



## VALORES ECONÔMICOS DA SOJA E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ATRAVÉS DE DIFERENTES ABORDAGENS

 <https://doi.org/10.56238/levv16n45-044>

**Data de submissão:** 19/01/2025

**Data de publicação:** 19/02/2025

**Henrique Solowej Medeiros Lopes**  
M.Sc.

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP, Brasil  
Faculdade de Tecnologia "José Crespo Gonzales" (Fatec), Sorocaba/SP, Brasil  
Doutoranda na UFSCar e Monitora de Laboratório na Fatec  
E-mail: henrique.lopes01@fatec.sp.gov.br  
ORCID: 0000-0002-8222-0888

**Thais Soares de Góes**  
M.Sc.

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP, Brasil  
Doutoranda na UFSCar  
E-mail: thaisgoes\_ufscar@hotmail.com  
ORCID: 0000-0001-7129-4585

**Ramzi Khiari**  
Doutor

Departamento de Têxteis, Instituto Superior de Estudos Tecnológicos de Ksar Hellal, Ksar Hellal  
5070, Tunísia  
Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LGP2, Grenoble, F-38000, França  
Pesquisador do LGP2 (UGA)  
E-mail: khiari\_ramzi2000@yahoo.fr  
ORCID: 0000-0003-4446-9014

**Samir Leite Mathias**  
M.Sc.

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP, Brasil  
Doutoranda na UFSCar  
E-mail: samirmathias@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-0523-9566

**Marcus Felipe de Jesus Barros**  
M.Sc.

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP, Brasil  
Doutoranda na UFSCar  
E-mail: mfjesusbarros@gmail.com  
ORCID: 0000-0001-7807-1798



**Julietta Bramorski**

Doutor

Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Macapá/AP – Brasil

Professor titular da UNIFAP

E-mail: bramorski@gmail.com

ORCiD: 0000-0002-2783-5644

**Aparecido Junior de Menezes**

Doutor

Autor correspondente

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Sorocaba/SP, Brasil

Professor titular da UFSCar

E-mail: jrmenezes@ufscar.br

ORCiD: 0000-0001-5638-489X

## **RESUMO**

A soja é uma cultura de extrema importância mundial, sendo uma das principais fontes de proteína vegetal, óleo e outros subprodutos utilizados na alimentação humana e animal, indústria e biocombustíveis. Sua produção em larga escala, principalmente no Brasil, impacta positivamente a segurança alimentar, a economia e o comércio internacional. O manejo adequado da biomassa e dos resíduos da soja é crucial para mitigar os impactos ambientais. O gerenciamento eficiente de resíduos, como resíduos de culturas e cascas, pode reduzir a poluição do solo, da água e do ar, além de prevenir a degradação ambiental. A valorização desses resíduos é igualmente importante, pois pode ser reutilizada na produção de ração animal, fertilizantes orgânicos, biomassa para energia renovável, fármacos e outros. Apresenta-se neste trabalho uma visão geral, com foco nos dados disponíveis no banco de dados da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) e outras organizações similares, sobre aspectos econômicos, valores de produção, aspectos de importação e exportação e outros, além da variedade de possibilidades de fornecer aplicações de alto valor agregado para resíduos de soja e biomassa. Este trabalho apresenta uma investigação completa sobre vários índices agrícolas disponíveis em diferentes organizações ao lado de algumas perspectivas da literatura de alto impacto, enfatizando o tamanho do mercado de resíduos de soja e destacando a importância de investir na recuperação de resíduos de soja por aplicações de alto valor agregado, o que não só reduz o impacto ambiental, mas também promove a economia circular aumentando a sustentabilidade da produção agrícola e contribuindo para a conservação dos recursos naturais em escala global.

**Palavras-chave:** Soja. Produtos de soja. Biomassa. Resíduo. Aplicativos.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 VALORES ECONÔMICOS DA SOJA E TAMANHO DO MERCADO

Devido à grande complexidade da decomposição e ao agravante da poluição de materiais não renováveis ao meio ambiente, o interesse em substituir materiais com perfil inovador está surgindo na ciência atual (Gong et al., 2017; Lima et al., 2015). De acordo com a literatura, o desenvolvimento científico de novos materiais biodegradáveis tem sido um caminho para grandes aplicações tecnológicas, baseadas em abundantes fontes renováveis, que oferecem propriedades mecânicas, térmicas e químicas superiores quando comparadas aos materiais convencionais, visando atender áreas como engenharia, automação, biomédica, ambiental e outras (Soares et al., 2005).

Nos últimos dez anos, especialmente no Brasil, houve um alto crescimento no setor agropecuário, por ser um país com grande exportação agrícola, no qual também impulsionou seu desenvolvimento econômico. Uma fonte promissora de alto valor econômico é a soja, que é um dos principais produtos agrícolas do mundo. No Brasil, a produção de soja tem contribuído para o crescimento do setor agropecuário, onde tem sido um dos principais setores em expansão desde 1994. Desde 2019, a soja representou 49% da área agrícola e 41% das receitas agrícolas, segundo o (Flach et al., 2021) *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE, 2023). Nesse mesmo ano, 37% de toda a soja produzida no mundo correspondeu à produção do Brasil. Ainda de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), o Brasil lidera atualmente o primeiro lugar como maior produtor mundial de soja, superando os Estados Unidos da América, a partir de 2021, com produção anual de 134.934.935 toneladas e US\$ 51.607.792 (Flach et al., 2021) (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023) milhões em valor bruto de produção. Entre os principais produtores mundiais de soja, a Tabela 1 mostra os demais países que lideram o mercado de soja, mostrando os valores produzidos.

**Tabela 1.** Os maiores produtores de soja em todo o mundo, de acordo com a FAO, em 2021 e a quantidade e o valor das importações de produtos de soja em todo o mundo em 2021, com base nas 20 maiores commodities (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023).

Países	Produção, toneladas	Valor da produção, 1000 US\$
Brasil	134.934.935	51.607.792
Estados Unidos da América	120.707.230	46.166.204
Argentina	46.217.911	17.676.700
China	16.400.000	6.272.414
Índia	12.610.000	4.822.875
Paraguai	10.537.080	4.030.057
Canadá	6.271.835	2.398.753
Rússia	4.759.908	1.820.495
Ucrânia	3.493.200	1.336.024
Bolívia	3.318.168	1.269.081
Produto à base de soja	Quantidade de importação, toneladas	Ranking mundial
Soja	163.360.904.81	3º
Torta de soja	69.264.488.00	4º
Óleo de soja	14.199.575.17	20º

	<b>Valor de importação, 1000 US\$</b>	<b>Ranking mundial</b>
<b>Soja</b>	91,272,050	1º

Portanto, a soja é comprovadamente uma das fontes mais importantes de alimento para consumo humano. Aliado a isso, faz-se necessária uma gestão adequada de sua biomassa e resíduos em uma sociedade cada vez mais preocupada com o meio ambiente. Este trabalho apresenta várias alternativas de valor agregado para o aproveitamento da biomassa da soja e enfatiza a importância de sua planta na atualidade.

Todos os dados dos valores e quantidades de produção de soja de acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação estão disponíveis no site da FAO. A Tabela 1 apresenta também os maiores produtores de soja do mundo e apresenta também o ranking dos diferentes produtos de soja. O Brasil lidera em primeiro lugar e nos últimos anos apresentou um aumento significativo nos números da soja. Refira-se que o crescimento significativo deste setor agrícola deve-se à intensa produção, cujo rendimento entre 1990 e 2019 passou de 1,7 para 3,2 toneladas por hectare, e à expansão da área de 11,5 para 35,8 milhões de hectares de 1990 a 2019, especialmente nas novas regiões agrícolas a norte e oeste, das regiões já estabelecidas nos biomas brasileiros, Amazônia e Cerrado. (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023) (Dias et al., 2016; Flach et al., 2021)

No setor de importação de soja, o país que lidera o ranking é a China, tornando-se o maior importador de soja do mundo com 96.516.785 toneladas, o que corresponde a US\$ 53.528.188 milhões, seguido por outros países, que podem ser vistos nas Tabelas 2 e 3, com suas respectivas quantidades em toneladas e valores de importação. (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023)

**Tabela 2.** A soja é a maior importadora do mundo, segundo a FAO, em 2021. (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023)

<b>Países</b>	<b>Quantidade de importação, toneladas</b>	<b>Valor de importação, 1000 US\$</b>
China	96,516,785	53,528,188
Argentina	4,866,019	2,623,687
México	4,597,127	2,537,823
Países Baixos	4,162,889	2,173,331
Tailândia	3,996,771	2,266,639
Egito	3,773,173	2,156,199
Espanha	3,656,836	2,001,681
Alemanha	3,590,728	1,923,268
Japão	3,271,220	2,074,642
Taiwan	2,585,363	1,497,066

**Tabela 3.** Maiores importadores de produtos de soja em todo o mundo em 2021, com base no relatório da . (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023)

<b>Torta de soja</b>	<b>Quantidade de importação, toneladas</b>
Indonésia	5,343,415.00
Vietnã	4,882,220.00
França	2,910,887.00
Espanha	2,777,815.00
Tailândia	2,754,738.00
<b>Óleo de soja</b>	<b>Quantidade de importação, toneladas</b>
Índia	3,522,865.46
Nepal	1,275,201.26
China	1,109,945.28
Bangladesh	797,340.74
Argélia	654,293.16

Em relação às exportações de soja, o Brasil também lidera o top 10 dos maiores países exportadores, como o maior exportador mundial, com 86.109.785 toneladas e US\$ 38.638.731 em exportações, como pode ser visto nas Tabelas 4 e 5.

