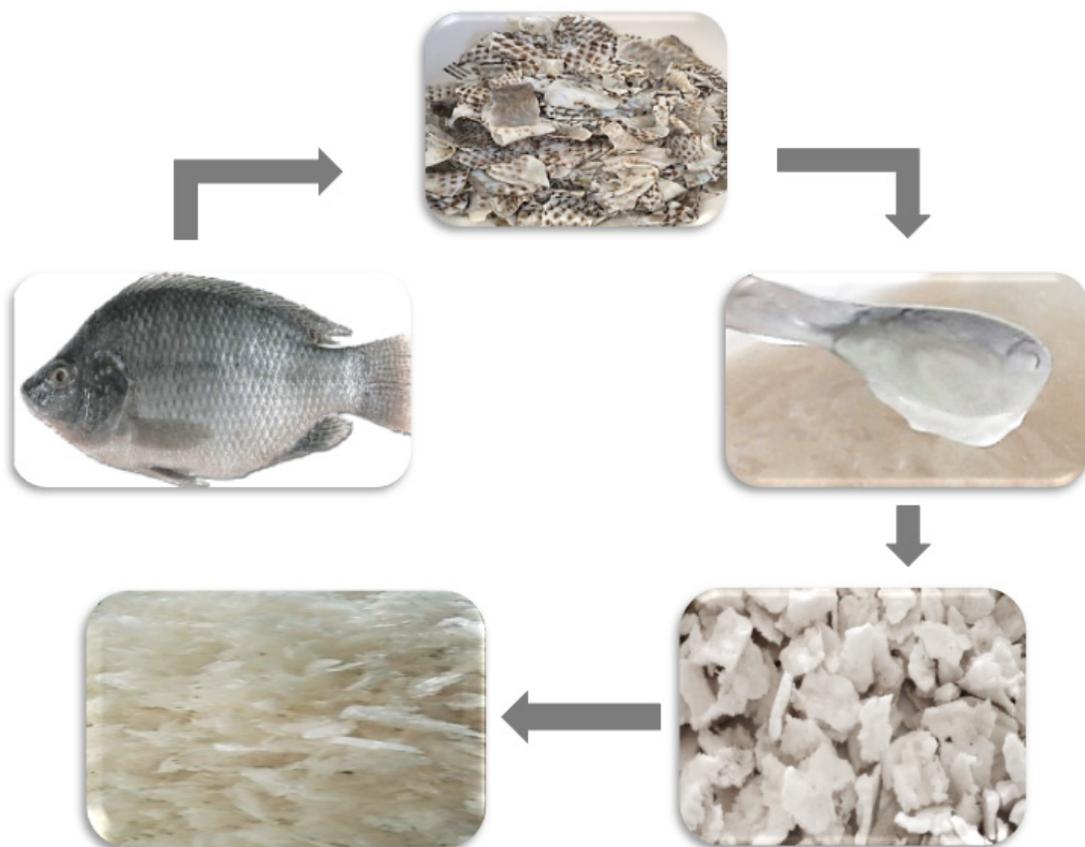




Avaliação do Ciclo de Vida de Rotas para Extração de Colágeno da Pele de Tilápia



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroindústria Tropical
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
213**

**Avaliação do Ciclo de Vida de Rotas para
Extração de Colágeno da Pele de Tilápia**

Jorgiane Pires Bezerra
Maria Cléa Brito de Figueirêdo
Maria do Livramento Linhares Rodrigues
Gabriela Ibiapina Figueiredo Câmara
Viviane da Silva Barros
Men de Sá Moreira de Souza Filho

Unidade responsável pelo conteúdo e edição:

Embrapa Agroindústria Tropical
Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Pici
CEP 60511-110 Fortaleza, CE
Fone: (85) 3391-7100
Fax: (85) 3391-7109
www.embrapa.br/agroindustria-tropical
www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê Local de Publicações
da Embrapa Agroindústria Tropical

Presidente
Gustavo Adolfo Saavedra Pinto

Secretária-executiva
Celli Rodrigues Muniz

Secretária-administrativa
Eveline de Castro Menezes

Membros
*Marlos Alves Bezerra, Ana Cristina Portugal
Pinto de Carvalho, Deborah dos Santos Garruti,
Dheyne Silva Melo, Ana Iraidy Santa Brígida,
Eliana Sousa Ximendes, Nívia da Silva Dias-Pini*

Revisão de texto
José Cesamildo Cruz Magalhães

Normalização bibliográfica
Rita de Cassia Costa Cid

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felíce Barbeiro

Editoração eletrônica
José Cesamildo Cruz Magalhães

Fotos da capa
Todos os autores

1ª edição
On-line (2021)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Agroindústria Tropical

Avaliação do ciclo de vida de rotas para extração de colágeno da pele de tilápia / Maria Cléa Brito de Figueirêdo... [et al.]. – Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2021.

29 p. : il. ; 16 cm x 22 cm – (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 1679-6543; 213).

Publicação disponibilizada on-line no formato PDF.

1. *Oreochromis niloticus*. 2. Impactos ambientais. 3. Avaliação ambiental. 4. Obtenção de proteína colagenosa. I. Bezerra, Jorgiane Pires. II. Figueirêdo, Maria Cléa Brito de. III. Rodrigues, Maria do Livramento Linhares. IV. Câmara, Gabriela Ibiapina Figueiredo. V. Barros, Viviane da Silva. VI. Souza Filho, Men de Sá Moreira de. VII. Série.

CDD 363.7285

Sumário

Resumo.....	4
Abstract.....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	8
Resultados e Discussão.....	16
Conclusões.....	25
Agradecimentos.....	26
Referências.....	26
ANEXO - Tabela A1.....	28
ANEXO - Tabela A2.....	29

Avaliação do Ciclo de Vida de Rotas para Extração de Colágeno da Pele de Tilápia

Jorgiane Pires Bezerra¹

Maria Cléa Brito de Figueirêdo²

Maria do Livramento Linhares Rodrigues³

Gabriela Ibiapina Figueiredo Câmara⁴

Viviane da Silva Barros⁵

Men de Sá Moreira de Souza Filho⁶

Resumo - Este trabalho avaliou os impactos ambientais do ciclo de vida de duas rotas alternativas para extração de colágeno a partir da pele de tilápia em escala laboratorial: ácido-solúvel e pepsina-solúvel. Investigaram-se oportunidades de melhoria no desempenho ambiental dessas rotas. Utilizou-se a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando impactos nas mudanças climáticas, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena, acidificação, eutrofização marinha e de água doce, ecotoxicidade de água doce e escassez hídrica. Os resultados mostraram que a rota pepsina-solúvel apresentou melhor desempenho ambiental inicial, significativo para mudanças climáticas, eutrofização marinha e de água doce e acidificação. Os impactos em ambas as rotas foram derivados principalmente das etapas de retirada de proteínas não colagenosas e de extração e remoção de lipídeos, devido ao consumo de energia e de ácido acético. Foram avaliadas alterações no

¹ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, bolsista de iniciação científica, Fortaleza, CE

² Bacharel em Ciência da Computação, doutora em Engenharia Civil (Saneamento Ambiental), pesquisadora da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

³ Bacharel em Química, mestra em Química, doutoranda em Química na Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE

⁴ Bacharel em Química, mestra em Química, doutoranda em Química na Universidade Federal do Ceará, professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Fortaleza, CE

⁵ Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, CE

⁶ Engenheiro Químico, doutor em Engenharia da Produção, Universidade Federal de São Carlos, SP, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE

tempo de processamento e na quantidade do ácido acético na rota ácido-solúvel que levaram à redução dos impactos ambientais. A comparação final das rotas mostra que elas apresentam impactos similares em quatro categorias, mas significativamente diferentes em outras quatro. Assim, indica-se a prototipagem das duas rotas em escala piloto e a realização de nova comparação de impactos ambientais.

