



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS NATURAIS
MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS NATURAIS

JOHNNY DAVID GOMES DE QUEIROZ

AVALIAÇÃO EX-ANTE DE CICLO DE VIDA DO COLÁGENO EXTRAÍDO DA
PELE DE TILÁPIA

FORTALEZA – CEARÁ
2021

JOHNNY DAVID GOMES DE QUEIROZ

AVALIAÇÃO EX-ANTE DE CICLO DE VIDA DO COLÁGENO EXTRAÍDO DA
PELE DE TILÁPIA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Naturais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Naturais. Área de Concentração: Recursos Naturais.

Orientadora: Prof.^a Dra. Maria Cléa Brito de Figueiredo.

FORTALEZA – CEARÁ
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Estadual do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Queiroz, Johnny David Gomes de.

Avaliação ex-ante de Ciclo de Vida do colágeno extraído da pele da tilápia [recurso eletrônico] / Johnny David Gomes de Queiroz. - 2021.

104 f. : il.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Mestrado Acadêmico em Ciências Naturais, Fortaleza, 2021.

Área de Concentração: Aproveitamento de Recursos Naturais.

Orientação: Dra. Maria Cléa Brito de Figueiredo

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Colágeno. 3. Tilápia. 4. Planta piloto. 5. ACV ex-ante

JOHNNY DAVID GOMES DE QUEIROZ

AVALIAÇÃO EX-ANTE DE CICLO DE VIDA DO COLÁGENO EXTRAÍDO
DAPELE DE TILÁPIA

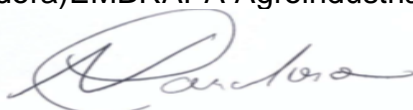
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Naturais do Programa de Pós- Graduação em Ciências Naturais do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Naturais.

Aprovada em: 02 de julho de 2021


BANCA AVALIADORA




Profa. Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo
(Orientadora) EMBRAPA Agroindústria Tropical



Dr. Alexandre Nunes Cardoso
EMBRAPA Agroindústria Tropical



Dra. Viviane da Silva Barros
Universidade Estadual do Ceará



Dr. Raimundo Marcelino da Silva Neto
EMBRAPA Agroindústria Tropical

Aos meus pais João Bandeira de
Queiroz e Clemilda Gomes de
Queiroz.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado força de vontade, paciência e coragem para realizar esse trabalho;

À minha família, João, Clemilda e Cléo por todo o esforço e apoio incondicional;

À Dra. Maria Cléa Brito de Figueirêdo, pela oportunidade de trabalhar nesse projeto e me ajudar a crescer. Obrigado por toda a sua paciência e tranquilidade em me ensinar;

Ao Dr. Men de Sá e Dr. Raimundo Marcelino, por ter me auxiliado em algumas etapas do trabalho;

Aos meus amigos Anne, Douglas, Ed e Jorgiane por todas as palavras amigas;

À minha amiga Carol por sempre me escutar e passar raiva comigo no Ragnarok online;

Agradecimento Ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento do Brasil (MAPA), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pelo apoio financeiro ao projeto “Estruturação de ações e inovação para o fortalecimento de cadeias produtivas da aquicultura no Brasil” (BRS-Aqua);

A todo o pessoal da Embrapa Agroindústria Tropical por possibilitar o desenvolvimento desse trabalho.

“Eu digo às estrelas que amanhã
será melhor”

(Fiesta de Iz*One)

RESUMO

A realização de avaliação de impactos ambientais ex-ante, buscando redução desses impactos em tecnologias em desenvolvimento, ainda é rara em estágios iniciais do desenvolvimento tecnológico. Entretanto, sem essa avaliação, novos processos e produtos podem ser utilizados em larga escala pela sociedade sem que seus impactos ambientais tenham sido reduzidos ao máximo durante. Esse estudo tem como objetivo utilizar dados laboratoriais para simular e avaliar em escala de planta piloto de produção os possíveis impactos ambientais de duas rotas de extração de colágeno a partir da pele de tilápia (*Oreochromis niloticus*). Busca-se identificar oportunidades viáveis de redução de impactos e apontar rota de melhor desempenho para produção em planta piloto. Utilizou-se o *software* SuperPro Designer® para modelar o processo laboratorial em escala piloto e a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), normatizada pelas ISO 14040 e 14044, com o escopo do tipo “berço ao portão”, para avaliar os impactos ambientais. O método AWARE foi empregado para avaliar impacto potencial na escassez hídrica e o método ILCD 2011 Midpoint, para avaliar impactos potenciais nas seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena, acidificação, eutrofização e ecotoxicidade de água doce, eutrofização marinha. Considerou-se que a relação entre quantidade de matéria-prima (pele de tilápia) e insumos na produção em nível laboratorial se manteve na produção em escala piloto. O funcionamento da planta é de 7.889,12 horas no ano para a rota ácido-solúvel (ASC) e 7.871,03 horas para a rota pepsina-solúvel (PSC), totalizando aproximadamente 328 dias/ano de funcionamento para ambas rotas. Os resultados obtidos mostraram que a produção na rota ASC ficou em 142 bateladas/ano, produzindo um total de 13.528,35 kg de colágeno a partir de 71 toneladas de pele, com um rendimento de 19,05%(kg/kg). Já a rota PSC realiza 137 bateladas/ano, com uma produção de colágeno de 10.020,18 kg a partir de 68,5 toneladas de pele, tendo um rendimento de 14,63% (kg/kg). Ao analisar os inventários, percebeu-se que a rota PSC consome 2,04 vezes mais insumos que a rota ASC por kg de colágeno produzido. As rotas avaliadas não apresentaram diferenças significativas em escala laboratorial. Porém, em escala piloto, observou-se que a rota ASC apresentou melhor desempenho ambiental na maioria das categorias de impactos ambientais avaliadas. A escala piloto, nas duas rotas, apresentou redução média de impactos de 68,60% na rota ASC e de 68,02% na rota PSC, em relação a escala laboratorial. Os pontos críticos encontrados nas duas rotas em escala piloto foram a etapa de purificação por membranas e a disposição de resíduos em aterro. Comparando o cenário base com outros que consideram a diafiltração e compostagem de resíduos orgânicos, observou-se que essas alterações reduziram os impactos de forma significativa em todas as categorias de impactos avaliadas. Concluindo, recomenda-se que a rota ASC com diafiltração e compostagem de resíduos seja implementada em escala piloto. Recomenda-se também que dados de caracterização de efluentes e resíduos sólidos sejam levantados para indicar o melhor tratamento para a modelagem dos processos em escala piloto. A análise de mudanças nos processos e impactos devido ao escalonamento permitiu indicar como boa prática a realização de comparações entre processos alternativos em escala laboratorial após modelagem dos processos em escala piloto.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Colágeno. Tilápia. Planta piloto. ACV ex-ante.

ABSTRACT

The performance of ex-ante environmental impact assessment, seeking to reduce these impacts on technologies under development, is still rare in the early stages of technological development. However, without this evaluation, new processes and products can be used in large scale by society without their environmental impacts having been reduced to the maximum during. This study aims to use laboratory data to simulate and evaluate at pilot plant scale the possible environmental impacts of two routes of collagen extraction from tilapia (*Oreochromis niloticus*) skin. The goal is to identify viable opportunities to reduce the impacts and point out the best performance route for pilot plant production. SuperPro Designer® software was used to model the pilot-scale laboratory process and the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, standardized by ISO 14040 and 14044, with a "cradle to gate" scope, to assess environmental impacts. The AWARE method was employed to assess potential impact on water scarcity and the ILCD 2011 Midpoint method to assess potential impacts in the following impact categories: climate change, human carcinogenic and noncarcinogenic toxicity, acidification, freshwater eutrophication and ecotoxicity, marine eutrophication. The ratio between the amount of raw material (tilapia skin) and inputs in laboratory level production was considered to be maintained in pilot scale production. The plant operation is 7,889.12 hours per year for the acid-soluble route (ASC) and 7,871.03 hours for the pepsin-soluble route (PSC), totaling approximately 328 days/year of operation for both routes. The results obtained showed that the production in the ASC route was 142 batches/year, producing a total of 13,528.35 kg of collagen from 71 tons of skin, with a yield of 19.05% (kg/kg). On the other hand, the PSC route performs 137 batches/year, with a collagen production of 10,020.18 kg from 68.5 tons of skin, with a yield of 14.63% (kg/kg). When analyzing the inventories, it was noticed that the PSC route consumes 2.04 times more inputs than the ASC route per kg of collagen produced. The evaluated routes did not present significant differences at laboratory scale. However, at pilot scale, it was observed that the ASC route showed better environmental performance in most categories of environmental impacts evaluated. The pilot scale, in both routes, showed an average reduction of impacts of 68.60% in the ASC route and 68.02% in the PSC route, in relation to the laboratory scale. The critical points found in the two pilot scale routes were the membrane purification step and the disposal of waste in landfills. Comparing the baseline scenario with others that consider diafiltration and composting of organic waste, it was observed that these changes reduced impacts significantly in all impact categories evaluated. In conclusion, it is recommended that the ASC route with diafiltration and waste composting be implemented on a pilot scale. It is also recommended that effluent and solid waste characterization data be collected to indicate the best treatment for pilot scale process modeling. The analysis of process changes and impacts due to scale-up indicated that it is good practice to perform comparisons between alternative processes at laboratory scale after modeling the pilot-scale processes.

Keywords: Life cycle assessment. Collagen. Tilapia. Pilot plant. Ex-ante LCA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas da ACV segundo diretrizes da NBR ISO 14040:2009.....	31
Figura 2 - Etapas do Estudo.....	45
Figura 3 - Fluxograma do processo de obtenção de colágeno baseado na rota ácido-solúvel (ASC).....	48
Figura 4 - Fluxograma do processo de obtenção de colágeno baseado na rota pepsina-solúvel (PSC).....	50
Figura 5 - Limites do Sistema.....	53
Figura 6 - Distribuição mássica da filetagem da tilápia-do-Nilo.....	54
Figura 7 - Extração do colágeno da pele de tilápia utilizando uma rota ASC.....	60
Figura 8 - Extração do colágeno da pele de tilápia utilizando uma rota PSC.....	63
Figura 9 - Comparação entre as rotas ASC e PSC em escala laboratorial pelo método de Monte Carlo.....	70
Figura 10 - Comparação entre as rotas ASC e PSC em escala piloto pelo método de Monte Carlo.....	71
Figura 11 - Análise dos impactos ambientais da produção da tilápia, filetagem e extração do colágeno por uma rota ácido-solúvel (ASC).....	75
Figura 12 - Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota ASC – Escala Laboratorial.....	77
Figura 13 - Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota ASC – Escala Piloto.....	77
Figura 14 - Análise dos impactos ambientais da produção da tilápia, filetagem e extração do colágeno por uma rota pepsina-solúvel.....	78
Figura 15 - Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota PSC – Escala Laboratorial.....	79
Figura 16 - Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota PSC – Piloto.....	80
Figura 17 - Comparação entre o cenário de referência e o cenário 1 para rotaASC pelo método de Monte Carlo.....	81

Figura 18 - Comparação entre o cenário de referência e o cenário 1 para rota PSC pelo método de Monte Carlo.....	82
Figura 19 - Comparação entre as rotas ASC e PSC (Cenário 1) pelo método de Monte Carlo.....	83
Figura 20 - Comparação da rota ASC (Referência e Cenário 2) pelo método de Monte Carlo.....	84
Figura 21 - Comparação da rota PSC (Referência e Cenário 2) pelo método de Monte Carlo.....	84
Figura 22 - Comparação entre as rotas ASC e PSC (Cenário 2) pelo método de Monte Carlo.....	85
Figura 23 – Estratégia simplificada para inserir ACV em processos em desenvolvimento.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de impactos e modelos de caracterização.....	36
Tabela 2 - Equipamentos utilizados em laboratório na extração das rotas de extração de colágeno.....	46
Tabela 3 - Metodologias analíticas dos parâmetros analisados.....	51
Tabela 4 - Dados secundários coletados da base de dados do Ecoinvent..	55
Tabela 5 - Equipamentos utilizados na simulação da rota ASC, indicando capacidade e etapa utilizada dos equipamentos.....	61
Tabela 6 - Equipamentos utilizados na simulação da rota PSC, indicando capacidade e etapa utilizada dos equipamentos.....	64
Tabela 7 - Inventário das duas rotas de extração de colágeno de pele de tilápia, considerando a produção anual de colágeno.....	65
Tabela 8 - Inventário da produção de colágeno em escala laboratorial e piloto, considerando a produção de 1 quilograma de colágeno..	68
Tabela 9 - Valores totais dos impactos ambientais nas categorias de impactos em escala laboratorial e piloto das rotas ASC e PSC.....	73
Tabela 10 - Valores totais dos impactos ambientais nas categorias de impactos em escala laboratorial das rotas ASC e PSC e gelatina*.....	89

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
Água WFI	Água para injetáveis
ASC	Ácido-solúvel
AWARE	Available Water Remaining
CE	Ceará
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EEB	Encefalopatia Espongiforme Bovina
EET	Encefalopatia Espongiforme Transmissível
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
LTB	Laboratório de Tecnologia da Biomassa
MPA	Ministério de Pesca e Agricultura
PDCA	Planejar, Fazer, Verificar e Agir
pH	Potencial Hidrogeniônico
PSC	Pepsina-solúvel
TNT	Tecido não tecido

LISTA DE SÍMBOLOS

°kg/kg	Quilo por quilo
Kg	Quilograma
%	Porcentagem
°C	Celsius
Mol.L ⁻¹	Mol por litro
US\$	Dólares norte-americanos
€	Euro
MJ	Megajoule
kWh	Quilowatt-hora
m ³	Metro cúbico
µS/cm	Microsiemens por centímetro
mg/L	Miligramma por litro
L/m ² h	Litro por metro quadrado hora
m ²	Metro quadrado
L	Litro
L/h	Litro por hora
MT	Tonelada Métrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	Aquicultura	21
3.1.1	Tilápia do Nilo.....	23
3.2	Colágeno	24
3.2.1	Extração de colágeno.....	25
3.2.2	Aplicações do colágeno.....	27
3.3	Avaliação do Ciclo de Vida – ACV	28
3.3.1	Definição de Objetivo e escopo.....	32
3.3.2	Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	33
3.3.3	Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).....	35
3.3.4	Interpretação.....	36
3.4	ACV ex-ante	38
3.5	ACV de produção de tilápia	40
3.6	Escalonamento de produção	42
3.6.1	Software SuperPro Desingner.....	43
4	MATERIAIS E MÉTODO	45
4.1	Etapa 1: Coleta de dado no laboratório	46
4.1.1	Descrição da Rota ácido-solúvel em laboratório.....	46
4.1.2	Descrição da Rota pepsina-solúvel em laboratório.....	48
4.2	Etapa 2: Elaboração de inventário com dados de laboratório	50
4.3	Etapa 3: Escalonamento das rotas avaliadas	51
4.4	Etapa 4: Elaboração dos inventários com dados obtidos no esca- lonamento	52
4.5	Etapa 5: Execução da ACV	53
4.5.1	Objetivo, unidade funcional e escopo do estudo.....	53
4.5.2	Alocação de dados.....	54
4.5.3	Dados secundários de inventário.....	55
4.5.4	Avaliação de impactos ambientais.....	56

4.5.5	Análise de Incerteza.....	56
4.6	Análise de Cenários alternativos.....	57
5	RESULTADOS.....	58
5.1	Plantas Piloto de Extração de Colágeno.....	58
5.1.1	Planta piloto de Extração de Colágeno na rota ASC.....	58
5.1.2	Planta piloto de Extração de Colágeno na rota PSC.....	61
5.2	Análise dos inventários das rotas de extração do colágeno em es- cala piloto.....	64
5.3	Comparação dos inventários das rotas em escala laboratorial e piloto.....	66
5.4	Avaliação dos impactos ambientais.....	70
5.4.1	Comparação das rotas ASC e PSC em escala laboratorial e piloto.....	70
5.4.2	Análise de pontos críticos na rota ASC em escala piloto de produção.....	75
5.4.3	Análise dos pontos críticos na rota PSC em escala piloto de produção....	78
5.5	Análise de cenários.....	80
6	DISCUSSÃO.....	86
6.1	Mudanças nos impactos de extração de colágeno com o escalo- namento de produção.....	86
6.2	Impactos do colágeno em relação a outros produtos semelhantes..	87
6.3.	Estratégia simplificada para inserir ACV em processos em desen- volvimento.....	90
7	CONCLUSÃO.....	93
	REREFÊNCIAS.....	95

1 INTRODUÇÃO

O modelo de economia linear de produção de bens tem levado à escassez dos recursos naturais e provocado impactos negativos ao meio ambiente, como poluição, degradação e intoxicação de ecossistemas e pessoas (BRAUNGART; MCDONOUGH, 2013). A Bioeconomia é uma tentativa de mudança desse modelo de desenvolvimento que promove a produção de recursos biológicos renováveis e a conversão desses recursos e fluxos de resíduos em produtos com valor agregado, como alimentos, rações, produtos de base biológica e bioenergia (BRENNAN *et al.*, 2015).

Além da preservação do meio ambiente, subprodutos e resíduos de base biológica, oriundos de diversas industriais, podem ser transformados em produtos de interesse comercial. Portanto, trata-se do surgimento de uma nova indústria, a bioindústria, com a participação de agentes de setores diversos. Essa indústria está inserida em um ecossistema de inovação relacionado às tecnologias de conversão biológica que está em desenvolvimento e aprimoramento.

Na indústria pesqueira, estima-se que 50 a 70% da matéria-prima se torna subproduto e resíduo (OLSEN; TOPPE; KARUNASAGAR, 2014). De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2018), a produção mundial pesqueira atingiu 171 milhões de toneladas em 2016 e, desse total, a aquicultura representa 47%. Só no Brasil, estima-se que a produção de pescado aumentará de 1,286 (em 2016) para 1,885 milhão de toneladas, em 2030.

O aproveitamento dos resíduos do processamento de pescado para a agroindústria, apresenta diversas oportunidades e vantagens, sendo a principal minimizar o grande problema de eliminação de resíduos orgânicos, através da agregação de valor a esse resíduo. Existem muitas possibilidades tecnológicas disponíveis para o aproveitamento dos resíduos do pescado, como elaboração de produtos para indústria de ração, cosméticos e farmacêutica (STEVANATO *et al.*, 2007). Entretanto, grande quantidade de resíduo da aquicultura e pesca é descartado, sendo importante o desenvolvimento de tecnologia que integre esse fluxo à bioeconomia, gerando bioprodutos demandados pelo mercado.

Nessa conjuntura, pesquisadores do Laboratório de Tecnologia da Biomassa – LTB, localizado na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, desenvolveram duas rotas tecnológicas para obtenção de gelatina e colágeno a partir da pele da tilápia. Menezes *et al.* (2020) extraíram colágeno utilizando rotas ácidas e enzimática e obtiveram resultados satisfatórios em escala laboratorial. Esses autores também avaliaram o colágeno extraído em diferentes condições de temperatura, tempo e concentração do ácido acético com o objetivo de otimizar o rendimento sem comprometer a qualidade do produto.

Nesse contexto, esse estudo tem como objetivo utilizar dados obtidos em escala laboratorial para modelar e avaliar possíveis impactos ambientais potenciais de duas rotas de extração de colágeno a partir da pele de tilápia, utilizando resultados de simulação das rotas em escala piloto de produção. Busca-se nessa avaliação ambiental a identificação de pontos críticos, avaliação de cenários que possam reduzir os impactos ambientais em ambas as rotas e indicação da rota com melhor desempenho ambiental. Além disso, são analisadas e identificadas variações nos dados de inventário e nos impactos ambientais potenciais dessas rotas quando se muda a escala de produção.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é um método amplamente utilizado para mensurar possíveis impactos ambientais de produtos e processos e com normas definidas pela *International Standardization Organization* – ISO (ISO 14040 e 14044, 2014a e 2014b). A ACV ex-ante visa avaliar os impactos ambientais potenciais desses produtos durante a fase inicial de desenvolvimento tecnológico, prospectando cenários de produção mais favoráveis à adoção do produto, a partir da verificação das opções de *design* de processo e produto que resulte em menor impacto ambiental, preparando o produto para o mercado. A modelagem da tecnologia de produção em escala piloto permite uma primeira comparação com tecnologias tradicionais, direcionando esforços durante a P&D de produtos e processos (CUCURACHI, VAN DER GIESEN, GUINÉE, 2018).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos ambientais potenciais de duas rotas de extração de colágeno a partir de pele de tilápia-do-nilo (*Oreochromis niloticus*).

2.2 Objetivos específicos

- Coletar dados laboratoriais das rotas ácido-solúvel (ASC) e pepsina-solúvel (PSC);
- Modelar as rotas ácido-solúvel (ASC) e pepsina-solúvel (PSC) em escala piloto de produção a partir de dados coletados em laboratório;
- Analisar os inventários das rotas ASC e PSC, investigando possíveis variações oriundas do escalonamento da produção;
- Comparar os inventários e impactos ambientais potenciais das rotas ASC e PSC, em escala laboratorial e simulação da escala piloto, investigando possíveis variações oriundas do escalonamento da produção;
- Avaliar cenários alternativos de produção de colágeno nessas rotas através de simulação em escala piloto.
- Propor rota de melhor desempenho ambiental.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse tópico foi realizada uma revisão da literatura sobre os temas: aquicultura, colágeno, Avaliação do Ciclo de Vida, ACV ex-ante, ACV de produção de tilápia e escalonamento de produção.

3.1 Aquicultura

Mundialmente, o peixe é a proteína animal de maior produção (158 milhões de toneladas em 2012), comercialização (130 milhões de dólares em 2012) e consumo (19 kg per capita em 2012). Isto se deve ao aumento demográfico que resulta em uma demanda progressiva por alimento; aos novos hábitos alimentares da sociedade urbana que busca carne mais magra, nutritiva e facilmente digerível; à boa qualidade e maior disponibilidade dos produtos pesqueiros e seus derivados nos estabelecimentos comerciais devido ao rápido crescimento da aquicultura (MPA, 2014).

Essa atividade produtiva é praticada em vários países, sendo uma importante fonte de renda e de proteína animal, com papel relevante na segurança alimentar (FAO, 2012). A aquicultura produz 73,8 milhões de toneladas de pescado no mundo, ou seja, cerca de 44% da produção mundial de pescado.

De acordo com a Schulter e Filho (2017), as espécies mais comuns produzidas no país, por região, são: *i*) tambaqui, pirarucu e pirapitinga na região Norte; *ii*) tilápia e camarão marinho no Nordeste; *iii*) tambaqui, pacu e pintado no Centro-Oeste; *iv*) tilápia, pacu e pintado no Sudeste; e *v*) carpa, tilápia, jundiá, ostra e mexilhão na região Sul.

Segundo Kubitzka (2015), apesar de o Brasil ser um grande produtor de frango, bovinos e suínos, a aquicultura foi o setor de carnes que apresentou maior incremento percentual em produção entre 2004 e 2014, com crescimento anual médio de quase 8%, contra 5,1% para bovinos, 4,1% para o frango e 2,9% para suínos. Kubitzka (2015) ainda destaca a indústria de produção de tilápia no Brasil. Enquanto a produção de peixes cresceu em torno de 10%, no período de 2004 a 2014, a tilapicultura teve um crescimento da ordem de mais de 14%.

O crescimento da aquicultura brasileira envolve uma série de problemas ambientais pouco explorados, sendo necessário que essa atividade siga princípios de sustentabilidade, adotando um sistema de gestão de meio ambiente (PELICICE *et al.*, 2017).

A chamada “Revolução Brasileira Azul” negligenciou aspectos sociais e ambientais básicos que comprometem seu próprio desenvolvimento. A expansão da aquicultura é suportada pelos seguintes componentes: (i) a produção é amplamente baseada em espécies não nativas, algumas com alto potencial invasivo, como espécies de carpas, tilápias e poecilídeos e ciclídeos ornamentais; ii) estações de aquicultura estão repletas de más práticas de gerenciamento ou ignoram as etapas práticas de PDCA (ou seja, Planejar, Fazer, Verificar, Agir); iii) fazendas de peixes, particularmente a aquicultura em gaiolas, estão planejadas para ocorrer principalmente em reservatórios hidrelétricos, conflitando com outros usos da água (por exemplo, suprimento de água) e facilitando invasões biológicas; (iv) os formuladores de políticas propuseram ou revisaram leis para estimular a indústria da aquicultura, enfraquecendo a proteção do meio ambiente (COELHO E HENRY, 2017).

Nos ecossistemas naturais, a magnitude dos impactos da aquicultura depende das espécies produzidas, método de produção, hidrografia da região, tipo de práticas de alimentação e gerenciamento fornecidas (CAO *et al.*, 2007). Práticas como fertilização de lagoas, aumento do fluxo da água para impedir a proliferação de algas e a qualidade e quantidade de alimentos, promovem o aumento dos nutrientes na água. Somente uma pequena parte desses nutrientes da ração é efetivamente revertida em biomassa de peixe; o restante é retido no sedimento ou exportado através de efluentes.

Quantificar os impactos gerados pela atividade aquícola por meio de indicadores ambientais é uma abordagem útil na busca da maior sustentabilidade ambiental dos produtos desse setor. No Brasil, embora escassos, foram realizados estudos sobre as questões ambientais importantes na aquicultura de trutas (CAMEL *et al.*, 2014; MORAES, 2014), na criação de sapos (BORGES *et al.*, 2012; MERCANTE *et al.*, 2014) e no sistema de policultura (tilápia/camarão) (ARAÚJO-SILVA *et al.*, 2014). Esses estudos mostraram que indicadores ambientais podem ser uma ferramenta útil para caracterização dos impactos ambientais, pois permitem a comparação de

diferentes sistemas, métodos de criação, avaliação da efetividade das práticas de gestão utilizadas no sistema de produção (KIMPARA *et al.*, 2010).

3.1.1 Tilápia do Nilo

Tilápia é o nome genérico para um grupo de ciclídeos constituído por três gêneros; *Oreochromis*, *Sarotherodon* e tilapia. A tilápia é nativa do meio Leste e África. Entretanto, há cultivo comercial de tilápia do gênero *Oreochromis* em muitos países fora da África. Mais de 90% do cultivo de tilápia desse gênero nesses países é de tilápia do Nilo (espécie *Oreochromis niloticus*) (WANG; LU, 2015).