**Tabela 4.** Quantidade e valor de exportação de produtos de soja em todo o mundo em 2021, com base nas 20 principais commodities mais altas, relatadas por . (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023)

<b>Produto à base de soja</b>	<b>Quantidade de exportação, toneladas</b>	<b>Ranking mundial</b>
Soja	161,212,557.18	3º
Torta de soja	61,888,495.00	4º
	Valor da exportação, 1000 US\$	Ranking mundial
Soja	77,703,371.00	2º
Torta de soja	27,894,251.00	13º
<b>Países</b>	<b>Quantidade de exportação, toneladas</b>	<b>Valor da exportação, 1000 US\$</b>
Brasil	86,109,785	38,638,731
Estados Unidos da América	53,050,523	27,522,855
Paraguai	6,329,541	2,975,124
Canadá	4,504,522	2,449,989
Argentina	4,284,452	2,232,371
Uruguai	1,768,288	896,993
Ucrânia	1,144,695	621,432
Países Baixos	988,047	591,297
Rússia	982,215	408,026
Croácia	186,429	130,948

**Tabela 5.** Maiores exportadores de produtos de soja em todo o mundo em 2021, com base no relatório de . (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, 2023)

<b>Torta de soja</b>	<b>Quantidade de exportação, toneladas</b>
Argentina	17,396,491.00
Brasil	17,149,123.00
Estados Unidos da América	9,833,559.00
Países Baixos	2,857,498.00
Paraguai	1,880,322.00
<b>Óleo de soja</b>	<b>Quantidade de exportação, toneladas</b>
Argentina	4,661,375.54
Brasil	1,650,954.52
Estados Unidos da América	734,317.30
Países Baixos	579,082.53
Paraguai	561,930.64

Notavelmente, a soja é uma das plantas mais consumidas em todo o mundo. Seus números sobre quantidades de produção e valores de importação e exportação são enormes. O Brasil lidera quase todas as estatísticas mencionadas, seguido por EUA, China e Argentina, destacando a importância de ampliar as informações técnicas e as aplicações para a biomassa de soja de todos os tipos. Na próxima seção, serão apresentados trabalhos impactantes e variados para pesquisas potenciais e futuras, visando uma forma mais sustentável e valorizada de gerenciar resíduos. Uma descrição abrangente e detalhada sobre várias propriedades físico-químicas da biomassa de soja pode ser encontrada em . ( Bramorski et al., 2023)

## **2 APLICAÇÕES DE BIOMASSA DE RESÍDUOS DE SOJA COMO MATERIAIS DE VALOR AGREGADO**

Um dos primeiros usos conhecidos da soja como matéria-prima para aplicações de compósitos foi realizado por Henry Ford, em 1941, quando a soja foi testada comprimida para componentes semelhantes ao plástico. Diferentemente, naquela época, os materiais à base de petróleo eram baratos e os recursos renováveis não eram economicamente atraentes. Normalmente, a biomassa residual de soja é frequentemente obtida após a extração do óleo. O lixo é frequentemente encontrado em grandes quantidades e não tem um uso específico, portanto, é barato e amplamente disponível . Um tipo de biomassa residual de soja é a proteína de soja, um subproduto da produção de óleo de soja e comumente obtido pelo farelo de soja, que usa a soja como matéria-prima. Durante a extração do óleo, a farinha de soja é obtida como produto secundário do processo, que pode ser posteriormente purificada para obter concentrado e isolado de proteína de soja. Outro resíduo de soja proveniente da extração do óleo é a casca de soja, representando cerca de 2% em peso do grão de soja integral e amplamente disponível comercialmente em países de alto produtor, como o Brasil. descreveram a biomassa de Okara como um subproduto da fabricação de leite de soja e tofu, causada principalmente pelo grande aumento no consumo de alimentos à base de soja nas últimas décadas, atribuído à característica saudável dos alimentos à base de soja. Além disso, alguns tipos diferentes de resíduos de soja estão disponíveis na literatura, como cascas de soja e óleo de soja usado como potenciais matérias-primas. Um dos grandes interesses no reaproveitamento da biomassa como matéria-prima para a fabricação de materiais de alto valor agregado, está relacionado ao alto índice de gases de efeito estufa gerados pelos costumes da sociedade atual e sua grande dependência da energia fóssil. Neste capítulo, vários materiais diferentes à base de soja são mencionados. No entanto, informações detalhadas sobre processos específicos ou análises realizadas estão além do escopo deste artigo de revisão e não puderam ser amplamente descritas na discussão subsequente. Artigos originais são extremamente encorajados a serem perseguidos por entusiastas. (Mohanty et al., 2002) (Bulgariu & Bulgariu , 2018) ( Leceta et al., 2014) (Cardoso et al., 2013) (Fung et al., 2010) (Rambo et al., 2015) (Melo et al., 2021)

(Leceta et al., 2014) Utilizou proteína de soja, um subproduto da extração do óleo de soja, para produzir filmes de base biológica e sua avaliação do ciclo de vida. O trabalho proposto foi obter embalagens biodegradáveis por diferentes biomassas, incluindo proteína de soja, como fonte para produtos plásticos de curto prazo ou uso único, e analisar as etapas contaminantes de sua produção. Concluiu-se que, para os filmes proteicos de soja, o maior retrocesso ambiental foi o uso da terra, necessário para produzir e extrair proteína de soja para a obtenção de filmes de base biológica, com maior geração de resíduos, juntamente com a necessidade de aditivos e energia consumida durante o processamento do filme. No entanto, todos os filmes estudados apresentaram a capacidade de compostagem, sendo o maior benefício em relação aos filmes poliméricos sintéticos.

(Kumar et al., 2009) preparou filmes de isolado de proteína de soja (SPI) usando um novo plastificante tioglicol (TDG) e comparou as propriedades mecânicas com amostras plastificadas com glicerol. Os resultados mostraram maior resistência à tração e módulo de elasticidade para amostras plastificadas por TDG e aumento do teor de plastificante também aumentou o alongamento na ruptura para ambos os plastificantes. A presença do TDG como plastificante diminuiu a absorção de água dos filmes de SPI após imersos em água destilada por 26h, indicando que o TDG formou uma forte interação com hidroxilas nativas dos filmes de SPI, impedindo-o de formar ligações com a água, e devido ao menor número de grupos hidroxila quando comparado ao glicerol como plastificante. Neste estudo, foi possível confirmar o TDG como um bom plastificante para filmes SPI.

(Huang et al., 2020) nanocristais de celulose extraídos (CNC) de resíduos têxteis e filmes reforçados de isolado de proteína de soja (SPI) para avaliação mecânica e física. As imagens MET mostraram com sucesso a obtenção de nanocristais de celulose a partir de resíduos têxteis, apresentando uma forma típica de bastonete. Neste trabalho, os autores não utilizaram nenhum pré-tratamento químico para a obtenção de CNC. Além disso, avaliou-se que o CNC apresentou uma estrutura cristalina  $I\beta$  com alto índice de cristalinidade. Os filmes mantiveram a transparência com propriedades mecânicas significativamente maiores de resistência à tração e módulo de Young. A aplicação de filmes à base de soja como alternativa para aplicações comuns de embalagens está significativamente bem fundamentada na literatura.