Termos para indexação: impactos ambientais; avaliação ambiental; obtenção de proteína colagenosa.

Life Cycle Assessment of Pathways for Extracting Collagen from Tilapia Skin

Abstract - This study assessed the life cycle environmental impacts of two alternative pathways for extracting collagen from tilapia skin, at laboratory level of technology maturity: soluble-acid and soluble-pepsin. The aim was to investigate opportunities to improve the environmental performance of these pathways. Life cycle assessment (LCA), according to ISO 14040 and 14044, was applied to this assessment, considering the following impact categories: climate change, human toxicity, cancer and non-cancer effects, freshwater ecotoxicity, freshwater and marine eutrophication, acidification and water scarcity. The results showed that the soluble-pepsin pathway presented better initial environmental performance, significant for climate change, marine and freshwater eutrophication and acidification. Impacts in both pathways were primarily from the phases of non-collagenous protein removal, lipids removal and extraction because of energy and acetic acid use. Modifications in processing time and amount of acetic acid used were proposed and evaluated, reducing impacts in most of the evaluated categories. The final comparison of pathways, after these modifications were considered, shows that their environmental impacts were similar for four categories but significantly different for the other four. Thus, both pathways are indicated for modeling at industrial production scale and new comparison in terms of their environmental impacts.

Index terms: environmental impacts; environmental assessment; obtaining collagenous protein.

Introdução

O crescimento da produção e do consumo de pescados motiva a necessidade de pesquisas para o reaproveitamento dos resíduos gerados. De acordo com dados de Lima (2013), pele e outros materiais provenientes do processo de filetagem industrial são passíveis de serem utilizados como matérias-primas para, por exemplo, produção de farinhas e óleos de peixe. Com isso, agrega-se valor econômico a um material que seria descartado e reduzem-se os impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado (Lima, 2013).

Conforme a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2010), mais da metade da produção mundial de peixes é de tilápia-do-Nilo (*Oreochromis niloticus*). Cerca de 50 a 70% do peso dessa espécie é constituído de pele, ossos e escamas, materiais usualmente considerados resíduos (El Rashidy et al., 2015). Esses resíduos, especialmente a pele, podem ser reaproveitados para a extração do colágeno devido a 30% do seu peso seco serem constituídos dessa proteína (Sun et al., 2017).

A pele de tilápia-do-Nilo, comumente descartada por empresas de filetagem e sem valor econômico, é uma alternativa promissora para obtenção de colágeno, que é usualmente extraído de tecidos conjuntivos de porco e boi. A extração de colágeno a partir da pele de pescados já é foco em algumas pesquisas (Arumugam et al., 2018; Wang et al., 2018; Tan; Chang, 2018).

Nesse contexto, foram desenvolvidas no Laboratório de Tecnologia da Biomassa, localizado na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Agroindústria Tropical, duas rotas tecnológicas para obtenção de colágeno a partir da pele da tilápia, uma baseada em um tratamento ácido (ácido-solúvel) e outra com a introdução de enzimas (pepsina-solúvel).

Embora essas rotas sejam uma opção ao descarte da pele de tilápia e agreguem valor econômico a esse abundante material, é importante avaliar seus potenciais impactos ambientais já no início do processo de desenvolvimento tecnológico. Essa avaliação permite a identificação de etapas críticas, o estudo de cenários alternativos de produção e a seleção de rotas menos impactantes.

A ferramenta desenvolvida para avaliação dos impactos ambientais de processos e produtos é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), normatizada pelas ABNT ISO 14040 e 14044 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2009a, 2009b). Avaliam-se os impactos que o processo e seu produto causam ao meio ambiente, considerando-se o ciclo de vida do produto, ou seja, desde a extração da matéria-prima e dos insumos até o uso e descarte final. Os resultados de uma ACV são empregados para tomada de decisão sobre sustentabilidade ambiental de produtos e processos em empresas.

Estudos anteriores sobre ACV de colágeno não foram encontrados na literatura científica. Sampaio et al. (2017) avaliaram rotas alternativas de extração de gelatina a partir da pele e de resíduos da carne mecanicamente processada de tilápia. Esses autores observaram que a rota que utiliza pele para extração de gelatina foi a menos impactante em termos ambientais.

Assim, este trabalho avalia os impactos ambientais do ciclo de vida de duas rotas alternativas em escala laboratorial, propostas para extração de colágeno a partir da pele de tilápia: ácido-solúvel e pepsina-solúvel (SIGEN código: A3B1887). Essas rotas estão em estágio inicial de desenvolvimento tecnológico, com definição técnica do processo de produção utilizando-se equipamentos de laboratório.

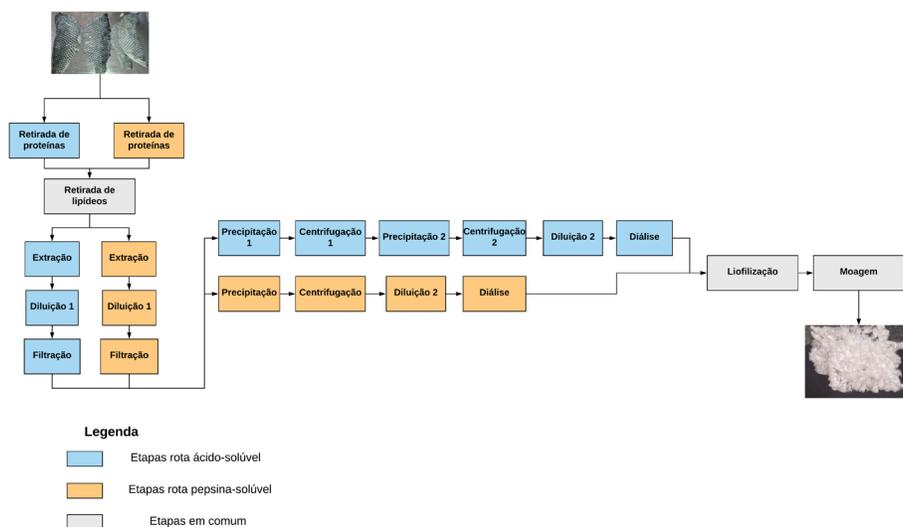
Busca-se com essa avaliação identificar oportunidades de melhoria no desempenho ambiental das rotas em estudo, assim como apontar a rota mais promissora para prototipagem em escala piloto. Inicialmente, as rotas em estudo são comparadas, identificando-se a de melhor desempenho ambiental. Em seguida, realiza-se a análise das etapas que mais contribuem para geração de impactos ambientais, identificando-se as etapas críticas e avaliando-se possibilidades de melhoria. Por fim, as melhorias são incorporadas às rotas e nova comparação é realizada visando à indicação da rota de menor impacto.

Material e Métodos

Objetivo, unidade funcional e escopo do estudo

Utilizou-se a ACV para avaliação de duas rotas para obtenção do colágeno em escala laboratorial: ácido-solúvel (ASC) e pepsina-solúvel (PSC) (Figura 1).

Essas rotas contêm as seguintes etapas em comum: retirada de lipídeos, liofilização e moagem do material liofilizado. Elas diferem-se em relação ao tempo de processamento na retirada de proteínas não colagenosas; no tempo de filtração; na concentração de ácido acético; no tempo de processamento, na proporção colágeno/ácido e adição de uma enzima na etapa de extração; na concentração do ácido acético na diluição 1; no número de precipitações e centrifugações; e no material usado para a segunda diluição e na diálise. Atualmente, essas rotas estão sob sigilo para avaliação de patenteabilidade e por isso são apresentadas sem detalhamento neste estudo.