A tilápia do Nilo é a segunda espécie mais cultivada no mundo e a primeira no Brasil, perdendo apenas para as carpas. É reconhecida pelo seu grande desempenho e capacidade de adaptação, rusticidade, elevada resistência a doenças e estresse, carne branca de boa qualidade, refletindo elevada aceitação no mercado consumidor e baixos custos de produção, podendo ser cultivada em áreas de alta salinidade e baixas temperaturas. Adicionalmente a tilápia apresenta um rápido crescimento atingindo o peso comercial em pequeno intervalo de tempo, sendo especialmente adequada para a cultura em países em desenvolvimento, de clima tropical e subtropical (IBGE, 2015).

A produção de tilápia no Brasil em 2017 foi estimada em aproximadamente 283,25 mil toneladas, o que representa uma contribuição de US \$ 1,58 bilhões para a economia brasileira. Essa produção coloca o país entre os quatro maiores produtores desta espécie no mundo, atrás da China, com 1,8 milhões de toneladas, Indonésia, com 1,1 milhão de toneladas, e Egito, com 800 mil toneladas (IBGE, 2018; PEIXEBr, 2018).

O estado do Ceará, atualmente, é o terceiro maior produtor de tilápia do Brasil, respondendo por 13,2% da produção nacional. A cidade de Jaguaribara é a líder na criação de tilápia, produzindo 13,8 toneladas do pescado, o que corresponde a 6,3% da produção nacional. Essa atividade gera um grande volume de resíduos, provenientes do processo de beneficiamento do pescado. Esses resíduos podem se tornar um problema ambiental quando não

enviados para compostagem, podendo poluir recursos hídricos, solo e ar (KARA *et al.*, 2017).

3.2 Colágeno

O colágeno é a principal proteína dos mamíferos correspondendo a 30% do total de proteínas, sendo componente estrutural do tecido conjuntivo e constituinte de peles, tendões, cartilagens, órgãos e ossos (RICARD-BLUM, 2011). Nos tecidos conjuntivos, o colágeno constitui a matriz extracelular, juntamente com as proteínas elastina e reticulina (JUNQUEIRA & CARNEIRO, 1990).

O colágeno está presente nos tecidos conjuntivos de todos os animais, podendo ser obtido de subprodutos das indústrias bovina, suína, avícola, pesqueira e outras. Entretanto, em escala piloto ou comercial, é extraído de resíduos de bois e suínos gerados em abatedouros, (CHI *et al.*, 2013).

Quase 28 tipos de colágeno já foram identificados, mas o colágeno tipo I é o mais comum em pele, osso, dentes, tendão, ligamentos, ligadura vascular e órgãos. O colágeno tipo II está presente nas cartilagens. Para o colágeno tipo III, a pele, os músculos e os vasos sanguíneos são as fontes mais comuns dessa proteína. O tipo IV foi relatado na camada secretada por epitélio da membrana basal e a lâmina basal. O colágeno tipo V é um dos principais componentes da superfície celular e das placentas. Os colágenos são diferentes de acordo com a composição da cadeia α , dependendo da repetição e duração da repetição de aminoácidos Gly – X – Y, com e sem interrupções, e também a ocupação do X e Y posições por prolina e sua forma hidroxilada, hidroxiprolina, respectivamente (LEÓN-LÓPEZ *et al.*, 2019).

A característica mais importante do colágeno é a sua composição de aminoácidos, fornecendo um alto nível de glicina e prolina, dois aminoácidos essenciais para a estabilidade e a regeneração das cartilagens. Portanto, apresenta efeitos benéficos ao organismo (WALRAND *et al.*, 2008).

Dentre os biopolímeros, o colágeno é o material de origem animal mais abundante e fornecedor de uma ótima base para biomateriais. Depois de extraído, o colágeno pode ser processado para obtenção de filmes, membranas e fibras. Quanto à produção de filmes, o colágeno é o material de natureza

proteica mais empregado. Sua conversão em gelatina envolve a hidrólise catalisada por ácido, base ou por aquecimento. Isso se deve ao fato da abundância dessa matéria prima que tem um baixo custo e possui excelentes propriedades funcionais (POPPE, 1997; CARVALHO & GROSSO, 2006; KOKOSZKA *et al.*, 2010).

É um produto de alto valor e tem sido fonte de investigação para uso piloto devido à sua abundância no tecido animal (bovinos, suínos, caprinos, ovinos, peixes, anfíbios, entre outros). Dentre os vários organismos utilizados para obtenção de colágeno destacam-se os peixes, especialmente devido a sua disponibilidade, ausência de risco de transmissão de doenças, barreiras religiosas, alto rendimento no processo de extração e ausência de toxicidade (OLIVEIRA, *et al.*, 2017).

3.2.1 Extração de colágeno

A crescente valorização de subprodutos industriais do colágeno é uma das principais razões para efetuar a extração de diferentes espécies de animais. A otimização das condições de extração de colágeno e de gelatina tem atraído pesquisadores na última década.

As principais fontes de colágeno são pele e carne de porco, couro e ossos bovinos. Assim, devido ao crescente interesse pelo colágeno, seu uso de fonte não mamífera tem aumentado (SILVA; PENNA, 2012).

Devido ao surto de encefalopatia espongiiforme bovina (EEB), Encefalopatia Espongiiforme Transmissível (EET), bem como gripe aviária em aves, colágenos obtidos a partir de recursos marinhos, especialmente do processamento de subprodutos de peixes, têm ganhado cada vez mais atenção como alternativa aos colágenos extraídos de animais terrestres (CHUAYCHAN; BENJAKUL; KISHIMURA, 2015).

A extração de colágeno de peixes tem sido realizada em várias espécies utilizando diferentes subprodutos, como a pele do robalo japonês (*Lateolabrax japonicus*) (KIM *et al.*, 2012), pele de palhaço pena (*Chitala ornata*) (KITTIPIHATTANABAWON *et al.*, 2015), bexiga de atum-amarelo (*Thunnus albacares*) (KAEWDANG *et al.*, 2014), pele e osso de peixe-serra japoneses (*Scomberomorous niphonius*) (LI *et al.*, 2013), cartilagem do esturjão japonês

(*Acipenser schrenckii*) (LIANG *et al.*, 2014), e as barbatanas, escamas, peles, ossos e bexigas de carpa-cabeçuda (*Hypophthalmichthys nobilis*) (LIU *et al.*, 2012).

Embora o pescado seja uma alternativa mais segura e atraente para isolamento de colágeno, esse colágeno é diferente do obtido de mamíferos em suas propriedades físicas e químicas. Os peixes vivem na água e sua temperatura corporal é muito menor do que a de um animal de sangue quente. Em particular, os colágenos de outras fontes têm estabilidade térmica diferente e têm correlação direta com a abundância relativa de aminoácidos (hidroxiprolina e prolina) no colágeno (PATI, ADHIKARI, DHARA, 2010).

A extração de colágeno das escamas e pele da tilápia não apenas melhoram o valor agregado da pele, mas também pode reduzir a poluição ambiental. No entanto, poucos estudos analisam as características do colágeno extraído de escama e pele da tilápia (CHEN *et al.*, 2016).

A utilização de ácido acético na extração de colágeno a partir da pele de Tilápia do Nilo permite obter um produto com alto grau de pureza. Com morfologia adequada e superfície livre de impurezas, estrutura química mantida durante a extração e integridade da triple hélice preservada, sendo excluída a possibilidade de desnaturação da proteína, em torno de 30°C (FIGUEIREDO, 2015).

Menezes *et al.* (2020), avaliou a obtenção de colágeno por uma rota ácida sob diferentes condições de extração para conseguir um colágeno com características ideais para preparar um hidrogel não tóxico. A melhor condição de extração do colágeno ASC foi em menores temperaturas de fusão (20°C), desnaturação utilizando ácido acético 0,35 Mol.L⁻¹ e tempo de 65 horas, onde se tem a vantagem de consumir menos energia tornando o colágeno mais barato. Como resultado foi possível criar hidrogel com parâmetros ideais para uso em engenharia de tecidos.

A extração de colágeno de tecido conjuntivo geralmente é realizada por solubilização do colágeno em ácido orgânico, obtendo-se a fração denominada de “colágeno solúvel em ácido”. Porém, este produto possui a estrutura nativa ou original do colágeno, sendo necessário utilizar uma enzima para degradação das ligações cruzadas covalentes nas regiões telopeptídicas. O ácido acético provoca intumescimento do tecido e dissolução das fibras

colagenosas permitindo melhor ação da pepsina para hidrólise do colágeno. Portanto, segundo GÓMEZ-GUILLÉN et al., (2011) a extração de colágeno com ácido acético e posterior hidrólise com pepsina é o método mais recomendado para obtenção de colágeno.

O uso de enzimas para extrair a proteína do colágeno é um método relativamente superior. As enzimas têm melhor seletividade de reação e são menos destrutivas para resíduos de aminoácidos. A enzima mais comum usada para extração de colágeno é a pepsina, porque quebra o colágeno onde a maioria das ligações cruzadas intermoleculares ocorre. Esta clivagem torna o colágeno mais facilmente digerido nos peptídeos. Além disso, a digestão com pepsina pode reduzir a antigenicidade porque a região do telopeptídeo antigênico é removida pela pepsina. Finalmente, a pepsina foi a melhor enzima para manutenção da estrutura repetida de colágeno Gly-X-Y (HONG et al., 2019).

Zou et al. (2017) utilizaram o ultrassom para auxiliar na extração de colágeno a partir de tartaruga de casca mole (*Pelodiscus sinensis*). O ultrassom aumentou significativamente o rendimento de colágeno comparado ao método de extração convencional com ácido. Além disso, segundo Zou et al. (2017) o colágeno extraído por ultrassom era mais propenso à digestão gastrointestinal in vitro.

3.2.2 Aplicações do colágeno

O colágeno é considerado um dos biomateriais mais usados por ter uma ampla gama de aplicações industriais (LAFARGA e HAYES, 2014). Isso se deve às suas propriedades incluindo biodegradabilidade, baixa antigenicidade e propriedade direta de adesão celular, além de suas propriedades gelificantes, emulsificantes, espumantes e micro encapsulantes. Por suas características, o colágeno é utilizado em alimentos, materiais biomédicos, produtos farmacêuticos e na indústria de cosméticos, além da indústria de couro e médica. A qualidade e aplicação específica do colágeno extraído está diretamente relacionada com suas propriedades funcionais e grau de pureza (SINTHUSAMRAN et al., 2013).

Na indústria dos alimentos a demanda de colágeno é alta devido a seu conteúdo proteico e suas propriedades funcionais (capacidade de absorção

de água, formação de gel e, sua capacidade de formar e estabilizar emulsões) formando parte dessa indústria como suplementos ou aditivos, formação de filmes e revestimentos comestíveis.

Na área da biomedicina e farmacêutica serve como material que contém o fármaco, proteínas e genes, como também pode substituir a pele do homem, vasos sanguíneos e ligamentos; por tais motivos na indústria cosmética é muito usado o colágeno para a prevenção e diminuição de rugas, géis, mascarilhas, injeções cutâneas, tratamentos para o cabelo com o fim de evitar queda e fraqueza, ou também, melhorar sua aparência deixando mais saudável (HASHIM *et al.*, 2015).

Na área médica, o colágeno tem aplicações cardíacas, em cirurgia estética, enxertos ósseos, regeneração de tecidos, usos cirúrgicos reconstrutivos e tratamentos de feridas. Foi evidenciado o uso do colágeno para o tratamento de feridas em forma de filmes (ALBANNA e HOLMES IV, 2016) ajudando na cicatrização e incentivando a formação do tecido conjuntivo devido à similaridade histológica e propriedades mecânicas do colágeno presente na pele humana (NORBURY *et al.*, 2016). Os aminoácidos glicina, prolina e hidroxiprolina são os possíveis responsáveis por essa similaridade, pois estão presentes em porcentagens próximas à da pele humana.

3.3 Avaliação do Ciclo de Vida – ACV

Segundo Rebitzer (2004), necessita-se de métodos e ferramentas que ajudem a quantificar e comparar os impactos ambientais dos bens (produtos) e serviços para se atingir o desenvolvimento sustentável. Todo produto tem uma “vida” que começa com o seu planejamento e a extração dos recursos naturais que vão possibilitar a sua existência. A sua produção e o seu uso/consumo são as fases seguintes, e, finalmente, o produto passa pelas atividades do fim de sua “vida” (coleta/separação, reúso, reciclagem, disposição dos resíduos).

O método de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi desenvolvido a partir da década de 60 tendo como foco a análise dos impactos ambientais de produtos, principalmente no contexto comparativo de materiais. Guinée *et al.* (2001) considera a fase das décadas de 70 a 90 como o período de concepção da ACV, quando diferentes abordagens e terminologias foram usadas com

resultados conflitantes, o que acabou limitando temporariamente a aplicação desse método. De acordo com Curran (2006), a emergência dos problemas associados à gestão de resíduos sólidos foi um grande fator revigorador da ACV a partir de 1988.

A década seguinte foi de padronização com a publicação das normas da série ISO 14040 (de 1997 a 2001), resultado da convergência conduzida pela SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*). Nesse período, também foram consolidados os softwares e banco de dados que foram, então, disponibilizados comercialmente, permitindo uma maior disseminação desse método.

Alguns autores (CHEHEBE, 1998; GRAEDEL, 1998) descrevem a ACV como sendo um instrumento de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou processo cuja abrangência compreende etapas que vão desde a retirada das matérias-primas elementares da natureza que entram no sistema produtivo (berço) à disposição final do produto após uso (túmulo). Assim, a Avaliação do Ciclo de Vida inclui extração e processamento da matéria-prima, manufatura, transporte, distribuição, uso, reuso, manutenção, reciclagem e disposição final. Isso possibilita uma visão abrangente dos diversos impactos provocados ao meio ambiente, favorecendo a identificação das medidas mais adequadas do ponto de vista ambiental e econômico para sua minimização. A partir dessa perspectiva, a ACV apoia o gerenciamento ambiental e desenvolvimento sustentável.

A ACV pode ser usada na indústria, organizações governamentais e não governamentais para:

- Identificar aspectos ambientais e processos críticos nas cadeias de produção e consumo;
- Identificar categorias de impactos mais relevantes;
- Comparar alternativas e tomar decisões sobre materiais, processos e produtos;
- Promover o *ecodesign* de processos e produtos.
- Promover *marketing* institucional e de produto.

Um estudo de ACV é dividido em quatro fases, de acordo com a norma ISO 14040, conforme apresentado na Figura 1. Na primeira fase, Definição do Objetivo e Escopo, define-se o contexto e identificam-se os limites da avaliação ambiental. Na formulação do objetivo são definidas perguntas que a ACV irá responder. Na definição do escopo, indica-se quais processos da cadeia de produção e consumo serão contemplados no estudo, qual função será avaliada para o produto ou processo, e quais categorias de impactos serão consideradas. A função deve ser quantificada por meio do estabelecimento de uma unidade funcional.

Na fase de Análise de Inventário, são identificados e quantificados os insumos e produtos utilizados, energia, resíduos e emissões para o ar, água e solo (CRUZ-DILONÉ, 2014) gerados em cada processo considerado no escopo do estudo. Essa fase envolve coleta de dados, refino de dados, cálculo e validação, análise de sensibilidade.

De acordo com a definição de Heijungs e Guinée (2007), a partilha das entradas e saídas entre os coprodutos é uma divisão artificial de um processo multifuncional em um número de processos monofuncionais independentes a partir de construções matemáticas, e que na verdade, não existem como casos reais. Na prática, isso significa que os impactos ambientais do sistema são compartilhados entre os coprodutos utilizando um critério especificado que pode ser baseado em propriedades físicas ou econômicas.

A alocação baseada em relações físicas é um dos procedimentos mais simples de aplicar, no entanto, determinar um critério físico que seja aplicável pode ser um pouco mais difícil em alguns casos. Nesse contexto, a norma ISO 14049 (2012) sugere o seguinte procedimento para encontrar um parâmetro físico de alocação: variar a relação entre os diferentes coprodutos para avaliar como os dados variam com a mudança na saída dos produtos.

No entanto, em alguns processos produtivos não se consegue realizar uma variação na razão entre os coprodutos e o produto a ser estudado sem acarretar em uma alteração significativa em parâmetros do processo, tais como consumo de energia. Como não é possível variar a razão entre os coprodutos, ainda que relações físicas sejam aplicadas por alguns autores, nenhum parâmetro físico pode ser justificado como preferível a outros, sendo indicado aplicar alocação baseada em critérios econômicos (ISO 14049).

Alocação econômica é a divisão das emissões de um processo entre o produto estudado e o(s) coprodutos (s) de acordo com a produção e os valores econômicos dos produtos ao sair do processo multifuncional. Basear a alocação em critério econômico é uma abordagem orientada para a utilidade dos coprodutos, que por sua vez é associada à motivação da produção.

O valor econômico é baseado em preço, que pode ser expresso em qualquer moeda, como dólares norte-americanos (US\$) ou euro (€) e a unidade de fluxo pode ser quantificada em qualquer quantidade e unidade em que os preços são apresentados, como unidade, massa (kg), energia (MJ ou kWh) ou volume (m³) desde que utilizado de forma consistente por meio de um cálculo (GUINÉE; HEIJUNGS; HUPPIES, 2004).

A avaliação de impacto é a terceira etapa da ACV. Após o inventário, a magnitude dos potenciais impactos ambientais, relacionados ao uso de recursos e emissões, serão calculados (CURRAN 2006).

Por fim, na fase de Interpretação, os resultados obtidos nas fases de Análise de Inventário e de Avaliação de Impacto são combinados e interpretados de acordo com os objetivos definidos previamente no estudo (COLTRO,2007).

Figura 1: Etapas da ACV segundo diretrizes da NBR ISO 14040:2009



Fonte: ISO 14.040/2009.

A ACV consiste basicamente em uma técnica que, através da quantificação das entradas e saídas de um sistema associado a um produto ou

serviço particular, realiza a avaliação dos impactos ambientais relacionados a estas entradas e saídas, realizando a interpretação dos resultados alcançados, de acordo com os objetivos estipulados para o estudo (ABNT, 2009).

Apesar de sua grande aplicabilidade, essa ferramenta apresenta limitações em sua metodologia. Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), as principais limitações são: as escolhas e suposições feitas na Avaliação do Ciclo de Vida podem ser subjetivas; os modelos utilizados na análise de inventário ou para avaliação de impactos são limitados pelas suposições; a exatidão da Avaliação do Ciclo de Vida pode ser limitada, em razão da qualidade e abrangência dos dados e a disponibilidade dos mesmos; e a falta de dimensões temporais e espaciais dos dados da ICV (Inventário do Ciclo de Vida) introduz incertezas nos resultados da análise.

3.3.1 Definição de Objetivo e escopo

O primeiro passo para a ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) é a definição do objetivo e escopo do estudo, sendo realizada uma descrição do que será ou não incluído no estudo. Nesta fase, segundo Guiné (2001), são feitas as escolhas iniciais que determinam o plano de trabalho da ACV do produto e são estabelecidas as principais características do estudo.

O objetivo, de acordo com a ABNT (2009), deve expor de forma clara a aplicação pretendida, as razões para executar o estudo, o público alvo a quem será comunicado os resultados e se existe intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas a serem divulgadas publicamente.

A fim de atingir o objetivo o escopo deve constituir uma série de informações qualitativas e quantitativas denotando o que será incluído no estudo e uma série de parâmetros chave que descrevem como o estudo será realizado (MATTHEWS *et al.*, 2015).

Segundo a ISO 14044 (ABNT, 2009), para o detalhamento do escopo alguns itens necessitam ser descritos, sendo eles: o sistema de produto a ser estudado; as funções do sistema de produto ou, no caso comparativo, dos sistemas; a unidade funcional; a fronteira do sistema; procedimentos de alocação, metodologia de AICV e tipos/categorias de impactos; interpretação a ser utilizada; requisitos de dados; pressupostos; escolha de valores e elementos

opcionais; limitações; requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados; tipos de revisão crítica, se aplicável; tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

A unidade funcional descreve a função primária satisfeita por um sistema de produto (ILCD, 2010). Um dos propósitos principais de uma unidade funcional é fornecer uma referência em relação à qual dados de entrada e saída são normalizados (no sentido matemático) (ABNT, 2009). A unidade funcional permite comparar processos e produtos equivalentes, ou seja, com funções semelhantes (COLLADO-RUIZ e OSTAD-AHMAD-GHORABI, 2010).

A fronteira do sistema determina quais processos elementares devem ser incluídos na ACV e o nível de detalhamento com que esses processos devem ser estudados. A seleção da fronteira do sistema deve ser consistente com o objetivo do estudo e os critérios utilizados na determinação da fronteira do sistema devem ser identificados e explicados. Deve-se também tomar decisões com relação a quais entradas e saídas serão incluídas (ABNT, 2009). Sendo assim, deve ser definido qual das abordagens (cradle-to-grave, cradle-to-gate ou gate-to-gate), serão adotadas no estudo.

AzariJafari *et al.* (2016), complementam que a definição do limite do sistema também envolve, levando em consideração o âmbito geográfico e temporal, a localização e o período de coleta de dados para a avaliação.

3.3.2 Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Nesta fase, todas as emissões liberadas para o ambiente e os recursos extraídos do ambiente ao longo de todo o ciclo de vida de um produto são agrupadas num inventário (UNEP, 2011).

Para realização da análise de inventário do ciclo de vida, a ISO 14044 recomenda desenhar um diagrama de fluxo, incluindo todos os processos dentro dos limites do sistema. O diagrama de fluxo fornece um resumo de todas as unidades de processos a ser modelada, incluindo as suas inter-relações. Este diagrama é útil para compreender e descrever o sistema, conferindo uma visão geral do mesmo para orientar a coleta dos dados (IFU HAMBURG GMBH, 2015).

A análise de inventário se resume em: coleta de dados, procedimentos de cálculo e alocação.

- i) coleta de dados:

A coleta de dados é uma das principais tarefas da fase de inventário e envolve grandes quantidades de dados. Para tornar estes comparáveis e coerentes entre si, um formato de dados padrão deve ser desenvolvido (GUINÉ, 2004) para essa coleta que pode abranger vários locais, assim como uso de dados publicados.

Deste modo, duas fontes de dados podem ser utilizadas para a coleta de dados: dados primários e dados secundários (ABNT, 2009). A primeira opção é coletar dados primários diretamente nos locais de produção e com fornecedores. No entanto, normalmente, nem todos os dados podem ser coletados como dados primários (por exemplo, com base em medições). Recorre-se então aos dados secundários. Neste caso alguns dados poderão ser estimados com base em conhecimento especializado e outros aproximados com a utilização de dados encontrados a partir de fontes publicadas, como por exemplo, nas bases de dadosecoinvent e GaBi (IFU HAMBURG GMBH, 2015).

ii) procedimentos de cálculo:

A validação pode ser efetuada, por meio do uso de balanços de massa, balanços de energia e/ou análises comparativas de fatores de emissão, com intuito de avaliar se as informações estão completas e sua variação no tempo. Caso anomalias sejam identificadas, dados alternativos podem ser empregados desde que estejam em conformidade com a seleção de dados estabelecida. Este processo, pode ser realizado com a ajuda de softwares para ACV, visando facilitar a tabulação e análise dos dados (ABNT, 2009).

O resultado desse processo, é uma tabela que constitui as entradas e saídas de cada processo referente ao inventário do ciclo de vida do produto, com valores agregados aos aspectos ambientais como energia, matérias-primas, emissões e resíduos etc. Nesta análise, é comum encontrar casos onde na mesma unidade de processo se obtenha além do produto principal um coproduto. Nestes casos, uma alternativa é utilizar algum critério de alocação (LUZ, 2017).

iii) alocação:

Quando o sistema envolve mais de um produto, os fluxos de materiais e de energia e as liberações associadas ao ambiente, devem ser alocados aos

diferentes produtos (ABNT, 2009). Ao enfrentar um problema de alocação, o primeiro passo deve ser sempre analisar o processo e buscar subdividir esse processo em processos individuais (IFU HAMBURG GMBH, 2015). Quando ainda assim é preciso alocar, deve-se privilegiar o uso de critério mássico e analisar a sensibilidade dos resultados quando critérios econômicos ou energéticos são adotados. Na alocação, o percentual de contribuição de um produto na massa total de produtos gerados em um processo é empregado para atribuir entradas e saídas ao inventário deste produto.

3.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) avalia a significância dos impactos ambientais potenciais relacionados ao ciclo de vida do produto. Isto significa, segundo Bare (2010), que a AICV fornece indicadores de impacto ambiental. É a base para analisar os potenciais contribuições das extrações de recursos, resíduos e emissões de um inventário para uma série de impactos potenciais de forma quantitativa.

Esta avaliação ocorre, por meio da correlação dos resultados da análise do inventário com categorias de impacto específicas, por meio de indicadores de categoria (ABNT, 2009). Obtém-se como resultado, uma avaliação com base em uma unidade funcional, em termos de várias categorias de impactos (ZHOU, CHANG e FANE, 2011).

As categorias de impacto, representam as questões ambientais de interesse as quais os resultados da análise do inventário podem ser associados (ABNT, 2009). Estas categorias estão associadas à escala de impactos globais (como por exemplo, mudanças climáticas e depleção da camada de ozônio), regionais e/ou locais (como é o caso da acidificação, escassez hídrica, qualidade do solo, perda da biodiversidade eutrofização, efeitos respiratórios e ecotoxicidade). Muitas categorias podem ser analisadas tanto na escala local, regional e global, como é o caso da perda de biodiversidade e escassez hídrica (análises por ecoregiões/bacias hidrográficas, país e globo) (FEHRENBACH et al, 2015).

A escolha das categorias de impacto, indicadores de categoria e abordagem dos impactos, juntamente com o modelo de caracterização, devem

estar relacionadas ao objetivo e escopo da ACV e abordar um conjunto de questões ambientais relevantes relacionadas ao sistema do produto em avaliação (ABNT, 2009).