Como alternativa ao isolado proteico de soja (SPI), utilizou-se uma fonte mais barata de soja, denominada farelo de soja (SM), na fabricação de filmes à base de soja para embalagem. Para isso, a matéria-prima precisava ser tratada por processos de fermentação e, em seguida, plastificada com glicerol e misturada com poli(adipato de butileno-co-tereftalato) (PBAT). Os materiais foram convencionalmente extrudados para obtenção de filmes e avaliados por diversas caracterizações. Os autores observaram que os processos fermentativos utilizados podem atuar como um processo desestruturante para carboidratos, sendo aplicáveis para várias outras biomassas. Além disso, um filme potencial foi obtido pelos processos de sacarificação e fermentação, que produziram uma amostra com

resistência à tração significativamente maior quando comparada ao PBAT e às demais amostras obtidas por diferentes processos. (Mekonnen et al., 2016)

(Soares et al., 2005) produziu filmes biodegradáveis à base de proteína de soja e amido de milho para avaliar sua estabilidade térmica. A presença de amido de milho na estrutura pareceu produzir filmes com diminuição da estabilidade térmica, principalmente quando comparados aos filmes puros de amido e proteína de soja. Além disso, os autores puderam avaliar por meio de valores de energia de ativação que a presença de proteína em filmes de amido causou degradação via cisão da cadeia em ligações fortes da cadeia proteica, normalmente esperadas em ligações fracas (< 100 kJ/mol).

Trabalhos adicionais sobre filmes de isolado de proteína de soja (SPI) foram feitos por Nesta abordagem, os autores prepararam uma mistura com SPI, poliéster hiperramificado solúvel em água (HBPE) e um derivado de cardanol polifuncional. Alguns ótimos desempenhos nas propriedades mecânicas foram observados pelos autores, com valores de resistência à tração e alongamento à ruptura de 11,6 MPa e 123%, respectivamente. Os autores mencionaram que esse desempenho se deve à alteração da estrutura causada pela introdução de cavidades nanométricas na matriz do HBPE. Além disso, o aumento da reticulação também aumentou a resistência à tração, causada pela incorporação de reagente bifuncional no processamento. Várias propriedades, incluindo térmica, óptica, barreira UV, espectroscopia e estrutural foram investigadas para obter um relatório conclusivo do material. (Gu et al., 2019)

Os hidrogéis também podem ser produzidos pela biomassa proteica de soja, essencialmente descrita por . Por essa abordagem, os autores utilizaram alguns resíduos do isolado proteico de soja (SPI) e realizaram modificações para obter um material reticulado, um hidrogel, com absorção de 105g de água/g de gel seco. Os hidrogéis biodegradáveis à base de proteínas podem ser um potencial material substituto para os hidrogéis sintéticos, com uma ampla gama de aplicações. As propriedades de inchaço do hidrogel obtido são amplamente discutidas no artigo original. (Hwang & Damodaran, 1996)

A proteína de soja pode desempenhar vários papéis na área de engenharia. O trabalho realizado por descreve a produção de microesferas de proteína de soja (SPM) como bio-sorventes para íons de metais pesados em soluções aquosas. Microesferas com faixa de diâmetro de 4-45 $\mu$ m apresentaram maior capacidade de absorver vários íons metálicos, incluindo Zn(II), Cr(III), Cd(II),(II), Pb(II) e Ni(II), quando comparadas aos adsorventes poliméricos naturais, de acordo com os autores. Além disso, parâmetros que influenciaram em suas capacidades de sorção, cinética de adsorção e modelos de isoterma foram avaliados neste trabalho. (D. Liu et al., 2013)

(J. Liu et al., 2017) também produziu hidrogéis a partir de biomassa de resíduos de soja. Nessa abordagem, os autores utilizaram isolado proteico de soja (SPI) e polietilenimina (PEI) como matriz e componente funcional, respectivamente, para obter uma mistura de hidrogel para tratamento

de águas residuárias. Como visto nesta seção, a proteína pode ser uma matéria-prima de baixo custo, abundante e sustentável para diversas aplicações, vista também pelos carboidratos. A SPI parece ser uma das proteínas mais utilizadas para produzir um biopolímero com aplicações de biocompósitos, hidrogéis ou embalagens. A composição de hidrogéis com 50% de ambos os componentes (SPI/PEI) apresentou uma excelente seletividade de íons(II) quando combinados com um segundo íon de metais pesados, como Zn(II), Cd(II) e Pb(II). Além disso, os íons (II) podem ser reduzidos a nanopartículas para formar um composto uniformemente disperso com material SPI / PEI carregado com NP. A avaliação detalhada realizada pelos autores permitiu concluir que o hidrogel produzido é eficiente para o tratamento de efluentes, além disso, pode ser uma possibilidade de proteção do meio ambiente aliada à reciclagem de metais.

(de Souza et al., 2020) Filmes de isolado proteico de soja (SPI) preparados com *resíduo de sementes de pinhão*, um extrato aquoso do processo de cozimento que possui compostos fenólicos com propriedades antioxidantes conhecidas. *O pinhão* é uma semente de uma árvore cultivada em países da América do Sul, comumente consumida fervida e descascada, resultando em um resíduo sólido e aquoso. Visando aplicações de embalagens, os autores realizaram propriedades físicas, estruturais e antioxidantes do material obtido. Os autores analisaram que a presença de extratos de *pinhão* não afetou negativamente as propriedades mecânicas do filme produzido, aliado a maiores capacidades antioxidantes e estabilidade oxidativa, quando testado como um pacote para vários óleos diferentes.

## 2.1 CASCAS DE SOJA

Algumas propriedades físicas da casca de soja foram fornecidas e as informações estão resumidas na seção anterior. Neste trabalho, os autores investigaram a densidade, tamanho de partícula e distribuições de forma de vários tipos de biomassas, incluindo casca de soja. Foram observados diferentes resultados, bem como influência de diferentes propriedades no comportamento do material como energia renovável. As propriedades obtidas podem servir como fonte para simulações numéricas para processos de pirólise, combustão e gaseificação, bem como estudos de condições ótimas. (Cardoso et al., 2013)

De outra forma, caracterizou-se a biomassa de casca de soja para produzir nanofibras de casca de soja para biocompósitos, resumida na seção anterior. É evidente o efeito de cada tratamento químico realizado sobre a composição lignocelulósica, refletindo na estrutura da fibra, sendo aparente a remoção de fases como hemicelulose, pectina e lignina, que atua como material cimentante ao redor das fibras. Além disso, o diâmetro médio da fibra mudou de 25-125 µm para 10-15 µm após os tratamentos, ou seja, a dissolução parcial das paredes celulares das fibras. Além disso, a cristalinidade das fibras da casca de soja foi estimada por análise de difratometria de raios X (DRX). Sabe-se que as cadeias de celulose são ordenadas em uma rede monoclinica, que representa a fibra saudável composta

por regiões ordenadas e desordenadas de cadeias de celulose, ou seja, regiões cristalinas e amorfas na mesma fibra, respectivamente. O comprimento dos cristalitos é estimado em 100-250 nm e uma cadeia de celulose pode conter vários cristalitos. A área de pico integrada das regiões amorfa e cristalina foi realizada a partir da DRX para obtenção do índice de cristalinidade (CI) das fibras da casca de soja, apresentado no capítulo anterior. A remoção das fases amorfas pelos tratamentos aumentou o índice de cristalinidade das fibras, como esperado, aumentando a rigidez da celulose e, consequentemente, as propriedades mecânicas. Além disso, os autores obtiveram temperaturas de decomposição por meio de análise termogravimétrica. A presença de uma estrutura mais cristalina, obtida por diferentes tratamentos químico-mecânicos realizados, refletiu diretamente na temperatura de decomposição durante a análise, com as nanofibras apresentando maior estabilidade térmica do que as fibras não tratadas. (Alemdar & Sain, 2008) (Fengel & Wegener, 1989)

(Herde et al., 2020) carvões ativados (AC) com alta área superficial específica (SSA) a partir de fibras de milho e cascas de soja. Os ACs são frequentemente desejados por produtores e usuários de baterias e supercapacitores e podem ser produzidos econômica e ambientalmente quando sua fonte é de subprodutos de biorrefinarias C5. Neste trabalho, os autores detalharam diversas estratégias químicas para obtenção do material, que consiste em uma hidrólise seletiva dos grãos para posterior obtenção de fibras residuais e, consequentemente, carvão ativado por ativação química e carbonização. Observou-se que essas biomassas foram muito eficazes para produzir ACs de alto SSA. De acordo com as observações dos autores, a área superficial da casca de soja pós-tratamento foi quase 50% maior do que a sem tratamento. Além disso, a fonte potencial de formação de grafeno foi observada através de imagens MET, onde finas camadas de carbono não amorfo foram detectadas. Esses resultados potenciais podem levar a aplicações de grande valor agregado de algumas biomassas.

(Zheng et al., 2019) preparou um material adesivo à base de biomassa de soja de farinha de soja e casca de soja. Os autores realizaram uma fermentação com uma enzima de baixo custo na biomassa da soja com posterior prensagem a quente para obtenção de bioadesivos e compensados. O material resultante mostrou-se reticulado com proteína de soja, apresentando maior resistência adesiva e resistência à água em comparação com a amostra não hidrolisada. Segundo os autores, esse material demonstrou potencial para ser um substituto dos adesivos sintéticos à base de madeira.

## 2.2 BIOCHAR DE RESÍDUOS DE SOJA

(Zhang et al., 2019) utilizaram o resíduo de soja como precursor para obtenção de carbono para síntese de biochar dots (BCD). Neste trabalho, foi mencionada a importância do uso de resíduos ricos em nitrogênio, como a soja, para a síntese de BCDs, que podem ser usados como um detector sensível para alguns metais, como os íons  $Hg^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ . Após um tratamento hidrotérmico, os autores puderam obter BCDs a partir de resíduos de soja, que foram eficientemente utilizados para a detecção

de íons metálicos em soluções aquosas. Além disso, foi possível detectar íons metálicos também na faixa micromolar, como sonda fluorescente, evidenciando a importância do uso de matéria-prima barata como fonte de materiais ecologicamente corretos.

Diferentes biomassas também foram usadas por , incluindo resíduos de soja, para produzir biochar para a remoção de íons Co (II) de soluções aquosas. Aqui, o biochar produzido foi obtido por pirólise a 600-650°C após a remoção do óleo com n-hexano no aparelho de Soxhlet. Observou-se na análise FTIR a presença de alguns grupos funcionais que funcionam como sítios de ligação para retenção de íons, como aminas, carbonilas e compostos de oxigênio. O biochar de soja apresentou capacidade de sorção de 19,61mg/g, sob pH de solução constante (5,0), dose de adsorvente (8,0 g/L) e temperatura ambiente durante 60mins no mínimo, e as amostras de biochar puderam ser utilizadas por pelo menos três ciclos de biossorção/dessorção, evidenciando sua capacidade como material biosorvente a partir de biomassa residual. Além disso, os autores caracterizaram a amostra de biochar de resíduos de soja, que está resumida na seção anterior. (Lucaci et al., 2019)

O biochar derivado da soja foi avaliado como uma melhoria para a qualidade ácida do solo. Os autores compararam o biochar de soja com o biochar de carvalho e verificaram que o primeiro apresentou maior capacidade de tratamento do solo, por meio dos resultados de pH, cátions trocáveis e crescimento do milho obtidos, possibilitando aplicações de valor agregado do biochar para resíduos de soja. (Lua et al., 2017)

## 2.3 BIOCOMBUSTÍVEIS À BASE DE SOJA

(Choi et al., 2015) Também estudou Okara, como matéria-prima para a produção de bioetanol. Segundo os autores, o okara representa 25% em peso como subproduto da fabricação de leite de soja e tofu. Considerando o consumo de bebidas de soja em todo o mundo, dezenas de toneladas de okara são geradas por ano. Neste trabalho, os autores realizaram uma fermentação a partir de uma enzima produzida internamente chamada *Saccharomyces cerevisiae* para produzir bioetanol a partir do resíduo de okara. Concluiu-se que o okara pode ser utilizado para a produção de bioetanol, com rendimento fermentativo de 96,2% e concentração de etanol de 59,1g por 1 kg de okara.

(Haas et al., 2001) produzia um biodiesel a partir do estoque de sabão de soja, um resíduo da produção de óleo de soja. O método desenvolvido em pequena escala foi utilizado para produzir o combustível, completamente avaliado. Segundo os autores, várias propriedades obtidas estavam de acordo com as especificações da American Society for Testing and Materials (ASTM) para biodiesel, como ponto de fulgor, água e sedimento, resíduo de carbono, cinzas sulfatadas, densidade, viscosidade cinemática, enxofre, número de cetano, ponto de turvação, corrosão do cobre, número de acidez, glicerina livre e glicerina total. Além disso, apresentaram valores de densidade e número de iodo semelhantes aos do biodiesel comercial à base de soja. Todos os resultados obtidos pelos autores

indicam plenamente que o éster metílico obtido a partir do estoque de sabão de soja é adequado para uso em óleo diesel, obtido por um método simples e de baixo custo, resultando em combustível funcionalmente idêntico produzido comercialmente.

## 2.4 RESÍDUOS À BASE DE SOJA

Em um trabalho recente, testou a biomassa de resíduos de soja funcionalizada como um material bioassorvente mais barato para remoção de metais pesados de solução aquosa. Os autores mencionaram que a escolha da biomassa residual de soja estava relacionada à quebra das paredes celulares da soja, durante o processo de extração do óleo, o que proporciona um aumento na área superficial do produto. Além disso, foi mencionado que não era necessária uma etapa de lavagem devido à extração do óleo com solventes orgânicos, de modo que a funcionalização proposta para a produção de um bioassorvente poderia ser realizada de forma direta. O bioassorvente obtido a partir da biomassa residual de soja apresentou eficiência na remoção de 0,40 mmolL<sup>-1</sup> de ( Bulgariu & Bulgariu , 2018) íons Pb(II) da solução aquosa em condição experimental ótima, utilizou-se uma proporção de 0,2 mLg<sup>-1</sup> de solução de agente quelante de enxofre e biomassa de resíduo de soja, a 30°C de temperatura. A funcionalização aumentou em 196% a capacidade de bioassorção do bioassorvente para Pb(II) e 130% para(II) e Ni(II). Essa eficiência também foi observada na análise FTIR, onde as observações dos espectros mostraram novos grupos funcionais contendo átomos doadores de enxofre na superfície do bioassorvente. Além disso, foi alcançado um potencial de regeneração dos bioassorventes utilizados, o que significa a possibilidade de utilizar o mesmo bioassorvente durante cinco ciclos de bioassorção/dessorção para remoção de Pb(II),(II) e Ni(II) da solução aquosa.

(Zhu et al., 2019) resíduos de coalhada de soja como fonte renovável para produzir materiais de carbono poroso *não dopado com Pd* modificados com Pd (Pd/PCNM), que são comumente preparados sob condições adversas de reações. Este tipo de material é geralmente utilizado como catalisador para hidrogenação de fenóis em ciclohexanonas, onde seu desempenho catalítico tem se mostrado ótimo. Neste trabalho, os autores determinaram que o material preparado apresentou alta atividade catalítica, mesmo quando comparado a materiais comerciais, destacando a nova estratégia de produção utilizada como um nanocatalisador promissor e eficiente a partir de uma fonte de biomassa. Em uma abordagem diferente, utilizou-se um microrganismo chamado (Suenaga et al., 2023) *Aurantiochytrium* sp. L3W em vários tipos de biomassas, incluindo o molho de soja, para produzir os ácidos docosahexaenóico e eicosapentaenóico (DHA e EPA), comumente encontrados no óleo de peixe. Os benefícios comprovados do DHA e do EPA na saúde cardiovascular, nas funções visuais e neurológicas são conhecidos pela sociedade atual e são discutidos de forma concisa no artigo. Indesejavelmente, os recursos de óleo de peixe estão se tornando uma preocupação ambiental negativa,

devido a questões de sustentabilidade, relacionadas a restrições nos sistemas de aquicultura. No entanto, os autores puderam confirmar o uso de resíduos sólidos de alimentos como substrato para a produção de DHA e EPA pelo cultivo de *Aurantiochytrium* sp. L3W, comprovando novamente a ampla gama de aplicações comerciais possíveis para vários tipos de biomassas comumente presentes no planeta.

A importância do óleo de soja na sociedade atual é claramente conhecida, consequentemente tendo grande produção, espera-se que o descarte incorreto possa causar grave poluição da água e do solo. Algumas estratégias de reutilização, como fabricação de sabão, biodiesel ou detergente, foram entregues, mas parecem ser insuficientes. O esforço dedicado pela academia no estudo de muitas aplicações possíveis e no reaproveitamento eficiente da biomassa é de grande valia. Descreveram de forma abrangente algumas estratégias para produzir uma biomassa potencial para suplementação animal com composição nutricional favorável a partir de resíduo de óleo de soja usado e outras biomassas. Para isso, os autores obtiveram um resultado satisfatório de hidrólise por fermentação do óleo de soja proveniente de processos de fritura, utilizando microrganismos específicos. Estudaram o potencial uso da casca de soja como matéria-prima para vermicompostagem, um sistema de disposição diferente, usando mamão rejeitado como aditivo. O sistema elaborado pelos autores mostrou que esses materiais têm potencial de aplicação em vermicompostagem por 63 dias, apresentando ótima combinação de nutrientes para as plantas, sendo uma saída sustentável para converter resíduos sólidos industriais em materiais de valor agregado, ao invés de se decompor em aterros sanitários ou incinerar. (Melo et al., 2021) (Lim et al., 2011)

(Choct et al., 2010) detalharam em um artigo de revisão, várias informações sobre digestibilidade, efeitos nutricionais e antinutricionais dos oligossacarídeos de soja na alimentação animal. Neste trabalho, os autores explicaram resumida a composição nutricional de diferentes produtos de soja. Os autores observaram que alguns polissacarídeos não-amiláceos (NSP) presentes na composição da soja eram solúveis e sua extração poderia melhorar a qualidade da dieta desse alimento. Foram realizadas observações na dieta de suínos e aves e realizados processos de extração desses PNAs, obtendo-se concentrado proteico de soja, que é um produto de alta qualidade para dieta animal. Utilizou uma biomassa de soja de baixo custo, denominada soja em pó desengordurada (DSP), para realizar uma conversão enzimática em várias biomassas diferentes, a fim de obter biocombustíveis a partir de massas lignocelulósicas, em vez de tratamentos usuais de alto custo e ineficazes. Os autores observaram que a adição de DSP poderia reduzir prontamente as cargas de aditivos sintéticos em 8 vezes na conversão de biomassas, diminuindo o custo do processo e contribuindo significativamente para toda a indústria de biorrefinaria de material celulósico, representando, também, um reaproveitamento da biomassa da produção de soja. (Luo et al., 2019)

A produção de biocompósitos reforçados com biomassas é amplamente discutida por . Nesse caso, os autores reutilizam vários resíduos de culturas para reforçar uma matriz biodegradável de poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV) e poli(adipato de butileno-coterreftalato) (PBAT), incluindo caule de soja. Várias propriedades dos espécimes foram avaliadas. Em relação aos biocompósitos de colmo de soja, foi encontrada a maior estabilidade térmica, avaliada por análise termogravimétrica (TG). Propriedades particulares observadas por cada composição foram atribuídas a serem relacionadas à natureza da fibra, composição e distribuição de comprimento. O trabalho de fornece uma ótima revisão sobre a biomassa de soja. Os autores detalharam diversas informações sobre a importância do óleo na sociedade atual, sua produção, rendimento e valor de mercado, com foco no óleo de soja, com descrição de diversos produtos processados. Variedades e composição da soja também são fornecidas, quanto aos seus aminoácidos e moléculas com discussão detalhada. Algumas aplicações da soja também foram entregues, incluindo bioplásticos de soja, processos de obtenção de filmes e seus aditivos e plásticos moldados por injeção à base de biomassa de soja, sustentando que, no início do século, a soja já era vista como uma fonte promissora de matéria-prima para tecnologias verdes. (Nagarajan et al., 2013) (Swain et al., 2004)

(Nyambo et al., 2010) compósitos preparados de polilactídeo (PLA) reforçados com vários tipos de biomassas, incluindo colmos de soja. O compósito preparado com colmos de soja apresentou densidade de fibra de  $1.424 \text{ g cm}^{-3}$  com eventos térmicos quase inalterados, quando comparado ao PLA puro. No entanto, o índice de cristalinidade da mistura com colmos de soja foi o mais alto entre as demais cargas, com 56%. Propriedades mecânicas completas desses espécimes foram obtidas, e nenhum efeito significativo foi encontrado, comparando cada carga. Os autores verificaram que a mistura de diferentes cargas da biomassa resultou em propriedades físico-químicas semelhantes de cada compósito, indicando uma possibilidade de utilização de diferentes fornecedores de biomassas. Propriedades produzidas com adesivos de soja aprimorados com lignina amina, a partir de um novo processo desenvolvido. A lignina amina primária foi produzida por uma abordagem de formaldeído livre, comumente conhecida como reação de oxidação e aminação redutiva, descrita de forma abrangente no artigo original. A presença de lignina amina no adesivo de soja produziu maior resistência à água e resistência à adesão, visando a produção de compensados. A utilização de biomassas de diferentes fontes pode gerar grande interesse comercial e ambiental no material resultante, devido ao seu baixo custo, fonte renovável e processos ecologicamente corretos envolvidos. (Xin et al., 2017)

### **3 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS À BASE DE SOJA**

Numa abordagem diferente, caracterizaram várias biomassas da indústria de palma e óleo de soja, nomeadamente tronco de dendê, folha de dendê e okara. Okara é rico em proteínas e fibras

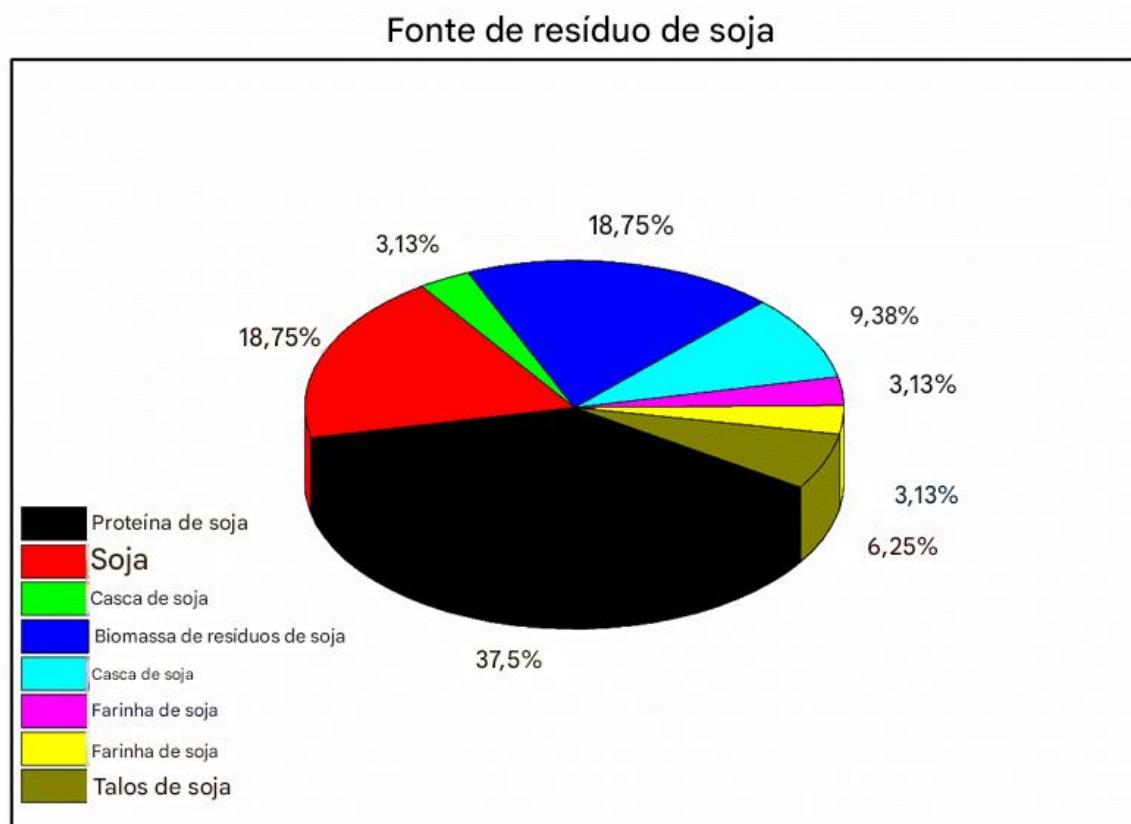
alimentares, mas é comumente descartado em aterros sanitários ou reciclado energeticamente, e sua principal fonte é a fabricação de leite de soja e tofu. Os autores caracterizaram completamente vários resíduos fibrosos, a fim de avaliar sua capacidade de realizar o desenvolvimento de nanofibras. Além disso, um (Fung et al., 2010) usuário mencionou que os tratamentos químicos (alcalinos, autoclave) e físicos (moagem) realizados no okara FM, promoveram uma estrutura mais rugosa e escamosa, observada na amostra FR, devido à remoção de ceras e materiais não celulósicos de sua superfície. Okara apresenta alto teor de proteína, que é significativamente reduzido após o tratamento alcalino para a obtenção de FR. O teor de proteína também afeta a atividade emulsificante da biomassa. O teor de gordura também é grande, o que reflete, juntamente com o teor de proteína, o interesse na produção de óleo de soja e leite dessa fonte. Além disso, o teor de carboidratos foi significativamente aumentado pelo tratamento, composto principalmente por fibras insolúveis discutidas mais adiante. Além disso, fibras solúveis e insolúveis também foram obtidas como teor de Fibra Alimentar Total (TDF) para resíduo de okara e consistem em pectinas e gomas, como fibras solúveis, e lignina, celulose e hemicelulose como fibras insolúveis. O alto teor de fibras insolúveis presentes no okara sugere potencial aplicação como produtos dietéticos para suplementos de fibras alimentares. Além disso, a presença de celulose e lignina como fração insolúvel, poderia promover a aplicação de okara para fonte de nanofibras em aplicações de biomateriais. Conclusivamente, o conteúdo mineral (Fe, Zn, Mn, Ca, K, Mg, Na, Si e P), os valores de refletância (Hunter L\*, a\* e b\*) e as propriedades funcionais (capacidade de retenção de água, capacidade de retenção de óleo, atividade emulsificante e estabilidade e atividade antioxidante) foram resumidos e discutidos de forma abrangente no artigo original, juntamente com a produção de nanofibras.