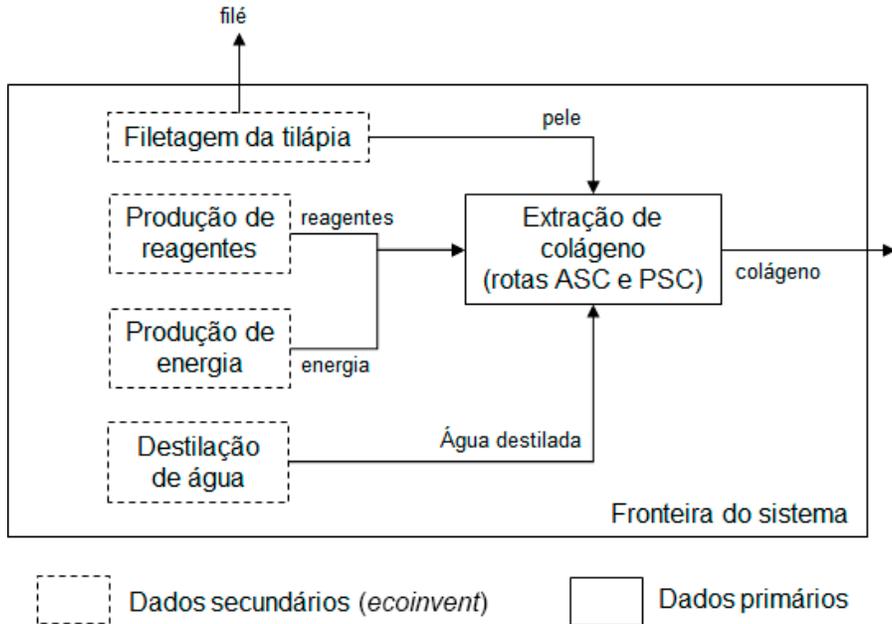


Fonte: autoria própria.

Figura 1. Fluxograma das rotas ácido-solúvel (ASC) e pepsina-solúvel (PSC), mostrando semelhanças e diferenças nas etapas de produção.

O escopo deste trabalho foi do “berço ao portão”, abrangendo os processos de produção de insumos (energia, água e reagentes químicos), filetagem e extração do colágeno por meio das duas rotas analisadas. O sistema de produto e o tipo de inventário (primário ou secundário) utilizado para caracterizar a produção em processos específicos estão apresentados na Figura 2. Nos processos com inventários primários, foram coletados dados no laboratório referente à quantidade de insumos, materiais, produtos e coprodutos, enquanto nos processos com inventários secundários esses dados foram provenientes da base de dados *ecoinvent*. A produção de tilápia

integra o escopo deste trabalho, pois a pele foi considerada um resíduo do processo de filetagem. Também não foi considerado o tratamento dos efluentes do processo de extração de colágeno.



Fonte: autoria própria.

Figura 2. Fronteira do sistema avaliado, com processos em que dados primários e secundários foram coletados.

Adotou-se como função a produção de colágeno e como unidade funcional 1 g de colágeno, considerando-se a produção de um mês.

Inventários com dados secundários

Os inventários com dados secundários, referentes aos processos de produção de insumos (Quadro 1) (reagentes químicos e energia), foram provenientes da base suíça *ecoinvent* (Weidema et al., 2013). Para a energia, foi considerada a seguinte combinação de fontes na matriz elétrica brasileira, conforme dados do balanço energético brasileiro de 2015: 3,2% de carvão e derivados; 13% de gás natural; 7,3% de biomassa; 2,0% de energia eólica;

65,2% de hidroelétricas; 2,5% de energia nuclear; e 6,9% de petróleo e derivados (Empresa de Pesquisa Energética, 2015).

Produção de insumos	Nome do inventário na base <i>ecoinvent</i>
Água	Water, well, in ground BR (in water)
Energia	Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U
Cloreto de sódio	Sodium chloride, powder {GLO} market for Alloc Def, U
Hidróxido de sódio	Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Alloc Def, U
Ácido acético	Acetic acid, without water, in 98% solution state {GLO} market for Alloc Def, U
Etanol	Ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant/BR U
Fosfato dissódico	Sodium {GLO} market for Alloc Def, U
	Phosphate rock, as P2O5, 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

Quadro 1. Nomes dos inventários na base de dados *ecoinvent*.

O inventário relativo à produção da enzima pepsina, que foi utilizada na extração de colágeno na rota pepsina-solúvel, foi construído a partir de Nielsen e Foltmann (1995). Os dados relacionados ao processo de filetagem da tilápia foram obtidos de Sampaio et al. (2017).

Inventário dos dados primários

Os dados primários, referentes ao uso de insumos e rendimento de colágeno nas rotas avaliadas, foram levantados por meio de balanço de massa no Laboratório de Tecnologia da Biomassa, localizado na Embrapa Agroindústria Tropical, de 2018 a 2019.

Para o cálculo do consumo de energia elétrica dos equipamentos utilizados na extração do colágeno (Equação 1), considerou-se: a capacidade total do equipamento (C_t) e a capacidade utilizada pela etapa (C_a) em litro ou quilograma; a potência do equipamento em quilowatts (Pot); e o tempo de funcionamento em horas (T_f).

$$\text{Consumo do equipamento (kWh)} = \frac{C_t}{C_a} \times Pot \times T_f \quad (1)$$

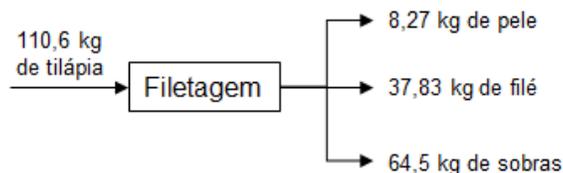
Como este estudo comparou rotas com tempos de duração diferentes, o tempo total de duração das rotas foi padronizado para 30 dias de produção. A rota ácido-solúvel teve duração em laboratório de 15 dias, e a pepsina-solúvel de 16 dias. Assim, a produção de colágenos (Equação 2) e as quantidades de insumos (Equação 3) nas duas rotas foram recalculadas para 30 dias.

$$\text{Produção padronizada} = \frac{\text{produção real (1)} \times \text{tempo padronizado (2)}}{\text{tempo real (3)}} \quad (2)$$

$$\text{Insumo padronizado} = \frac{\text{insumo real (1)} \times \text{produção reajustada (2)}}{\text{produção real (3)}} \quad (3)$$

Descrição do processo de filetagem da tilápia

Os dados relacionados à filetagem da tilápia-do-Nilo foram provenientes da pesquisa realizada por Sampaio et al. (2017). A Figura 3 mostra a etapa de separação da pele no processo de filetagem, com a distribuição mássica do filé (produto), da pele (coproduto) e de outros resíduos desse processo. A diferença mássica entre a etapa de produção da tilápia e da filetagem equivale às perdas do processo. A filetagem foi realizada manualmente.



Fonte: autoria própria.

Figura 3. Produtos e coprodutos do processo de filetagem da tilápia-do-Nilo.

Descrição da rota ácido-solúvel (ASC)

Na etapa de retirada de proteínas não colagenosas (Figura 1), a pele de tilápia foi adicionada a um banho ultratermostatizado contendo solução de hidróxido de sódio (NaOH) sob agitação mecânica constante. Em seguida, a suspensão de pele e hidróxido foi retirada desse banho e filtrada em peneira plástica com malha fina. Após esse procedimento, a pele foi lavada com água destilada até pH neutro.

