.

Além disso, os resultados desta pesquisa sugerem que para a redução dos impactos das mudanças climáticas, depleção fóssil, depleção de metais e toxicidade humana, é preciso atuar diminuição do uso da cadeia petroquímica na formulação do xampu.

Aponta-se como gargalo para a formulação *bio-based*, o impacto gerado na depleção de água pelo agente regulador de pH estudado, o ácido cítrico. Seu processo de produção na China utilizando carvão trouxe impacto em diversas categorias. Desse modo, como caminhos para tomada de decisão são sugeridos a substituição por outro agente regulador de pH e/ou a utilização de outro processo de produção, que atenda a requisitos ambientais almejados.

Portanto, o presente estudo conclui que a formulação de xampu *bio-based* estudada possui melhor performance ambiental quando comparada à formulação convencional avaliada. Dessa forma, corrobora-se necessidade de mais pesquisas direcionadas a formulações com a inclusão de mais ingredientes de origem natural a fim de viabilizar a redução de impactos ambientais do setor globalmente.

5.2. Sugestões

Como sugestões para continuidade da linha de pesquisa e futuros trabalhos, propõe-se:

- a busca e realização de parcerias com empresas cosméticas para obtenção de dados primários;
- a realização de ACVs a partir de dados experimentais obtidos em laboratório;
- a inclusão de mais processos regionalizados para a realização da ACV.

6. ANEXOS

6.1. Anexo I: Resultados de todas as categorias de impacto

Tabela 6.1 Resultado da AICV para formulação de xampu *bio-based* e convencional em valores absolutos para todas as categoria de impacto de ReCiPe *Midpoint* (H).

Categoria de impacto ambiental	Impacto xampu <i>bio-based</i>	Impacto xampu convencional	Unidade
Ocupação agrícola da terra	4.95E-03	6.94E-03	m ² a
Mudanças climáticas	3.80E-03	1.20E-02	kg CO ₂ -Eq
Depleção fóssil	7.80E-04	4.33E-03	kg oil-Eq
Ecotoxicidade de água doce	5.70E-04	1.14E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofização de água doce	1.32E-06	8.00E-06	kg P-Eq
Toxicidade humana	3.58E-03	7.17E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Radiação ionizante	2.00E-04	3.90E-04	kg U ₂₃₅ -Eq
Ecotoxicidade marinha	1.10E-04	5.10E-04	kg 1,4-DCB-Eq
Eutrofização marinha	3.15E-05	4.50E-05	kg N-Eq
Depleção de metais	2.60E-04	1.39E-03	kg Fe-Eq
Transformação natural da terra	2.19E-05	2.37E-05	m ²
Depleção de ozônio	4.38E-10	1.63E-07	kg CFC-11-Eq
Formação de material particulado	1.11E-05	4.25E-05	kg PM ₁₀ -Eq
Formação de oxidantes fotoquímicos	1.47E-05	5.17E-05	kg NMVOC
Acidificação terrestre	2.42E-05	7.31E-05	kg SO ₂ -Eq
Ecotoxicidade terrestre	3.03E-03	3.89E-03	kg 1,4-DCB-Eq
Ocupação de terra urbana	7.38E-05	1.30E-04	m ² a
Depleção de água	1.68E-05	2.02E-09	m ³

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Norma Técnica 2014.

ADLAKHA, N.; YAZDANI, S. S. **Efficient production of (R,R)-2,3-butanediol from cellulosic hydrolysate using *Paenibacillus polymyxa* ICGEB2008**. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, v. 42, p. 21–28, 2015.

ABRELPE, <https://abrelpe.org.br/>

ABIHPEC, Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos. **A Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos: Essencial para o Brasil**. 2023. Disponível em https://abihpec.org.br/site2019/wp-content/uploads/2023/01/Panorama_do_Setor_Atualizado_01.02.23-1.pdf. Acesso em: jan 2023.