(Rambo et al., 2015) caracterizaram muitas biomassas brasileiras, incluindo cascas de soja. Algumas de suas propriedades foram descritas no capítulo anterior. Além disso, a composição do açúcar foi obtida. Dentre várias análises, foi possível concluir pelos autores que a biomassa com alto poder calorífico e baixo teor de cinzas pode ser uma fonte promissora para a produção de bioenergia. Altos teores de umidade ( $> \sim 10\%$ ) tornam a biomassa inadequada para matéria-prima energética, mas cada resíduo mostrou alguma propriedade promissora como fonte de materiais de valor agregado. Resumiu de forma abrangente várias composições químicas e valor proteico da soja e do resíduo de soja comumente usado como alimento animal. Ambos os materiais foram testados em uma dieta para desmame de ratos Wistar machos. O resíduo de soja apresentou alto teor de proteína e menor valor energético do que o grão de soja, com maiores valores de pontuação de aminoácidos. A qualidade protéica do resíduo de soja mostrou-se semelhante à do grão de soja neste trabalho, sendo potencialmente uma ótima fonte de alimento animal em vez de descarte ou reciclagem comum. (Silva et al., 2006)

## 4 AVALIAÇÃO DE APLICAÇÕES DE MATERIAIS À BASE DE SOJA

No último capítulo, algumas perspectivas da literatura foram fornecidas apontando várias possíveis aplicações de diferentes resíduos à base de soja. Agora, essa literatura será analisada de acordo com cada tipo de resíduo de soja utilizado, a aplicação mencionada e os diferentes tipos de caracterizações. O objetivo deste capítulo é resumir todos os achados anteriores da literatura.

A **Figura 1** resume a fonte de resíduos à base de soja citada neste trabalho.



**Figura 1.** Fonte do resíduo de soja na literatura citada neste trabalho.

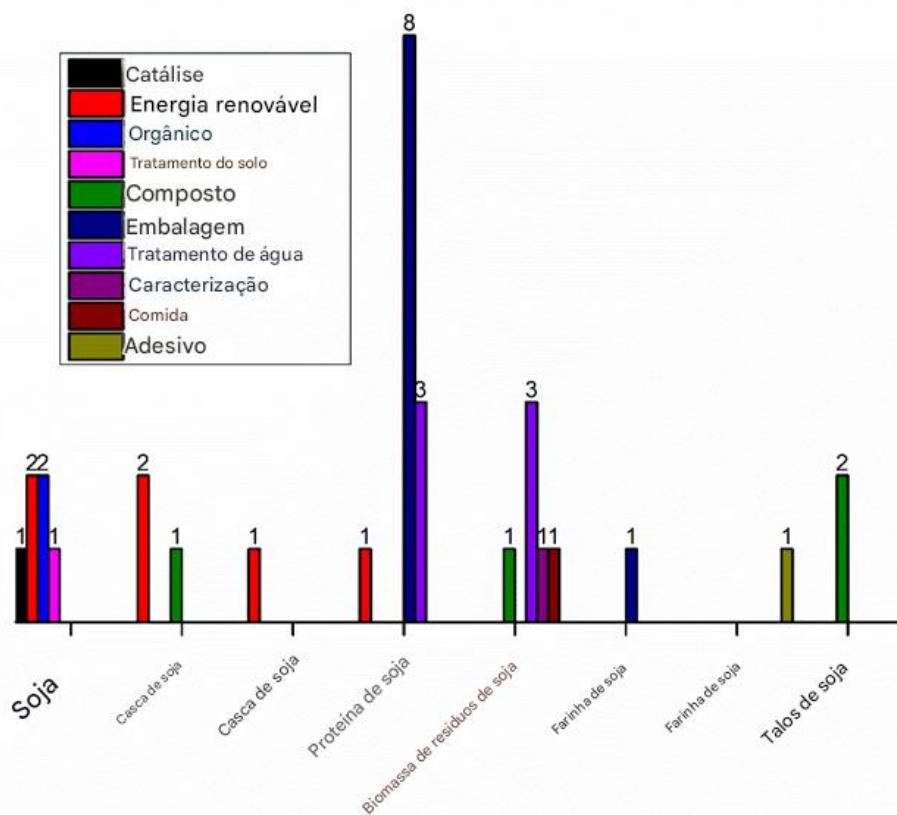
Como observado, a fonte mais comum é a proteína de soja, uma das fontes de proteína mais abundantes do planeta. Esse tipo de resíduo normalmente é resultado da indústria de óleo de soja, que utiliza a soja como matéria-prima. O processo mais comum é a extração da proteína de soja da soja após a extração do óleo. Além disso, é produzido outro subproduto, chamado farinha de soja, que pode ser purificado para obter proteína de soja em pó . (de Souza et al., 2020; Leceta et al., 2014; J. Liu et al., 2017)

De modo geral, o resíduo de soja pode ser definido como o subproduto formado por diversos tipos de indústrias à base de soja, como leite e tofu, e apresenta uma composição muito interessante de proteína e celulose, sendo uma fonte importante para diversas aplicações, como enfatizado anteriormente, (Zhu et al., 2019) sendo a segunda fonte mais utilizada aqui mencionada. O resíduo

de soja também pode ser chamado de "okara", um subproduto dos mesmos processos de tofu e leite, representando uma maior massa de resíduo, que é diferente da definida como biomassa de resíduo de soja, sendo um subproduto normalmente obtido após a extração do óleo. (Choi et al., 2015; Fung et al., 2010) ( Bulgariu & Bulgariu , 2018; Lucaci et al., 2019)

A casca de soja também é um subproduto da extração do óleo de soja, mas com uma massa significativamente menor, aproximadamente 2% do grão inteiro, muito semelhante às cascas de soja. Para a obtenção de proteínas isoladas purificadas de soja, o farelo de soja surge como alternativa, sendo normalmente utilizado como matéria-prima para animais. Este resíduo é um subproduto das indústrias petrolíferas também, (Cardoso et al., 2013) (Rambo et al., 2015) (Mekonnen et al., 2016) uma abordagem semelhante à farinha de soja (Zheng et al., 2019) e caules de soja. Em geral, os resíduos à base de soja são obtidos principalmente das indústrias de alimentos, como tofu e leite, ou extração de óleo. (Nyambo et al., 2010)

**A Figura 2** resume as aplicações observadas neste trabalho para cada tipo de resíduo à base de soja.



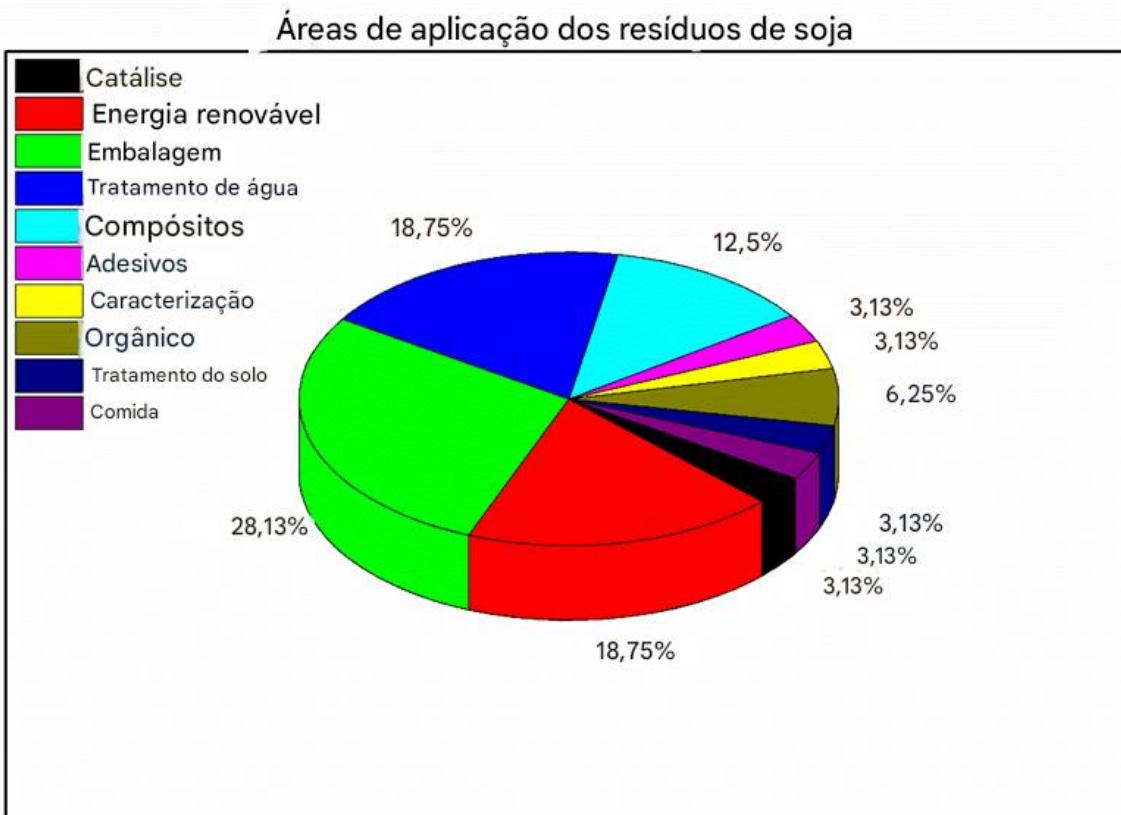
**Figura 2.** Áreas de aplicação de cada tipo de resíduo à base de soja.

É possível observar que a proteína de soja é utilizada principalmente como material para a fabricação de filmes com fins de embalagem. Isso se deve principalmente às boas propriedades de

barreira, resistência a óleos e biodegradabilidade que as proteínas naturais podem ter , o que foi bem descrito em um capítulo anterior. (de Souza et al., 2020; J. Liu et al., 2017)

As seguintes aplicações mais discutidas neste trabalho são o tratamento de água e energia renovável, conforme mostrado na Figura 3.

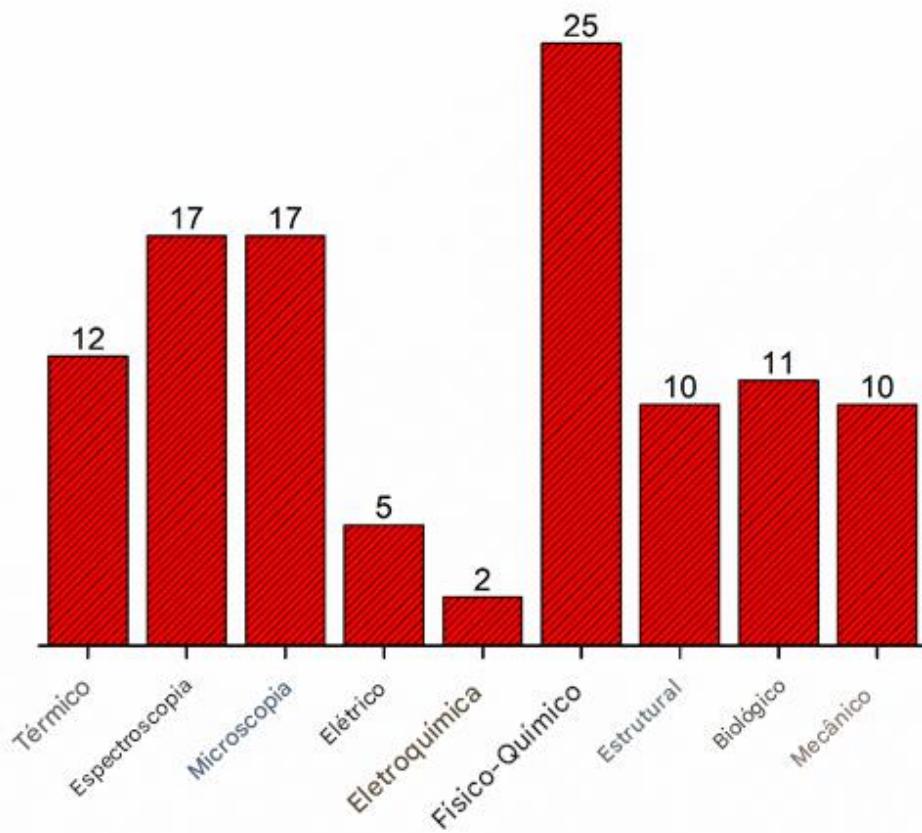
**Figura 3.** Áreas de aplicação dos resíduos de soja deste trabalho.



Essas observações enfatizam que os resíduos à base de soja podem ter várias aplicações possíveis. O propósito do tratamento de água também utiliza proteína de soja como fonte, discutida por (J. Liu et al., 2017) . O mesmo ocorre com o resíduo de soja, que normalmente é utilizado para superar o alto custo dos biossorventes sintéticos, sendo facilmente modificado para essa aplicação específica. ( Bulgariu & Bulgariu , 2018; Lucaci et al., 2019)

A Figura 4 mostra as principais caracterizações realizadas nos resíduos à base de soja.

**Figura 4.** Tipos de análise realizados nos diversos tipos de resíduos à base de soja apresentados.



A caracterização mais comum é a fisico-química, normalmente realizada para caracterizar a composição e propriedades do resíduo, bem descritas. As seguintes análises, como térmica, espectroscopia e microscopia são comumente encontradas em diferentes tipos de aplicações e resíduos, conforme discutido anteriormente, e são realizadas principalmente para aplicações de energia renovável, compósitos e embalagens, respectivamente. (Fung et al., 2010) (Rambo et al., 2015) (Alemdar & Sain, 2008) (Gu et al., 2019)

A biomassa de soja e alguns de seus produtos revelaram um cenário multifacetado e promissor quanto à aplicação de seus resíduos e produtos derivados para fins ambientalmente sustentáveis. Os estudos citados destacaram inúmeras possibilidades de utilização da biomassa e resíduos da soja, bem como de seus subprodutos, em diferentes aplicações, evidenciando seu potencial de contribuir significativamente para práticas ambientalmente amigáveis. O objetivo deste trabalho foi enfatizar a viabilidade do emprego de resíduos de soja na produção de biocombustíveis, biochars, fonte lignocelulósica e biomassa geral para geração de energia limpa, bem como na fabricação de materiais biodegradáveis e compostáveis. Além disso, os subprodutos da soja têm sido identificados como fontes valiosas de compostos bioativos com potencial aplicação nas indústrias farmacêutica, alimentícia e cosmética, destacando seu valor agregado e múltiplas possibilidades de uso. Esse panorama reforça a importância da exploração e valorização dos resíduos de soja e seus derivados como recursos renováveis, promovendo práticas sustentáveis e mitigando impactos ambientais, incentivando o



desenvolvimento de estratégias inovadoras e sustentáveis para o manejo desses materiais na busca por um futuro ecologicamente correto.



## REFERÊNCIAS

- Alemdar, A., & Sain, M. (2008). Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues - Wheat straw and soy hulls. *Bioresource Technology*, 99(6), 1664–1671. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.029>
- Bramorski, J., Lopes, H. S. M., de Jesus Barros, M. F., Mathias, S. L., & de Menezes, A. J. (2023). Agricultural Crop Residues Biomass. In *Handbook of Biomass* (pp. 1–35). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6772-6\\_8-1](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6772-6_8-1)
- Bulgariu, L., & Bulgariu, D. (2018). Functionalized soy waste biomass - A novel environmental-friendly biosorbent for the removal of heavy metals from aqueous solution. *Journal of Cleaner Production*, 197, 875–885. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.261>
- Cardoso, C. R., Oliveira, T. J. P., Santana Junior, J. A., & Ataíde, C. H. (2013). Physical characterization of sweet sorghum bagasse, tobacco residue, soy hull and fiber sorghum bagasse particles: Density, particle size and shape distributions. *Powder Technology*, 245, 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.029>
- Choct, M., Dersjant-Li, Y., McLeisha, J., & Peisker, M. (2010). Soy Oligosaccharides and Soluble Non-starch Polysaccharides: A Review of Digestion, Nutritive and Anti-nutritive Effects in Pigs and Poultry. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.*, 23(10), 1386–1398.
- Choi, I. S., Kim, Y. G., Jung, J. K., & Bae, H. J. (2015). Soybean waste (okara) as a valorization biomass for the bioethanol production. *Energy*, 93, 1742–1747. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.093>
- de Souza, K. C., Correia, L. G., da Silva, T. B. V., Moreira, T. F. M., de Oliveira, A., Sakanaka, L. S., Dias, M. I., Barros, L., Ferreira, I. C. F. R., Valderrama, P., Leimann, F. V., & Shirai, M. A. (2020). Soy Protein Isolate Films Incorporated with Pinhão (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze) Extract for Potential Use as Edible Oil Active Packaging. *Food and Bioprocess Technology*, 13(6), 998–1008. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02454-5>
- Dias, L. C. P., Pimenta, F. M., Santos, A. B., Costa, M. H., & Ladle, R. J. (2016). Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. *Global Change Biology*, 22(8), 2887–2903. <https://doi.org/10.1111/gcb.13314>
- Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions* (1st ed., Vol. 1). Wagner GmbH.
- Flach, R., Abrahão, G., Bryant, B., Scarabello, M., Soterroni, A. C., Ramos, F. M., Valin, H., Obersteiner, M., & Cohn, A. S. (2021). Conserving the Cerrado and Amazon biomes of Brazil protects the soy economy from damaging warming. *World Development*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105582>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). FAO. <Https://Www.Fao.Org/Faostat/En/#home>.
- Fung, W. Y., Yuen, K. H., & Lioung, M. T. (2010). Characterization of fibrous residues from agrowastes and the production of nanofibers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 8077–8084. <https://doi.org/10.1021/jf1012506>



Gong, J., Li, J., Xu, J., Xiang, Z., & Mo, L. (2017). Research on cellulose nanocrystals produced from cellulose sources with various polymorphs. *RSC Advances*, 7(53), 33486–33493. <https://doi.org/10.1039/C7RA06222B>

Gu, W., Liu, X., Li, F., Shi, S. Q., Xia, C., Zhou, W., Zhang, D., Gong, S., & Li, J. (2019). Tough, strong, and biodegradable composite film with excellent UV barrier performance comprising soy protein isolate, hyperbranched polyester, and cardanol derivative. *Green Chemistry*, 21(13), 3651–3665. <https://doi.org/10.1039/c9gc01081e>

Haas, M. J., Scott, K. M., Alleman, T. L., & McCormick, R. L. (2001). Engine performance of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: A high quality renewable fuel produced from a waste feedstock. *Energy and Fuels*, 15(5), 1207–1212. <https://doi.org/10.1021/ef010051x>

Herde, Z. D., Dharmasena, R., Sumanasekera, G., Tumuluru, J. S., & Satyavolu, J. (2020). Impact of hydrolysis on surface area and energy storage applications of activated carbons produced from corn fiber and soy hulls. *Carbon Resources Conversion*, 3, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2019.12.002>

Huang, S., Tao, R., Ismail, A., & Wang, Y. (2020). Cellulose nanocrystals derived from textile waste through acid hydrolysis and oxidation as reinforcing agent of soy protein film. *Polymers*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/POLYM12040958>

Hwang, D.-C., & Damodaran, S. (1996). *Chemical Modification Strategies for Synthesis of Protein-Based Hydrogel*. <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>

IBGE. (2023). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. <Https://Www.Ibge.Gov.Br/>.

Kumar, R., Wang, L., & Zhang, L. (2009). Structure and mechanical properties of soy protein materials plasticized by thioglycol. *Journal of Applied Polymer Science*, 111(2), 970–977. <https://doi.org/10.1002/app.29136>

Leceta, I., Etxabide, A., Cabezudo, S., De La Caba, K., & Guerrero, P. (2014). Bio-based films prepared with by-products and wastes: Environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 64, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.054>

Lim, P. N., Wu, T. Y., Shyang Sim, E. Y., & Lim, S. L. (2011). The potential reuse of soybean husk as feedstock of *Eudrilus eugeniae* in vermicomposting. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(14), 2637–2642. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4504>

Lima, L. R., Santos, D. B., Santos, M. V., Barud, H. S., Henrique, M. A., Pasquini, D., Pecoraro, E., & Ribeiro, S. J. L. (2015). CELLULOSE NANOCRYSTALS FROM BACTERIAL CELLULOSE. *Química Nova*. <https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150131>

Liu, D., Li, Z., Li, W., Zhong, Z., Xu, J., Ren, J., & Ma, Z. (2013). Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution by soy protein hollow microspheres. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(32), 11036–11044. <https://doi.org/10.1021/ie401092f>

Liu, J., Su, D., Yao, J., Huang, Y., Shao, Z., & Chen, X. (2017). Soy protein-based polyethylenimine hydrogel and its high selectivity for copper ion removal in wastewater treatment. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(8), 4163–4171. <https://doi.org/10.1039/c6ta10814h>

Lucaci, A. R., Bulgariu, D., Ahmad, I., Lisa, G., Mocanu, A. M., & Bulgariu, L. (2019). Potential use of biochar from variouswaste biomass as biosorbent in Co(II) removal processes. *Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081565>

Luo, X., Liu, J., Zheng, P., Li, M., Zhou, Y., Huang, L., Chen, L., & Shuai, L. (2019). Promoting enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass by inexpensive soy protein. *Biotechnology for Biofuels*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1387-x>

Mekonnen, T., Misra, M., & Mohanty, A. K. (2016). Fermented Soymeals and Their Reactive Blends with Poly(butylene adipate-co-terephthalate) in Engineering Biodegradable Cast Films for Sustainable Packaging. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 4(3), 782–793. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00782>

Melo, M. M., dos Reis, K. C., Pires, J. F., das Neves, T. T., Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2021). Biohydrolysis of used soybean oil: environmental-friendly technology using microbial consortium. *Biodegradation*, 32(5), 551–562. <https://doi.org/10.1007/s10532-021-09951-0>

Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2002). Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World. In *Journal of Polymers and the Environment* (Vol. 10, Issue 2).

Moon, D. H., Hwang, I., Chang, Y. Y., Koutsospyros, A., Cheong, K. H., Ji, W. H., & Park, J. H. (2017). Quality improvement of acidic soils by biochar derived from renewable materials. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 4194–4199. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8142-7>

Nagarajan, V., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2013). Sustainable green composites: Value addition to agricultural residues and perennial grasses. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 1(3), 325–333. <https://doi.org/10.1021/sc300084z>

Nyambo, C., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2010). Polylactide-based renewable green composites from agricultural residues and their hybrids. *Biomacromolecules*, 11(6), 1654–1660. <https://doi.org/10.1021/bm1003114>

Rambo, M. K. D., Schmidt, F. L., & Ferreira, M. M. C. (2015). Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, 144, 696–703. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.045>

Silva, M. S., Margareth, M., Naves, V., De Oliveira, R. B., De, O., & Leite, S. M. (2006). Composição QuímiCa e Valor protéico do resíduo de soja em relação ao Grão de soja 1. In *Ciênc. Tecnol. Aliment* (Vol. 26, Issue 3).

Soares, R. M. D., Scremin, F. F., & Soldi, V. (2005). Thermal stability of biodegradable films based on soy protein and corn starch. *Macromolecular Symposia*, 229, 258–265. <https://doi.org/10.1002/masy.200551132>

Suenaga, T., Nakai, S., Umebara, A., Nishijima, W., Gotoh, T., & Humaidah, N. (2023). Valorization of Solid Food Waste as a Source of Polyunsaturated Fatty Acids Using Aurantiochytrium sp. L3W. *Waste and Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02072-0>

Swain, S. N., Biswal, S. M., Nanda, P. K., & Nayak, P. L. (2004). Biodegradable Soy-Based Plastics: Opportunities and Challenges. In *Journal of Polymers and the Environment* (Vol. 12, Issue 1).



Xin, J., Zhang, P., Wolcott, M. P., Zhang, J., Hiscox, W. C., & Zhang, X. (2017). A Novel and Formaldehyde-Free Preparation Method for Lignin Amine and Its Enhancement for Soy Protein Adhesive. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(3), 599–605. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0844-x>

Zhang, L., Liu, W., Zhuang, H., Zhang, J., Chen, C., Wang, Y., & Shan, S. (2019). Environmentally friendly synthesis of photoluminescent biochar dots from waste soy residues for rapid monitoring of potentially toxic elements. *RSC Advances*, 9(38), 21653–21659. <https://doi.org/10.1039/c9ra03001h>

Zheng, P., Chen, N., Mahfuzul Islam, S. M., Ju, L. K., Liu, J., Zhou, J., Chen, L., Zeng, H., & Lin, Q. (2019). Development of Self-Cross-Linked Soy Adhesive by Enzyme Complex from *Aspergillus Niger* for Production of All-Biomass Composite Materials. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(4), 3909–3916. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04993>

Zhu, Y., Yu, G., Yang, J., Yuan, M., Xu, D., & Dong, Z. (2019). Biowaste soybean curd residue-derived Pd/nitrogen-doped porous carbon with excellent catalytic performance for phenol hydrogenation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 533, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.08.067>