Na etapa de retirada de lipídeos, a pele entumecida foi imersa em uma solução de etanol (C_2H_5OH) e colocada em banho ultratermostatizado sob constante agitação mecânica. Em seguida, a suspensão pele e etanol foi retirada desse banho e filtrada utilizando-se uma peneira plástica malha fina. Posteriormente, a pele foi lavada com água destilada para retirar o excesso de etanol.

Em seguida, a pele entumecida foi colocada em banho ultratermostatizado, com constante agitação mecânica, em conjunto com uma solução de ácido acético (CH_3COOH), para extração do colágeno. O material extraído foi diluído em uma solução de ácido acético (CH_3COOH) e filtrado em tecido não tecido (TNT) de polipropileno utilizando-se uma bomba de vácuo.

Ao material filtrado foi adicionado cloreto de sódio (NaCl) e a solução foi deixada em repouso em uma câmara de refrigeração para que o colágeno precipitasse. Em seguida, o material precipitado foi centrifugado, com o intuito de retirar a solução de cloreto de sódio, obtendo-se colágeno. Ao material obtido na etapa anterior foi adicionada uma solução de ácido acético (CH_3COOH), com as etapas de precipitação e centrifugação realizadas uma vez mais. Em seguida, nova diluição ocorreu com a adição de uma solução de ácido acético (CH_3COOH) ao material colagenoso.

Na etapa de diálise, o colágeno diluído foi submerso em uma solução de ácido acético (CH_3COOH). Em seguida em água destilada, em que foram feitas trocas diárias durante sete dias até o colágeno ficar com pH neutro, obtendo-se após essa etapa o colágeno dialisado e um sétimo efluente. Posteriormente, a amostra foi encaminhada para congelamento em embalagens laminadas, para ser liofilizada e, por fim, moída em um moinho analítico.

Descrição da rota pepsina-solúvel (PSC)

Para retirar as proteínas não colagenosas, a pele de tilápia foi adicionada a um banho ultratermostatizado contendo uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) e sob agitação mecânica, com condições diferentes da rota ASC (Figura 1). A suspensão foi filtrada utilizando-se uma peneira plástica. Em seguida, a pele foi lavada com água destilada até pH neutro.

Para retirada de lipídios, a amostra tratada foi imersa em uma solução de etanol (C_2H_5OH) e colocada sob constante agitação mecânica em um banho ultratermostatizado. Em seguida, a suspensão foi filtrada em peneira plástica e lavada com água destilada para a retirada do excesso de etanol. Dessa forma, foi obtida pele sem lipídeos.

Na etapa de extração de colágeno, a amostra foi submersa em uma solução de ácido acético (CH_3COOH) juntamente com pepsina. Essa suspensão foi colocada em um banho ultratermostatizado, sob constante agitação mecânica, para a extração do colágeno.

O material obtido na etapa anterior foi dissolvido em uma solução de ácido acético (CH_3COOH) e filtrado utilizando-se tecido não tecido (TNT) de polipropileno com uma bomba de vácuo.

Posteriormente, ao material filtrado foi adicionado cloreto de sódio (NaCl) e a mistura foi deixada em repouso em uma câmara de refrigeração para a precipitação do colágeno. Em seguida, o material foi centrifugado com o intuito de separar a solução de cloreto de sódio do material colagenoso. Esse material foi diluído e disposto em uma membrana de troca iônica para ser submerso em uma solução de fosfato de sódio dibásico (Na_2HPO_4) com o intuito de desnaturar a pepsina utilizada na etapa de extração.

Na etapa de diálise, a membrana foi imersa em uma solução de ácido acético (CH_3COOH). Em seguida, o material foi submerso em água destilada, em que foram realizadas trocas diárias até a solução ficar com pH neutro.

Finalmente, o material dialisado foi encaminhado para congelamento em embalagens laminadas e depois liofilizado. Após esses procedimentos, o colágeno foi moído.

Avaliação de Impactos

Neste estudo, foram analisadas as seguintes categorias de impacto: mudanças climáticas, acidificação, ecotoxicidade de água doce, eutrofização marinha e de água doce, toxicidade humana cancerígena e não cancerígena. O método utilizado para avaliar essas categorias foi o *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) Midpoint V1.05. Além dessas categorias, foi também avaliada a escassez hídrica pelo método AWARE, que foi desenvolvido por Boulay et al. (2018).

Foram realizadas as seguintes análises dos impactos ambientais, utilizando-se o software Simapro v.8.3: dominância, cenários e incerteza (Baumann; Tillman, 2004). A análise de dominância identificou etapas críticas das rotas, observando as etapas com maior percentual de contribuição no valor final do impacto. A análise de cenário comparou impactos da rota originalmente concebida com impactos resultantes de alterações propostas pela equipe de pesquisa. Cenários com redução de impacto em mais da metade das categorias de impacto analisadas foram considerados promissores, sendo as alterações propostas nesses cenários incorporadas à rota. Por fim, a análise de incerteza foi empregada para determinação se a diferença nos valores dos impactos foi significativa quando as rotas alternativas foram comparadas.

A análise de incerteza foi realizada com o método de Monte Carlo, observando-se o percentual de vezes em que o impacto de uma rota foi menor que o da outra em 1000 simulações (Goedkoop; Oele, 2008). Contabilizaram-se quantas vezes a diferença do valor de impacto de ASC em relação ao impacto de PSC foi menor do que zero. Quando a relação entre essa diferença e o número de simulações (1000) foi maior ou igual a 95%, considerou-se que o impacto do colágeno extraído na rota ASC foi significativamente menor que o do colágeno extraído na rota PSC.

O método Monte Carlo permite simular variações nos valores médios dos parâmetros de entrada (aspectos ambientais) e assim obter variações também nos dados de saída (impactos ambientais). Para isso, esse método requer que sejam informados o tipo de distribuição e o desvio padrão de cada dado de entrada. Neste trabalho, atribuiu-se a função log-normal para os dados de consumos e emissões (aspectos ambientais) dos inventários dos processos, de acordo com Goedkoop; Oele (2008). O desvio padrão desses

dados foi calculado utilizando-se a matriz pedigree que realiza essa aferição, considerando-se os seguintes critérios: fiabilidade, abrangência, correlação temporal, correlação geográfica e correlação tecnológica (Weidema; Wesnaes, 1996).

Para indicação de uma rota em relação à outra, para futura modelagem em escala industrial, empregou-se como critério seu melhor desempenho significativo em mais da metade das categorias avaliadas. No caso dessa condição não ser atendida, ambas as rotas são indicadas para modelagem.

Resultados e Discussão

Análise de inventário

Rota ácido-solúvel (ASC)

Na rota ácido-solúvel, o rendimento da produção de colágeno foi de 16,17% (g/g), sendo produzidos 6,92 g de colágeno a partir de 42,83 g de pele de tilápia inicial (Tabela A1 no Anexo). Em todas as etapas dessa rota, houve perda de massa; entretanto, na etapa de liofilização, houve uma perda maior em decorrência da perda de umidade da amostra.

Em relação ao consumo energético, a retirada de proteínas não colagenosas (13,75 kWh), extração de colágeno (8,65 kWh) e retirada de lipídeos (6,84 kWh) apresentaram um maior consumo de energia na extração de 6,93 g de colágeno (Tabela A1 no Anexo). Isso decorreu do uso do banho ultratermostatizado e do agitador mecânico nessas etapas. Embora a secagem de material seja uma etapa demandante de energia, tendo requerido 5,23 kWh, esse consumo foi menor do que o das etapas mencionadas.

Em relação ao consumo de água e à geração de efluentes, a etapa de diálise foi a mais significativa para ambos os parâmetros, em consequência da elevada quantidade de água destilada utilizada diariamente e manualmente para regular o pH do colágeno.