AJINOMOTO, 2023. **Amisoft® CS-22**. Disponível em: <https://www.aminoscience.com.br/materia-prima-e-aplicacoes/amisoft-cs-22/>. Acesso em: jan. 2023.

_____, 2011. **Ajinomoto Technical News: HAIR SHAMPOO** <Transparent> NSAI-ZN02. Disponível em: https://ajiaminoscience.eu/personalcare/wp-content/uploads/2021/06/Ajinomoto_NSAI-ZN02_Hair-Shampoo_Sulfate-free-Anti-dandruff-Shampoo.pdf. Acesso em: jan. 2023.

ALTAMIRANO, Carlos Alberto Alejos. Análise de ciclo de vida do biodiesel de soja: uma comparação entre as rotas metílica e etílica. 2013. Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos EQ/UFRJ. Rio de Janeiro, 2013.

AMBERG, N.; FOGARASSY, C. Green Consumer Behavior in the Cosmetics Market. **Resources**, v. 8, n. 3, p. 137, 30 jul. 2019.

AMIRALIAN, Luciana; FERNANDES, Claudia Regina. Shampoos. **Fundamentos da Cosmetologia**. Vol. 30, jan-fev 2018. Disponível em: https://www.cosmeticsonline.com.br/ct/painel/class/artigos/uploads/c2ff1-CT301_Integra.pdf

ANDRADE, Eduardo Augusto Tardelli de. Avaliação de ciclo de vida na gestão de resíduos sólidos: um estudo de caso da coleta seletiva do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014. Programa de Engenharia de Produção. Rio de Janeiro, 2014.

Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR ISO 14040. **Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. ISBN 978-85-07-01533-8. 2014.

BELISARIO, Elisa Silva. **Avaliação do ciclo de vida de concretos contendo agregados reciclados de diferentes origens**. 2020. Programa de Engenharia Civil COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

BEERLING, J.; SAHOTA, A. Green Standards, Certification and Indices. Em: SAHOTA, A. (Ed.). **Sustainability: How the Cosmetics Industry is Greening Up**. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 217–238.

BOM, S. *et al.* A step forward on sustainability in the cosmetics industry: A review. **Journal of Cleaner Production**. Vol 225. 270-290. 2019 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.255>

BRUNDTLAND, Gro Harlem. Comissão Mundial de Meio ambiente e Desenvolvimento. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. 1987.

CONFORTI, C. et al. Topical dermocosmetics and acne vulgaris. **Dermatologic Therapy**, v. 34, n. 1, p. e14436, 2020. <https://doi.org/10.1111/dth.14436>

CORNWELL, P. A. A review of shampoo surfactant technology: consumer benefits, raw materials and recent developments. **International Journal of Cosmetic Science**, v. 40, n. 1, p. 16–30, fev. 2018.

DALTIN, D. Tensoativos: química, propriedades e aplicações. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. 2012.

DE, S. *et al.* A review on natural surfactants. **RSC Adv.**, v. 5, n. 81, p. 65757–65767, 2015.

DEEN, A. *et al.* Chemical composition and health benefits of coconut oil: an overview. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 6, p. 2182–2193, 2021.

DRAKONTIS C.E., AMIN S. Biosurfactants: Formulations, properties, and applications. **Curr. Opin. Colloid Interface Sci.** 2020; 48:77–90. doi: 10.1016/j.cocis.2020.03.013.

DUBER-SMITH, D. C.; RUBIN, M. W. Understanding Green Marketing. Em: SAHOTA, A. (Ed.). **Sustainability: How the Cosmetics Industry is Greening Up**. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 239–253.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**: Nota Técnica PR 04/18. Rio de Janeiro, 2018.

CIVANCIK-USLU, D. *et al.* Improving the production chain with LCA and eco-design: application to cosmetic packaging. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, p. 104475, dez. 2019.