Os modelos de caracterização apresentam indicadores e equações para geração de fatores de impacto para cada substância (recurso natural ou poluente). Existem disponíveis vários modelos para uma mesma categoria de impacto (HAUSCHILD *et al.*, 2013). Visando estabelecer um consenso sobre quais modelos empregar por categoria, a fim de promover comparações entre produtos e guiar programas de certificação ambiental, a União Europeia, em parceria com o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (UNEP) e outras instituições científicas, governamentais e não-governamentais, elaboraram e periodicamente revisam o guia para cálculo da pegada ambiental de produtos, baseado na ACV (Zampori *et al.*, 2019). Esse guia estabelece como modelos de caracterização os apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Categorias de impactos e modelos de caracterização

Categorias de Impacto Ambiental	Método Recomendado	Indicador	Classificação
Mudanças Climáticas	100 anos IPCC	kg CO ₂ eq.	I
Acidificação	Excedência Acumulada	Mol H ⁺ eq.	II
Eutrofização de Água Doce	Modelo EUTREND	kg P eq.	II
Eutrofização Marinha	Modelo EUTREND	kg N eq.	II
Toxicidade Humana, efeitos cancerígenos	USEtox model 2.1	CTUh	II/III
Toxicidade Humana, efeitos não cancerígenos	USEtox model 2.1	CTUh	II/III
Ecotoxicidade de Água Doce	USEtox model 2.1	CTUe	III
Escassez Hídrica	AWARE	m ³	III

Fonte: Adaptado de Zampori *et al.*, 2019.

3.3.4 Interpretação

Após a avaliação do impacto, a fase de interpretação orienta os tomadores de decisão, fornecendo uma melhor compreensão das incertezas e suposições relacionadas ao estudo. Salientam que a fase de interpretação é a chave para tornar os resultados da avaliação de impacto comparável e

compreensível, para então, poderem ser utilizados no processo de tomada de decisão (ZHOU *et al.*, 2011).

De acordo com Curran (2013), a interpretação inclui a comparação dos dados e resultados encontrados anteriormente no estudo para colocá-los no contexto adequado para a tomada de decisão considerando suas limitações. Hendrickson e Matthews (2015) complementam que a fase de interpretação se refere a estudar os resultados do objetivo e escopo, análise de inventário e avaliação de impacto, a fim de tirar conclusões e recomendações que podem ser relatados.

De acordo com a ISO 14044, as seguintes análises são usualmente empregadas nessa fase:

- Análise de pontos críticos: identifica os processos mais impactantes em um sistema de produto, assim como materiais e emissões mais impactantes para as categorias de impacto consideradas no estudo.
- Análise de incerteza: é um procedimento para determinar como as incertezas nos dados e pressupostos se propagam nos cálculos e como afetam a confiabilidade dos resultados da Avaliação do Impacto do ciclo de vida. O método de Monte Carlo pode ser aplicado em problemas de tomada de decisão a qual envolva incerteza, ou seja, situações nas quais o comportamento das variáveis envolvidas com o problema não é de natureza determinística (JÚNIOR; TABOSA; COSTA, 2011). De acordo com Gregory *et al.* (2013), é uma metodologia amplamente utilizada em estudos de ACV por meio de indicadores de qualidade dos dados, para os seguintes critérios de avaliação: confiabilidade, abrangência, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica adicional.
- Análise de sensibilidade: avalia a confiabilidade dos resultados finais e conclusões, determinando de que forma eles são afetados por mudanças nos dados, critério de alocação ou modelo de caracterização empregado. Nessa análise devem ser consideradas as questões predeterminadas pelo objetivo e escopo do estudo, resultados de todas as outras fases do estudo e pareceres de especialistas e experiências anteriores.

3.4 ACV ex-ante

Uma abordagem ex-ante é indispensável para uma comparação legítima de tecnologias emergentes com outras mais maduras que desempenham a mesma função. Portanto, uma primeira aplicação relevante da ACV ex-ante consiste em avaliar tecnologias em um estágio inicial de desenvolvimento. A ACV ex-ante pode ser usada para estimar o perfil ambiental de uma tecnologia emergente em escala piloto e usar essas informações para direcionar esforços de pesquisa ao comparar uma tecnologia emergente com uma tecnologia similar em escala piloto (BUYLE *et al.*, 2019).

No entanto, o conceito de ACV ex-ante não deve se limitar a tecnologias emergentes, sendo duas outras aplicações da ACV ex-ante merecem ser mencionadas. Em primeiro lugar, todas as tecnologias e sistemas de produtos evoluem com o tempo, mesmo os que estão maduros e abundantemente disponíveis em escala piloto há algum tempo.

É bem sabido que a aprendizagem tecnológica influencia o desempenho econômico e ambiental da produção de sistemas. Por exemplo, o conceito de curvas de aprendizagem (ou experiência) foi desenvolvido para vincular as reduções de custo empiricamente observadas de uma tecnologia para fatores-chave, como o cumulativo volume de produção ou a capacidade instalada. Se tais reduções de custo forem desencadeadas por um aumento na eficiência energética e / ou por uma gestão otimizada de materiais, é provável que esses fatores irão melhorar o desempenho ambiental também. Formalmente, a aprendizagem tecnológica pode ser descrita como um desenvolvimento devido a um aumento no conhecimento que vem de mais experiência (RUBIN *et al.*, 2015).

Em segundo lugar, uma vez que uma nova tecnologia ou sistema de produto é lançado comercialmente, sua penetração no mercado determina a magnitude das consequências ambientais no mix de mercado total. Podendo ser definido como difusão de tecnologia, sendo uma análise da forma e da taxa com que novos produtos, serviços e as ideias se espalham (GREEN, AGARWAL, LOGUE, 2015). Por exemplo, as tecnologias de energia renovável são normalmente consideradas uma alternativa ambientalmente correta para

combustíveis fósseis, mas por enquanto, seus benefícios potenciais são limitados pela sua baixa quota de mercado (MENTEN *et al.*, 2015).

Na ACV *ex ante*, as especificações do sistema e dados de novas tecnologias geralmente se originam de laboratório (escala de laboratório) ou de planta piloto (escala piloto). Os dados derivados dessas primeiras realizações de uma tecnologia (em escala de laboratório, escala piloto) geralmente não podem ser usados na avaliação de tecnologias futuras, pois está longe de ser representativa da indústria. Processos em escala industrial podem se diferenciar significativamente dos processos em escala de laboratório e em escala piloto quanto aos equipamentos e tecnologias utilizadas e quanto aos dados de desempenho (Piccinno *et al.* 2018; González-García *et al.* 2018). Em particular, os processos industriais são geralmente muito mais eficientes do que os processos em escala de laboratório ou em escala piloto devido à implementação de equipamento complexo e recursos sofisticados, por ex. sistemas de recuperação de calor e circuitos de reciclagem de resíduos.

Tsoy *et al.* (2020) desenvolveu uma estrutura para a melhoria de tecnologias emergentes em ACV *ex ante*. Essa estrutura é composta por três etapas principais: projeto de definição de cenário de tecnologia, preparação de um fluxograma de projeto de ACV e estimativa de dados projetados.

1) Projeto de definição de cenário de tecnologia: a primeira etapa requer experiência em tecnologia e não tanto em ACV. Um especialista em tecnologia desenvolve um cenário hipotético da tecnologia aprimorada. O especialista deve decidir sobre a operação de processo necessária, condições e instalações para a hipotética tecnologia aprimorada e pode projetar um diagrama de fluxo de processo.

2) Preparação de um fluxograma de projeto de ACV: o próximo passo envolve conhecimento especializado em ACV. Os resultados da primeira etapa são entregues ao praticante de ACV. O especialista em ACV desenvolve um fluxograma de ACV (envolvendo um especialista em tecnologia), por exemplo, agregando instalações em processos unitários e definir função, unidade funcional, fluxo de referência, sistema limites, etc.

3) Estimativa de dados projetados: os dados precisam ser estimados para os processos unitários definidos no fluxograma ACV usando métodos de estimativa de dados. Normalmente, a estimativa de dados é realizada por um especialista em ACV, mas também envolve especialistas em tecnologia, por exemplo, para aplicar *software* de simulação de processo e para verificação de suposições e dados finais. A estimativa de dados da etapa é realizada em interação com a segunda etapa.

Apesar da crescente consciência da importância de incorporar possíveis evoluções futuras na ACV, a implementação atual da ACV ex-ante ainda é bastante limitada e não uniforme. Esta não uniformidade resulta na criação de uma variedade de definições, conceitos, abordagens e procedimentos, cada um deles visando diferentes aspectos orientados para o futuro (BUYLE *et al.*, 2019).

3.5 ACV da produção de tilápia

A pesca e aquicultura podem acarretar diversos impactos ambientais nas três áreas de proteção ambiental: recursos naturais, qualidade dos ecossistemas e saúde humana. A pesca contínua e não seletiva tem resultado na perda de recursos bióticos, enquanto a ocupação de áreas para aquicultura em tanques escavados em áreas interiores tem promovido mudanças no uso da terra e escassez. A ração não consumida e os resíduos de antibióticos acarretam impactos diversos no meio ambiente que vão além da eutrofização e toxicidade, abrangendo a transmissão de doenças e dispersão de espécies não nativas que afetam a biodiversidade (ABDOU *et al.*, 2017).

Para Abdou *et al.* (2017) e Gracia *et al.* (2019), a fase de produção do peixe é o principal fator de eutrofização, principalmente devido às substâncias derivadas de alimentos para animais, a ração não digerida vira resíduo contendo nitrogênio e fósforo dissolvido em efluentes.

Além dos impactos ambientais diretos da atividade pesqueira e aquícola, impactos indiretos relacionados à produção de ingredientes (arroz) para a alimentação de peixes, uso de energia (por exemplo, combustível, eletricidade) e construção de infraestrutura e edifícios também precisam ser

considerados. O uso da abordagem de ciclo de vida na avaliação dos impactos de produtos oriundos do pescado permite entender melhor as consequências ambientais da aquicultura e garantir sua sustentabilidade (ABDOU *et al.*, 2017).

Yacout *et al.* (2016) notou que o consumo de energia e a produção de farinha de peixe são os principais pontos críticos que afetam o desempenho ambiental na produção de tilápia. Esses autores sugeriram que a redução desses impactos poderia ser minimizada reformulando receitas de ração para peixe, utilizando ingredientes com menor impacto para o meio ambiente.

Nhu *et al.* (2015) identificou que o consumo de água (principalmente na filetagem e congelamento) e uso de eletricidade (no congelamento, abastecimento de água, tratamento de águas residuais) são as causas principais no aumento dos impactos em produtos derivados da pesca. Para melhorar o sistema de produção, foi proposto que deve ser diminuído o uso da água, eletricidade e materiais de embalagem através de boas práticas de gestão em processamento.

Richard *et al.* (2018) notou que impactos no potencial de depleção de ozônio ocorreu devido ao uso de gás refrigerante no processamento do pescado. O desenvolvimento de produtos (como biogás, fertilizantes e hidrolisados) a partir dos resíduos do processamento é apontado como medida para reduzir os impactos na cadeia.

Os resultados desta revisão mostram que na maioria dos estudos relacionados à produção aquícola e pesca, o manejo alimentar é um dos principais contribuintes para a maioria dos impactos (redução de recursos e eutrofização). Já no processamento do pescado, destaca-se o consumo de energia utilizada para processamento e congelamento dos produtos (intensificando o impacto de redução de recursos) e elevado consumo de água nas etapas de processamento do pescado (escassez hídrica).

É necessário o aprofundamento de estudos de ACV avaliando outras categorias de impactos ambientais relacionadas a produção aquícola e processamento de pescado, como mudança no uso da terra, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática, e depleção de recursos bióticos.

3.6 Escalonamento da produção

O desenvolvimento de processos industriais exige tempo e investimentos no desenvolvimento de equipamentos, processos e produtos, incluindo o fato da necessidade de se estudar a fundo o novo processo a fim de obter-se a sua otimização. No mercado atual, é necessário rapidez no desenvolvimento dos novos processos, baixos custos e baixos impactos ambientais a fim de permitir uma maior competitividade face aos concorrentes.

Segundo Vercellis (2009), as empresas operam num mundo de negócios cada vez mais competitivo uma vez que o ambiente organizacional está sujeito a alterações constantes. Como consequência, a capacidade de responder rapidamente a essas alterações, ou seja, de inovar, tornou-se cada vez mais num fator crítico de sucesso.

Pinedo (2012), que afirma: “*Scale-up*” (*escalonamento*) é o processo de tomada de decisão que é utilizado regularmente em muitas indústrias de transformação e de serviços. Trata-se de alocar os recursos (máquinas, unidades de processamento, tripulação, e outros, dependendo do sistema em que se encontram), as tarefas (operações realizadas através da utilização dos recursos), num dado período de tempo, com a finalidade de otimizar um ou mais objetivos, que também podem assumir diferentes formas, como, por exemplo, a minimização do tempo de execução total ou a minimização do número de tarefas que são completadas após a data prevista”.

De acordo com Paiva (2005), a modelagem e simulação é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponível para projeto e operação de processos ou sistemas. Esta pode ser útil em qualquer uma das fases do ciclo de vida de um sistema de produção: desde a fase de análise do problema e definição de requisitos, até as fases de projeto e operação.

Existem inúmeras vantagens de se utilizar softwares de simulação para o desenvolvimento de novos processos. Como etapa anterior ao desenvolvimento do processo em escala laboratorial esses simuladores podem ser utilizados com o intuito de se obter uma diminuição no tempo de desenvolvimento do processo, estabelecer a oportunidade de comparação entre várias alternativas de processos e possibilitar o estudo das interações existentes entre as correntes de entrada e saída dos equipamentos (PRADO, 2009).

3.6.1 *Software* SuperPro Designer®

O *software* SuperPro Designer® foi desenvolvido por Demetri Petrides como objeto de sua tese de Doutorado e é comercializado pela companhia Intelligen, Inc., Scotch Plains, NJ. O *software* foi desenvolvido com mais de 140 operações unitárias e pode simular processos de indústrias químicas, farmacêuticas, alimentícias, biotecnológicas entre outras.

Segundo Intelligen (2014), o SuperPro Designer® é um conjunto de ferramentas computacionais para projeto e avaliação de especialidades químicas, farmacêuticas, agroquímicas, alimentos, reciclagem e tratamento de resíduos. Ele possibilita a simulação de processos, avaliação econômica e o planejamento de atividades, sendo amplamente utilizado por cientistas e diversas companhias do mundo.

O simulador de processos SuperPro Designer® é um *software* moderno de processos industriais, constituído de módulos que representam os processos das indústrias químicas incluindo separadores, trocadores de calor, bioreatores, etc. O simulador apresenta um conjunto de ferramentas capazes de estimar parâmetros econômicos de processos, realizar balanços de massa e energia, analisar tempo de processamento, entre outras funções. O *software* permite que o usuário analise operações unitárias básicas individuais ou a combinação destas operações unitárias para uma análise integrada (PEREIRA, 2015). Vários tipos de configurações de processos podem ser estudados através do fluxo de diagramas esquemáticos produzidos pelo usuário. O *software* permite a documentação detalhada dos resultados expressos como relatórios de avaliação econômica e dos dados de entrada e saída (FLORA et al., 1999).

O *software* simula matematicamente as operações unitárias de um processo e fornece vários dados químicos, físicos e fenomenológicos de um processo a partir de seu banco de dados. O banco de dados contempla materiais e equipamentos e suas propriedades. A partir desses dados o simulador é capaz de juntar e calcular as correntes das diversas operações unitárias de um processo produtivo (EVANS; FIELD, 1988).

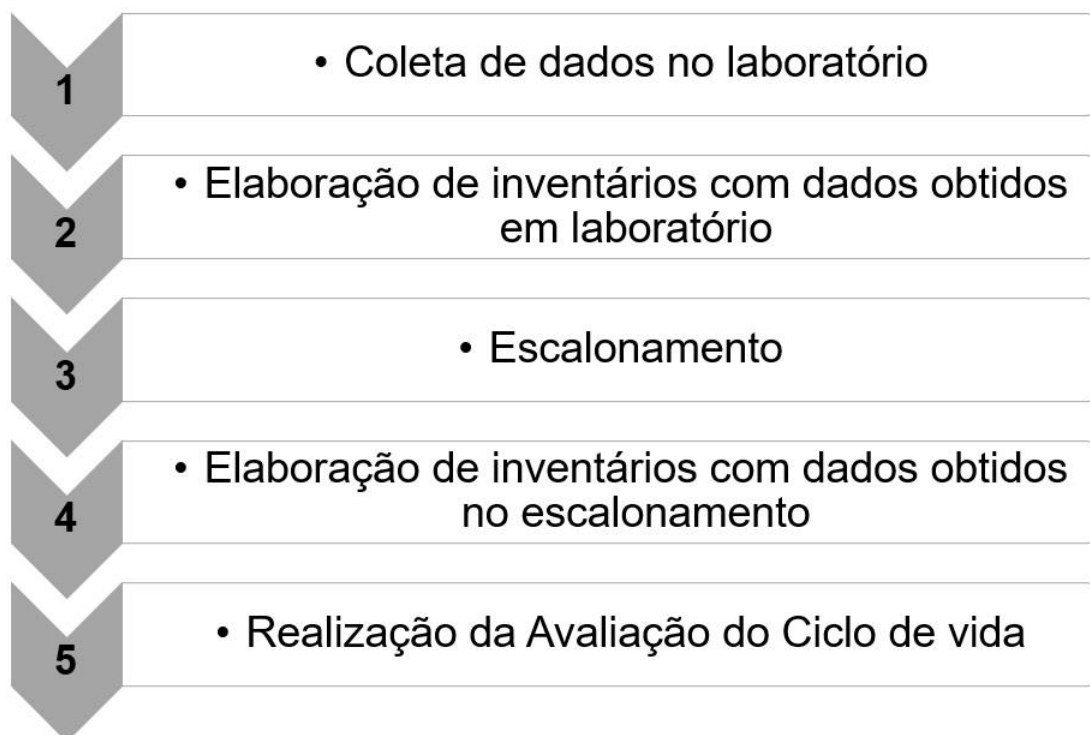
O *software* SuperPro Designer possibilita simular processos em batelada, processos múltiplos ou processos multipropósitos. Também oferece

um banco de dados padrão e a possibilidade de customizar o banco de dados (PETRIDES, 2000).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse estudo foi realizado em 5 etapas (Figura 2). A primeira etapa foi a coleta de dados em laboratório, realizada no Laboratório de Tecnologia da Biomassa da Embrapa Agroindústria Tropical (LTB), Fortaleza – CE, Brasil entre agosto e dezembro de 2019. Essa coleta de dados permitiu a elaboração dos inventários de entradas de matéria-prima e insumos e saídas de produtos, coprodutos e resíduos das rotas ASC e PSC. Utilizando os dados inventariados na primeira etapa, foi possível realizar o escalonamento, que ocorreu entre os meses de janeiro e novembro de 2020 com o uso do *software* SuperPro Designer®. Ao fim do escalonamento, foi possível gerar inventários das rotas escalonadas, a partir de relatórios desse *software*. Por fim, realizou-se a ACV-ex ante de acordo com as normas NBR ISO 14040 (2014a) e 14044 (2014b).

Figura 2: Etapas do Estudo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

4.1 Etapa 1: Coleta de dados no laboratório

Os dados para realizar o balanço de massa foram coletados em laboratório a partir da execução das metodologias de extração do colágeno descritas nos itens 4.1.1 (Rota ASC) e 4.1.2 (Rota PSC). Essas rotas estudadas são compostas pelas seguintes etapas: extração de proteínas não colagenosas, extração de lipídeos, extração do colágeno, filtração do colágeno, precipitação, centrifugação, diluição, diálise, liofilização e moagem do colágeno. As rotas ASC e PSC se diferenciam por tempos de reações, concentrações das soluções, tempo das operações unitárias e quantidades de operações. Os equipamentos utilizados em laboratório estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Equipamentos utilizados em laboratório na extração das rotas de extração de colágeno.

Equipamento	Etapa Utilizada
Banho Ultratermostatizado	Extração de proteínas não colagenosas, Extração de lipídeos, Extração de colágeno
Agitador Mecânico	Extração de proteínas não colagenosas, Extração de lipídeos, Extração de colágeno
Bomba de vácuo	Filtração
Centrífuga	Centrifugação
Câmara de Resfriamento	Precipitação do Colágeno
Ultra freezer	Liofilização
Liofilizador	Liofilização
Moinho	Moagem

Fonte: Elaboração Própria, 2021.

4.1.1 Descrição da Rota ácido-solúvel (ASC), em laboratório

O fluxograma mostrado na Figura 3 detalha o processo de obtenção de colágeno utilizando uma rota ácido-solúvel (ASC). A primeira etapa desse processo é a retirada de proteínas não colagenosas, onde a pele de tilápia é inserida em um banho ultratermostatizado sob agitação mecânica constante contendo solução de hidróxido de sódio. Posteriormente, a suspensão de pele e hidróxido foi retirada do banho ultratermostatizado e filtrada em peneira, gerando o primeiro efluente. Depois, a pele foi lavada com água destilada até neutralização do pH, gerando um segundo efluente.

Na fase de retirada de lipídeos, a pele entumecida foi colocada em banho ultratermostatizado sob constante agitação mecânica contendo uma solução de etanol (C_2H_5OH). Depois, a suspensão pele e etanol foi retirada do banho ultratermostatizado e filtrada utilizando uma peneira, resultando em um terceiro efluente com resíduos de pele e etanol. Em seguida, a pele foi lavada com água destilada para retirar o excesso de etanol, obtendo-se um quarto efluente.

Depois da retirada de proteínas não colagenosas e de lipídeos a pele entumecida foi colocada em banho ultratermostatizado, com constante agitação mecânica, com uma solução de ácido acético (CH_3COOH).

Logo após, o material extraído foi diluído em uma solução de ácido acético (CH_3COOH) e filtrado em tecido não tecido (TNT) de polipropileno em uma bomba à vácuo. O procedimento anterior gerou material filtrado e resíduo orgânico (composto de pedaços de pele de tilápia). Foi adicionado cloreto de sódio ($NaCl$) ao material filtrado. A solução foi deixada em repouso para que o colágeno se precipitasse.

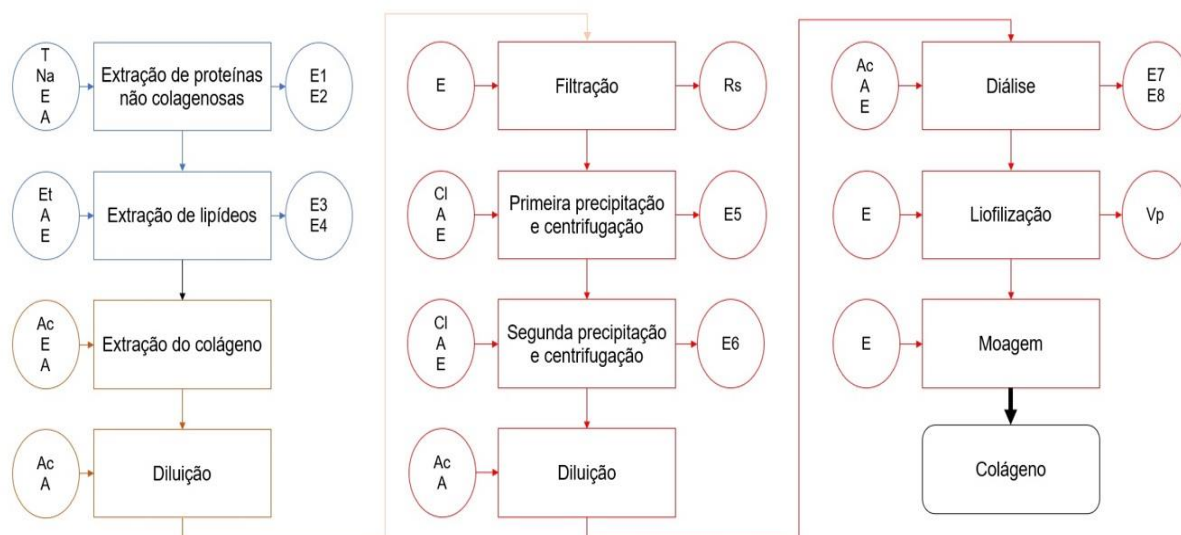
Posteriormente, o material precipitado foi centrifugado, com a intenção de retirar a solução de cloreto de sódio do colágeno, ao final obteve-se material colagenoso e um quinto efluente proveniente da centrifugação (sobrenadante). Em seguida, o material colagenoso obtido foi diluído em uma solução de ácido acético (CH_3COOH) e adicionou-se cloreto de sódio ($NaCl$) nessa solução que foi deixada em repouso para uma nova precipitação do colágeno.

Em seguida, a solução foi centrifugada com o objetivo de remover a solução de cloreto de sódio, obtendo-se material colagenoso e um sexto efluente (sobrenadante).

Com o objetivo de dissolver o material colagenoso, foi adicionada solução de ácido acético. Em seguida, o colágeno foi posto em diálise em solução de ácido acético (CH_3COOH). Logo após, o material foi submerso em água destilada, onde foram feitas trocas diárias até o colágeno ficar com pH neutro. Adquiriu-se após esse processo colágeno dialisado e um sétimo efluente (composto da água destilada utilizado nas trocas).

Com a finalidade de liofilizar o material obtido, a amostra foi encaminhada para congelamento, e logo após, para o liofilizador. Por fim, a amostra foi moída em um moinho analítico.

Figura 3: Fluxograma do processo de obtenção de colágeno baseado na rota ácido-solúvel (ASC)



Legenda

T: Pele de tilápia; Na: Hidróxido de Sódio; E: Energia elétrica; A: Água; Et: Etanol; Ac: Ácido Acético; Cl: Cloreto de Sódio; E1: Efluente 1; E2: Efluente 2; E3: Efluente 3; E4: Efluente 4; E5: Efluente 5; E6: Efluente 6; E7: Efluente 7; E8: Efluente 8; Rs: Resíduo Úmido; Vp: Vapor.

Fonte: Elaboração própria, 2020.

4.1.2 Descrição da rota pepsina-solúvel (PSC), em laboratório

A Figura 4 mostra as etapas do processo de obtenção de colágeno através de uma rota pepsina-solúvel (PSC). Inicialmente, é realizada a retirada de proteínas não colagenosas da pele de tilápia do Nilo, onde a pele é inserida em um banho ultratermostatizado sob agitação mecânica constante contendo solução de hidróxido de sódio. Posteriormente, a suspensão de pele e hidróxido foi retirada do banho ultratermostatizado e filtrada em peneira gerando o primeiro efluente. Depois, a pele foi lavada com água destilada até neutralização do pH, gerando um segundo efluente.

Na fase de retirada de lipídeos, a pele entumecida foi colocada em banho ultratermostatizado sob constante agitação mecânica contendo uma solução de etanol. Depois, a suspensão pele e etanol foi retirada do banho ultratermostatizado e filtrada utilizando uma peneira, resultando um terceiro

efluente com resíduos de pele e etanol. Em seguida, a pele foi lavada com água destilada para retirar o excesso de etanol, obtendo-se um quarto efluente.