Rota pepsina-solúvel (PSC)

O rendimento de colágeno nessa rota foi de 14,58% (g/g), sendo necessários 42,03 g de pele de tilápia para a produção de 6,13 g de colágeno (Tabela A2 no Anexo). Na etapa de liofilização, houve a maior perda de massa quando comparada às outras etapas devido à desidratação do colágeno.

Em relação à energia elétrica, o gasto energético foi maior na retirada de proteínas (6,47 kWh), extração de colágeno (6,46 kWh) e retirada de lipídeos (6,44 kWh) para extração de 6,13 g de colágeno. Esse elevado consumo de energia ocorreu devido ao uso do banho ultratermostatizado e de agitador mecânico.

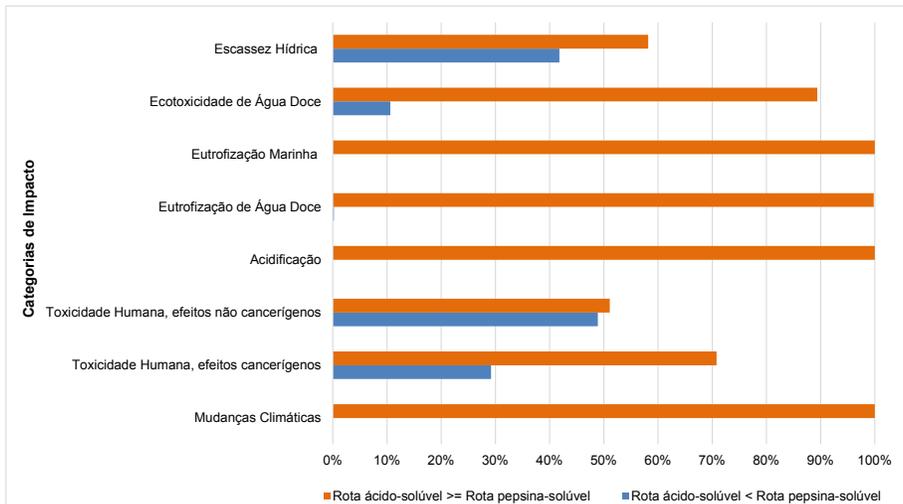
No que se refere à demanda hídrica e à geração de efluentes, a etapa de diálise foi mais impactante em ambos os parâmetros, em consequência do uso da água destilada nas soluções de fosfato dissódico e ácido acético, como também na troca diária de água para regular o pH do colágeno.

Comparação inicial das rotas ASC e PSC

Na comparação das rotas, observou-se que a diferença entre essas duas rotas foi significativa para as categorias mudanças climáticas, eutrofização de água doce e marinha e acidificação (Figura 4). Embora o valor médio de impacto nas demais categorias tenha sido menor para o colágeno extraído na rota ASC, a diferença de impacto entre as rotas não foi significativa, considerando-se 95% dos resultados das simulações por Monte Carlo. Assim, o próximo passo foi identificar as etapas que mais contribuíam para a maioria dos impactos e, em seguida, avaliar possíveis modificações nessas etapas que resultassem em redução de impactos.

Avaliação das etapas críticas nas rotas avaliadas

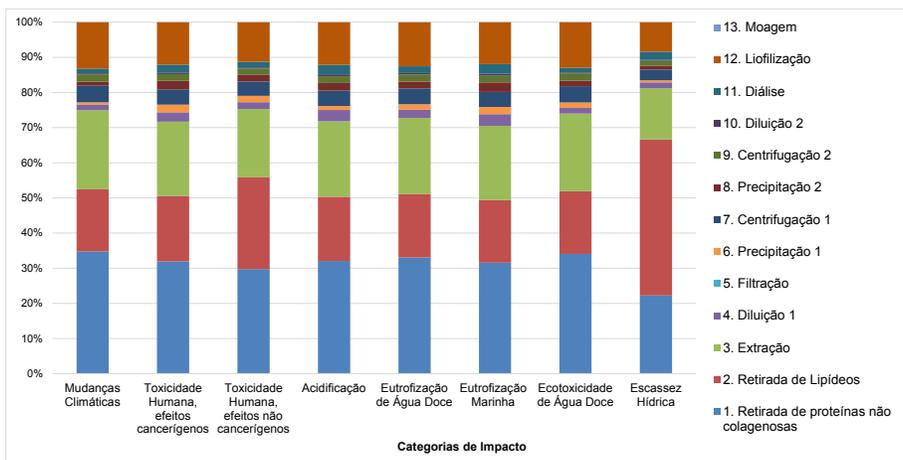
Em ambas as rotas ASC e PSC, as etapas mais impactantes nas categorias de impacto avaliadas foram: retirada de proteínas não colagenosas, extração de lipídeos e extração de colágeno (Figura 5 e Figura 6). Na rota ASC, destacou-se a etapa de retirada de proteínas, enquanto na PSC teve destaque a extração de colágeno. A etapa de retirada de lipídeos foi a mais importante na escassez hídrica para ambas as rotas.



Fonte: autoria própria.

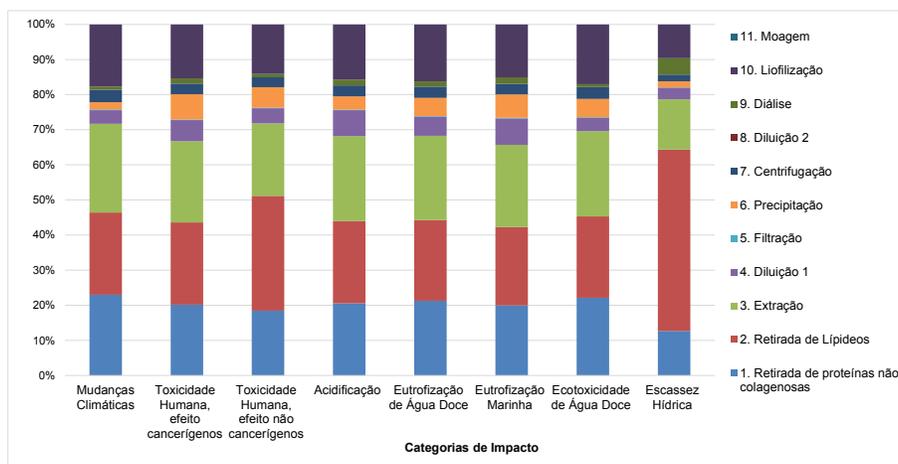
Rota ácido-solúvel > = Rota pepsina-solúvel mostra o percentual de vezes que o impacto da rota ácido-solúvel foi maior ou igual ao da rota pepsina-solúvel em 1000 simulações. Rota ácido-solúvel < Rota pepsina-solúvel mostra o percentual de vezes que o impacto da rota ácido-solúvel foi menor do que o da rota pepsina-solúvel em 1000 simulações.

Figura 4. Comparação entre as rotas ácido-solúvel e pepsina-solúvel, utilizando-se o método de Monte Carlo.



Fonte: autoria própria.

Figura 5. Percentuais dos impactos ambientais referentes às etapas do processo de extração de colágeno na rota ácido-solúvel.



Fonte: autoria própria.

Figura 6. Percentuais dos impactos ambientais referentes às etapas do processo de extração de colágeno na rota pepsina-solúvel.

Nessas etapas, os aspectos ambientais que se destacaram como causadores dos impactos avaliados foram o consumo de energia elétrica e de ácido acético. A rota ASC empregou 11% mais ácido acético e 46% mais energia do que a rota PSC (Tabelas A1 e A2 no Anexo).