FANTINATTI, Pedro; ZUFFO, Antonio Carlos; ARGOLLO, André Munhoz. **Indicadores de Sustentabilidade em Engenharia**: como desenvolver. 1ª ed. Editora GEN LTC, 2014.

FARIA, Filipe Soares de. Avaliação do ciclo de vida de argamassas de revestimento com diferentes níveis de industrialização. Programa de Engenharia Civil. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro, 2021.

FFF, Fridays for Future. **Declaration of Lausanne**. Agosto de 2019. Disponível em: <https://fridaysforfuture.org/what-we-do/our-demands/>. Acesso em janeiro de 2023.

FERNANDES, Sabrina. *Se Quiser Mudar o Mundo: um guia político para quem se importa*. 1ª ed. Editora Planeta, 2020.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, out. 2009.

FISCHEDICK M., J. Roy, A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J.M. Allwood, J.-P. Ceron, Y. Geng, H. Kheshgi, A. Lanza, D. Perczyk, L. Price, E. Santalla, C. Sheinbaum, and K. Tanaka, 2014: **Industry**. In: **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

FONSECA-SANTOS, B.; CORREA, M.A.; CHORILLI, M. Sustainability, natural and organic cosmetics: consumer, products, efficacy, toxicological and regulatory considerations. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences** vol. 51, n. 1, jan./mar., 2015 <http://dx.doi.org/10.1590/S1984-82502015000100002>

FREIRE, Paulo. **Educação como prática de liberdade**. 53ªed. Editora Paz e Terra, 2019.

FUJITA, Hiroya e OHARA, Shinji. Production method of fatty acid chloride and fatty acid chloride. Depositante: NOF Corporation. EP 3 133 056 A1. Publicação: 22 de fevereiro de 2017.

GERVAJIO, Gregorio C. Fatty Acids and Derivatives from Coconut Oil. In: SHAHIDI, Fereidoon (org.). **Bailey's Industrial Oil and Fat Products**. 6. Ed. 2005. Disponível em: <http://www.innoleague.com/Coconut%20oil%20and%20derivates.pdf>

GOLSTEIJN, L. et al. Developing Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for shampoos: The basis for comparable life cycle assessment: Product Environmental Footprint Category Rules for Shampoos. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 14, n. 5, p. 649–659, set. 2018. 10.1002/ieam.4064

_____ . A compilation of life cycle studies for six household detergent product categories in Europe: the basis for product-specific A.I.S.E. Charter Advanced Sustainability Profiles. **Environmental Sciences Europe**. 27:23. 2015. <https://doi.org/10.1186/s12302-015-0055-4>

GUINÉE, J.B. **Handbook on Life Cycle Assessment**. Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers. NEW YORK, BOSTON, DORDRECHT, LONDON, MOSCOW. ISBN: 0-306-48055-7. 2004.

HE, Xiaorong, YU, Dejian. Research trends in life cycle assessment research: A 20-year bibliometric analysis (1999–2018). **Environmental Impact Assessment Review**. 106461. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106461>

HEIJUNGS, R. Ten easy lessons for good communication of LCA. Editorial. **International Journal of Life Cycle Assessment**. 19:473-476. 2014 doi 10.1007/s11367-013-0662-5

HOLMBERG, K. *et al.* **Surfactants and polymers in aqueous solutions**. 2. ed. Göteborg, Sweden: John Wiley & Sons, 2002. p. 7-23. Disponível em: <https://rushim.ru/books/polimers/surfactants-and-polymers-in-aqueous-solution.pdf>

HONDA, M.; ROBINSON, M.; KANNAN, K. Parabens in human urine from several Asian countries, Greece, and the United States. **Chemosphere**, v. 201, p. 13–19, jun. 2018.

HUIJBREGTS, M.A.J., STEIMANN, Z.J.N, ELSHOUT, P.M.F., STAM, G., VERONES, F., VIEIRA, M. D. M., HOLLANDER, A. ZIJP, M., VAN ZELM, R., 2017, A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. RIVM. Relatório técnico. Disponível em: https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report_ReCiPe_2017.pdf

IBD. **Diretrizes para a certificação de produtos de saúde e beleza orgânicos e naturais e para ingredientes orgânicos e naturais**. 2014.

MCCLEMENTS, D. J. Food Emulsions: Principles, Practices and Techniques.3 ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2016.

IPCC, Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press. 2021.

KAUL, S. et al. Role of Nanotechnology in Cosmeceuticals: A Review of Recent Advances. **Journal of Pharmaceutics**. Volume 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3420204>

KUMAR, S. *et al.* Advancements in laundry wastewater treatment for reuse: a review. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**. Volume 57, 2022 - Issue 11. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2132076>

JAINI, A. et al. “I buy green products, do you...?”: The moderating effect of eWOM on green purchase behavior in Malaysian cosmetics industry. **International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing**, v. 14, n. 1, p. 89–112, 31 mar. 2020.

LIOBIKIENĖ, G.; BERNATONIENĖ, J. Why determinants of green purchase cannot be treated equally? The case of green cosmetics: Literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 109–120, set. 2017.

MALULY, Hellen Dea Barros *et al.* Aspectos industriais e aplicação do glutamato monossódico em alimentos. *IN: REYES, Felix Guillermo Reyes. Umami e Glutamato: aspectos químicos, biológicos e tecnológicos*. Editora Blucher 1. ed. 2021.

MANGIA, Lys Hamond Regua. **Encapsulamento de rivastigmina em nanopartículas de P(MMA-co-AA) funcionalizadas para tratamento de doenças neurodegenerativas**. 2018. Dissertação de Mestrado. Encapsulamento de rivastigmina – Programa de Engenharia Química COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2018.

MARIANO, Jacqueline Barboza. **Impactos ambientais do refino de petróleo**. 1ªed. Editora Interciência, 2005.

MARTINEZ, S. BESSOU, C. HURE, L. GUILBOT, J. HÉLIAS, A. The impact of palm oil feedstock within the LCA of a bio-sourced cosmetic cream. **Journal of Cleaner Production**, 145 (348-360). 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.042>

MATTOS, Thaís de Moraes. Potencial de redução de emissões de gases de efeito estufa pela captura e sequestro de CO₂ de destilarias de etanol do centro sul do Brasil para utilização em recuperação avançada de petróleo. 2018. Programa de Planejamento Energético COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2018.

MENDES, N.C., BUENO, C., OMETTO, A.R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, vol. 26 n.1, 160-175, jan./mar. 2016
<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>

MONARO, R. L. G; LIMA, M. C, TONETTI, M. M.. Plásticos de engenharia como agentes competitivos na indústria automobilística. **Revista Intellectus**. Nº26 Vol 1. 2014. ISSN 1679-8902. <http://www.revistaintellectus.com.br/artigos/26.282.pdf>

MONTEIRO, Alessandra da Rocha Duailibe. **Contribuição da reciclagem química de resíduos plásticos para o desenvolvimento sustentável**. 2018. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Química COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2018.

NAMPOOTHIRI, K. M.; PANDEY, A. Fermentation and recovery of L-glutamic acid from cassava starch hydrolysate by ion-exchange resin column. **Revista de Microbiologia**, v. 30, p. 258–264, jul. 1999.

OLIVEIRA, Maria Clara Brandt Ribeiro de. Avaliação de ciclo de vida de embalagens plásticas de óleo lubrificante: um estudo de caso. 2017. Programa de Planejamento Energético COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2017.

ORGANIC MONITOR, 2013. Technical Insights Report on Natural & Organic Cosmetics Brand Assessment, London, UK. Relatório técnico.

PATIL, U.; BENJAKUL, S. Coconut Milk and Coconut Oil: Their Manufacture Associated with Protein Functionality. **Journal of Food Science**, v. 83, n. 8, p. 2019–2027, ago. 2018.

PEDROSA, T. **Desenvolvimento de Epiderme Humana Reconstruída (RHE) como plataforma de testes in vitro para irritação, sensibilização, dermatite atópica e fotoimunossupressão**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.

ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K. et al. A safe operating space for humanity. **Nature** 461, 472–475, 2009. <https://doi.org/10.1038/461472a>

RONDEL, C. et al. Green Production of Anionic Surfactant Obtained from Pea Protein. **Journal of Surfactants and Detergents**, v. 14, n. 4, p. 535–544, out. 2011.

SAMPAIO, Thays Cristina de Oliveira, D'ÁGUIAR, Vivian Ribeiro Freire. **Estudo comparativo das pegadas ambientais de xampu sólido e xampu líquido convencional por Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)**. 2020. Escola de Química/UFRJ. Rio de Janeiro, 2020.

SANO, C. “History of glutamate production”. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 90(3): 728S-732S, 2009

SATO, S. “Produção de aminoácidos”. In: LIMA, U. A.; AQUARONE, E. & BORZANI, W. (ed.). *Biotecnologia industrial*. 1. ed. São Paulo, Edgard Blücher Ltda., 2001.

SEBRAE. **Estudo sobre Segmento de Cosméticos na Bahia**. 2016. Disponível em: <https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/BA/Sebrae%20de%20A%20a%20Z/Estudos%20de%20Mercado/Estudo%20de%20Mercado%20Segmento%20de%200Cosm%20C3%A9ticos%20na%20Bahia%20-%20Vers%20C3%A3o%20para%20publica%20C3%A7%20C3%A3o.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2019.

SECCHI, M. *et al.* Assessing eco-innovations in green chemistry: Life Cycle Assessment (LCA) of a cosmetic product with a bio-based ingredient. **Journal of Cleaner Production**. 129 269-281. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.073>

SHAIKH, M. S. et al. Analysis of Physicochemical Properties of Aqueous Sodium Glycinate (SG) Solutions at Low Concentrations from 0.1-2.0 M. **Journal of Applied Sciences**, v. 14, n. 10, p. 1055–1060, 22 mar. 2014.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, 347(6223), 2015. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>.

SVB, Sociedade Vegetariana Brasileira. **Estatuto**. Disponível em: <https://www.svb.org.br/svb/estatuto>. Acesso em: janeiro de 2023.

TAKUJI *et al.* Microorganismo transgênico e método para produzir um L-aminoácido. Depositante: AJINOMOTO, CO. INC. Depósito: 28/01/2005. Concessão: 03/11/2020.

TOURINHO, Tiago Chagas de Oliveira. **Avaliação comparativa do ciclo de vida de processos de tratamento de efluentes domésticos**. 2014. Programa de Engenharia Química COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2014.

VARGAS, J. G. M. *et al.* Microplásticos: uso na indústria cosmética e impactos no ambiente aquático. **Revista Química Nova** Vol. 45, No. 6, 705-711, 2022 <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170870>

VERONES, F e HUIJBREGTS, M.A.J.; Water use. *IN: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. RIVM. Relatório técnico. 2017.

VRIES, R. *et al.* The potential of tissue engineering for developing alternatives to animal experiments: a systematic review. **Journal Of Tissue Engineering and Regenerative Medicine**, 9(7), 771-778. 2013. doi: 10.1002/term.1703

WANG *et al.* Preparation method and use of n-acyl acidic amino acid or salt thereof. Depositante: Nanjing Huashi Chemical Co., LTD. Pub. No: US 2016/0200668 A1. Publicação: 14 de julho de 2016.

YUN, Y., *et al.* Artificial skin models for animal-free testing. **Journal Of Pharmaceutical Investigation**, 48(2), 215-223. 2018. doi: 10.1007/s40005-018-0389-1

ZELM, R e HUIJBREGTS, M.A.J.; Fine particulate matter formation. *IN: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level*. RIVM. Relatório técnico. 2017.