Depois da retirada de proteínas não colagenosas e de lipídeos a pele entumecida foi colocada em banho ultratermostatizado com uma solução de ácido acético e nessa solução foi inserida uma enzima.

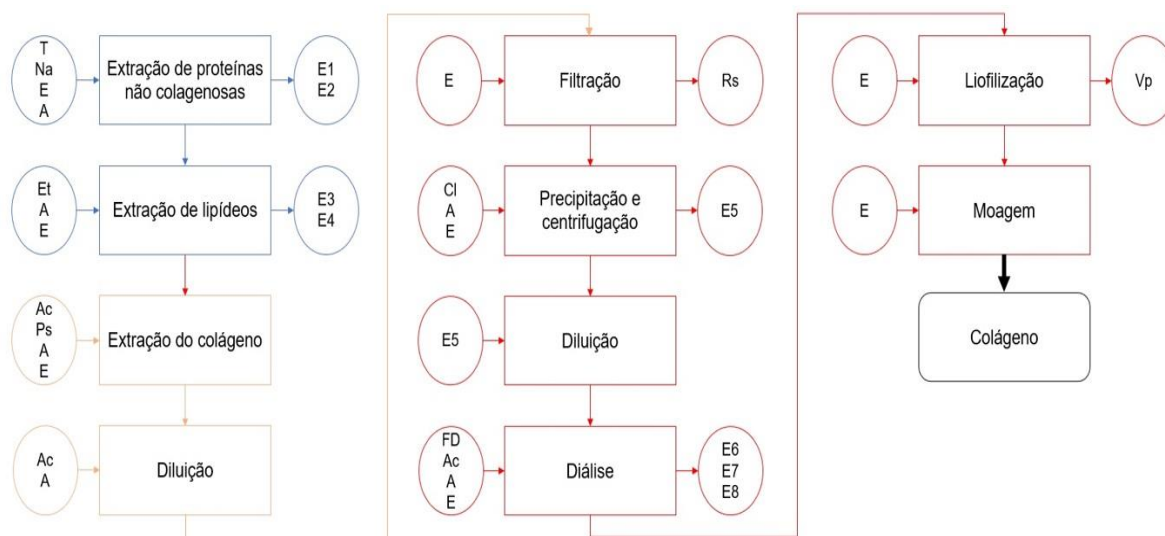
Logo após, o material extraído foi diluído em uma solução de ácido acético e filtrado em tecido não tecido (TNT) de polipropileno em bomba à vácuo. O procedimento anterior gerou material filtrado e resíduo orgânico (composto de pedaços de pele de tilápia). Foi adicionado cloreto de sódio (NaCl) ao material filtrado. A solução foi deixada em repouso para que o colágeno se precipitasse.

Posteriormente, o material precipitado foi centrifugado com a intenção de retirar a solução de cloreto de sódio do colágeno, ao final obteve-se material colagenoso e um quinto efluente proveniente da centrifugação (sobrenadante).

Com o objetivo de dissolver o material colagenoso, foi adicionado parte do quinto efluente na amostra. Em seguida, o colágeno foi posto em diálise em uma solução de fosfato de sódio dibásico (Na_2HPO_4), em seguida o material foi colocado em solução de ácido acético (CH_3COOH). Em seguida, o material foi submerso em água destilada, onde foram feitas trocas diárias até o colágeno ficar com pH neutro. Adquiriu-se após esse processo colágeno dialisado e um sétimo efluente (composto da água destilada utilizado nas trocas).

Com a finalidade de liofilizar o material obtido, a amostra foi encaminhada para congelamento, e logo após, para o liofilizador. Por fim, a amostra foi moída em moinho analítico.

Figura 4: Fluxograma do processo de obtenção de colágeno baseado na rota pepsina-solúvel (PSC)



Legenda

T: Pele de tilápia; Na: Hidróxido de Sódio; E: Energia elétrica; A: Água; Et: Etanol; Ac: Ácido Acético; Cl: Cloreto de Sódio; Ps: Pepsina a; FD: Fosfato dissódico; E1: Efluente 1; E2: Efluente 2; E3: Efluente 3; E4: Efluente 4; E5: Efluente 5; E6: Efluente 6; E7: Efluente 7; E8: Efluente 8; Rs: Resíduo Úmido; Vp: Vapor.

Fonte: Elaboração própria, 2020.

4.2 Etapa 2: Elaboração de inventário com dados de laboratório

Foram medidas massa e vazão (efluentes) de todas as entradas e saídas das etapas dos processos ASC (Figura 3) e PSC (Figura 4) para estruturação dos inventários. Esses dados foram coletados no Laboratório de Tecnologia da Biomassa da Embrapa Agroindústria Tropical (LTB), Fortaleza – CE, Brasil entre agosto e dezembro de 2019. Durante esse período, também foram coletadas amostras de efluentes das duas rotas de extração e encaminhadas para o Laboratório H₂O Analysis, Fortaleza – CE, para caracterização de efluentes das etapas de retirada de proteínas não colagenosas (efluente 1), neutralização da pele (efluente 2), retirada de lipídeos (efluente 3) e centrifugação (efluente 5).

Para a caracterização dos efluentes, foram selecionados os seguintes parâmetros: condutividade elétrica, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), fósforo, nitrato, nitrogênio amoniacal total, nitrogênio total, pH e sólidos suspensos totais. A DQO da amostra do efluente 4 da rota pepsina-solúvel foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Biomassa

da Embrapa Agroindústria Tropical (LTB). As análises foram realizadas segundo APHA (2012 e 2017) e utilizando como valores de referência o Artigo 11 da Resolução Coema N° 02 de 02 de fevereiro de 2017 (CEARÁ, 2017) conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Metodologias analíticas dos parâmetros analisados

Parâmetro	Unidade	Metodologia	Referência
Condutividade Elétrica	µS/cm	MÉTODO 2510 B / 2520 B	APHA, 2017
Demanda Bioquímica de Oxigênio	mg/L	SM 5210 B / ABNT NBR 1261	APHA, 2012
Demanda Química de Oxigênio	mg/L	SM 5220 D	APHA, 2012
Fósforo	mg/L	SM 4500 C. 4 - 153	APHA, 2012
Nitrato	mg/L	SM 4500 NO3 D	APHA, 2017
Nitrogênio Amoniacal Total	mg/L	SM 4500 F. 4- 115	APHA, 2012
Nitrogênio total	mg/L	SM 4500 N C.	APHA, 2012
pH	-	SM 4500 (H+) - B.	APHA, 2017
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	SM 2540 D	APHA, 2012

Fonte: Elaboração própria, 2020.

4.3 Etapa 3: Escalonamento das rotas avaliadas

A simulação das rotas ASC e PSC em escala piloto utilizou *software* SuperPro Designer, que através de um modelo matemático executou cálculos de balanço de material e energia para cada operação escolhida dentro de cada equipamento. A extração em escala de laboratório e as suas condições operacionais foram usadas para simular a extração do colágeno em escala piloto. A especificação dos equipamentos foi feita utilizando equipamento com as mesmas funções dos equipamentos utilizados em laboratório. Considerou-se que a relação entre quantidade de matéria-prima (pele de tilápia) e insumos na produção em nível laboratorial se manteve na simulação da produção em escala piloto. Estabeleceu-se que o funcionamento da planta foi de 7.889,12 horas para a rota ASC e 7.871,03 horas, para a rota PSC, totalizando aproximadamente 328 dias/ano de funcionamento para as duas rotas.

Para reduzir o tempo de batelada das rotas, foram utilizados vários equipamentos operando em modo escalonado (ou seja, alternando de lote a lote) para etapas (procedimentos) que têm tempos de ciclo longos. Essa função foi ativada nos equipamentos das etapas de extração de proteínas não colagenosas, extração de lipídeos e purificação por membranas, em ambas as rotas.

Nesse trabalho, todo efluente líquido e sólido gerado nas rotas avaliadas foi encaminhado para sistemas de tratamento de efluente e aterro sanitário. A consideração de procedimentos de reuso de água e calor será objeto de estudo posterior, não sendo parte do escopo deste trabalho.

4.4 Etapa 4: Elaboração dos inventários com dados obtidos no escalonamento

Para a criação dos inventários do escalonamento, utilizou-se os seguintes relatórios gerados pelo software SuperPro Designer:

- Relatório de Materiais e Fluxos, contendo dados relacionados as entradas e saídas de cada corrente do sistema; como materiais a granel por seção e por material e detalhamento da composição de cada fluxo do sistema.
- Relatório de Avaliação Econômica, contendo dados sobre especificações dos equipamentos utilizados no sistema; como especificações e custos de equipamentos e materiais, custo de tratamento de resíduos e custo anual de operação.
- Relatório de Custos Discriminados, contendo dados de consumo de energia e agentes de transferência de calor utilizados pelos equipamentos do sistema; como custo do processo, utilidades e resíduos por seção.
- Relatório de Equipamentos Auxiliares, contendo dados de consumo de agente de limpeza utilizados para a manutenção dos equipamentos do sistema; como detalhes de ocupação dos equipamentos e consumo de agente de limpeza por seção.

4.5 Etapa 5: Execução da ACV

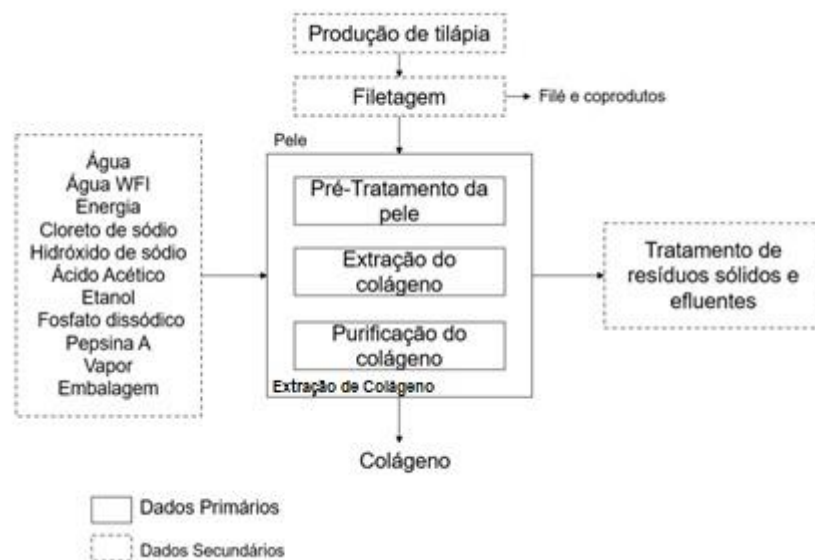
4.5.1 Objetivo, unidade funcional e escopo do estudo

A ACV considerou duas rotas de obtenção de colágeno a partir de pele de tilápia em simulação de escala piloto de produção (descritas na seção 4.1): ácido-solúvel (ASC) e pepsina-solúvel (PSC). Essa avaliação buscou identificar pontos críticos nas duas rotas de extração, indicar e avaliar oportunidades de redução de impactos ambientais nessas rotas e, ao final, indicar rota com melhor desempenho ambiental.

Como o foco é a comparação e melhoria de processos, a função analisada foi de produção de colágeno. Assim, a unidade funcional utilizada foi a produção de um quilograma de colágeno extraído de pele de tilápia.

O escopo deste estudo foi do “berço ao portão”, englobando os processos de produção de tilápia, produção de insumos, e extração de colágeno (Figura 5).

Figura 5: Limites do Sistema



Fonte: Elaboração Própria, 2020.

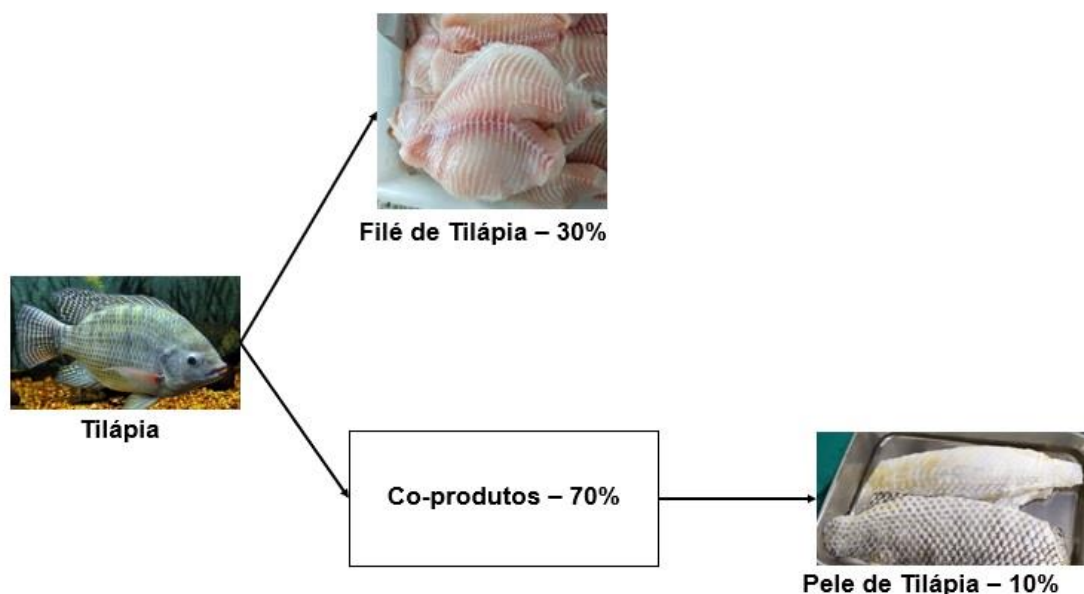
4.5.2 Alocação de dados

O processo de filetagem de tilápia resulta no filé (produto) e em coprodutos de baixo valor no mercado: pele, cabeça, vísceras, escama e carcaça. Empregou-se alocação mássica nesse processo de produção da tilápia, onde a pele representa apenas 10% da massa total da tilápia.

Na escala laboratorial, considerou-se que esse processo é manual, sendo as quantidades de produto e coprodutos por massa de tilápia extraídas do estudo de Vidotti & Gonçalves (2006). Já na escala piloto, adaptou-se o inventário de truta congelada da base de dados *Ecoinvent* v3.7. As seguintes mudanças foram realizadas nesse processo: a produção de truta foi substituída pela produção da tilápia e os coprodutos obtidos pelo processo de filetagem foram encaminhados para a produção de farinha de peixe. O processo de filetagem tem rendimento médio de 30% de filé, e 70% de co-produtos (cabeça, carcaça, vísceras, pele e escamas).

A Figura 6 mostra a distribuição mássica da filetagem da tilápia, empregada na alocação de entradas e saídas desse processo.

Figura 6: Distribuição mássica da filetagem da tilápia-do-Nilo



Fonte: A partir de Vidotti&Gonçalves, 2006.

4.5.3 Dados secundários de inventário

Os dados secundários, referentes aos inventários de produção da maioria dos insumos foram provenientes da base de dados suíça *Ecoinvent* v3.6. Também foram utilizados inventários do *Ecoinvent* referentes a filetagem, tratamento de resíduos sólidos e líquidos dos processos de extração.

Considerou-se que os resíduos sólidos foram enviados para aterro sanitário para resíduos biogênicos ou não tratados, com sistema de coleta de gás de aterro e chorume. Os efluentes líquidos foram enviados para tratamento de águas residuais de médio porte (tratamento mecânico, biológico e químico, incluindo a digestão do lodo). A Tabela 4 mostra o nome dos inventários coletados da base de dados *Ecoinvent*.

A rota pepsina-solúvel (PSC) utiliza enzima (pepsina a) no seu processo, o inventário desse insumo foi gerado a partir da análise do trabalho realizado por Nielsen (1995).

Tabela 4: Dados secundários coletados da base de dados do Ecoinvent

Processo/Recurso	Nomenclatura na base de dados
Produção de Tilápia	Tilapia {RLA} tilapia production, extensive aquaculture, in pond APOS, U
Água da natureza	Water, well, in ground BR (in water)
Produção de energia	Electricity, high voltage {BR} production mix APOS, U
Produção de cloreto de sódio	Sodium chloride, powder, at plant/RER U
Produção de hidróxido de sódio	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant/RER U
Produção de ácido acético	Acetic acid, without water, in 98% in H ₂ O, at plant/RER U
Produção de etanol	Ethanol, 95% in H ₂ O, from sugar cane, at fermentation plant/BR U
Produção de vapor	Steam, for chemical processes, at plant/RER U

Produção de água WFI (Água para injetáveis)	Water, ultrapure {RoW} production APOS, U
Produção de fosfato dissódico	Sodium {GLO} market for Alloc Def, U
	Phosphate rock, as P ₂ O ₅ , beneficiated, wet {US} phosphate rock beneficiation, wet Alloc Def, U
	Hydrogen, liquid {RoW} market for Alloc Def, U
	Oxygen, liquid {RoW} market for Alloc Def, U
Tratamento de resíduos Sólidos	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, U
	Compost {RoW} treatment of biowaste, industrial composting APOS, U
Tratamento de efluentes líquidos	Wastewater, unpolluted {BR} treatment of, capacity 5E9l/year Alloc Def, U
Filetagem	Adaptado de Trout, slaughtered, frozen (Market regulated)

Fonte: Elaboração própria, 2020.

4.5.4 Avaliação de impactos ambientais

Nesse estudo, foram consideradas as seguintes categorias de impacto, seguindo os modelos de caracterização indicados por Zampori *et al.* (2019) para estudos de pegada ambiental de produtos na União Europeia: escassez hídrica (AWARE), mudanças climáticas (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas - IPCC, 100 anos), acidificação (Excedência Acumulada), ecotoxicidade de água doce (USEtox model 2.1), eutrofização marinha e de água doce (Modelo EUTREND), toxicidade humana cancerígena e não cancerígena (USEtox model 2.1).

4.5.5 Análise de Incerteza

Após o cálculo dos impactos ambientais nas categorias selecionadas, foi realizada análise de incerteza utilizando o método de Monte Carlos. O desvio

padrão geométrico dos parâmetros de entrada e saída dos inventários foram calculados utilizando a Matriz Pedigree, enquanto a função lognormal foi empregada, seguindo recomendação de HAUSCHILD *et al.* (2013).

Essa análise foi empregada na comparação entre as duas rotas (A e B) para extração do colágeno. Realizou-se 1000 simulações, obtiveram-se valores de impactos e contabilizou-se o percentual de vezes em que o impacto de $A - B > 0$ em relação ao total de simulações. Considerou-se que quando esse valor foi maior ou igual a 95%, a diferença entre as rotas A e B foi significativa.

4.6 Análise de cenários alternativos

No cenário base (situação de referência), definido para avaliação de impacto inicial das rotas, considerou-se que a diálise na etapa de “purificação por membranas” é realizada através de membranas com poros onde é realizada a troca iônica até que o colágeno extraído esteja em pH neutro. Além dessa situação, o seguinte cenário 1 foi analisado: realização de diafiltração que promove a remoção de contaminantes de menor massa molar por meio da adição de um solvente puro (água WFI- água para injetáveis). A principal diferença entre as operações de filtração por membranas e diafiltração é que o processo separa a mistura de solutos com base no tamanho molecular. O processo de diafiltração é usado para purificar um determinado soluto numa solução onde os contaminantes têm diâmetro menor que o soluto de interesse.

Para construção desse cenário, consideraram-se os seguintes parâmetros e valores: coeficiente de rejeição (0,95), tempo de filtração (240 minutos), fluxo do filtrado (20L/m²h), área da membrana (30,1m²), concentração máxima de sólidos retidos (600g/L) e concentração de sólidos retidos (340,23g/L). Os valores utilizados para esses parâmetros foram retirados do trabalho de Chalermthai *et. al* (2020), onde os autores utilizam a operação de diafiltração em proteína de soro de leite bovino.

Outro cenário (2) foi avaliado referente a disposição de resíduos orgânicos. Investigou-se o envio de resíduos sólidos para compostagem ao invés de aterro sanitário (cenário base).

5 RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados da modelagem das rotas de extração ASC e PSC em escala piloto, avaliam-se os impactos ambientais e cenários alternativos para essas rotas.

5.1 Plantas Piloto de Extração de Colágeno

5.1.1 Planta Piloto de Extração de Colágeno na rota ASC

A Figura 7 mostra a planta modelada para a rota ASC e a Tabela 5, a lista dos equipamentos utilizados. A produção nessa rota ficou em 142 bateladas/ano, produzindo um total de 13.528,35 kg de colágeno a partir de 71 toneladas de pele de tilápia, com um rendimento de 19,05% (kg/kg).

A entrada da pele ocorre pelo equipamento P-1 (estocagem) e segue para a seção de pré-tratamento da pele, onde ocorre a retirada de proteínas não colagenosas e lipídios. Essa etapa ocorreu em um homogeneizador (P-3) em agitação constante, em seguida a pele foi lavada até a neutralização. Nesse processo foram gerados os efluentes 1 e 2, respectivamente. No mesmo tipo de equipamento (P-4) foi realizada a retirada de lipídeos através da adição de uma solução de etanol em agitação constante. Em seguida, a pele foi neutralizada, gerando os efluentes 3 e 4, respectivamente.

Em seguida, na seção de extração do colágeno ocorreu a extração do colágeno. A corrente (S-101) contém a pele de tilápia sem proteínas não colagenosas, essa corrente foi enviada para um homogeneizador (P-5) com solução de ácido acético. O material extraído foi transportado por uma bomba (P-6) para um outro homogeneizador (P-7), onde o material foi diluído usando solução de ácido acético.

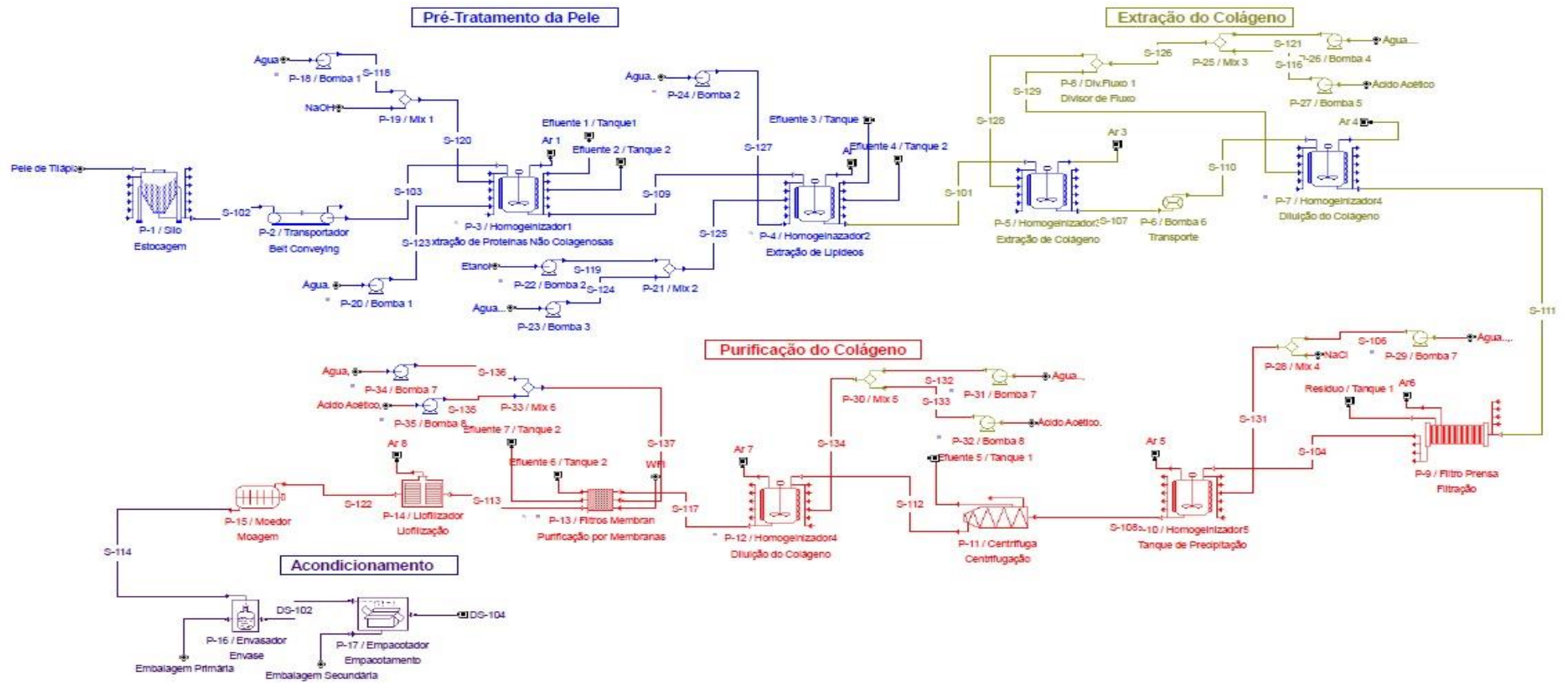
Na purificação estão incluídas as etapas de filtração, precipitação, centrifugação, diluição, purificação por membranas (diálise), liofilização e moagem. O material foi encaminhado para um filtro prensa (P-9). Nessa etapa de filtração foram gerados dois tipos de materiais: o filtrado e resíduo úmido. O material filtrado foi encaminhado para um homogeneizador (P-10), onde adicionou uma solução de cloreto de sódio. Esse material permaneceu em repouso para que ocorresse a precipitação do colágeno. O material do

equipamento P-10 foi direcionado para uma centrífuga (P-11), após o processo de centrifugação foi gerado o efluente 5. O material precipitado na centrifugação foi encaminhado para diluição com ácido acético em um homogeneizador (P-12).

Logo após, o material diluído foi encaminhado para a purificação por membranas (P-13) que ocorreu em duas etapas. Primeiramente ocorreu a purificação utilizando uma solução de ácido acético. Em seguida, foi realizada a purificação com água WFI (água para injetáveis) até a neutralização do colágeno. Depois que o colágeno atingiu pH neutro, ele foi encaminhado para o congelamento e liofilização realizados pelo equipamento (P-14). Posteriormente, o colágeno liofilizado foi para o moedor (P-15) para obtenção do colágeno granulado (S-114).

Por fim, o colágeno purificado é colocado em embalagem de papelão na secção de acondicionamento, pelos equipamentos P-16 e P-17.

Figura 7: Extração do colágeno da pele de tilápia utilizando uma rota ASC



Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelo autor.

Tabela 5: Equipamentos utilizados na simulação da rota ASC, indicando capacidade e etapa utilizada dos equipamentos

Equipamento	Capacidade	Etapa Utilizada
Estocagem	736,57 L	Pré-Tratamento
Transportador	-	Pré-Tratamento
Homogeneizador1	66237,97 L	Pré-Tratamento
Homogeneizador2	28434,93 L	Pré-Tratamento
Homogeneizador3	14293,59 L	Extração
Homogeneizador4	43124,19 L	Extração
Homogeneizador5	41796,84 L	Purificação
Bombas	-	Pré-Tratamento, Extração, Purificação
Filtros de Membrana	77786,46 L	Purificação
Centrífuga	9404,29 L/h	Purificação

Equipamento	Área	Etapa Utilizada
Filtro Prensa	43,52 m ²	Extração

Equipamento	Capacidade de Sublimação	Etapa Utilizada
Liofilizador	119,87 kg	Purificação

Equipamento	Volume do grânulo	Etapa Utilizada
Moedor	3,36 L	Purificação

Fonte: Elaboração própria, 2020.

5.1.2 Planta Piloto de Extração de Colágeno na rota PSC

A Figura 8 mostra a planta modelada para a rota PSC e a Tabela 6, os equipamentos utilizados em cada etapa. Nessa rota, essa planta realiza 137 bateladas/ano, com uma produção de colágeno de 10.020,18 kg a partir de 68,5 toneladas de pele de tilápia, tendo um rendimento de 14,63% (kg/kg).

Observa-se a entrada da pele pelo equipamento P-1 (estocagem) que segue para a secção de pré-tratamento da pele, onde ocorre a retirada de proteínas não colagenosas e lipídios. Essa etapa ocorre em um homogeneizador

(P-3) em agitação constante, em seguida a pele foi lavada até a neutralização. Nesse processo são gerados os efluentes 1 e 2, respectivamente. No mesmo tipo de equipamento (P-4) é realizada a retirada de lipídeos através da adição de uma solução de etanol em agitação constante. Em seguida, a pele foi neutralizada, gerando os efluentes 3 e 4, respectivamente.

Em seguida, na etapa de extração do colágeno ocorre a extração do colágeno com auxílio de enzimas e sua diluição, sendo a solução encaminhada para a secção de purificação. A corrente (S-101) é enviada para um homogeneizador (P-5) com solução de ácido acético, sendo adicionada nessa etapa a pepsina. A mistura manteve-se em agitação constante. O material extraído foi transportado por uma bomba (P- 6) para um outro homogeneizador (P-7), onde foi diluído usando solução de ácido acético (P-8).

A purificação inclui as etapas de filtração, precipitação, centrifugação, diluição, purificação por membranas (diálise), liofilização e moagem. Posteriormente, o material foi encaminhado para um filtro prensa (P-9). Nessa etapa de filtração, gerou-se dois tipos de materiais: o filtrado e resíduo úmido. O material filtrado foi encaminhado para um homogeneizador (P-10), onde adicionou-se uma solução de cloreto de sódio. Esse material permaneceu em repouso para que ocorresse a precipitação do colágeno.

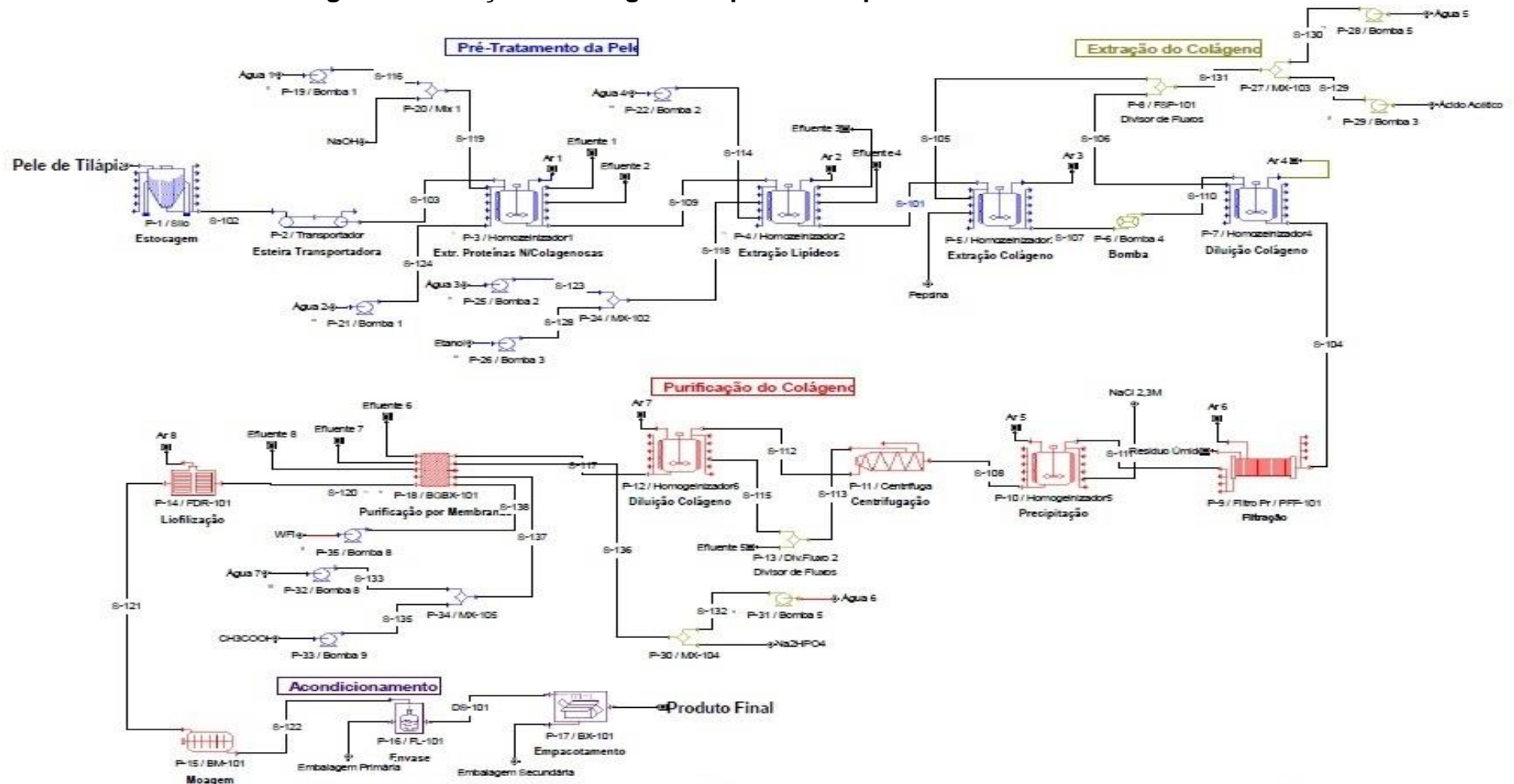
Em seguida o material do equipamento P-10 foi direcionado para uma centrífuga (P-11). Após o processo de centrifugação, foi gerado o efluente 5. O material precipitado na centrifugação foi encaminhado para diluição, com o efluente 5 sendo gerado em um homogeneizador (P-12).

O material diluído foi encaminhado para a purificação por membranas (P-18). Esse processo é realizado em três etapas. Primeiramente ocorreu a purificação utilizando uma solução de fosfato de sódio dibásico. Em seguida, foi realizada a purificação com solução de ácido acético. Por último, a purificação utilizou-se água WFI (água para injetáveis) até a neutralização do colágeno.

Depois que o colágeno atingiu pH neutro, ele foi encaminhado para o congelamento e liofilização realizados pelo equipamento (P-14). Posteriormente, o colágeno liofilizado foi para o moedor (P-15), obtendo-se o colágeno granulado (S-114).

Por fim, o colágeno purificado é colocado em embalagem de papelão na secção de acondicionamento, pelos equipamentos P-16 e P-17.

Figura 8: Extração do colágeno da pele de tilápia utilizando uma rota PSC



Fonte: SuperPro Designer (2020), adaptado pelo autor.

Tabela 6: Equipamentos utilizados na simulação da rota PSC, indicando capacidade e etapa utilizada dos equipamentos

Equipamento	Capacidade	Etapas Utilizadas
Estocagem	736,57 L	Pré-Tratamento
Transportador	-	Pré-Tratamento
Homogeneizador1	100000 L	Pré-Tratamento
Homogeneizador2	17994,83 L	Pré-Tratamento
Homogeneizador3	23509,00 L	Extração
Homogeneizador4	72019,88 L	Extração
Homogeneizador5	68101,31 L	Purificação
Homogeneizador6	11761,95 L	Purificação
Bombas	-	Pré-Tratamento, Extração, Purificação
Filtros de Membrana	200000 L	Purificação
Centrífuga	9404,29 L/h	Purificação
Equipamento	Área	Etapas Utilizadas
Filtro Prensa	72,4 m ²	Extração
Equipamento	Capacidade de Sublimação	Etapas Utilizadas
Liofilizador	119 kg	Purificação
Equipamento	Volume do grânulo	Etapas Utilizadas
Moedor	2,58 L	Purificação

Fonte: Elaboração Própria, 2020.

5.2 Análise dos inventários das rotas de extração do colágeno em escala piloto

A tabela 7 ilustra os dados obtidos de inventários a partir das rotas escalonadas. Analisando a quantidade de insumos, pode-se observar que a rota PSC consome 2,04 vezes mais insumos do que a rota ASC. Esse valor é devido a grande diferença de consumo de água WFI, ácido acético e cloreto de sódio entre as rotas.

O consumo de água é 2,03 vezes maior na rota PSC, devido à utilização de maiores quantidades de solução na extração do colágeno e lavagem da pele e pelo alto consumo desse insumo na etapa de purificação por membranas (diálise). O grande consumo de água na rota PSC influencia diretamente no volume de efluentes gerados, sendo duas vezes maior para essa rota.

Os reagentes com maiores consumos na rota PSC em relação a rota ASC foram o ácido acético p.a. (4,28 vezes) e cloreto de sódio p.a. (3.04 vezes). O maior uso desses insumos na rota PSC. são devido à sua maior concentração nessa rota.

Tabela 7: Inventário em escala piloto das duas rotas de extração de colágeno de pele de tilápia, considerando a produção anual de colágeno

Insumos (entrada)	Unidade	Rota ASC (produção anual)	Rota PSC (produção anual)
Pele de Tilápia	kg	71.000,00	68.500,00
NaOH	kg	5.704,14	7.150,03
Água	kg	62.477.932,50	127.057.646,96
Água de Resfriamento	MT	6.080,00	4.057,00
Água de Lavagem	L	2.366.402,00	4.307.766,00
Etanol	kg	223.192,76	357.530,27
Ácido Acético	kg	133.986,94	573.972,46
Pepsina a	kg	-	134,26
Na ₂ HPO ₄	kg	-	58.545,58
NaCl	kg	293.433,06	892.638,57
Embalagem Primária	kg	7,10	5,48
Embalagem Secundária	kg	134,90	100,01
Energia Elétrica	kWh	339.784,00	653.754,00
Vapor	MT	340,00	1.049,00
Saídas			
Efluentes	kg	62.602.333,00	127.245.469,90
Rejeito de pele	kg	566.828,5	948.293,45
Resíduo da Liofilização	kg	22.701,54	812.440,14
Colágeno	kg	13.528,34	10.020,18

Fonte: Elaboração própria, 2020.

O consumo de energia elétrica é 1,9 vezes maior na rota PSC que na rota ASC. Isso ocorreu devido a alta demanda de energia na rota PSC para manter a temperatura baixa durante o processo de purificação por membranas.

Já o vapor foi três vezes maior na rota PSC devido a maior quantidade de material que entra na etapa de liofilização. Entretanto, a água de resfriamento possui um consumo 34% maior na rota ASC em razão de ter mais bateladas ao ano e assim mais equipamentos que utilizam esse insumo.

Em relação ao consumo de água da lavagem dos equipamentos, a rota PSC utilizou 1,82 vezes mais desse insumo. Essa diferença foi devida essa rota utilizar mais equipamentos auxiliares (bombas) e ter três etapas de purificação por membranas (diálise com fosfato dissódico, diálise com ácido acético e diálise com água WFI), enquanto a rota ASC tem somente duas etapas (diálise com ácido acético e diálise com água WFI).

5.3 Comparação dos inventários das rotas em escala laboratorial e piloto

Na comparação dos inventários nas escalas laboratorial e piloto (Tabela 8), observa-se que na rota ASC houve redução do consumo de água em 49% e aumento do consumo de água em 19% na rota PSC. A redução do consumo de água na rota ASC é devido ao menor número das operações unitárias centrifugação e precipitação do colágeno em escala piloto. Por outro lado, a rota PSC apresentou aumento no consumo de água devido ao uso desse insumo nas etapas de purificação do colágeno.

Na rota ASC ocorreu diminuição no consumo de pele, hidróxido de sódio, etanol, ácido acético, cloreto de sódio, energia elétrica e geração de efluentes e rejeito de pele quando se passou do laboratório para a planta piloto. Por outro lado, na rota PSC houve aumento no consumo de pele, hidróxido de sódio, etanol, ácido acético, cloreto de sódio, energia elétrica e geração de efluentes e rejeito de pele com o escalonamento da produção. Não houve variação no consumo de pepsina na rota PSC.

O consumo de ácido acético e cloreto de sódio foi maior na escala laboratorial da rota ASC porque nela ocorrem duas diluições com ácido acético e duas precipitações usando cloreto de sódio. Essa rota na escala piloto só realiza uma diluição e precipitação, já que, conforme indicado por especialistas

nessas rotas de extração, a eficiência de equipamentos industriais possui desempenho mais elevado em comparação aos de laboratório.

Ocorreu diminuição do consumo de energia elétrica na rota ASC, devido ao menor número de operações em escala piloto. Já na rota PSC houve aumento de consumo de energia, devido ao uso de mais equipamentos com temperaturas controladas na escala piloto, como purificação por membranas (diálise) na secção de purificação do colágeno.

A geração de efluentes foi menor na escala piloto da rota ASC e maior, da rota PSC. A menor geração de efluentes na rota ASC em escala piloto pode ser explicada porque nela existem menos etapas de diluição, precipitação e centrifugação na secção de purificação do colágeno.

A produção de rejeito de pele foi menor com o escalonamento da rota ASC, porém maior, na rota PSC. Isso ocorreu devido o consumo de pele ser 11,33% menor na nota ASC e 2,39% maior na rota PSC.

A quantidade de material liofilizado foi menor em ambas as rotas quando se passou para a escala piloto. Esses valores são explicados pelo fato de a escala piloto possuir equipamentos mais eficientes nas etapas de centrifugação e liofilização.

Tabela 8: Inventário da produção de colágeno em escala laboratorial e piloto, considerando a produção de 1 kg de colágeno

Insumos (entrada)	Unidade	Rota ASC			Rota PSC		
		Escala Laboratorial	Escala Piloto	Escala Laboratorial para Escala Piloto (%)*	Escala Laboratorial	Escala Piloto	Escala Laboratorial para Escala Piloto (%)*
Pele de Tilápia	kg	5,91	5,24	-11,33	6,67	6,83	+2,39
NaOH	kg	0,47	0,42	-10,64	0,54	0,71	+31,48
Água da natureza	kg	9057,00	4618,29	-49,00	10195,7	12680,17	+19,59
Água de resfriamento	MT	0	63,81	-	0	64,47	-
Etanol	kg	18,66	16,49	-10,63	33,72	35,68	+5,81
Ácido Acético	kg	40,10	9,90	-75,31	44	57,28	+30,18
Pepsina a	kg	0	0	-	0,01	0,01	0
Na ₂ HPO ₄	kg	0	0	-	4,27	5,84	+36,78
NaCl	kg	43,60	21,69	-50,25	75,52	89,1	+17,99
Embalagem Primária (plástico polietileno)	kg	0	0,001	-	0	0,001	-
Embalagem Secundária (papelão)	kg	0	0,01	-	0	0,01	-
Energia elétrica	KWh	36,15	25,11	-30,54	31,01	75,84	+144,56

Vapor	MT	0	0,35	-	0	0,22	-
Saídas							
Efluentes	kg	8968,10	4627,49	-48,40	10045,8	12698,92	+26,41
Rejeito de pele	kg	156,88	71,89	-54,17	5,56	94,63	+1601,98
Resíduo da Liofilização	kg	76,35	10,67	-86,02	131,56	81,08	-38,37
Colágeno	kg	1	1	-	1	1	-

* = $\{(V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}) / V_{\text{inicial}}\} \times 100\%$

Fonte: Elaboração Própria, 2020.

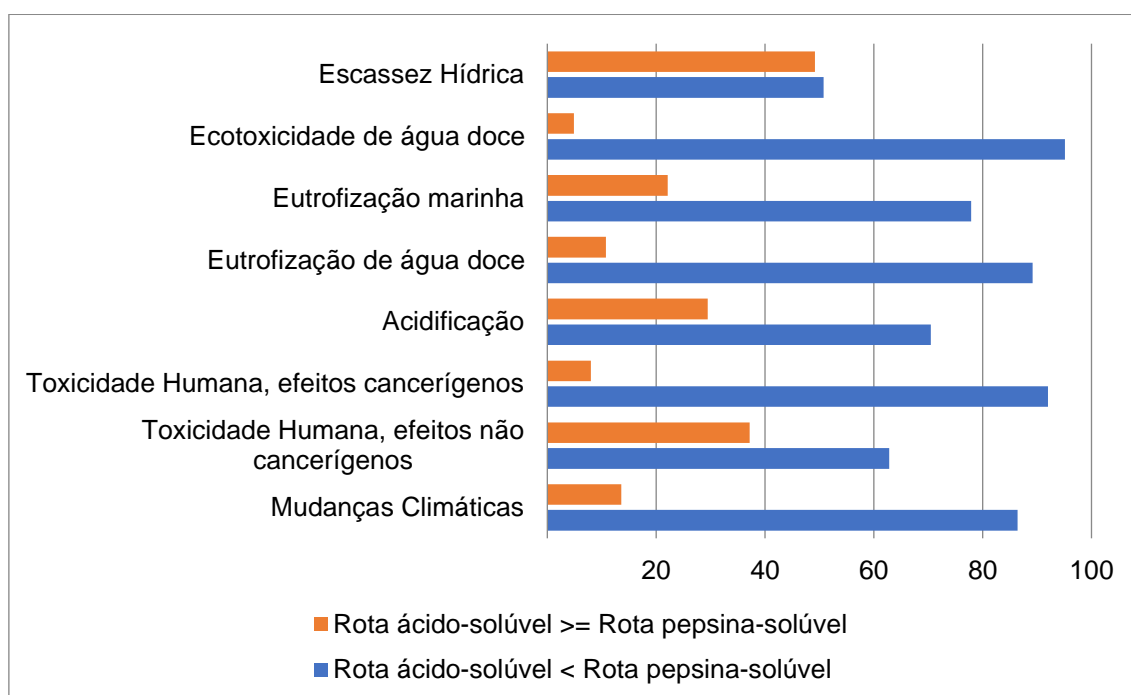
5.4 Avaliação dos impactos ambientais

5.4.1 Comparação dos impactos das rotas ASC e PSC nas escalas laboratorial e piloto

Na comparação das rotas em escala laboratorial pelo método de Monte Carlo, observou-se que houve diferença significativa na categoria de ecotoxicidade de água doce (Figura 9). Nas demais categorias (eutrofização marinha e de água doce, acidificação, mudanças climáticas e toxicidade humana – efeitos cancerígenos), a rota ASC apresentou melhor desempenho do que a rota PSC.

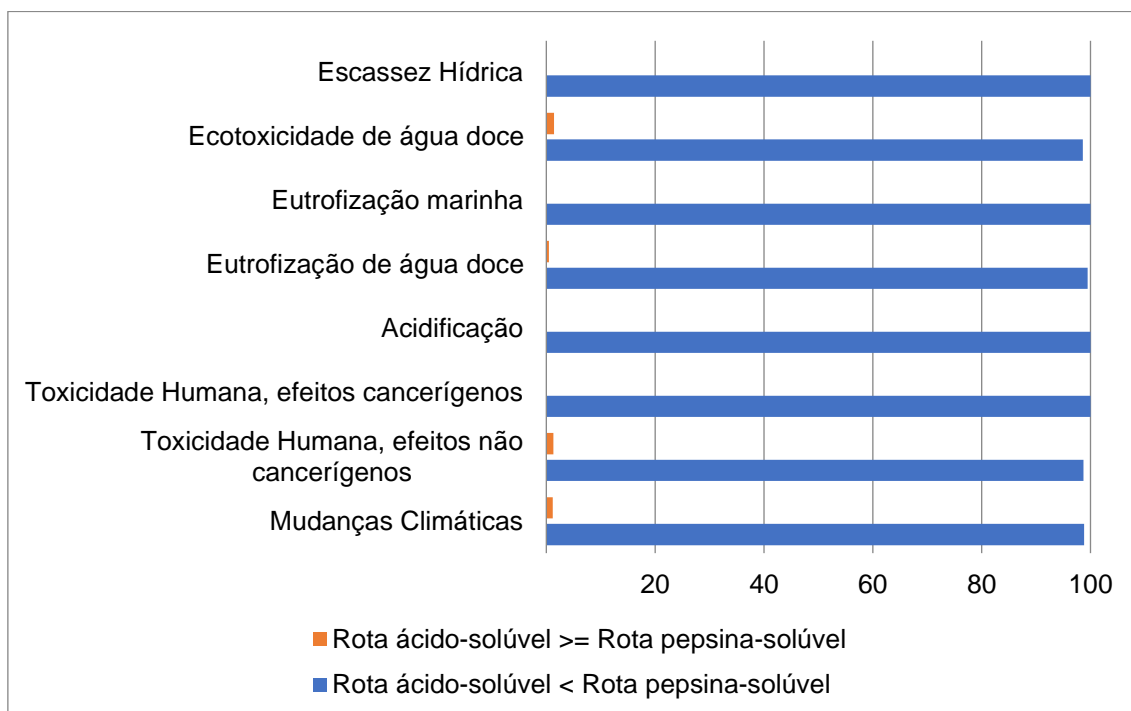
Na escala piloto, observou-se que a rota ASC apresentou melhor desempenho ambiental, com nível de significância $\geq 95\%$, em todas as categorias de impactos ambientais analisadas (Figura 10). Isso ocorreu, principalmente, pela diferença de insumos totais utilizadas pelas rotas, onde a rota PSC necessita de mais insumos para realizar 160 bateladas ao ano e não tem um rendimento melhor do que na rota ASC.

Figura 9: Comparação entre as rotas ASC e PSC em escala laboratorial pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

Figura 10: Comparação entre as rotas ASC e PSC em escala piloto pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

Além disso, observou-se que em ambas as rotas ocorreu redução média de 68% no valor dos impactos com o escalonamento, com exceção da categoria de escassez hídrica que acarretou aumento médio de 65% (Tabela 9). Na rota ASC e PSC, a categoria de impacto escassez hídrica apresentou aumento devido ao alto consumo de água WFI utilizada na purificação do colágeno.

Já a categoria mudanças climáticas gerou maior redução (entre 94,79% e 98,55%) em ambas as rotas. Essa redução pode ser explicada pelo aumento no uso de etanol com o escalonamento e maior sequestro de CO₂ da atmosfera na produção de cana-de-açúcar utilizada na geração do etanol.

As categorias de toxicidade humana – efeitos não cancerígenos (redução dos impactos entre 88,23% e 90,00%) e ecotoxicidade de água doce (redução dos impactos entre 88,21% e 90,69%) apresentaram essas reduções, em ambas as rotas, devido a mudança da etapa que mais contribuiu nessa categoria. Para essas categorias, em escala laboratorial, o processo de tratamento de efluentes (construção da rede coletora de esgoto e estação de tratamento de efluentes) foi responsável pelos impactos, já em escala piloto foi

o tratamento de resíduos sólidos que gerou menos impactos em comparação ao tratamento de água.

Nas categorias de toxicidade humana – efeitos cancerígenos (redução dos impactos entre 66,66% e 98,87%) e acidificação (redução dos impactos entre 93,03% e 97,63%) obtiveram reduções consideráveis devido ao menor consumo de ácido acético e etanol na rota ASC. Esses insumos, mesmo tendo consumo maior na rota PSC contribuíram para a redução dos impactos totais ao trocar de escala.

As categorias de eutrofização de água doce (redução dos impactos entre 57,14% e 77,33%) e eutrofização marinha (redução dos impactos entre 88,02% e 94,44%) conseguiram reduções nos impactos totais devido aos grandes impactos relacionados ao consumo de energia e tratamento de efluentes em escala laboratorial.

Tabela 9: Valores totais dos impactos ambientais nas categorias de impactos em escala laboratorial e piloto das rotas ASC e PSC.

Categoria de Impacto	Unidade	Rota ASC			Rota PSC		
		Escala Laboratorial	Escala Piloto	Escala Laboratorial para Escala Piloto (%)*	Escala Laboratorial	Escala Piloto	Escala Laboratorial para Escala Piloto (%)*
Mudanças Climáticas	kg CO2 eq	2360,0000	34,0000	-98,55	3690,0000	192,0000	-94,79
Toxicidade Humana, efeitos não cancerígenos	CTUh	0,0010	0,0001	-90,00	0,0017	0,0002	-88,23
Toxicidade Humana, efeitos cancerígenos	CTUh	0,0003	0,0001	-66,66	0,0007	0,0000	-98,87
Acidificação	molc H+ eq	15,3000	0,3620	-97,63	18,8000	1,3100	-93,03
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,6000	0,1360	-77,33	0,9870	0,4230	-57,14

Eutrofização marinha	kg N eq	3,5300	0,1960	-94,44	4,7100	0,5640	-88,02
Ecotoxicidade de água doce	CTUe	56100,0000	5220,0000	-90,69	112000,0000	13200,0000	-88,21
Escassez Hídrica	m ³	2630,0000	4380,0000	66,53	3290,0000	5400,0000	64,13
Valor Médio				-68,60			-68,02

*= $\{(V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}) / V_{\text{inicial}}\} \times 100\%$

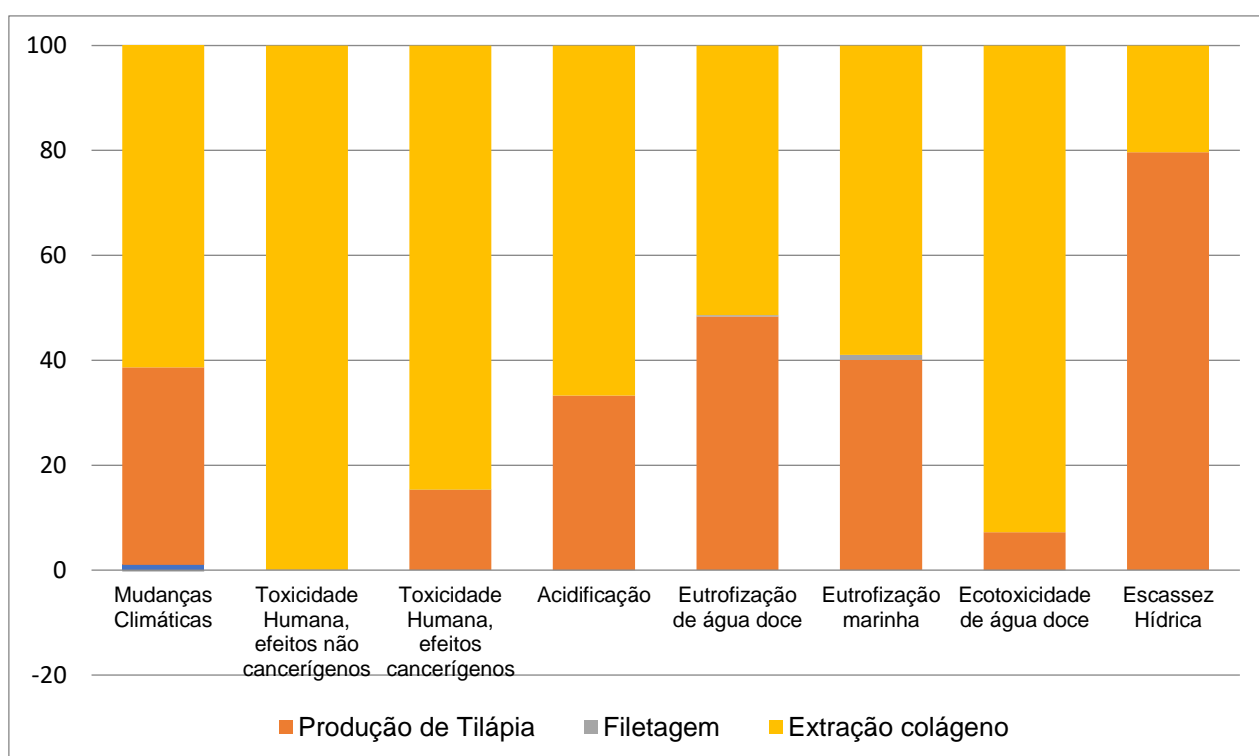
Fonte: Elaboração Própria, 2021.

5.4.2 Análise de pontos críticos na rota ASC em escala laboratorial e piloto de produção

O processo de extração do colágeno foi o mais importante no ciclo de vida da produção de 1 kg de colágeno na maioria das categorias, com exceção de escassez hídrica (Figura 11). A produção de tilápia causou maior impacto nessa categoria, além de também ter contribuído de forma expressiva para os impactos eutrofização marinha e de água doce.

Na produção de tilápia, o maior consumo de água na produção do peixe (46.428,96 L/kg de colágeno) e do arroz utilizado na ração (34.727,16 L/kg de colágeno) foram relevantes para o impacto na escassez hídrica (79,63%). Essa produção contribuiu para eutrofização devido as emissões para a água (175.000,00 L/kg de colágeno) ricas em nutrientes como nitrogênio (3,66 kg/kg de colágeno) e fósforo (0,48 kg/kg de colágeno) provenientes da degradação da ração nas fazendas de aquicultura.

Figura 11: Análise dos impactos ambientais da produção da tilápia, filetagem e extração do colágeno por uma rota ácido-solúvel (ASC)



Fonte: Elaboração própria, 2021.

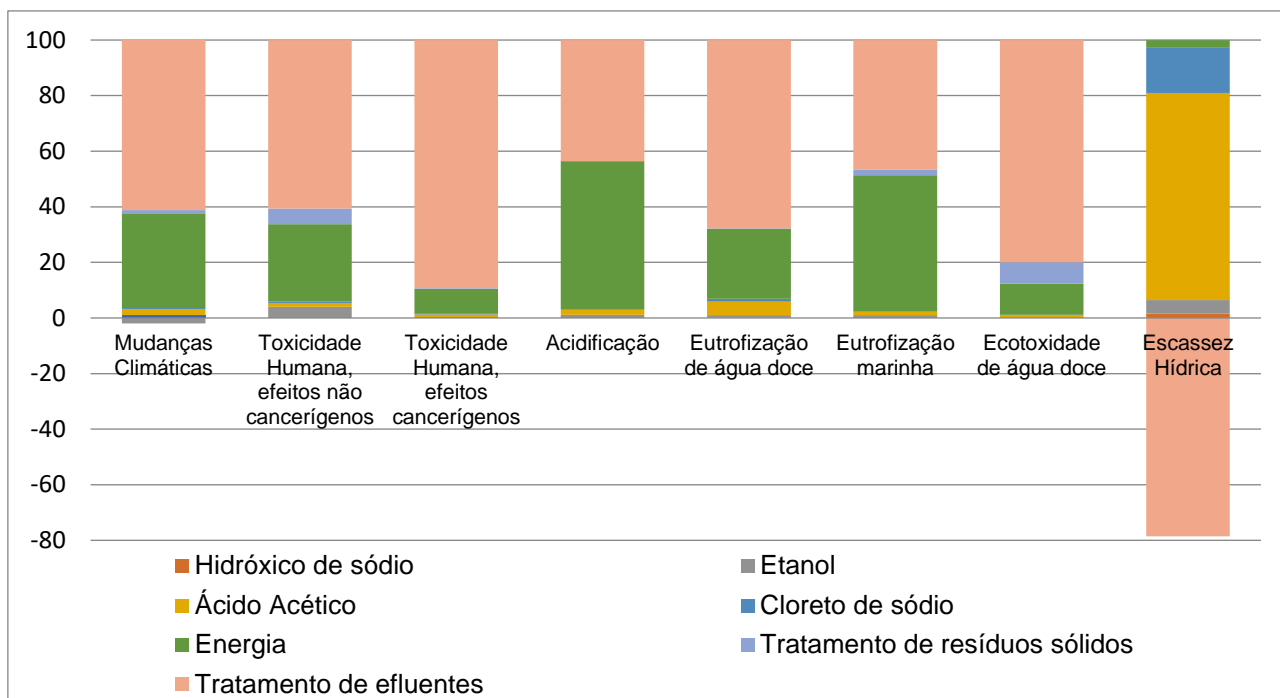
Na escala piloto, os insumos/resíduos mais impactantes na rota ASC foram: água WFI (etapa de purificação), resíduos sólidos da centrifugação e etanol (extração de lipídeos). A disposição dos resíduos sólidos em aterro foi o processo que mais se destacou nas categorias mudanças climáticas (42%), toxicidade humana-efeitos não cancerígenos (58,36%), ecotoxicidade de água doce (90,11%) e eutrofização marinha (38,27%%). Esse processo tem grande impacto porque o processamento do peixe gera grande quantidade de resíduos que quando dispostos em aterros liberam metano e outros gases.

Nas categorias de toxicidade humana – efeitos cancerígenos (32,58%) e eutrofização de água doce (86,15%), a água WFI apresentou-se como insumo mais impactante. Esse insumo é utilizado na etapa de purificação por membranas e tem grande impacto porque sua produção requer grande quantidade de energia elétrica que no Brasil é principalmente oriunda de hidroelétricas.

O etanol apresentou impacto positivo na categoria de mudanças climáticas, devido sua cadeia produtiva (cana-de-açúcar) sequestrar mais gases de efeito estufa do que emite. Porém, apresentou impactos negativos nas categorias de acidificação (37%). Esses impactos estão relacionados à produção da cana-de-açúcar, transporte e energia utilizados na produção do etanol.

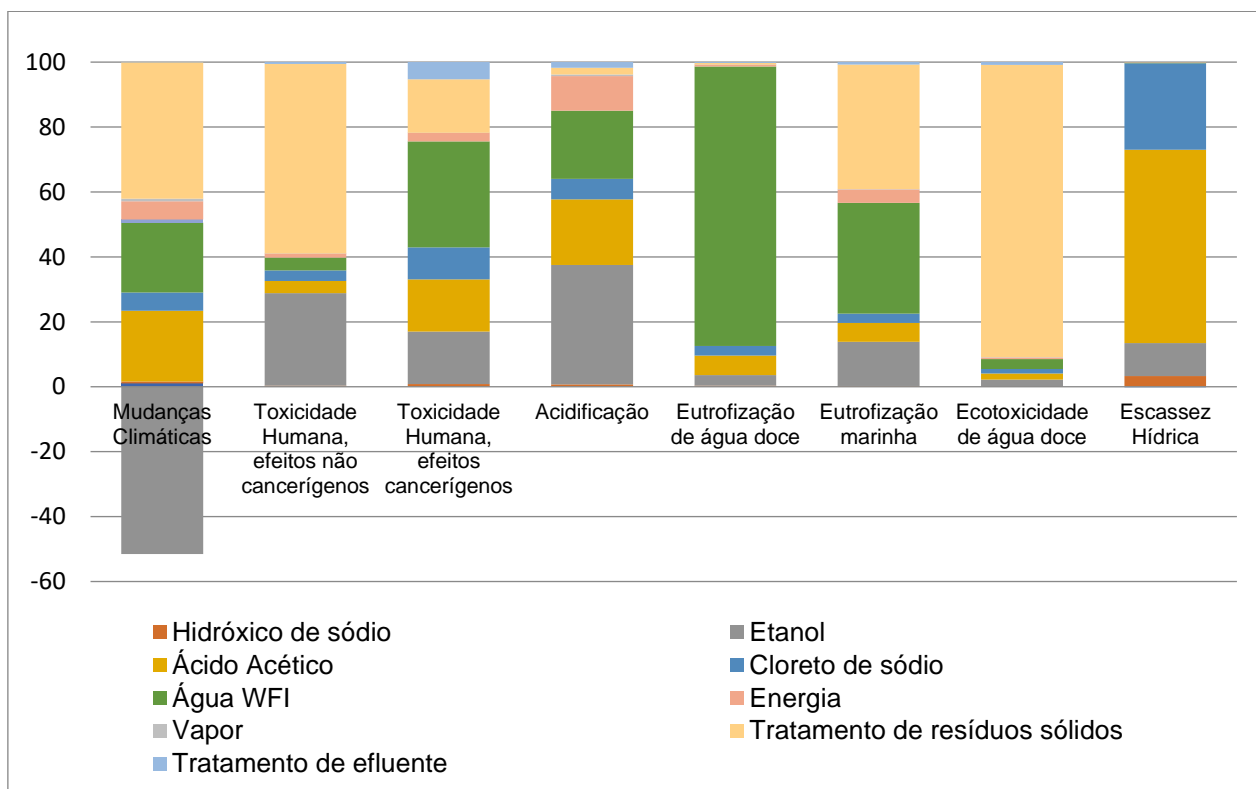
Ao comparar as análises de extração nas escalas laboratorial e piloto, houve mudanças nos pontos críticos do processo. Em escala laboratorial o tratamento de efluentes foi mais impactante em praticamente todas as categorias de impactos analisadas, mas em escala piloto o consumo de água WFI e o tratamento de resíduos sólidos foram os que mais contribuíram nos impactos das categorias.

Figura 12: Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota ASC – Escala Laboratorial



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

Figura 13: Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota ASC – Escala Piloto

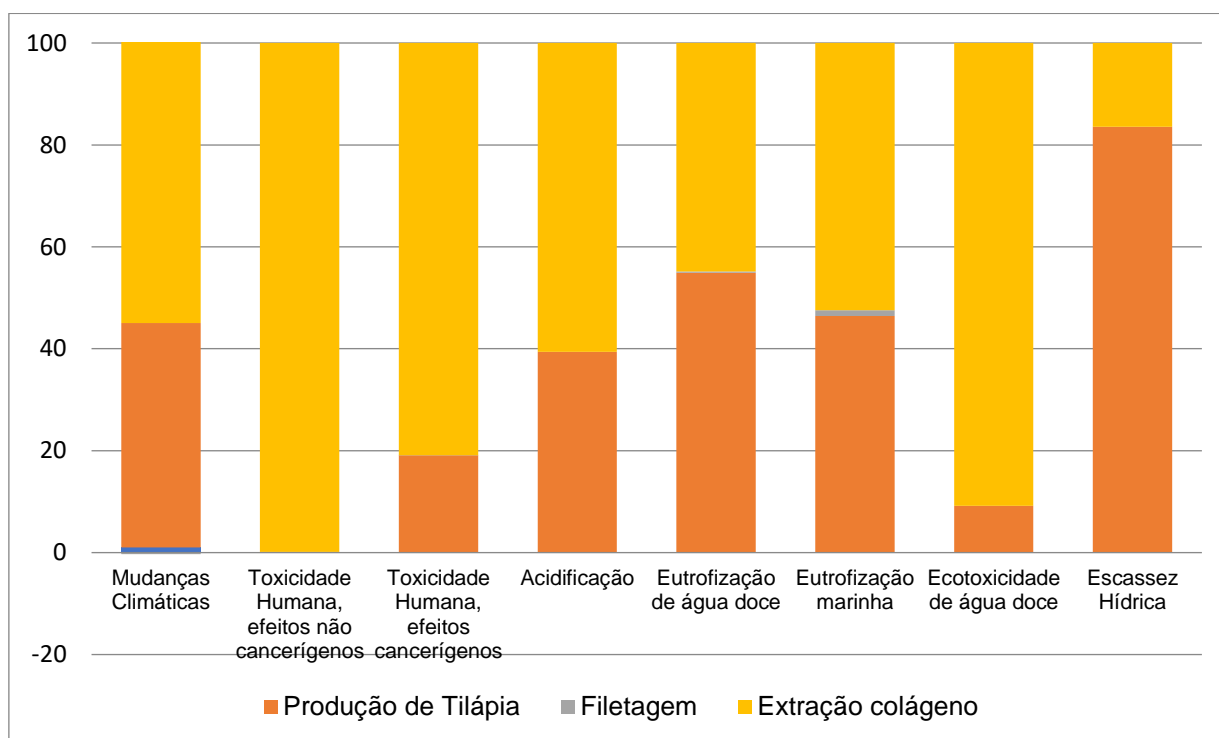


Fonte: Elaboração Própria, 2021.

5.4.3 Análise dos pontos críticos na rota PSC em escala piloto de produção

Observou-se na avaliação dos pontos críticos da rota PSC o mesmo padrão da rota ASC, ou seja, os processos mais impactantes foram extração de colágeno e produção de tilápia (Figura 14). A produção da tilápia apresentou principais impactos nas categorias de escassez hídrica (54,91%) e eutrofização de água doce (83,58%), relacionados ao alto consumo de energia e insumos na produção de ração.

Figura 14: Análise dos impactos ambientais da produção da tilápia, filetagem e extração do colágeno por uma rota pepsina-solúvel



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

A análise detalhada da rota PSC de extração do colágeno (Figura 16) mostrou que a água WFI, etanol e ácido acético foram os insumos mais impactantes, e resíduos sólidos a saída mais relevante. Por exigir uma grande demanda de energia na sua produção, a água WFI se destacou nas categorias de impactos: toxicidade humana-efeitos cancerígenos (26,64%), eutrofização de águas doces (80,33%) e eutrofização marinha (34,28%).

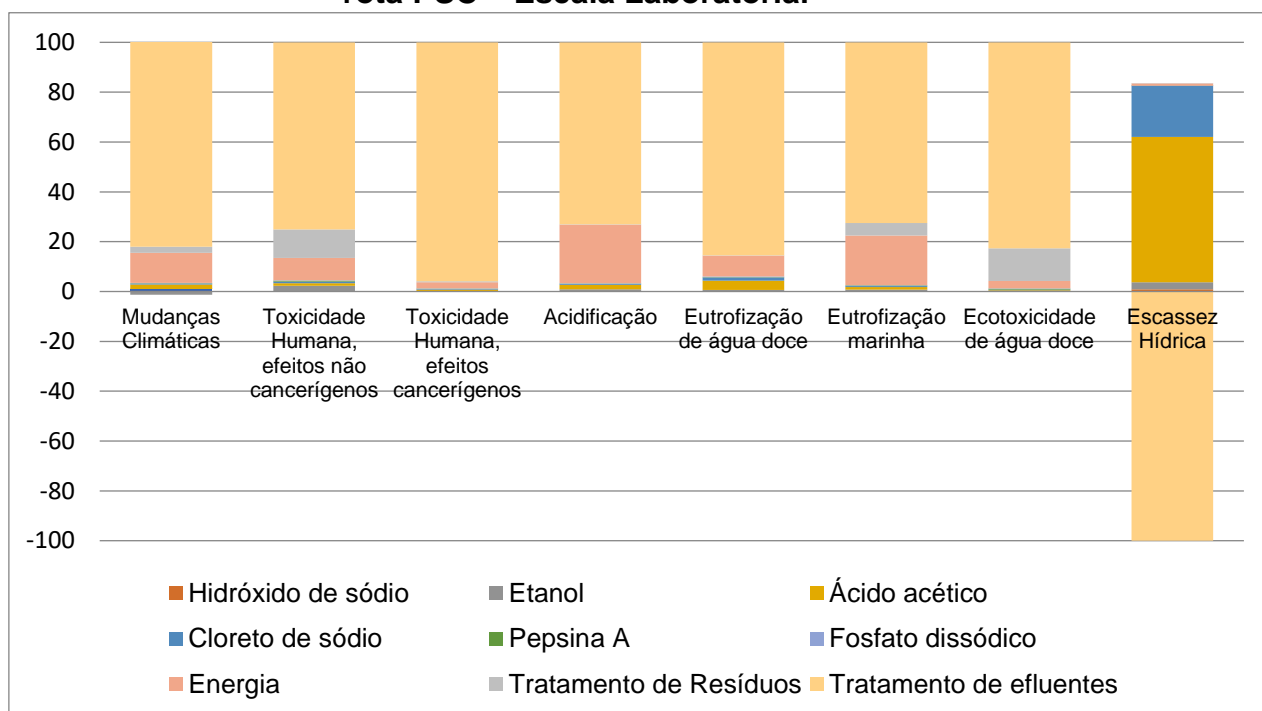
O ácido acético apresentou impactos mais significativos nas categorias mudanças climáticas (32,75%) e acidificação (32,38%). Esses

impactos são provenientes da cadeia de produção do ácido acético que libera compostos nitrogenados e gases de efeito estufa gerados na queima de combustíveis fósseis (BUDSBERG, Erik et. al, 2020).

Os impactos na cadeia do etanol são mais significativos na categoria de acidificação (22,00%) e toxicidade humana – efeitos não cancerígenos (24,00%), sendo oriundos da produção das matérias-primas, como a cana-de-açúcar, para a obtenção do etanol.

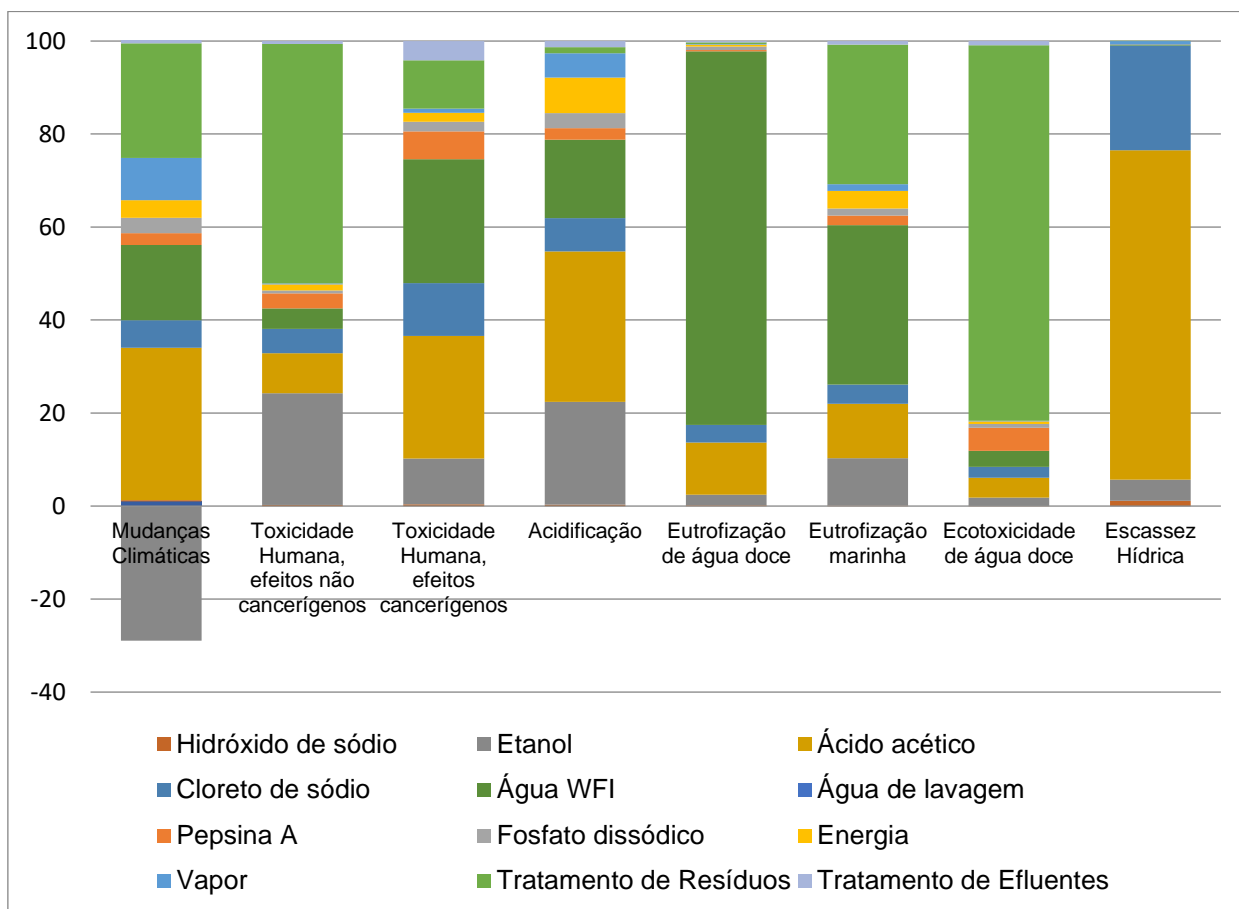
A disposição de resíduos sólidos em aterro foi mais impactante nas categorias de toxicidade humana - efeitos não cancerígenos (51,50%) e ecotoxicidade de água doce (80,74%) devido as emissões principalmente de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e diversos compostos orgânicos voláteis.

Figura 15: Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota PSC – Escala Laboratorial



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

Figura 16: Análise dos impactos ambientais da extração do colágeno pela rota PSC – Escala Piloto



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

5.5 Análise de cenários

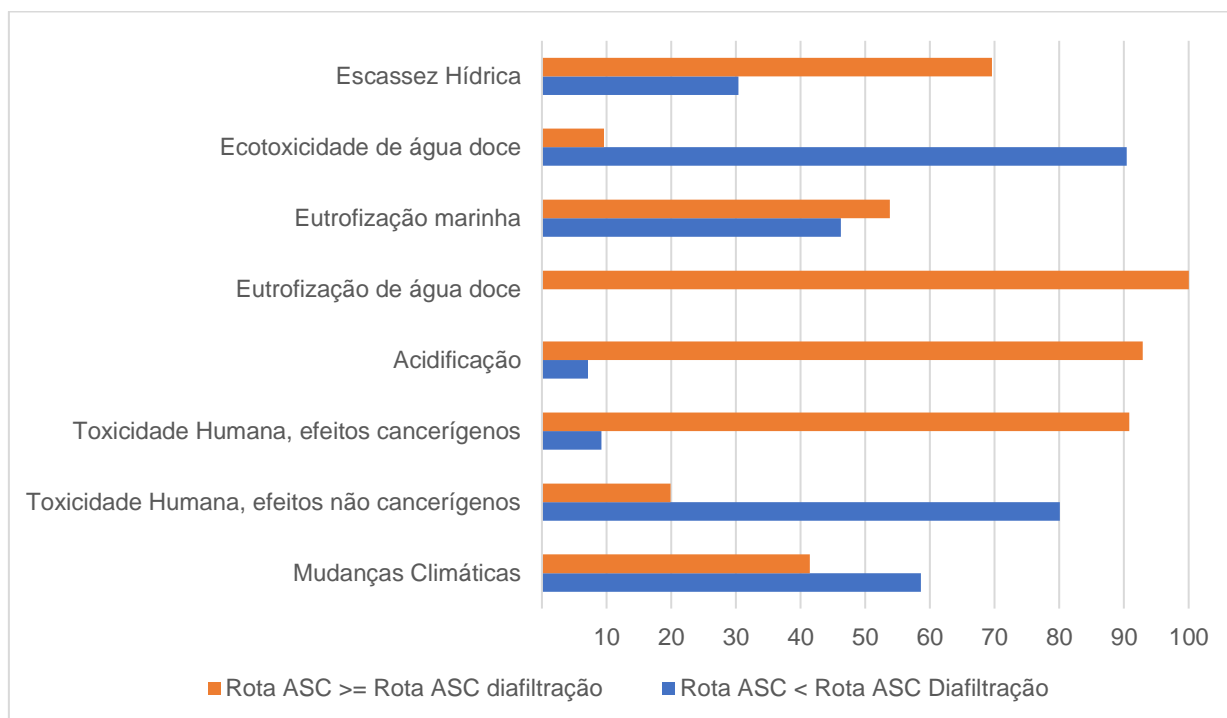
Devido à etapa de purificação do colágeno ter sido um ponto crítico no processo de extração, pelo uso da água WFI em ambas as rotas, analisou-se um cenário de produção em que a diálise por membranas é substituída pelo processo de diafiltração (Cenário 1).

A diafiltração é um processo de separação por membranas utilizado para purificar um soluto de uma determinada solução em que os contaminantes possuem dimensões menores que as do soluto de interesse. Tan, Hezel e Franzreb (2021) testaram a eficiência da diafiltração em albumina de soro bovino utilizando três operações: i) diafiltração em lote com reciclagem de retido, ii) diafiltração contínua, com módulos sequencial e mistura tampão entre as fases da diafiltração, e (iii) diafiltração contínua contracorrente injetando solução

tampão apenas uma vez na fase final da diafiltração. Esses pesquisadores tiveram resultados satisfatórios, conseguindo uma eficiência de 99,9% utilizando duas membranas sem a necessidade de acoplar vários módulos ou etapas de mistura. Assim, considerou-se que a diafiltração é uma alternativa considerável para a análise de cenários nas rotas de extração de colágeno.