Analisando-se os resultados para cada categoria de impacto a partir da árvore de contribuição no software Simapro, observou-se que para mudanças climáticas o impacto foi decorrente do consumo de energia elétrica provocado pelo uso do banho ultratermostatizado e do agitador mecânico. A produção de energia no Brasil vem de um *mix* de diferentes fontes, tais como termoeletricas, gás natural e hidroelétricas. Nessa categoria de impacto, as fontes energéticas mais impactantes foram as hidroelétricas e as derivadas de combustíveis fósseis, devido à liberação de gases de efeito estufa.

Além da geração de energia, foram significativos para as mudanças climáticas os impactos decorrentes da produção do ácido acético, em decorrência das emissões dos gases dióxido de carbono e metano durante sua síntese.

O impacto na toxicidade humana, efeitos cancerígenos, também tem origem na produção de energia, nas fontes hidroelétricas e termoeletricas.

Na disposição final de resíduos provenientes da construção dessas usinas, são liberados metais pesados e outros componentes tóxicos.

O impacto na toxicidade humana, efeitos não cancerígenos, foi também decorrente do consumo energético. As principais fontes foram a energia produzida da biomassa de cana-de-açúcar e as termoelétricas, devido às emissões de compostos tóxicos no processo de tratamento de resíduos envolvidos na síntese dessas duas fontes. Destaca-se também a fabricação do etanol utilizado na etapa de remoção de lipídeos, por ser produzido a partir da cana-de-açúcar. Na produção de cana, são usados pesticidas para o controle de pragas, o que ocasiona o aumento do impacto na categoria toxicidade humana, efeitos não cancerígenos.

O impacto na acidificação foi devido ao consumo de energia em todas as etapas das rotas avaliadas. As fontes energéticas que possuem potencial impactante foram as provenientes de derivados de petróleo e de gás natural, por causa da emissão de dióxido de enxofre em seus processos de produção.

O impacto na eutrofização de água doce foi oriundo da produção de energia elétrica. A principal emissão é o fosfato, gerado no tratamento de resíduos de carvão usados em usinas termoelétricas.

O impacto na eutrofização marinha foi devido à emissão de compostos nitrogenados que são liberados na produção de ácido acético e de energia elétrica. As fontes de energia consideradas mais impactantes foram provenientes de biomassa de lascas de madeira e de derivados do petróleo.

O impacto na ecotoxicidade de água doce foi proveniente do consumo de energia. As fontes hidroelétrica e termoelétrica foram as mais importantes devido à disposição final de resíduos de cobre, ferro e de lignite, usados, respectivamente, no sistema de transmissão da rede elétrica, na construção de hidroelétricas e em usinas termoelétricas.

O impacto na escassez hídrica foi proveniente da demanda energética de todas as etapas das rotas avaliadas, em que foram consideradas as hidroelétricas e a energia obtida por meio da biomassa de cana-de-açúcar como as fontes que possuem maior potencial de impacto. Ressaltam-se, também, os impactos decorrentes da síntese do etanol, insumo que também é oriundo da cana-de-açúcar. No processo de produção de cana, existe uma

elevada demanda de água, principalmente nas etapas de irrigação e de lavagem da cana.

Análise de alternativas para redução dos impactos em etapas críticas

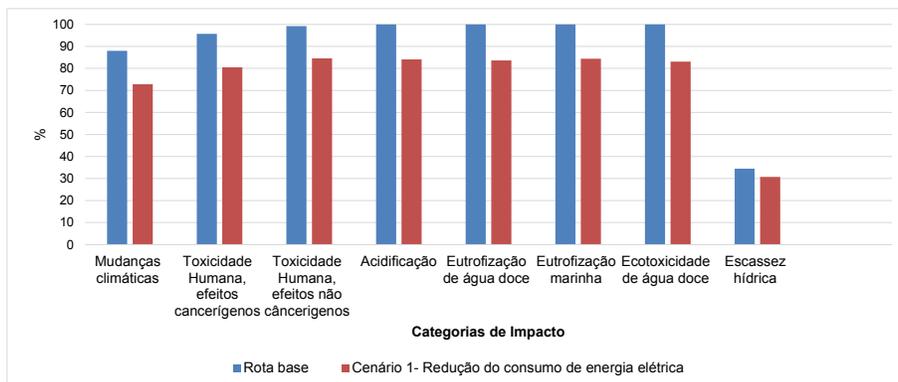
Tempo de processamento

Observou-se que o consumo de energia elétrica é um dos maiores responsáveis pelo potencial de impacto ambiental em todas as categorias analisadas e em ambas as rotas analisadas. Diante disso, a partir de reuniões com a equipe técnica responsável pela proposição das rotas, foi proposto um cenário para a rota ASC, em que o tempo da etapa de retirada de proteínas não colagenosas foi reduzido de 48 h para 24 h. Observou-se em laboratório que não houve mudança no rendimento de colágeno, considerando-se essa redução no tempo. Nenhum cenário alternativo foi vislumbrado para a rota PSC.

Comparando-se a rota ácido-solúvel inicial (base) com a rota com essa modificação (cenário 1), observou-se redução entre 5 e 15% em todas as categorias de impacto avaliadas (Figura 7). Assim, essa redução de tempo foi incorporada à rota ASC para nova comparação entre rotas.

Concentração de ácido acético

Além do consumo de energia, observou-se que a produção do ácido acético (insumo usado na etapa de extração de colágeno) também contribui para os impactos ambientais em todas as categorias avaliadas. Diante disso, foi proposto um outro cenário para a rota ASC, em que foi implementada a redução da concentração do ácido acético de 0,7 M (rota ácido-solúvel base) para 0,35 M nas etapas de extração, diluição 1, precipitação 2. A equipe de pesquisa avaliou que a quantidade de ácido acético empregado na rota PSC estava no limite, tendo sido descartada a redução desse insumo nessa rota.



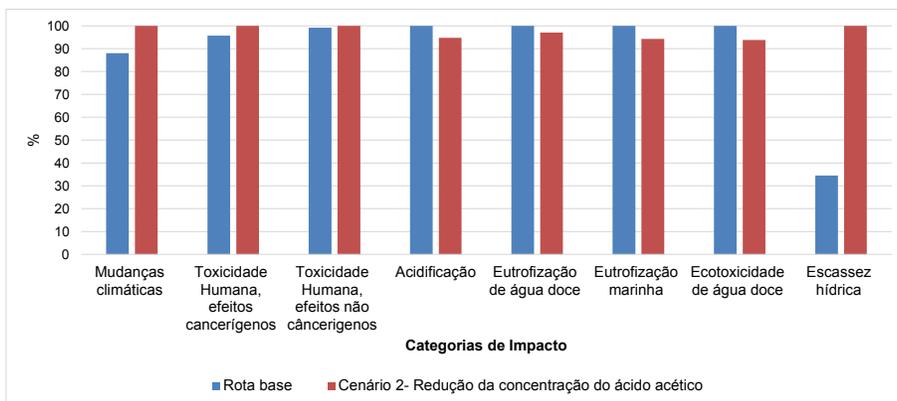
Fonte: autoria própria.

Figura 7. Comparação entre a rota ácido-solúvel base e o cenário 1.

Esse cenário foi testado em laboratório, observando-se que ocorreu perda de rendimento do colágeno em 4%. Na comparação de impacto da rota original com esse cenário, observou-se que os impactos diminuíram nas categorias acidificação, eutrofização e ecotoxicidade de água doce e eutrofização marinha. Porém, nas outras categorias avaliadas, houve aumento dos impactos, em função da redução no rendimento (Figura 8). Como não houve redução de impacto em mais da metade das categorias, esse cenário foi descartado.

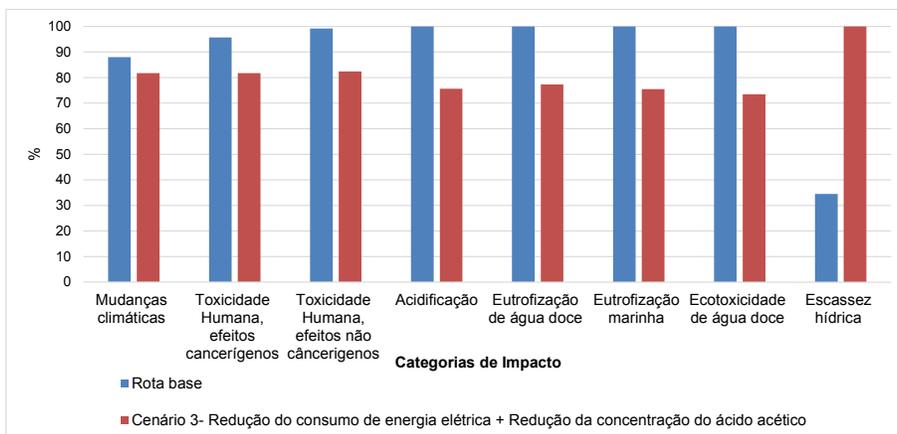
Tempo de processamento e concentração de ácido ascórbico

Diante dos resultados favoráveis para a rota ASC, com a redução no tempo de reação na retirada de proteínas não colagenosas (cenário 1), e parcialmente favoráveis, com a redução da concentração do ácido acético (no cenário 2), realizou-se a combinação dessas ações (cenário 3) para nova avaliação dos impactos ambientais. Esse cenário apresentou redução de impacto em quase todas as categorias, sendo exceção a escassez hídrica, que aumentou em 65% (Figura 9). Como houve redução de impacto em quase todas as categorias, esse terceiro cenário foi considerado para nova comparação entre rotas.



Fonte: autoria própria.

Figura 8. Comparação entre a rota ácido-solúvel base e o cenário 2.

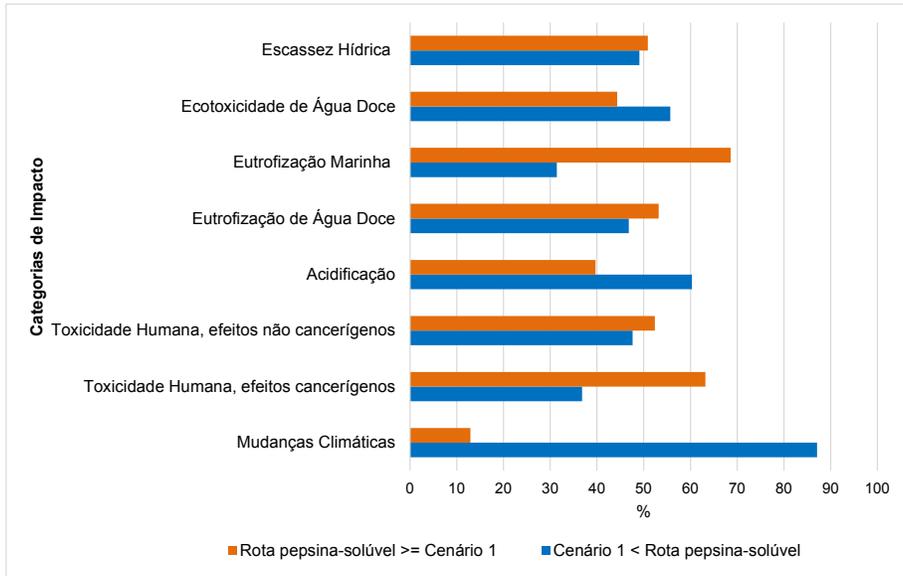


Fonte: autoria própria.

Figura 9. Comparação entre a rota ácido-solúvel base e o cenário 3.

Comparação final entre rotas

Realizou-se nova comparação entre rotas, considerando-se os cenários 1 e 3 para a rota ASC. Na comparação da rota ASC – cenário 1 (redução no tempo de processamento) com a rota PSC, observou-se que não houve diferença significativa entre os impactos dessas rotas, ao nível de 95% de significância (Figura 10). A redução no consumo de energia e consequente diminuição dos impactos da rota ASC foi suficiente para equipará-la à rota PSC.

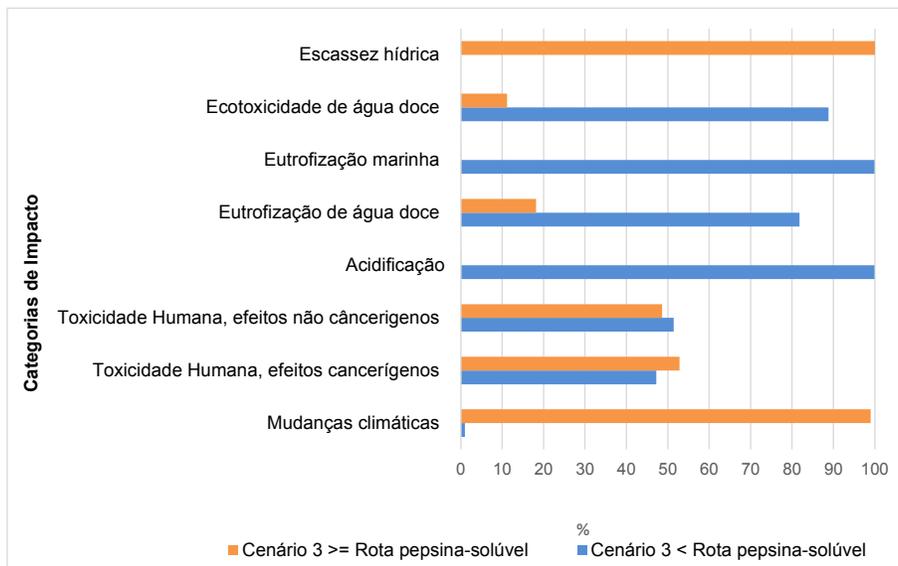


Fonte: autoria própria.

Rota pepsina-solúvel > = Cenário 1 mostra o percentual de vezes que o impacto da rota pepsina-solúvel foi maior ou igual ao do cenário 1 em 1000 simulações. Cenário 1 < Rota pepsina-solúvel mostra o percentual de vezes que o impacto do Cenário 1 foi menor do que o da rota pepsina-solúvel em 1000 simulações.

Figura 10. Comparação entre o cenário 1 e a rota pepsina-solúvel, conforme o método de Monte Carlo.

Comparando-se a rota ASC – cenário 3 (menor tempo de processamento e quantidade de ácido acético) com a rota PSC, observou-se maior impacto significativo da rota ASC para mudanças climáticas e escassez hídrica, porém menor impacto da rota ASC para eutrofização marinha e acidificação (Figura 11). As duas rotas geraram resultados similares para as demais categorias de impacto avaliadas.



Cenário 3 > = Rota pepsina-solúvel mostra o percentual de vezes que o impacto do Cenário 3 foi maior ou igual ao da rota pepsina-solúvel em 1000 simulações. Cenário 3 < Rota pepsina-solúvel mostra o percentual de vezes que o impacto do Cenário 3 foi menor do que o da rota pepsina-solúvel em 1000 simulações. Fonte: autoria própria.

Figura 11. Comparação entre o cenário 3 e a rota pepsina-solúvel, conforme o método de Monte Carlo.

Conclusões

As etapas mais impactantes nas categorias de impacto avaliadas, em ambas as rotas ácido-solúvel e pepsina-solúvel, foram: retirada de proteínas não colagenosas, extração de lipídeos e extração de colágeno.

A rota ácido-solúvel teve redução nos impactos ambientais em mais da metade das categorias ao trabalhar com o cenário de tempo da etapa de retirada de proteínas não colagenosas, reduzido para 24 h, e de concentração do ácido acético nas etapas de extração, diluição 1, precipitação 2, diluição 2 e diálise, reduzido para 0,35 M.