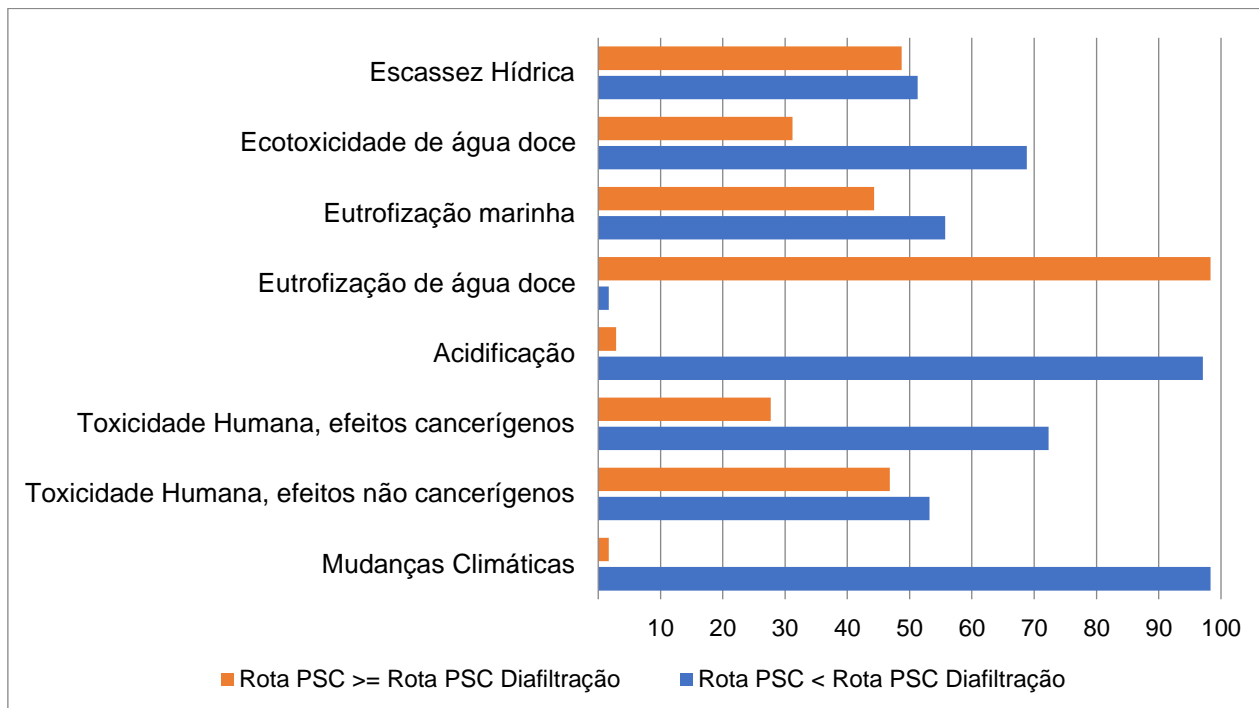
Comparando-se a produção no cenário base da rota ASC com o cenário 1, observou-se que a diafiltração reduziu os impactos nas categorias de escassez hídrica, eutrofização marinha e de água doce, acidificação e toxicidade humana – efeitos cancerígenos (Figura 17). E ao analisar a produção no cenário base da rota PSC com o cenário 1 (Figura 18), constatou-se que a operação da diafiltração reduziu os impactos nas categorias de acidificação e mudanças climáticas. Isso decorreu principalmente do menor consumo de água, que foi 2,1 vezes menor na rota ASC e 2,8 vezes menor na rota PSC com a diafiltração.

Figura 17: Comparação entre o cenário de referência e o cenário 1 para rota ASC pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

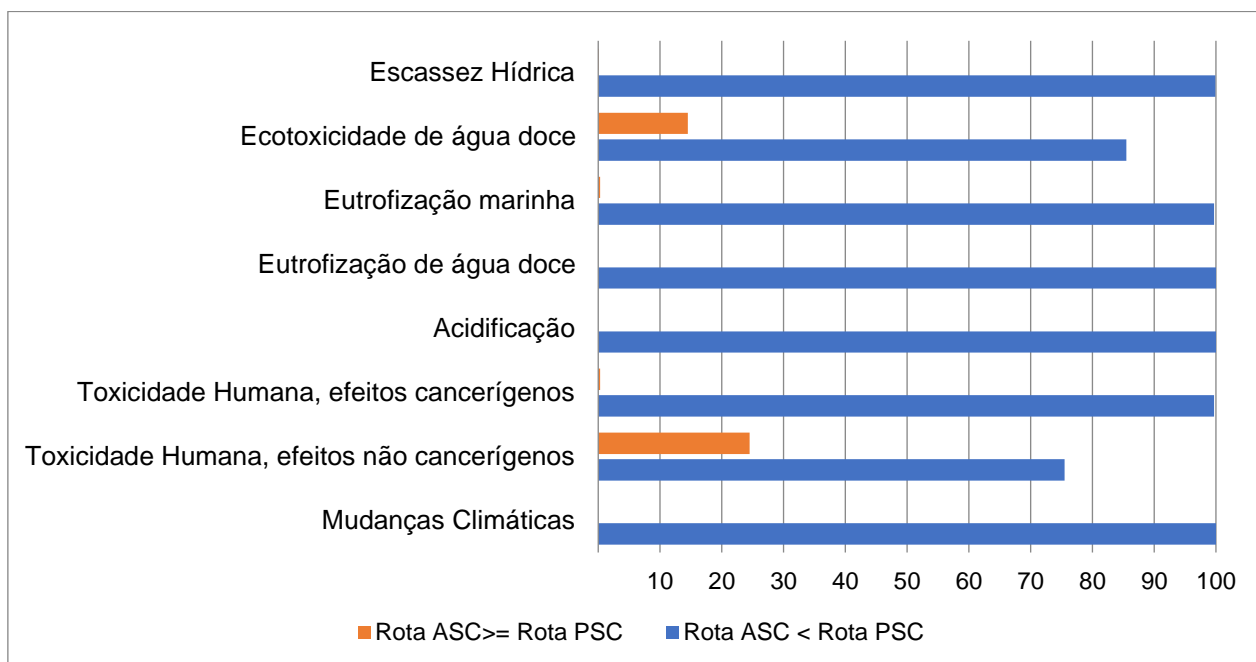
Figura 18: Comparação entre o cenário de referência e o cenário 1 para rota PSC pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

Comparando-se os impactos das rotas ASC e PSC no cenário 1, observou-se que a diferença entre elas foi significativa em todas as categorias de impacto (Figura 19), sendo a rota ASC menos impactante do que a PSC. A diferença dos impactos entre as rotas é devido a contribuição do consumo de ácido acético, vapor e a etapa de tratamento do resíduo sólido ser maior na rota PSC.

Figura 19: Comparação entre as rotas ASC e PSC (Cenário 1) pelo método de Monte Carlo



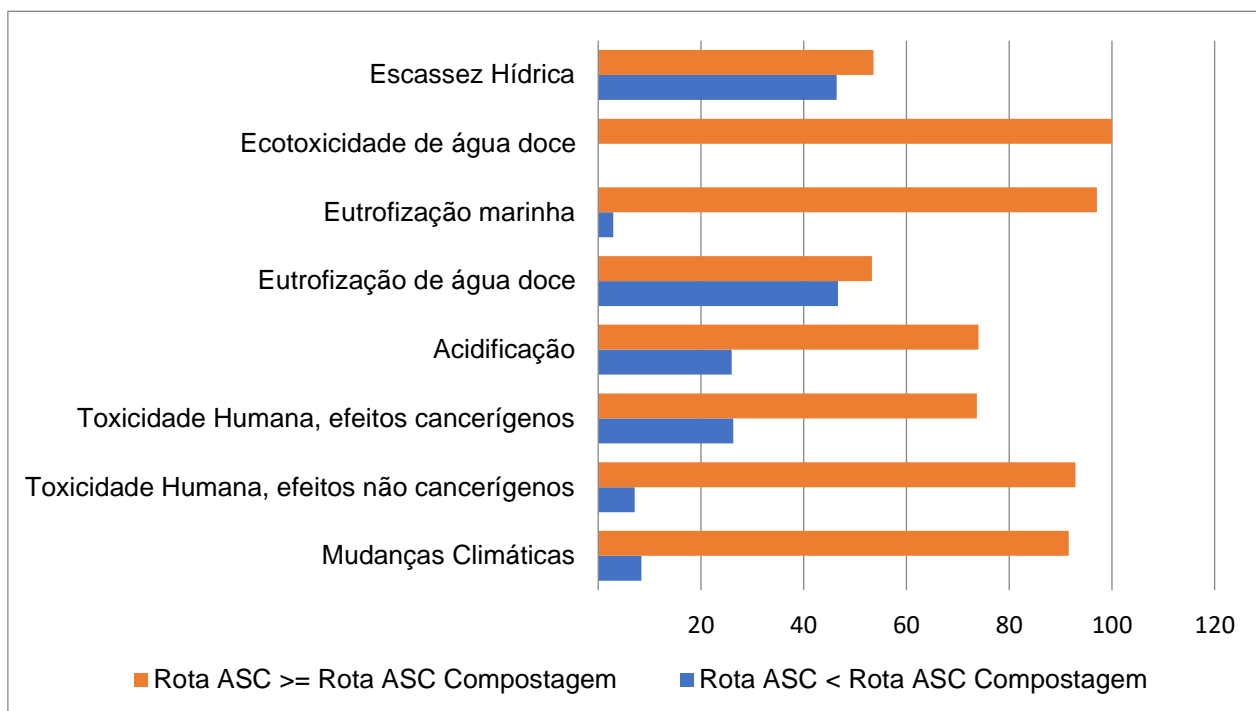
Fonte: Elaboração Própria, 2020.

Percebeu-se também que para as duas rotas ASC e PSC, o tratamento de resíduos em aterro (cenário base) contribuiu negativamente para os impactos nas categorias avaliadas, principalmente mudanças climáticas, toxicidade humana – efeitos não cancerígenos, eutrofização marinha e ecotoxicidade de água doce. Assim, foi proposto o cenário 2 que utiliza a compostagem como tecnologia para a disposição dos resíduos sólidos.

A comparação da rota ASC nos cenários base e 2 (Figura 20) mostrou que a compostagem apresentou desempenho significativamente melhor que o aterro nas categorias de mudanças climáticas, eutrofização marinha, ecotoxicidade de água doce, acidificação e toxicidade humana – efeitos cancerígenos e não cancerígenos.

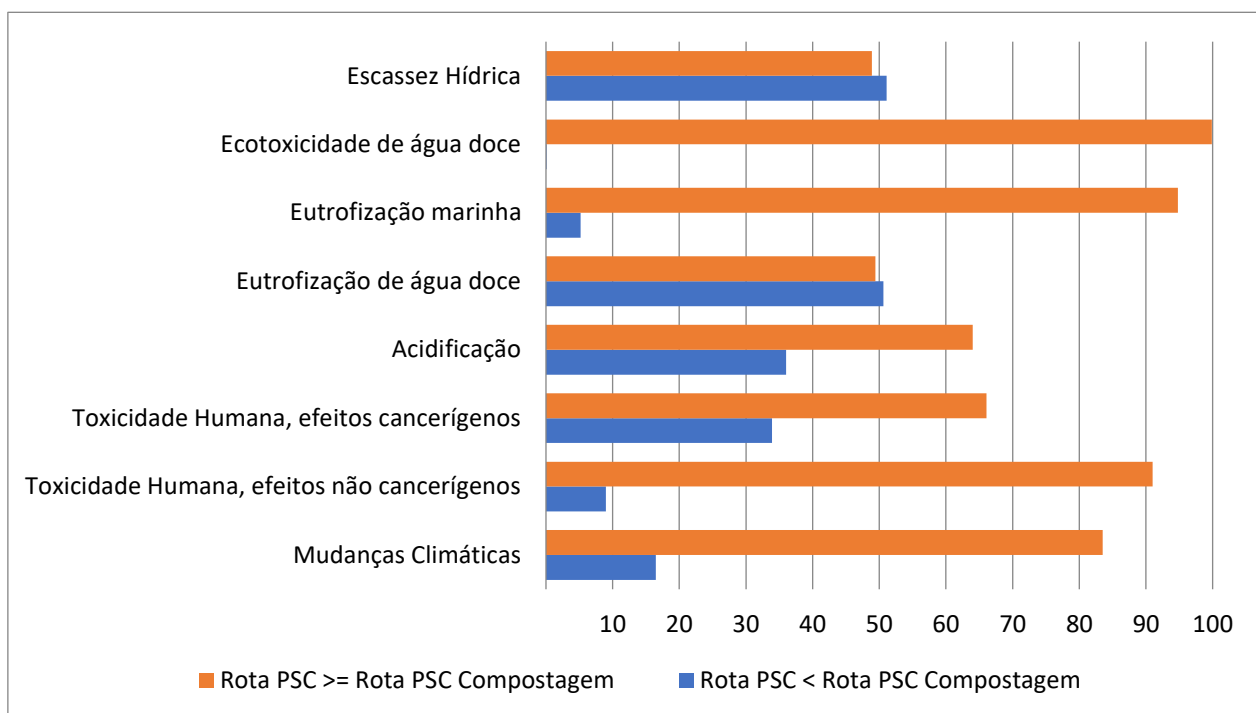
Ao comparar a rota PSC nos cenários base e 2 (Figura 21) a compostagem apresentou melhores resultados nas categorias de mudanças climáticas, eutrofização marinha, ecotoxicidade de água doce, acidificação e toxicidade humana – efeitos cancerígenos e não cancerígenos e resultados negativos nas categorias de escassez hídrica e eutrofização de água doce.

Figura 20: Comparação da rota ASC (Referência e Cenário 2) pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

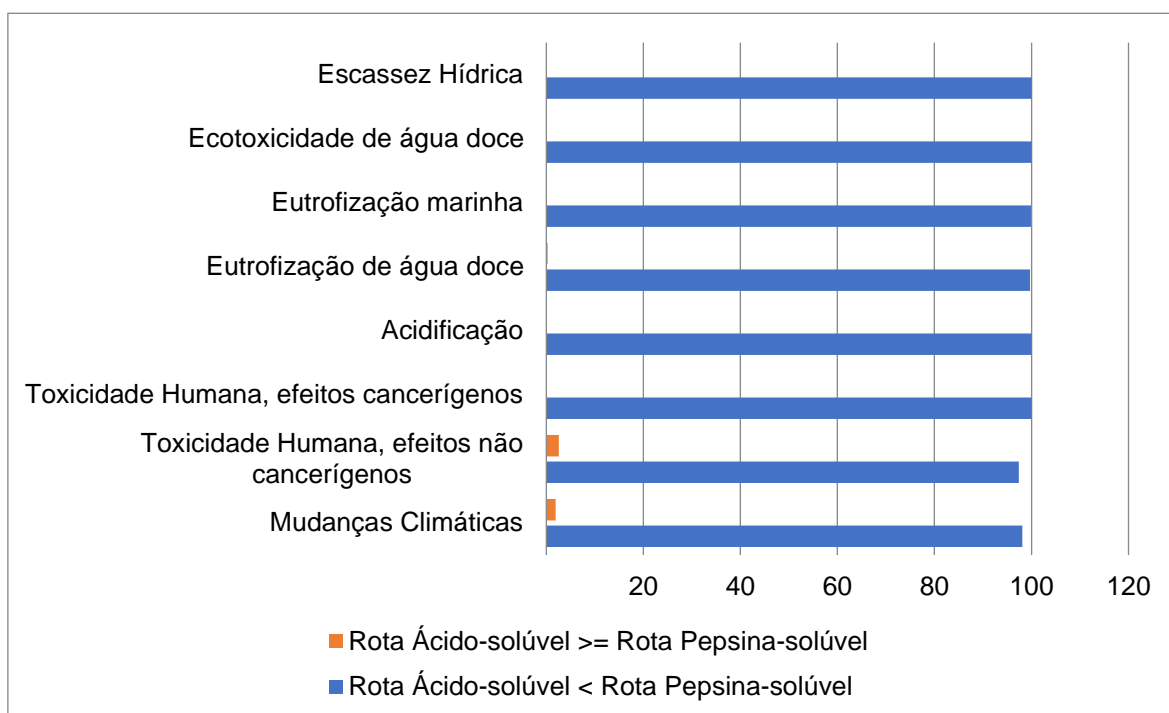
Figura 21: Comparação entre as rotas PSC (Referência e Cenário 2) pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

Comparando as rotas ASC e PSC no cenário 2, observou-se que a rota ASC foi a menos impactante em todas as categorias (Figura 22) devido a maior produção de rejeito de pele (resíduos) na rota PSC.

Figura 22: Comparação entre as rotas ASC e PSC (Cenário 2) pelo método de Monte Carlo



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

6 DISCUSSÃO

6.1 Mudanças nos impactos da extração de colágeno com o escalonamento da produção

Nesse trabalho, observou-se redução nos valores dos impactos ambientais nas categorias de mudanças climáticas, toxicidade humana – efeitos cancerígenos e efeitos não cancerígenos, eutrofização de água doce e marinha, acidificação e ecotoxicidade de água doce, nas duas rotas quando passou-se da escala de laboratório para a piloto. Também foi verificada mudanças na análise de pontos críticos com o escalonamento.

Hetherington *et al.* (2014) analisaram mudanças oriundas do escalonamento de nano materiais e biocombustível lignocelulósico. Esses autores concluíram que a escala industrial requer elementos adicionais ao processamento, como materiais e equipamentos alternativos (no mínimo equipamentos de transferência de calor), além de gerar mudanças no rendimento do produto. Esses fatores foram notados nesse trabalho, com o uso de equipamentos adicionais e diferentes insumos na escala piloto (como vapor e água WFI), mas mudanças no rendimento não foram observadas nesse estudo.

Michailos (2018) estudou os efeitos do escalonamento da produção em biorrefinaria de combustível de aviação através da fermentação de açúcares (glicose e xilose), obtendo um aumento de 26,50% na eficiência energética em escala piloto. Nesse trabalho, também observou-se redução no consumo de energia na rota ASC de 30,54%. Porém, na rota PSC observou-se aumento no consumo de energia em 144, 56%, como também o aumento no consumo dos outros insumos para essa rota.

Tan *et al.* (2018) avaliaram os impactos ambientais da fabricação de nanocristais de celulose, constatando redução de pelo menos 80% nos impactos totais quando se passou da escala laboratorial para a piloto. Essa redução nos valores dos impactos com o escalonamento de nanomaterial e nanocristais de celuloso foi oriunda do menor consumo de energia (redução de até 42%) e de outros insumos.

Silva *et al.* (2020) quando escalonaram a produção de celulose bacteriana perceberam redução no consumo de água e energia com o escalonamento, assim como mudanças nos pontos críticos identificados. Nesse trabalho, observou-se mudanças nos pontos críticos (tratamento de esgoto relevante na escala laboratorial, e produção da água WFI na escala piloto) quando se escalonou as rotas de extração de colágeno.

6.2 Impactos da extração de colágeno em relação a outros produtos semelhantes

Não foram encontrados na literatura trabalhos sobre ACV de colágeno em escala laboratorial ou piloto. Entretanto, Sampaio *et al.* (2017) avaliaram os impactos da extração de gelatina a partir da tilápia em escalas laboratorial e piloto. A partir do colágeno tipo I são comumente obtidos o colágeno parcialmente hidrolisado (gelatina) e o colágeno hidrolisado (PRESTES *et al.*, 2013).

Sampaio *et al.* (2007) extraiu gelatina diretamente de coprodutos da tilápia. Esses autores analisaram dois processos alternativos de extração de gelatina, o primeiro extraia gelatina da pele e o segundo de ossos, cartilagem e cabeça. Esses autores desconsideraram a produção de tilápia e consideraram que a filetagem era realizada totalmente de forma manual. Eles observaram que na extração da gelatina a partir da pele da tilápia o grande consumo de energia elétrica foi o que causou impactos consideráveis em todas as categorias analisadas com exceção das categorias de escassez hídrica e eutrofização marinha, sendo as etapas de desmineralização/desodorização e secagem/moagem responsáveis pelo grande consumo de energia elétrica no processo.

Ao comparar os impactos ambientais do processo de extração de gelatina a partir da pele (Sampaio *et al.* (2017) (escala laboratorial) com os impactos das rotas ASC e PSC de extração do colágeno (escala laboratorial, desconsiderando a produção de tilápia e utilizando os mesmos métodos de avaliação) notou-se que a extração de colágeno (melhor rota ASC em termos ambientais) causa maior impacto que a extração de gelatina em todas as categorias. Essa diferença ocorre principalmente devido a extração da gelatina

ter duração de 5,04 dias e a extração de colágeno pela rota ASC ter duração de aproximadamente 21 dias. Além disso, a rota ASC acarreta maior consumo de reagentes e energia para manter o processo em temperaturas baixas.

Comparando os pontos críticos da extração de colágeno com os da extração de gelatina por Sampaio et al (2017), pode-se dizer que os resultados foram semelhantes. Na extração da gelatina uma das etapas mais impactantes foi a desodorização/desmineralização que corresponde a diálise na extração do colágeno, foi a etapa de purificação por membranas (diálise) que usa água WFI.

Tabela 10: Valores totais dos impactos ambientais nas categorias de impactos em escala laboratorial das rotas ASC e PSC e gelatina*

Categoria de Impacto	Unidade	Gelatina	Rota ASC	Rota PSC	Gelatina/Rota ASC (%)**	Gelatina/Rota PSC (%)**
Mudanças Climática	kg CO2 eq	43,7000	2845,7969	3967,1022	6412,12	8978,04
Toxicidade Humana, efeitos não cancerígenos	CTUh	0,0000	0,0009	0,0017	353875,34	652981,91
Toxicidade Humana, efeitos cancerígenos	CTUh	0,0000	0,0004	0,0007	425368,84	808537,49
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,0052	0,8554	1,1473	16318,34	21920,20
Eutrofização marinha	kg N eq	0,0083	2,7506	4,3409	33039,35	52199,59
Ecotoxicidade de água doce	CTUe	1,0900	65033,0440	118722,8000	5966234,31	10891900,00
Escassez Hídrica	m ³	6,0600	14800,0000	4780,0000	244124,42	78777,89

*Fonte: Sampaio *et al.*, 2017.

* $= \{(V_{final} - V_{inicial}) / V_{inicial}\} \times 100\%$

6.3. Estratégia simplificada para inserir ACV em processos em desenvolvimento

O procedimento metodológico aplicado nas seções 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 sugere uma sequência de etapas para a ACV do colágeno extraído da pele de tilápia, utilizando os dados gerados através da modelagem e simulação de processo (Figura 23). A primeira etapa consiste na coleta de dados dos processos avaliados.

É preciso investir tempo na coleta de dados em escala laboratorial. Nessa etapa é necessário realizar a coleta de dados de caracterização física, química e biológica de emissões líquidas e sólidas para poder indicar o tratamento mais eficiente. Além disso, é importante realizar balanço de massa de entradas e saídas, de todos os insumos, produtos e coprodutos em base seca. Esses dados permitem construir inventários necessários para realizar a modelagem e simulação em escala piloto.

Na segunda etapa, os processos são modelados em escala piloto. Essa etapa é realizada antes de identificar as fases críticas do sistema e definir novos cenários. Os resultados do escalonamento deste estudo mostraram alterações nos pontos críticos das operações ao modelar os processos de extração do colágeno para escala piloto, sendo desencorajada a realização de ACV com dados laboratoriais para esse fim.

O escalonamento de processos requer análises de insumos disponíveis no mercado regional. Além disso, a comparação de equipamentos alternativos é necessária para analisar possíveis modificações no consumo de insumos e rendimento do produto. Equipamentos alternativos podem ter sua eficiência testada primeiro em laboratório (Etapa 1), criando novos cenários a ser analisados e diminuindo possíveis erros da simulação.

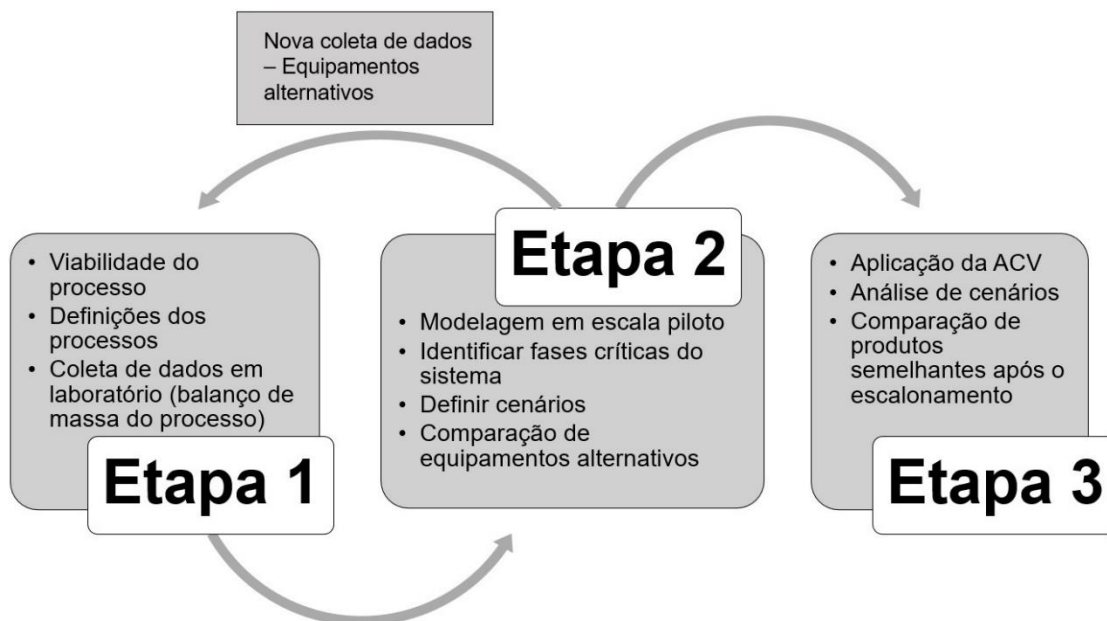
Nesse estudo e no de Hetherington *et al.* (2014), o escalonamento permitiu identificar opções de equipamentos que proporcionassem uma operação unitária mais eficiente, ou seja, a substituição da diálise pela diafiltração (extração de colágeno) com o auxílio do *software*. Tendo a necessidade de realizar novos testes em laboratório (Fase 1) com equipamentos que mostraram ser mais eficientes para coletar dados mais precisos.

A última etapa compreende a ACV, que irá identificar as fases críticas em cada processo ou insumo avaliado e definir chances de modificações por meio de análise de cenários. Pesquisas como a de Michailos (2018) que constatou maior eficiência energética em escala piloto, a de Tan *et al.* (2018) que verificou a redução dos impactos totais quando se mudou a escala e Silva *et al.* (2020) que constatou alterações nos pontos críticos do processo ao realizar o escalonamento, assim como os resultados obtidos nesse trabalho, demonstram a necessidade de realizar ACV em estudos de produtos na fase de desenvolvimento, preferencialmente em escala laboratorial modelada em escala piloto.

Algumas precauções são necessárias ao realizar uma ACV, como a escolha da unidade funcional e limites do sistema. A unidade de produção (kg de produto), utilizada nesse estudo, permite a comparação de produtos semelhantes após o desenvolvimento da planta piloto. A unidade funcional aplicada nesse trabalho permitiu a comparação de produtos semelhantes (produção de gelatina de Sampaio *et al.* (2017)), oferecendo a oportunidade de comparar os impactos totais da produção de gelatina e colágeno extraído da pele da tilápia. E os limites do sistema permite considerar ou não os processos a jusante ou montante da planta piloto.

Enfim, existe a necessidade de realizar estudos de avaliação de impactos no estágio inicial de desenvolvimento de produtos que englobem toda a vida útil do produto. Esses estudos são importantes porque podem indicar possíveis impactos relacionados ao descarte do produto. Dentro desse estudo, que tem seu limite de sistema do “berço ao portão”, os processos desenvolvidos para a extração de colágeno a partir da pele da tilápia demonstraram dados satisfatórios, sendo necessários estudos complementares de otimização do escalonamento e de alternativas para o descarte do colágeno após uso, considerando as principais aplicações desse produto.

Figura 23: Estratégia simplificada para inserir ACV em processos em desenvolvimento



Fonte: Elaboração Própria, 2021.

7 Conclusões

De acordo com esse estudo, a rota ASC apresentou melhor desempenho ambiental, sendo indicada para escalonamento em real escala de produção piloto. A rota ASC apresentou melhores resultados ambientais na escala piloto, devido utilizar menos insumos e ter maior rendimento em comparação a rota PSC. Isso ocorreu no cenário base e após alterações nos cenários com diafiltração (Cenário 1) e com a compostagem como tecnologia de tratamento de resíduos sólidos (Cenário 2).

Recomenda-se a realização testes em escala piloto da purificação do colágeno por diafiltração, substituindo a purificação por membranas. Esse estudo permitirá a coleta de dados primários da diafiltração aplicada ao colágeno e realização de uma nova ACV do processo com menor incerteza nessa etapa do processo.

Esse estudo também verificou diminuição no consumo da maioria dos insumos da rota ASC quando se passou da escala laboratorial para a piloto. Por outro lado, a rota PSC apresentou aumento no consumo dos insumos ao mudar de escala. Essas condições permitiram que os valores médios dos impactos diminuíssem em torno de 68% nessa rota. Essa mudança de escala também proporcionou alterações nos consumos de insumos como também nos pontos críticos dessas rotas. Avaliações de processos em escala laboratorial são dominadas pelo alto consumo de água e energia, gerando resultados com alto nível de incerteza para a tomada de decisão. Assim, indica-se como boa prática a realização de comparações entre processos alternativos em escala laboratorial após modelagem dos processos em escala piloto.

Com relação aos impactos ambientais, observou-se um padrão entre as rotas, sendo a extração do colágeno o processo mais impactante quando comparado a produção e filetagem da tilápia. A mudança de escala proporcionou alterações nos pontos críticos, sendo o tratamento de efluentes e energia mais impactantes na escala laboratorial e em escala piloto foram o consumo da água WFI e o tratamento de resíduos. Também foi observado diferentes impactos positivos quando modificou de escala laboratorial (categoria de escassez hídrica) para escala piloto (categoria de mudanças climáticas).

Analisando-se a coleta de dados realizada em laboratório nesse trabalho e as dificuldades encontradas na modelagem dos processos em escala piloto, recomenda-se a coleta dos seguintes dados em estudos futuros com objetivo de empregar a ACV ex-ante: dados do processo utilizando a diafiltração na etapa de filtração do colágeno e dados de caracterização de todos os efluentes e resíduos sólidos gerados no processo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14040:2009 Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 14044:2009 Versão Corrigida: 2014: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009.

ABDOU, Khaled et al. Environmental assessment of seabass (*Dicentrarchus labrax*) and seabream (*Sparus aurata*) farming from a life cycle perspective: A case study of a Tunisian aquaculture farm. (2017) <http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.01.019>.

ALBANNA, M.; HOLMES, J. H. IV. Skin Tissue Engineering and Regenerative Medicine, 1st Edition. Medical Center Boulevard Winston-Salem, NC, USA. Academic Press is an imprint of Elsevier. ISBN:978-0-12-801654-1, 2016.

Apha-American Public Health Association. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. 22. ed. Washington: Apha, 2012.

Apha-American Public Health Association. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington: Apha, 2017.

ARAÚJO-SILVA, S.L., MORAES, M.A.B., CARMO, C.F., OSTI, J.A.S., VAZ-DOS-SANTOS, A.M. and MERCANTE, C.T.J. Effluent of a polyculture system (tilapias and shrimps): assessment by mass balance of nitrogen and phosphorus. *Journal of Environmental Protection*, vol. 5, no. 10, pp. 799-804, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2014.510081>.

ARVIDSSON, R.; TILLMAN, A.-M.; SANDÉN, B.A.; JANSSEN, M.; NORDELÖF, A.; KUSHNIR, D.; MOLANDER, S. Environmental assessment of emerging technologies: Recommendations for prospective LCA. *J. Ind. Ecol.* v.22, p.1286 – 1294, 2017.

AZARIJAFARI, H.; AMMAR, Y.; MOURAD, B. A. Life cycle assessment of pavements: reviewing research challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, n.4, 2016.

BARE, J.C. Life cycle impact assessment research developments and needs. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v.12, n. 4, 2010.

BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W. *Cradle to Cradle: criar e reciclar ilimitadamente*. São Paulo: Gustavo Gili Brasil, p.193, 2013.

BORGES, F.F., AMARAL, L.A. and DE STEFANI, M.V. Characterization of effluents from bullfrog (*Lithobates catesbeianus*, Shaw, 1802) grow-out ponds.

Acta Limnologica Brasiliensia, vol. 24, no. 2, p. 160-166, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2012005000035>.

BRENNAN, G., TENNANT, M., BLOMSMA, F. Business and production solutions: closing loops and the circular economy. In: Helen, Kopnina, Eleanor, Shoreman- Ouimet (Eds.), *Sustainability: Key Issues*. Routledge: EarthScan, ISBN 9780415529860, p. 219 - 239. *Key Issues in Environment and Sustainability*, 2015.

BUDSBERG, Erik *et al.* Production routes to bio-acetic acid: life cycle assessment. *Biotechnology for Biofuels*, v. 13, n. 1, p. 1-15, 2020.

BUYLE, M. *et al.* The future of ex-ante LCA? Lessons learned and practical recommendations. *Sustainability*, v. 11, n. 19, p. 5456, 2019.

CAO, L., WANG, W., YANG, Y., YANG, C., YUAN, Z., XIONG, S. AND DIANA, J. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. *Environmental Science and Pollution Research International*, v. 14, n. 7, p. 452-462. PMID:18062476, 2007. <http://dx.doi.org/10.1065/espr2007.05.426>.

CAMEL, B.P., MORAES, M.A.B., CARMO, C.F., VAZ-DOS-SANTOS, A.M., TABATA, Y.A., OSTI, J.A.S., ISHIKAWA, C.M., CERQUEIRA, M.A.S. and MERCANTE, C.T.J. Water quality assessment of a trout farming effluent, Bocaina, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 6, n. 10, p. 909-915, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.610086>.

CARVALHO, R.A., GROSSO, C.R.F. Efeito do tratamento térmico e enzimático nas propriedades de filmes de gelatina. *Ciênc. Tecnol. Aliment. Campinas*, v. 26, n.3, p. 495-501, 2006.

CEARÁ (Estado). Resolução nº 2, de 02 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as portarias Semace Nº154, de 22 de julho de 2002 e Nº111, de 05 de abril de 2011, e altera a portaria Semace Nº151, de 25 de novembro de 2002. v. 9, n. 37, Seção 2.

COELHO, P.N., AND R. HENRY. The small foreigner: New laws will promote the introduction of non-native zooplankton in Brazilian aquatic environments. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2017, <https://doi.org/10.1590/s2179-975x0717>.

CHALERMTHAI, B.; ASHRAF, M. T.; BASTIDAS-OYANEDEL, J. R.; OLSEN, B. D.; SCHMIDT, J. E.; TAHER, H.; Techno-Economic Assessment of Whey Protein-Based Plastic Production from a Co-Polymerization Process. *Polymers*, v. 12, n. 4, p. 847, 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/polym12040847>.

CHEHEBE, J.R.B. *Análise do Ciclo de Vidas de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

CHEN, J. *et al.* Extraction and characterization of acid-soluble collagen from scales and skin of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Lwt - Food Science And Technology*, v. 66, p.453-459, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.070>.

CHI, C. F.; WANG, B.; LI, Z. R.; LUO, H. Y.; DING, G. F. Characterization of Acid-soluble Collagens from the Cartilages of Scalloped Hammerhead (*Sphyrna lewini*), Red Stingray (*Dasyatis akajei*), and Skate (*Raja porosa*). *Food Sci. Biotechnol.* v.22, p.909 – 916, 2013.

CHUAYCHAN, S.; BENJAKUL, S.; KISHIMURA, H.. Characteristics of acid- and pepsin-soluble collagens from scale of seabass (*Lates calcarifer*). *Lwt - Food Science And Technology*, v. 63, n. 1, p.71-76, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.002>.

COLLADO-RUIZ, D.; OSTAD-AHMAD-GHORABI, H. Funon theory: Standardizing functional units for product design. *Resources, Conservation and Recycling*, v.54, n.10, 2010.

COLTRO, L. Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão, 2007. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_WIC_185_055_22686.pdf>. Acesso em: 05 de janeiro 2021.

CURRAN, M.A. LIFE CYCLE ASSESSMENT: PRINCIPLES AND PRACTICE, 2006.

CURRAN, M.A. Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability. *Current Opinion in Chemical Engineering*, v. 2, n.3, 2013.

CRUZ-DILONÉ, P. A Methodological Framework for Evaluating the Environmental Performance of Large-Scale Sanitation Systems in Developing Countries, 2014.

EVANS, L. B.; FIELD, R. P. Bioprocess simulation: A new tool for process development. *Nature Biotechnology*, v. 6, p. 200-203, 1988.

FEHRENBACH, H.; GRAHL, B.; GIEGRICH, J.; BUSCH, M. Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v.20, n.11, 2015.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018*. Roma: FAO, p.250, 2018.

PATI, F., ADHIKARI, B., DHARA, S., Isolation and characterization of fish scalecollagen of higher thermal stability, *Bioresour. Technol.* v.101 , p.3737–3742, 2010.

FIGUEIREDO, G.I. *Elaboração de Compósitos de Nanohidroxiapatita e Colágeno Proveniente de Resíduos do Beneficiamento de Tilápia do Nilo (Oreochromis niloticus)*, 2015.

GARCÍA, B.G. *et al.* Life Cycle Assessment of Seabass (*Dicentrarchus labrax*) Produced in Offshore Fish Farms: Variability and Multiple Regression Analysis, 2019. <http://dx.doi.org/10.3390/su11133523>.

GARCÍA-SANTIAGO, X. *et al.* Eco-efficiency of a marine biorefinery for valorization of cartilaginous fish biomass. *Journal of Industrial Ecology*, 2020.

GÓMEZ-GUILLÉN, M.C., GIMÉNEZ, B., LÓPEZ-CABALLERO, M.E., MONTERO, M.P. Functional and bioactive properties of collagen and gelatina from alternative sources: A review. *Food Hydrocolloids*, v. 25, p.1813-1827, 2011.

GREGORY, J. R., MONTALBO, T. M. e KIRCHAIN. R. E. Analyzing uncertainty in a comparative life cycle assessment of hand drying systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 8, p. 1605-1617, 2013.

GREEN, R.; AGARWAL, R.; LOGUE, D. INNOVATION. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*; Wright, J.D., Ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, p. 145–151, 2015.

GUINÉE, J. B; GORÉE, M; HUPPES, R, H. G.; KLEIJN. R.; KONING, A.; SLEESWIJK, L. O. A. W.; SUH, S.; HAES, H. A. U. *Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*. Publisher: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2001.

GUINÉ, J.B. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. New York: Kluwer Academic Publishers. 2004.

GUINÉE, J.B.; HEIJUNGS, R. HUPPES, G. Economic Allocation: Examples and Derived Decision Tree. *International Journal of Life Cycle Assessment*. v.9, n.1, p.23-33, 2004.

GUINÉE, J.B.; HEIJUNGS, R. Calculating the Influence of Alternative Allocation Scenarios in Fossil Fuel Chains. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v.12, n.3, p.173 – 180, 2007.

HASHIM, P.; MOHD RIDZWAN, M. S.; BAKAR, J.; MAT HASHIM, D. Collagen in food and beverage industries. *International Food Research Journal*, v.22, p. 1 – 8, 2015.

HAUSCHILD, M.; GOEDKOOP, M.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; JOLLIET, O.; MARGNI, M.; SCHRYVER, AN DE.; HUMBERT; S.; LAURENT, A.; SERENELLA SALA; PANT, R. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v.18, n.3, 2013.

HETHERINGTON, A. C. *et al.* Use of LCA as a development tool within early research: challenges and issues across different sectors. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 1, p. 130-143, 2014.

HONG, H. *et al.* Preparation of low-molecular-weight, collagen hydrolysates (peptides): Current progress, challenges, and future perspectives. *Food Chemistry*, v. 301, p.125-135, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125222>.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção da Pecuária Municipal*. Rio de Janeiro: IBGE; p 1 – 49, 2015.

IBGE. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios: Síntese de indicadores 2017*. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2018.

IFU HAMBURG GMBH. *Umberto® NXT LCA: User manual*. ifu Hamburg GmbH. Hamburg / Germany, 2015.

ILCD (INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM). *ILCD Handbook: Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment*. 2010. Disponível em: < <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO/TR 14049: Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis*. 2012.

JUNQUEIRA, L.C.; CARNEIRO, J. *Histologia Básica*. Guanabara, 1990.

KAEWDANG, O., BENJAKUL, S., KAEWMANEE, T. AND KISHIMURA, H. Characteristics of collagens from the swim bladders of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Food Chemistry* v.155, p.264-270, 2015.

KARA, K. *et al.*, Biodiesel production from waste fish oil with high free fatty acid content from Moroccan fish-processing industries. *Egyptian Journal of Petroleum*, v.27, p.249-255, 2017.

KIM, H.K., KIM, Y.H., KIM, Y.J., PARK, H.J. AND LEE, N.H. Effects of ultrasonic treatment on collagen extraction from skins of the sea bass *Lateolabrax japonicus*. *Fisheries Science* v.78, p.485-490, 2012.

KIMPARA, J.M., ZADJBAND, A.D. , VALENTI, W.C. Medindo a sustentabilidade na aquicultura. *Boletim Ablimno*, v. 38, n. 2, p. 1-13, 2010.

KITTIPHATTANABAWON, P., BENJAKUL, S., SINTHUSAMRAN, S. AND KISHIMURA, H. Characteristics of collagen from the skin of clown featherback (*Chitala ornata*). *International Journal of Food Science and Technology* v.50, n.9, p.1972-1978, 2015.

KOKOSZKA, S.; DEBEAUFORT, F.; HAMBLETON, A.; LENART A.; VOILLEY, A.; *Innov. Food Sci. Emer. Technol.*, v.11, 2010.

KUBITZA, F. *Aquicultura no Brasil: principais espécies, áreas de cultivo, rações, fatores limitantes e desafios. Panorama da Aquicultura*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 150, 2015.

LAFARGA, T.; HAYES, M. Bioactive peptides from meat muscle and by-products: generation, functionality and application as functional ingredients. *Meat Science*, 2014.

LEÓN-LÓPEZ, ARELY *et al.*; Hydrolyzed Collagen—Sources and Applications. *Molecules*, [s.l.], v. 24, n. 22, p.4031-4047, 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/molecules24224031>.

LIANG, Q., WANG, L., SUN, W., WANG, Z., XU, J. AND MA, H. Isolation and characterization of collagen from the cartilage of Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*). *Process Biochemistry* v.49, n.2, p.318-323, 2014.

LI, Z.R., WANG, B., CHI, C.F., ZHANG, Q.H., GONG, Y.D., TANG, J.J., LUO, H.Y. AND DING, G.F. Isolation and characterization of acid soluble collagens and pepsin soluble collagens from the skin and bone of Spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*). *Food Hydrocolloids* v.31, n.1, p.103-113, 2013.

LIU, D., LIANG, L., REGENSTEIN, J.M. AND ZHOU, P. Extraction and characterisation of pepsin-solubilised collagen from fins, scales, skins, bones and swim bladders of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*). *Food Chemistry* v.133, n.4, p.1441-1448, 2012.

LUZ, L. M.; *Integração da Avaliação do Ciclo de Vida ao processo de desenvolvimento de produto: uma proposta metodologica*. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C.T.; MATTHEWS, D. H. *Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter*. 2015. Disponível em: < <https://www.icatextbook.com/>>. Acesso em: 10 fev. 2020.

MENEZES, M.L.L.R. *et al.*; Optimization of the collagen extraction from Nile tilapia skin (*Oreochromis niloticus*) and its hydrogel with hyaluronic acid. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, v. 189, 2020.

MENTEN, F.; TCHUNG-MING, S.; LORNE, D.; BOUVART, F. Lessons from the use of a long-term energy model for consequential life cycle assessment: The BTL case. *Renew. Sustain. Energy Rev.* v.43, p.942–960, 2015.

MERCANTE, C.T.J., VAZ-DOS-SANTOS, A.M., MORAES, M.A.B., PEREIRA, J.S. and LOMBARDI, J.V. Bullfrog (*Lithobates catesbeianus*) farming system: water quality and environmental changes. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 26, n. 1, p. 9-17, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2014000100003>.

NEWTON, R. W.; LITTLE, D. C.; Mapping the impacts of farmed Scottish salmon from a life cycle perspective. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 23, n. 5, p. 1018-1029, 2018.

MICHAÏLOS, S. Process design, economic evaluation and life cycle assessment of jet fuel production from sugar cane residue. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 37, n. 3, p. 1227-1235, 2018.

Ministério da Pesca e Aquicultura (MPA); 1o Anuário Brasileiro da Pesca e Aquicultura; 2014.

MORAES, M. A. B.; AVALIAÇÃO DE EFLUENTES DE SISTEMA INTENSIVO DE TRUTICULTURA ATRAVÉS DE INDICADORES AMBIENTAIS. 2014. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Aquicultura e Pesca, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - Instituto de Pesca, São Paulo, 2014.

HECHT-NIELSEN, R. Replicator neural networks for universal optimal source coding. *Science*, v.269, n.5232, p.1860-1863, 1995.

NORBURY W, HERNDON DN, TANKSLEY J, JESCHKE MG, FINNERTY CC. Infection in Burns. *Surgical Infections*. V.17, n.2, p.250– 255, 2016.

NHU, T. T., *et al.* Resource consumption assessment of Pangasius fillet products from Vietnamese aquaculture to European retailers. (2015) <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.030>.

OLIVEIRA, V. M., *et al.* Collagen: general characteristics and production of bioactive peptides - a review with emphasis on byproducts of fish. *Acta Of Fisheries And Aquatic Resources*, v. 2, n. 5, p. 56-68, 2017.

OLSEN, R.L., TOPPE, J.Y.; KARUNASAGAR, I. Challenges and realistic opportunities in the use of by-products from processing of fish and shellfish. *Trends in Food Science & Technology*, v. 36, n. 2, p. 144-151, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.01.007>

PAIVA, A.F.O. Geração automática de modelos de simulação de uma linha de produção na indústria têxtil. Dissertação de Mestrado. Engenharia Industrial, Universidade do Minho. Guimarães. p.239, 2005.

PEREIRA, C. S. S. Avaliação técnico-econômica da extração de ésteres de forbol da torta do pinhão manso com dióxido de carbono supercrítico, 2015.

PEIXE BR (Associação Brasileira da Piscicultura). Anuário Peixe BR da Piscicultura 2018. São Paulo. p. 71,2018.

PELICICE, F.M., V.M. AZEVEDO-SANTOS, J.R.S. VITULE, M.L. ORSI, D.P. LIMA-JUNIOR, A.L.B. MAGALHÃES, P.S. POMPEU, M. PETRERE-JUNIOR.

Neotropical freshwater fishes imperilled by unsustainable policies. *Fish and Fisheries* v.18, p.1119–1133, 2017.

PRESTES, R.C. *et al.* Caracterização da fibra de colágeno, gelatina e colágeno hidrolisado. *Rev Bras Prod Agroindustr*, v. 15, n. 4, p. 375-82, 2013.

PETRIDES, D. Bioprocess design and economics. *Bioseparations Science and Engineering*, 2000.

PICCINNO, F.; HISCHIER, R.; SEEGER, S.; SOM, C.; Predicting the environmental impact of a future nanocellulose production at industrial scale: application of the life cycle assessment scale-up framework. *Journal Of Cleaner Production*, v. 174, p. 283-295, 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.226>.

Pinedo, M. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. New York: Springer, 2012.

POPPE, J.; Gelatin Thickening and Gelling Agents for Food; Imeson A., ed.; Blackie Academic & Professional: New York, 1997.

PRADO, I. M., *et al.*; Uso de simulador no estudo de aumento de escala e viabilidade econômica do processo de extração supercrítica de produtos naturais. 2009.

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... & Pennington, D. W. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment international*, v30, n.5, p.701-720, 2004.

RICARD-BLUM, S. The collagen family. *Cold Spring Harbor perspectives in biology*, v. 3, n. 1, 2011.

RUBIN, E.S.; AZEVEDO, I.M.L.; JARAMILLO, P.; YEH, S. A review of learning rates for electricity supply technologies. *Energy Policy*. V.86, p.198–218, 2015.

SAMPAIO, A. P. C. *et al.*; Life cycle assessment from early development stages: the case of gelatin extracted from tilapia residues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, n. 5, p. 767-783, 2017.

SARAIVA JÚNIOR, A. F.; TABOSA, C. M.; COSTA, R. P. Monte Carlo simulation applied to order economic analysis. *Production*, v. 21, n. 1, p.149-164, 2011. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132011005000016>.

SCHULTER, E. P.; FILHO, J. E. R. V. Evolução da piscicultura no Brasil: Diagnóstico e desenvolvimento da cadeia produtiva de tilápia. Rio de Janeiro: Ipea, 2017.

SILVA, R. A. *et al.*; An approach for implementing ecodesign at early research stage: A case study of bacterial cellulose production. *Journal of Cleaner Production*, 2020.

SILVA, T. F.; PENNA, A. L. B. Chemical characteristics and functional properties of collagen. *Rev Inst Adolfo Lutz, São Paulo*, v. 2, n. 71, p.530-540, 2012.

SINTHUSAMRAN, S.; BENJAKUL, S.; KISHIMURA, H. Comparative study on molecular characteristics of acid soluble collagens from skin and swim bladder of seabass (*Lates calcarifer*). *Food Chemistry*, v. 138, p. 2435-2441, 2013.

TAN, Lianghai *et al.* Combining ex-ante LCA and EHS screening to assist green design: A case study of cellulose nanocrystal foam. *Journal of Cleaner Production*, v. 178, p. 494-506, 2018.

TAN, R.; HEZEL, F.; FRANZREB, M.. Continuous single pass diafiltration with alternating permeate flow direction for high efficiency buffer exchange. *Journal of Membrane Science*, v. 619, p. 118695, 2021.

The state of world fisheries and aquaculture 2012. FAO Fisheries Department. Roma, 230p, 2012.

TSOY, N. *et al.*; Upscaling methods used in ex ante life cycle assessment of emerging technologies: a review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, p. 1-13, 2020.

UNEP. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Towards a Life Cycle Sustainability Assessment: Making informed choices on products. UNEP/SETAC, 2011.

VERCELLIS, C. *Business Intelligence: Data Mining and Optimization for Decision Making*. UK: Wiley and Sons, Ltd, 2009.

VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, G. S. Produção e caracterização de silagem, farinha e óleo de tilápia e sua utilização na alimentação animal. Instituto de Pesca, 2006.

WALRAND S, CHIOTELLI E, NOIRT F, MWEWA S, LASSEL T. Consumption of a functional fermented milk containing collagen hydrolysate improves the concentration of collagen-specific amino acids in plasma. *J Agric Food Chem*. V. 56, n.16, p.7790–7795, 2008

WANG, M.; LU, M. Tilapia polyculture: a global review. *Aquaculture Research*, v. 47, n. 8, p.2363-2374, 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/are.12708>.

YACOUT, D. M. M.; SOLIMAN, N. F.; YACOUT, M. M.. Comparative life cycle assessment (LCA) of Tilapia in two production systems: semi-intensive and intensive. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1061-5>.

ZAMPORI, L.; PANT, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76- 00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959.

ZHANG, Y. H., OLSEN, K., GROSSI, A., & OTTE, J. Effect of pretreatment on enzymatic hydrolysis of bovine collagen and formation of ACE-inhibitory peptides. *Food Chemistry*, v.141, n.3, p.2343 - 2354, 2013.

ZHOU, J.; CHANG, V.W.-C.; FANE, A.G. Environmental life cycle assessment of reverse osmosis desalination: The influence of different life cycle impact assessment methods on the characterization results. *Desalination*, v. 283, n.1, 2011.

ZOU, Y., XU, P., LI, P., CAI, P., ZHANG, M., SUN, Z., WANG, D. Effect of ultrasound pre-treatment on the characterization and properties of collagen extracted from softshelled turtle (*Pelodiscus sinensis*). *LWT - Food Science and Technology*, v.82, p.72–81, 2017.