Em escala laboratorial, não houve diferença entre as rotas ácido-solúvel e pepsina-solúvel para a maioria dos parâmetros avaliados. São necessários estudos futuros de modelagem e simulação das rotas pepsina-solúvel e ácido-solúvel no cenário 3 (condição citada acima) em escala industrial e a realização de nova comparação de impactos ambientais utilizando-se dados dessa modelagem.

Agradecimentos

Ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), à Secretaria de Aquicultura e Pesca (SAP) do 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 “Ações estruturantes e inovação para fortalecimento das cadeias produtivas da Aquicultura no Brasil (BRS Aqua)”.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009a.

ARUMUGAM, G. K. S.; SHARMA, D.; BALAKRISHNAN, R. M.; ETTIYAPPAN, J. B. P. Extraction, optimization and characterization of collagen from sole fish skin. **Sustainable Chemistry And Pharmacy**, v. 9, p. 19-26, set. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2018.04.003>.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. M. **The Hitch Hiker's Guide to LCA**: an orientation in life cycle assessment methodology and application. Lund: Studentlitteratur, 2004. 543 p.

BOULAY, A. M.; BARE, J.; LORENZO, B.; BERGER, M.; LATHUILLIÈRE, M. J.; MANZARDO, A.; MARGNI, M.; MOTOSHITA, M.; NÓÑEZ, M.; PASTOR, A. V.; RIDOUTT, B.; OKI, T.; WORBE, S.; PFISTER, S. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (aware). : assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 2, p. 368-378, 8 jun. 2018. <<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>>.

EL-RASHIDY, A. A.; GAD, A.; ABU-HUSSEIN, A.; EI-H, G.; HABIB, S. I.; BADR, N. A.; HASHEM, A. A. Chemical and biological evaluation of Egyptian Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) fish scale collagen. **International Journal Of Biological Macromolecules**, v. 79, p. 618-626, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.05.019>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2015**: ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015.

FAO. **World Review of fisheries and aquaculture**. Rome, 2010.

GOEDKOOOP, M.; OELE, M. **SimaPro 7-Introduction to LCA with SimaPro**. Amersfoort, The Netherlands: PRé Consultants, 2008.

LIMA, L. K. F. de. **Reaproveitamento de resíduos sólidos na cadeia agroindustrial do pescado**. Palmas: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2013. 28 p. (Embrapa Pesca e Aquicultura. Documentos, 1). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/968518/1/cnpasa.doc1.pdf>>. Acesso em: 04 fev. 2020.

NIELSEN, P. K.; FOLTMANN, B. Purification and characterization of porcine pepsinogen B and pepsin B. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 322, n. 2, p. 417-422, 1995.

SAMPAIO, A. P. C.; SÁ FILHO, M. de S. M. de; CASTRO, A. L. A. C.; FIGUEIRÊDO, M. C. B. de. 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.

SUN, L.; HOU, H.; LI, B.; ZHANG, Y. Characterization of acid-and pepsin-soluble collagen extracted from the skin of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 99, p. 8-14, 2017.

TAN, Y.; CHANG, S. KC. Isolation and characterization of collagen extracted from channel catfish (*Ictalurus punctatus*) skin. **Food Chemistry**, v. 242, p. 147-155, 2018.

WANG, J.; PEI, X.; LIU, H.; ZHOU, D. Extraction and characterization of acid-soluble and pepsin-soluble collagen from skin of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*). **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 106, p. 544-550, 2018.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C. O.; WERNET, G. **Overview and methodology: data quality guideline for theecoinvent database version 3**. St. Gallen: The Ecoinvent Centre, 2013. (Ecoinvent Report 1, v.3).

WEIDEMA, B. P.; WESNAES, M. S. Data quality management for life cycle inventories - an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3-4, p. 167-174, 1996.

ANEXO - Tabela A1. Inventário da rota ácido-solúvel por etapa.

Insumos	Retirada de proteínas	Retirada de Lipídeos	Extração	Diluição 1	Filtração	Precipitação 1	Centrifugação 1	Precipitação 2	Centrifugação 2	Diluição 2	Dialise	Liofilização	Moagem
Entradas													
Pele de tilápia (g)	4,28E+01												
Hidróxido de sódio (g)	3,43E+00												
Água destilada (g)	5,40E+03	2,63E+03	1,03E+03	2,24E+03		7,15E+02		1,56E+03		3,74E+02	5,16E+04		
Etanol (g)		1,35E+02											
Ácido acético (g)			4,50E+01	9,81E+01				4,92E+01		1,64E+01	8,18E+01		
Energia (kWh)	1,37E+01	6,85E+00	8,65E+00		1,00E-03	2,00E-02	1,89E+00	1,00E-02	8,43E-01			5,23E+00	2,30E-02
Cloreto de sódio (g)						2,10E+02		1,05E+02					
Saídas													
Pele sem proteínas colágenosas (g)	7,87E+01												
Pele sem lipídeos (g)		6,33E+01											
Colágeno extraído (g)			1,14E+03										
Colágeno diluído (g)				3,48E+03						5,60E+02			
Colágeno filtrado (g)					3,18E+03								
Resíduo úmido (g)					2,98E+02		2,71E+02		2,01E+02				
Colágeno precipitado (g)						4,10E+03		1,95E+03					
Colágeno centrifugado (g)							2,31E+02		1,70E+02				
Colágeno liofilizado (g)												7,24E+00	
Colágeno dialisado (g)											5,60E+02		
Colágeno particulado (g)													6,92E+00
Efluentes (g)	5,37E+03	2,78E+03					3,60E+03		1,58E+03		5,17E+04		
Resíduo sólido (g)													3,18E-01
Vapor (g)												5,53E+02	

ANEXO - Tabela A2. Inventário da rota pepsina-solúvel por etapa.

Insumos	Retirada de proteínas não colagenosas	Retirada de Lipídeos	Extração	Diluição 1	Filtração	Precipitação 1	Centrifugação 1	Diluição 2	Diálise	Liofilização	Moagem
Entradas											
Pele de tilápia (g)	4,20E+01										
Hidróxido de sódio (g)	3,36E+00										
Água destilada (g)	4,58E+03	2,54E+03	1,19E+03	2,64E+03					7,54E+04		
Etanol (g)		1,33E+02									
Ácido acético (g)			7,56E+01	1,68E+02					1,80E+01		
Energia (kWh)	6,47E+00	6,45E+00	6,46E+00		5,80E-02	2,10E-02	9,93E-01			5,00E+00	2,10E-02
Cloreto de sódio (g)						5,27E+02					
Efluente (g)								3,74E+02			
Pepsina (g)			0,063								
Fosfato dissódico (g)									5,44E+01		
Saídas											
Pele sem proteínas colagenosas (g)	7,73E+01										
Pele sem lipídeos (g)		6,21E+01									
Colágeno extraído (g)			1,33E+03								
Colágeno diluído (g)				4,14E+03							
Colágeno filtrado (g)					3,98E+03						
Resíduo úmido (g)					1,61E+02		3,74E+02			5,58E+02	
Colágeno precipitado (g)						4,50E+03					
Colágeno centrifugado (g)							1,84E+02				
Colágeno liofilizado (g)										6,73E+00	
Colágeno dialisado (g)									5,58E+02		
Colágeno particulado (g)											6,13E+00
Efluentes (g)	4,54E+03	2,68E+03					3,94E+03				5,98E-01
Resíduo sólido (g)											
Vapor (g)										5,51E+02	

Embrapa

Agroindústria Tropical

Embrapa

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL