

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Análise de inteligência competitiva no uso de resíduos agrícolas
lignocelulósicos na indústria produtora de polpa celulósica**

Tamara Braga dos Santos
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

TAMARA BRAGA DOS SANTOS

**Análise de inteligência competitiva no uso de resíduos agrícolas
lignocelulósicos na indústria produtora de polpa celulósica**

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

Orientador: Gleison Augusto dos Santos

Coorientadora: Jaqueline M. do Nascimento

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

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

T

Santos, Tamara Braga dos, 1993-

S237a
2025

Análise de inteligência competitiva no uso de resíduos agrícolas lignocelulósicos na indústria produtora de polpa celulósica / Tamara Braga dos Santos. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (112 f.): il.

Orientador: Gleison Augusto dos Santos.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.031>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Indústria de celulose. 2. Resíduos agrícolas - Reaproveitamento. 3. Sustentabilidade. I. Santos, Gleison Augusto dos, 1977-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.986116

TAMARA BRAGA DOS SANTOS

**Análise de inteligência competitiva no uso de resíduos agrícolas
lignocelulósicos na indústria produtora de polpa celulósica**

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

APROVADA: 5 de agosto de 2025.

Assentimento:

Tamara Braga dos Santos
Autora

Gleison Augusto dos Santos
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 04/02/2026 às 18:46:13 e pelo orientador em 04/02/2026 às 21:42:38. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **YZK6.I85Y.M5QN** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus tão amados mãe, pai e irmão
por ser meu alicerce de corpo, alma e coração...

AGRADECIMENTOS

“Gracias a la vida, que me ha dado tanto...”

Agradeço por estar viva e ser sobrevivente do caos. Eu acredito que o amor, o bem e o afeto coletivo hão de triunfar!

Aos meus tão amados pais, por me mostrarem o caminho do bem e pela fonte de amor inesgotável. Vosso amor me sustenta, me acalma e me regozija. Ao meu doce e forte irmão, por me mostrar que a força da fé é maior que tudo e qualquer coisa. Eu sou e existo por vocês, eternamente! Dedico também este trabalho à querida Marilane Bhering, que sempre será parte da minha família e hoje habita os céus da vida eterna.

À família que escolhi – meus fiéis amigos e amigas espalhados por esse mundão de meu Deus. Aqui cabem os poucos que se sentirem tocados pelo meu amor e presença, ainda que na distância.

Aos bons colegas que fiz no dia-a-dia do trabalho e tornaram as curvas da estrada menos sinuosas. Vocês se tornaram bons amigos!

Ao prof. Gleison e à doutora e colega Jaqueline Nascimento pelo apoio na orientação e construção do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) e à Universidade Federal de Viçosa pela estrutura e apoio.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

... “Peço-lhe que tente ter amor pelas próprias perguntas, como quartos fechados e como livros escritos em uma língua estrangeira. Não investigue agora as respostas que não lhe podem ser dadas, porque não poderia vivê-las. E é disto que se trata, de viver tudo. Viva agora as perguntas. Talvez passe, gradativamente, em um belo dia, sem perceber, a viver as respostas.”

(Rainer Maria Rilke)

RESUMO

SANTOS, Tamara Braga dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Análise de inteligência competitiva no uso de resíduos agrícolas lignocelulósicos na indústria produtora de polpa celulósica.** Orientador: Gleison Augusto dos Santos. Coorientadora: Jaqueline Maria do Nascimento.

A indústria de celulose enfrenta desafios crescentes relacionados à sustentabilidade e à segurança do suprimento de matéria-prima, diante do aumento contínuo da demanda global e das limitações impostas pelas florestas plantadas. Neste contexto, resíduos agrícolas surgem como alternativa estratégica para diversificar a matriz de fibras e reduzir a dependência da madeira, especialmente em um cenário de mudanças climáticas e competição por terras agricultáveis. Esta dissertação analisa o potencial de diferentes resíduos agrícolas como matérias-primas para a produção de celulose, com foco em três regiões-chave: América Latina, Europa e China. A metodologia envolveu a revisão sistemática de dados sobre a disponibilidade regional de resíduos, composição lignocelulósica e avaliação técnica das fibras, considerando parâmetros como teor de celulose, lignina e sílica, além da análise das barreiras e oportunidades tecnológicas para seu aproveitamento em larga escala. Os resultados evidenciam que o bagaço de cana-de-açúcar, na América Latina, se destaca como a alternativa mais promissora no curto e médio prazo. Essa recomendação se deve não apenas à ampla geração do resíduo e à infraestrutura industrial já consolidada para seu processamento, mas também às características morfológicas e químicas das fibras, semelhantes às das madeiras duras, que favorecem a adaptação aos processos de polpação existentes. Na Europa, a palha de trigo é apontada como o resíduo mais adequado em função de sua alta produção anual e compatibilidade com as tecnologias convencionais de polpação. Por outro lado, na China, a palha de arroz apresenta grande potencial devido à sua abundância, mas exige soluções tecnológicas específicas, como pré-tratamentos para mitigação do teor de sílica, que podem comprometer os equipamentos de recuperação química. A análise reforça que o aproveitamento de resíduos agrícolas como fonte alternativa de fibras contribui para a bioeconomia circular, a inovação tecnológica e a resiliência produtiva da indústria de celulose, consolidando-se como estratégia de inteligência competitiva diante de um mercado global cada vez mais voltado à sustentabilidade.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais; Fibra não madeira celulose; Fibras alternativas; Sustentabilidade do negócio; Bioeconomia circular

ABSTRACT

SANTOS, Tamara Braga dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025.
Competitive intelligence analysis on the use of lignocellulosic agricultural waste in the pulp industry. Adviser: Gleison Augusto dos Santos. Co-adviser: Jaqueline Maria do Nascimento.

The pulp industry faces increasing challenges related to sustainability and the secure supply of raw materials, due to the continuous growth in global demand and the limitations imposed by planted forests. In this context, agricultural residues emerge as a strategic alternative to diversify the fiber matrix and reduce dependence on wood, especially in a scenario of climate change and competition for arable land. This dissertation analyzes the potential of different agricultural residues as raw materials for cellulose production, focusing on three key regions: Latin America, Europe, and China. The methodology involved a systematic review of data on regional residue availability, lignocellulosic composition, and technical assessment of the fibers, considering parameters such as cellulose, lignin, and silica content, as well as an analysis of the technological barriers and opportunities for large-scale utilization. The results show that sugarcane bagasse in Latin America stands out as the most promising alternative in the short and medium term. This recommendation is supported not only by the wide availability of the residue and the already consolidated industrial infrastructure for its processing but also by the morphological and chemical characteristics of its fibers, similar to those of hardwoods, which facilitate adaptation to existing pulping processes. In Europe, wheat straw is identified as the most suitable residue due to its high annual production and compatibility with conventional pulping technologies. In contrast, in China, rice straw has significant potential thanks to its abundance but requires specific technological solutions, such as pre-treatment methods to mitigate its high silica content, which can compromise chemical recovery equipment. The analysis reinforces that leveraging agricultural residues as an alternative fiber source contributes to circular bioeconomy, technological innovation, and the productive resilience of the cellulose industry, consolidating itself as a competitive intelligence strategy in a global market increasingly oriented toward sustainability.

Keywords: Agricultural residues; Cellulose; Alternative fibers; Sustainability; Circular bioeconomy

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	10
REFERÊNCIAS	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Fontes convencionais de fibra e o panorama atual indústria de celulose	16
2.2 Principais fibras alternativas usadas na indústria de celulose.....	19
2.3 Características das fibras alternativas – comparação à celulose de <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i>	23
2.4 Métodos de extração de celulose a partir de resíduos agrícolas	25
2.5 Composição e características dos resíduos agrícolas.....	26
2.5.1 Características químicas.....	26
2.5.2 Características morfológicas	31
2.5.3 Características físicas	33
2.6 Pré-tratamento dos resíduos agrícolas	34
2.7 Polpação.....	34
2.7.1 Propriedades de polpação de matérias-primas não madeireiras	35
2.8 Inteligência competitiva na indústria florestal	36
REFERÊNCIAS	40
CAPÍTULO 1: Resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de celulose na América Latina: disponibilidade e potencial estratégico.....	49
1 INTRODUÇÃO.....	51
2 OBJETIVO	52
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5 Considerações finais	76
Perspectivas futuras para o uso de biomassa agrícola na produção de celulose	77
6 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	80
CAPÍTULO 2: Resíduos agrícolas lignocelulósicos na indústria de celulose na Europa e na China: desafios, inovações e posicionamento estratégico	84
1 INTRODUÇÃO.....	86
2 OBJETIVO	87
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	87
3.1 Estratégia de busca e seleção bibliográfica.....	88
3.2 Seleção das regiões e culturas agrícolas	88

3.3 Fonte de dados e coleta de informações	89
3.4 Estimativa da geração de resíduos agrícolas.....	89
3.5 Avaliação do potencial técnico das fibras para a produção de celulose	89
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
4.1 Produção agrícola e estimativa de resíduos na Europa.....	89
4.2 Projeções futuras e estratégias para o uso sustentável de resíduos agrícolas na Europa	94
4.3 Panorama geral da indústria de celulose e papel na Europa	98
4.4 Panorama geral da produção de celulose na China.....	100
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6 CONCLUSÕES	106
7 CONCLUSÕES GERAIS	107
REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO GERAL

O mercado global de celulose branqueada é marcado por forte integração internacional e pela consolidação de produtores altamente competitivos, entre os quais o Brasil se destaca como líder mundial nas exportações. Em 2024, o país produziu 25,5 milhões de toneladas de celulose, destinando 18,6 milhões de toneladas ao mercado externo, o que reforça seu papel estratégico no abastecimento global. A celulose respondeu por 67% do valor exportado pela cadeia de árvores plantadas, gerando US\$ 10,6 bilhões, com destaque para a China, a Europa e a América do Norte, que concentraram 73% do destino das exportações brasileiras. Esse desempenho evidencia a centralidade do Brasil nas dinâmicas internacionais do setor, especialmente diante da crescente demanda por fibras de base renovável (IBÁ, 2025).

Atualmente, cerca de 90 a 95% da celulose comercializada no mundo é extraída de espécies arbóreas cultivadas em sistemas florestais, com destaque para o eucalipto, especialmente em países da América do Sul como o Brasil, Chile e o Uruguai. Apesar de seu alto rendimento por hectare e da qualidade da fibra, o cultivo do eucalipto enfrenta diversos desafios. Entre eles, estão os impactos de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas e geadas, o longo ciclo de crescimento até a colheita (em torno de 7 anos) e a crescente competição por áreas agricultáveis, especialmente em regiões de solos férteis (Florêncio et al., 2022; Virtuoso et al., 2022; Tomé et al., 2021).

Diante desse cenário, a combinação entre o crescimento constante da demanda global e as limitações na expansão da oferta de celulose proveniente de florestas plantadas tem gerado preocupações quanto à sustentabilidade e à segurança do suprimento no longo prazo. Nesse sentido, cresce o interesse por espécies alternativas para produção de celulose, como espécies arbóreas do gênero *Corymbia* spp., o bambu, o kiri japonês (*Paulownia tomentosa*) e até o cânhamo industrial (*Cannabis sativa*) que apresentam vantagens como crescimento rápido e adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. No entanto, essas alternativas ainda encontraram obstáculos significativos, como a escassez de conhecimento técnico sobre tratos silviculturais específicos, falta de dados sobre desempenho em escala industrial e incertezas quanto ao rendimento na produção de polpa celulósica. Nesse contexto, ganha relevância a exploração de uma terceira via: o aproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos, abundantes, renováveis e ainda subutilizados como fonte complementar de fibras para atender à crescente demanda global por celulose (Churam et al., 2024; Gonzalez et al., 2023; Iglesias et al., 2023; De Assis et al., 2019).

O aproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos como fonte de fibras para produção de celulose é amplamente reconhecido como uma alternativa promissora, sustentável e ainda subexplorada quando comparada à produção convencional baseada em florestas plantadas. Gerados em grande escala pelas atividades agroindustriais, esses resíduos incluem materiais como palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, sabugo de milho, casca de soja, entre outros. Por serem subprodutos de colheitas já consolidadas, sua utilização não exige a ocupação de novas áreas, reduzindo impactos ambientais e custos associados à matéria-prima. Além disso, seu aproveitamento contribui para a diversificação de fontes de fibra e para a mitigação da dependência de monoculturas florestais, alinhando-se às exigências por práticas mais sustentáveis e circulares (Riseh et al., 2024; Koul et al., 2022; Abd El-Sayed et al., 2020).

Nesse cenário, o uso estratégico de resíduos lignocelulósicos da agricultura também pode ser interpretado como uma prática de inteligência competitiva, ao permitir que empresas do setor antecipem cenários futuros de escassez de matéria-prima, explorem fontes alternativas com potencial regional e aumentem sua resiliência produtiva. Essa abordagem favorece não apenas a inovação tecnológica e o posicionamento sustentável da marca, mas também a capacidade de resposta a pressões regulatórias e mercadológicas em constante transformação, de modo a atender à crescente demanda global por celulose a preços mais acessíveis e com menor impacto ambiental.

As atividades agrícolas resultam na geração de diversos resíduos ou subprodutos comumente denominados resíduos agroindustriais, os quais representam uma fração significativa dos rejeitos da cadeia produtiva do setor (Afolalu et al., 2021). Esses resíduos incluem uma ampla variedade de materiais, como palhas residuais, cascas, talos, esterco, folhas, sementes, camas de animais, raízes, restos vegetais, entre outros (Koul et al., 2022). Estima-se que, anualmente, cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos agroindustriais sejam geradas em todo o mundo, compostas por diferentes proporções de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos, o que evidencia seu potencial como fonte de biomassa lignocelulósica (Millati et al., 2019).

Os resíduos agrícolas correspondem à biomassa vegetal remanescente das colheitas agrícolas deixadas no campo, como palhas de arroz, trigo, sorgo, milho, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. Esses resíduos são compostos majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, além de quantidades menores de pectina, compostos nitrogenados e minerais (Andlar et al., 2018).

O fator inicial para analisar a viabilidade da valorização de resíduos agroindustriais, visando a produção de materiais à base de celulose, é a identificação dos tipos de resíduos que,

além de possuírem alto teor de celulose, também sejam gerados em grande escala e apresentem ampla disponibilidade. Em geral, essa disponibilidade é estimada com base na produção anual das culturas e nas respectivas taxas de geração de resíduos (Worku et al., 2023).

Diante das transformações e desafios que permeiam o mercado global de celulose, torna-se evidente a necessidade de repensar as fontes tradicionais de matéria-prima e explorar alternativas igualmente ou mais sustentáveis, economicamente viáveis e estrategicamente posicionadas. O aproveitamento de resíduos agrícolas surge, assim, como uma solução promissora tanto do ponto de vista ambiental quanto competitivo, ao permitir a diversificação da matéria-prima, o uso eficiente de recursos já existentes e a abertura de novos mercados (Worku et al., 2023; Otieno et al., 2021).

Nesse cenário, a aplicação da inteligência competitiva se apresenta como um diferencial estratégico, capaz de orientar decisões informadas, antecipar tendências e identificar oportunidades de inovação em um setor cada vez mais pressionado por exigências de sustentabilidade, resiliência e eficiência. Essa abordagem integrada sustenta a proposta deste trabalho, que busca investigar o potencial dos resíduos agroindustriais como recurso para a indústria de celulose, a partir de uma perspectiva orientada pela inteligência competitiva.

O anúncio de investimentos de R\$ 105 bilhões pela indústria de papel e celulose até 2028 — envolvendo grandes empresas como Arauco, Suzano, CMPC, Bracell e Klabin — reflete não apenas a expansão do setor, como também acende um alerta sobre a disponibilidade futura de matéria-prima florestal. Embora o Brasil detenha quase 10 milhões de hectares de florestas plantadas e seja o maior exportador mundial de celulose, a pressão crescente por madeira pode em breve exceder a capacidade sustentável das plantações atuais (Brasil, 2024).

A demanda global por fibras está projetada para crescer entre 2% e 3% ao ano até 2030, impulsionada tanto pelo aumento populacional quanto pelo crescimento do consumo per capita, especialmente em países em desenvolvimento (Gschwandtner, 2022). Nesse sentido, é moldado um cenário, envolto em incerteza quanto à oferta de madeira; por isso, começam a ganhar força as discussões sobre o uso de fibras alternativas — provenientes de resíduos agrícolas, biomassas lignocelulósicas e fontes não convencionais — como meios de reduzir a pressão sobre as plantações convencionais e garantir a resiliência do setor no médio e longo prazo.

Nesse sentido, o objetivo geral do trabalho foi avaliar o potencial dos resíduos agrícolas como fonte alternativa de matéria-prima para a produção de celulose, sob a perspectiva da inteligência competitiva, considerando aspectos técnicos, regionais e estratégicos da indústria de base florestal.

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar a disponibilidade e a geração de resíduos agrícolas nas principais regiões produtoras analisadas (América Latina, Europa e China), com base em dados secundários e estatísticas oficiais;
- Avaliar as principais características técnicas e lignocelulósicas dos resíduos agrícolas selecionados, considerando sua adequação aos processos industriais de produção de celulose;
- Analisar as diferenças regionais quanto às estratégias de aproveitamento de resíduos agrícolas, políticas ambientais, nível tecnológico e inserção na cadeia produtiva de celulose;
- Identificar oportunidades e limitações técnicas, econômicas e estratégicas para a incorporação de resíduos agrícolas como matéria-prima alternativa na indústria de celulose;
- Examinar o papel da inteligência competitiva como ferramenta de apoio à tomada de decisão estratégica na diversificação da base de fibras da indústria florestal;
- Discutir as implicações do uso de resíduos agrícolas para a competitividade, sustentabilidade e resiliência da indústria de celulose no contexto da bioeconomia e da economia circular.

REFERÊNCIAS

- Abd El-Sayed, E. S.; El-Sakhawy, M.; El-Sakhawy, M. A. M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp e Paper Research Journal*, v. 35, n. 2, p. 215–230, 2020.
- Afolalu, S. A.; Salawu, E. Y.; Ogedengbe, T. S.; Joseph, O. O.; Okwilagwe, O.; Emetere, M. E.; Yusuf, O. O.; Noiki, A.; Akinlabi, S. Bio-agro waste valorization and its sustainability in the industry: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 1107, p. 012140, 2021.
- Brasil. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Indústria de papel e celulose anuncia investimentos de R\$ 105 bilhões. 1 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/agosto/industria-de-papel-e-celulose-anuncia-investimentos-de-r-105-bilhoes>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- Churam, T.; Usubharatana, P.; Phunggrassami, H. Sustainable production of carboxymethyl cellulose: a biopolymer alternative from sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) leaves. *Sustainability*, v. 16, n. 6, p. 2352, 2024.
- de Assis, A. C. L.; Alves, L. P.; Malheiro, J. P. T.; Barros, A. R. A.; Pinheiro-Santos, E. E.; de Azevedo, E. P.; Alves, H. S.; Oshiro-Junior, J. A.; Damasceno, B. P. G. L. *Opuntia ficus-indica* L. Miller (palma forrageira) as an alternative source of cellulose for production of pharmaceutical dosage forms and biomaterials: extraction and characterization. *Polymers*, v. 11, n. 7, p. 1124, 2019.
- Florêncio, G. W. L.; Martins, F. B.; Fagundes, F. F. A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. *Industrial Crops and Products*, v. 188, p. 115538, 2022.
- González, P.; Vega, M.; Zaror, C. Life cycle inventory of pine and eucalyptus cellulose production in Chile: effect of process modifications. In: Towards life cycle sustainability management. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 259–266, 2011.
- Gschwandtner, C. Outlook on global fiber demand and supply 2030. *Growth*, v. 65, p. 113, 2022.
- Iglesias, A.; Cancela, Á.; Soler Baena, A.; Sánchez, Á. Characterization of cellulose derived from invasive alien species plant waste for application in the papermaking industry: physic-mechanical, optical, and chemical property analysis. *Applied Sciences*, v. 13, n. 20, p. 11568, 2023.
- Koul, B.; Yakoob, M.; Shah, M. P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research*, v. 206, p. 112285, 2022.
- Millati, R.; Cahyono, R. B.; Ariyanto, T.; Azzahrani, I. N.; Putri, R. U.; Taherzadeh, M. J. Agricultural, industrial, municipal, and forest wastes. In: Taherzadeh, M. J.; Bolton, K.; Lagerkvist, A. (ed.). Sustainable resource recovery and zero waste approaches. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, p. 1–22, 2019.

Otieno, J. O.; Okumu, T. N.; Adalla, M.; Ongutu, F.; Oure, B. Agricultural residues as an alternative source of fibre for the production of paper in Kenya-a review. *Asian J. Chem. Sci.*, v. 10, n. 1, p. 22-37, 2021.

Riseh, R. S.; Vazvani, M. G.; Hassanisaadi, M.; Thakur, V. K. Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. *Industrial Crops and Products*, v. 208, p. 117904, 2024.

Timberland Investment Group. Global wood pulp market: structure and dynamics. Disponível em: <https://timberlandinvestmentgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TIG-White-Paper-Global-Wood-Pulp-Market-Structure-and-Dynamics.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Tomé, M.; Almeida, M. H.; Barreiro, S.; Branco, M. R.; Deus, E.; Pinto, G.; Silva, J. S.; Soares, P.; Rodríguez-Soalleiro, R. Opportunities and challenges of Eucalyptus plantations in Europe: the Iberian Peninsula experience. *European Journal of Forest Research*, v. 140, n. 3, p. 489–510, 2021.

Virtuoso, M. C. S.; Souza, J. V. O.; Zanatto, B.; Valente, T. S.; Silva, E. H. C.; de Paula, R. C. Germinative and physiological performance of eucalyptus species under abiotic stress. *Trees, Forests and People*, v. 10, p. 100348, 2022.

Worku, L. A.; Bachheti, A.; Bachheti, R. K.; Rodrigues Reis, C. E.; Chandel, A. K. Agricultural residues as raw materials for pulp and paper production: overview and applications on membrane fabrication. *Membranes*, v. 13, n. 2, p. 228, 2023.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fontes convencionais de fibra e o panorama atual indústria de celulose

A indústria de celulose é um dos pilares da economia global e está diretamente associada ao setor florestal, que fornece sua principal matéria-prima: a fibra vegetal. Essa fibra é obtida, majoritariamente, por meio do processamento de madeiras oriundas de florestas plantadas, cujos principais componentes químicos são a celulose, a hemicelulose e a lignina. A celulose, por ser a molécula de maior interesse para a produção de papel e derivados, é o elemento-chave em torno do qual a cadeia produtiva se organiza. As fibras à base de celulose são materiais biodegradáveis e renováveis, que apresentam características como não serem tóxicas, corrosivas ou agressivas ao meio ambiente, além de serem combustíveis. Essas propriedades as tornam adequadas para a produção de diversos compósitos poliméricos (Liu et al., 2021).

Historicamente, as florestas naturais foram a principal fonte de fibras de celulose, mas, devido ao aumento da demanda e preocupações ambientais, a indústria passou a depender quase exclusivamente de florestas plantadas, principalmente de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) em países tropicais como Brasil e Uruguai, e de pinus (*Pinus spp.*) em regiões temperadas como Estados Unidos, Canadá e partes da Europa. O Brasil se destaca como maior produtor mundial de celulose de fibra curta, graças à expertise no cultivo intensivo de eucalipto, que oferece alta produtividade, rotações curtas e fibras adequadas para papéis sanitários e de impressão (Vieira et al., 2021; Medeiros et al., 2020; Gonzalez et al., 2011).

O pinus, por sua vez, possui fibras mais longas, ideais para papéis de maior resistência, como os usados em embalagens (*kraftliner*) (Fall et al., 2014; Andrade et al., 2021). Atualmente, os plantios de eucalipto e pinus são as principais fontes globais de fibra para celulose, com Brasil, Chile, Finlândia e Canadá entre os maiores produtores (Medeiros et al., 2020; González et al., 2011). O eucalipto, por sua vez, se destaca por seu rápido crescimento, alta produtividade por hectare e adaptabilidade a condições tropicais e subtropicais, consolidando-se como base da indústria brasileira de celulose de fibra curta. Já o pinus é valorizado em regiões temperadas por sua versatilidade e qualidade das fibras para diferentes aplicações industriais. Essas espécies são preferidas devido à sua composição química favorável, com alto teor de holocelulose e baixo teor de lignina, o que facilita o processamento industrial e resulta em produtos de alta qualidade (Andrade et al., 2021; Vieira et al., 2021; Medeiros et al., 2020).

As madeiras utilizadas na produção de polpa celulósica dividem-se em duas categorias principais: folhosas, como espécies de eucalipto, que fornecem fibras mais curtas e são preferidas para papéis com boa formação e qualidade de impressão, e coníferas, como o pinus, que apresentam fibras mais longas, conferindo maior resistência, elasticidade e qualidade ao papel, especialmente em aplicações como embalagens. A escolha entre essas matérias-primas envolve fatores como ciclo de crescimento, custo de cultivo, complexidade do processamento e benefícios econômicos, já que madeiras duras tendem a ser mais fáceis de processar, enquanto as macias oferecem maior resistência mecânica ao produto final (Li et al., 2023; Morais et al., 2020; Fišerová et al., 2019).

Fibras não madeira, como as provenientes de resíduos agrícolas ou plantas alternativas, surgem como opções viáveis, especialmente em regiões com restrição de suprimento de madeira, podendo diversificar a matriz de fibras e contribuir para a sustentabilidade do setor. Essas alternativas, no entanto, ainda enfrentam desafios técnicos e de escala industrial, mas apresentam potencial para complementar ou substituir parcialmente as fontes tradicionais de fibra (Fišerová et al., 2019; Buzala et al., 2017).

Apesar da eficiência técnica dos sistemas de plantios florestais, desafios significativos têm surgido nas últimas décadas, principalmente devido à vulnerabilidade das espécies frente às mudanças climáticas. Eventos extremos como secas prolongadas, geadas, incêndios e tempestades estão se tornando mais frequentes e intensos, comprometendo diretamente a produtividade das áreas plantadas e exigindo maiores investimentos em manejo e monitoramento climático. Estudos apontam que, em cenários de aquecimento global, grandes áreas atualmente produtivas podem se tornar inviáveis para o plantio, enquanto outras regiões podem experimentar ganhos ou perdas de produtividade dependendo do balanço entre aumento de CO₂, temperatura e disponibilidade hídrica (Martins et al., 2022; Carrasco et al., 2022; Elli et al., 2020).

A competição pelo uso do solo entre o setor florestal e a agricultura é um desafio crescente, especialmente em regiões de alta fertilidade e produção intensiva. A expansão agrícola frequentemente pressiona áreas destinadas à silvicultura, elevando preços da terra e limitando a expansão de florestas plantadas (Bousfield et al., 2024). Além disso, o ciclo de cultivo do eucalipto, com duração média de sete anos, pode representar uma limitação diante da alta demanda, dificultando a adaptação a choques de mercado e à pressão por aumentos rápidos na produção. O tempo entre plantio e colheita impede respostas rápidas a variações de mercado. Se a demanda aumenta, novas áreas plantadas só estarão prontas para colheita após

vários anos, criando um descompasso entre oferta e demanda (Cavalli et al., 2022; Xu et al., 2020).

Essas limitações estruturais revelam a fragilidade da dependência excessiva de poucas fontes de fibra, baseadas em monoculturas, longos ciclos produtivos e contextos territoriais complexos. Para além das questões econômicas e climáticas, soma-se uma pressão crescente por sustentabilidade, tanto por parte dos consumidores quanto de legislações ambientais. O mercado exige hoje não apenas produtos de qualidade e custo competitivo, mas também origens rastreáveis, pegada ambiental reduzida, economia circular e uso eficiente de recursos naturais.

Neste contexto, cresce o interesse por alternativas às fontes convencionais de fibra, capazes de suprir a demanda global por celulose de forma mais flexível, acessível e alinhada às exigências ambientais. Entre essas alternativas, destacam-se espécies de crescimento rápido como bambu, *Paulownia*, *Corymbia* e até mesmo o cânhamo industrial, além do uso de fibras vegetais não madeireiras e resíduos agrícolas (Seki et al., 2022; Frazier et al., 2024; Kamarian e Song, 2022). Cada uma dessas alternativas apresenta potenciais e desafios específicos, como a falta de dados sobre produtividade industrial, limitações silviculturais e necessidade de adaptação tecnológica nos processos de extração de celulose.

Assim, compreender o estado atual das fontes de fibra é fundamental para justificar a necessidade de inovação na indústria de celulose. Os limites impostos pelas fontes tradicionais abrem espaço para novas estratégias produtivas, mais resilientes e conectadas com os princípios de sustentabilidade e bioeconomia.

Nos últimos anos, a demanda global por celulose tem crescido de forma contínua, impulsionada pelo aumento populacional, pela urbanização e pelo crescimento do consumo médio per capita de produtos à base de fibras celulósicas como papéis higiênicos, embalagens sustentáveis, têxteis e até substitutos de plásticos (Kallio, 2021; Morland e Schier, 2020). Esse cenário ampliou a pressão sobre a principal matéria-prima do setor: a madeira, que, além de ser a base da produção de celulose, também é usada em diversos outros segmentos da bioeconomia, como biomateriais, energia renovável, construção civil e químicos de base biológica (Maximo et al., 2022; Hassegawa et al., 2022). A competição intersetorial pelo uso da madeira se intensifica, enquanto a oferta de florestas aptas ao corte não cresce na mesma proporção. Sem expansão sustentável da base florestal e diversificação de matérias-primas, há risco de desequilíbrio entre oferta e demanda, com impactos econômicos e ambientais (Kallio, 2021; Hassegawa et al., 2022)

No Brasil, esse risco se torna ainda mais evidente diante da rápida intensificação da capacidade industrial de processamento de celulose, especialmente no estado do Mato Grosso

do Sul. A região tem sido alvo de investimentos bilionários por parte de empresas como Arauco, Suzano e Bracell, que estão expandindo suas plantas industriais ou construindo novas unidades de grande porte (Brasil, 2024). No entanto, caso a base florestal não acompanhe esse crescimento, seja por limitações territoriais, ambientais ou econômicas, pode haver um desequilíbrio crítico entre a capacidade instalada das fábricas e a disponibilidade de madeira para abastecê-las, comprometendo a competitividade e a sustentabilidade da cadeia produtiva.

2.2 Principais fibras alternativas usadas na indústria de celulose

Nas últimas décadas, a indústria de papel e celulose tem enfrentado grandes desafios: a escassez de recursos, os impactos ambientais relacionados à produção e o nível tecnológico dos equipamentos utilizados – entre esses fatores, se destaca a escassez de matérias-primas. Neste contexto, as fibras alternativas oriundas de fontes não convencionais como resíduos agrícolas e espécies não madeireiras, têm despertado crescente interesse por apresentarem características promissoras, que podem melhorar significativamente os produtos finais da indústria de papel (Liu et al., 2018). Assim, é reafirmada a importância do uso de recursos não lenhosos em contribuir para amenizar os possíveis danos frente a escassez de fibras que se prevê para o futuro (Abd El-Sayed et al., 2020).

A produção industrial de celulose permanece majoritariamente baseada em matérias-primas florestais, enquanto as fibras não madeireiras ocupam um nicho reduzido, porém estratégico, estimado em cerca de 5–7% da produção mundial (Hawanis et al., 2024; Quintana e Roncero, 2024). Nesse contexto, as culturas fibrosas não madeireiras compreendem espécies tradicionalmente exploradas por seu elevado teor de fibras, como cânhamo, kenaf, linho, juta, rami e sisal, além de gramíneas e biomassa anual, a exemplo do bambu e das palhas de cereais, cuja participação é mais expressiva em contextos regionais específicos.

China e Índia destacam-se como os principais produtores globais de celulose a partir de fibras não madeira, respondendo conjuntamente por mais de 80% da produção mundial desse tipo de polpa (Jahan et al., 2020). A China se destaca como o principal produtor mundial, com cerca de 5,9 milhões de toneladas, seguida pela Índia, com aproximadamente 3 milhões de toneladas no mesmo período (Šedík et al., 2021). Contudo, nesses países onde há forte tradição em fibras anuais, a participação local de plantas anuais na produção de polpa pode ser bem maior, mas isso não altera substancialmente o quadro global, ainda dominado por madeira (Eugenio et al., 2019).

As fibras vegetais são insubstituíveis como matéria-prima principal na produção de celulose e papel. Embora praticamente todas as plantas possuam fibras, apenas algumas são adequadas para uso produtivo. As matérias-primas ideais devem ser de fácil acesso, abundantes, economicamente viáveis e apresentar fibras com comprimento adequado e baixo teor de impurezas. As espécies florestais mais utilizadas na produção de celulose incluem coníferas (pinus) e folhosas (eucalipto) (Fearon et al., 2020).

A biomassa oriunda de fibras não madeira, como resíduos agrícolas e agroindustriais, desponta como alternativas economicamente viáveis e ambientalmente vantajosas. Estes materiais apresentam, em sua maioria, menor teor de lignina e maior teor de hemicelulose do que a madeira, facilitando os processos de deslignificação das fibras, além de exigirem menor consumo de energia e produtos químicos (Abd El-Sayed et al., 2020). Além disso, esta matéria-prima possui alto potencial para ser convertida em bioenergia, biocombustíveis e biofertilizantes, entre outros produtos de base biológica, por meio de processos de biorrefinaria (Rodias et al., 2020; Gontard et al., 2018; Duque-Acevedo et al., 2023).

Dado o baixo valor econômico das aplicações atuais deste tipo de biomassa lignocelulósica e o alto valor potencial de seus produtos derivados, existe uma oportunidade significativa de transformar esses resíduos em matérias-primas valiosas para a indústria. Assim, à medida que a indústria de celulose se alinha às práticas sustentáveis e aos princípios da economia circular, intensificam-se os investimentos e pesquisas voltados ao aproveitamento de fibras alternativas, com o objetivo de promover um crescimento econômico ambientalmente responsável (Nechyporchuk et al., 2016; Gontard et al., 2018).

Do ponto de vista prático, as fontes não-madeira oferecem uma ampla gama de características fibrosas que podem ser exploradas para o desenvolvimento de novos tipos de papel. Contudo, o aproveitamento industrial dessas fibras enfrenta desafios técnicos e operacionais. Entre os principais obstáculos estão o grande volume e a dificuldade de manuseio desses materiais, sua tendência à deterioração e à coloração durante o armazenamento, o que resulta em menor rendimento de polpa e menor alvura. Além disso, essas fibras geralmente apresentam baixa capacidade de drenagem, ou seja, maior retenção de água durante as etapas de lavagem e formação da folha, o que reduz a eficiência da remoção de água, limita a velocidade das máquinas de papel e compromete a produtividade do processo (Abd El-Sayed et al., 2020).

Nesse sentido, a produção de celulose a partir de fibras não madeira permanece concentrada em poucos países, sendo fortemente influenciada pela disponibilidade local de resíduos agrícolas e por políticas industriais associadas à bioeconomia (Abd El Sayed et al.,

2020). A Tabela 1 apresenta os países líderes em capacidade instalada de polpação de celulose não madeireira (PNM), indicando os volumes de capacidade estimados, sua representatividade percentual e a participação relativa na capacidade global.

Tabela 1 - Países líderes em capacidade de polpação de celulose não-madeireira (PNM) expresso em (mil toneladas métricas), (porcentagem) e capacidade de polpação global (%).

País	Polpação de PNM (mil ton métricas)	Polpação de PNM (%)	Capacidade global de polpação de PNM (%)
China	17672	84,2	70,7
Índia	2001	61,3	8
Paquistão	491	100	1,96
Venezuela	260	65	1,1
Colômbia	252	46,8	1
México	230	24,1	0,92
Tailândia	221	34,2	0,88
Turquia	191	27,4	0,76
Brasil	182	8	0,73
Grécia	160	84,2	0,64
Itália	145	23,6	0,58
Argentina	141	12,8	0,56
Espanha	141	7,2	0,56
Egito	127	100	0,51
África do Sul	113	7	0,45
Cuba	108	100	0,43
Iraque	101	100	0,4
Vietnã	100	40	0,4
Irã	90	25	0,36
Indonésia	86	1,4	0,34
Equador	77	100	0,31
Bangladesh	75	34,3	0,3
Romênia	74	9,3	0,3
República Popular Democrática da Coreia	50	47,2	0,2
Perú	50	100	0,2

Adaptado de Abd El-Sayed et al. (2020).

A produção global de celulose e papel a partir de fibras não madeireiras está concentrada em apenas 25 países. A China lidera esse cenário com ampla vantagem, respondendo por cerca de 71% da capacidade mundial de polpação a partir dessas fontes alternativas. Em seguida, destaca-se a Índia, com aproximadamente 8% de participação. O protagonismo desses países está diretamente relacionado à expressiva produção de grãos como arroz e trigo, cujos resíduos agrícolas apresentam elevado potencial para a fabricação de celulose. O Brasil aparece na nona posição, com capacidade de polpação baseada em fibras não madeira equivalente a 8% da produção nacional, o que representa apenas 0,7% da capacidade global (Abd El-Sayed et al., 2020).

Tabela 2: Coeficientes de geração de resíduo: volume (em toneladas) de resíduos gerado para cada tonelada de cultura agrícola produzida.

Cultura agrícola	Tipo de resíduo	CR (peso resíduo/peso cultura)					Média
Cana de açúcar	Palha	0,24	-	-	-	-	0,24
	Bagaço	0,27	0,26	-	-	-	0,27
	Topo e folhas	-	0,2	0,22	0,1	-	0,17
Milho	Palha	2,5	1,96	-	-	-	2,23
	Espiga	0,6	0,3	1,42	0,7	1,96	1,00
Soja	Palha	1,4	1,53	2,05	2,12	-	1,78
	Vagem	-	1,09	-	-	-	1,09
Trigo	Palha	1,4	1,28	1,42	1,1	1,5	1,34
Maçã	Bagaço	0,25	0,3	-	-	-	0,28
Uva	Cascas e sementes	0,4	-	-	-	-	0,40
Laranja	Cascas	0,5	-	-	-	-	0,50
Algodão	Casca	-	0,26	2,95	-	-	1,61
	Talo	-	3,4	3	-	-	3,20
Arroz	Casca	0,22	0,25	1,49	-	-	0,65
	Palha	1,3	1,33	-	-	-	1,32
Feijão	Palha e vagem	3,67	-	-	-	-	3,67

Fonte: Araújo et al. (2019); Magalhães Jr. et al. (2019); Nones et al. (2017).

O uso de resíduos lignocelulósicos de origem agrícola como matéria-prima para fábricas de celulose apresenta vantagens ambientais, mas também enfrenta desvantagens técnicas e operacionais importantes. Essas desvantagens incluem menor escala de operação, maior volume e umidade dos insumos, desafios no processamento das fibras e complicações na recuperação química dos reagentes. O alto teor de sílica presente em muitas dessas fibras também causa problemas nos sistemas de recuperação química, como a formação de incrustações em evaporadores, caldeiras e equipamentos de soda cáustica (Kaur et al., 2017; Worku et al., 2023).

Outro desafio significativo está relacionado à morfologia e à composição química das plantas de origem não madeireiras, que variam conforme a época de colheita, localização geográfica e características genéticas das espécies, afetando rendimento, qualidade e propriedades da polpa (Worku et al., 2023).

O uso de fibras não madeireiras tem se mostrado uma resposta promissora diante da escassez de recursos florestais e da pressão crescente por sustentabilidade. A fabricação de papel baseada em materiais não madeireiros oferece vantagens como facilidade no processo de polpação, produzir papel branqueado de melhor qualidade e potencial para atender nichos específicos da indústria papeleira (Abd El-Sayed et al., 2020).

Assim, a utilização de fibras alternativas representa uma oportunidade estratégica para promover a economia circular, reduzir impactos ambientais e atender à demanda crescente por papel em um mundo cada vez mais consciente das limitações dos recursos naturais. A produção mundial de polpa celulósica, estimada em cerca de 195 milhões de toneladas métricas em 2023 (UNECE e FAO, 2023), tem projeções de crescimento contínuo, o que reforça a importância estratégica da diversificação das fontes de fibras (Jahan et al., 2020). Assim, os resíduos agrícolas e outras fibras não madeira consolidam-se como elementos de grande potencial para suplementar a indústria papeleira rumo a um modelo mais sustentável, inovador e adaptado às realidades socioambientais do século XXI.

2.3 Características das fibras alternativas – comparação à celulose de *Eucalyptus* e *Pinus*

As fibras alternativas, também denominadas fibras não madeireiras, correspondem a materiais fibrosos de origem vegetal utilizados como matéria-prima para a produção de polpa celulósica e papel a partir de fontes distintas da madeira. Essas fibras podem ser extraídas de plantas de ciclo anual, culturas específicas ou resíduos agrícolas lignocelulósicos e subprodutos agroindustriais, configurando-se como uma alternativa à celulose tradicional proveniente de

espécies florestais como *Eucalyptus* e *Pinus*. Embora ainda representem uma fração reduzida do mercado global, as fibras não madeira contribuem para a diversificação de matérias-primas e para o avanço de estratégias de sustentabilidade e inovação na indústria de celulose e papel (Abd El-Sayed et al., 2020).

Entre as matérias-primas não madeireiras mais utilizadas para a extração de celulose destacam-se as plantas de ciclo anual, historicamente associadas a aplicações regionais e, por vezes, consideradas de qualidade inferior à madeira. No entanto, essas fontes apresentam vantagens relevantes, como rápido crescimento, elevado rendimento anual por área e, em muitos casos, menor teor de lignina, o que facilita os processos de polpação e branqueamento. Além disso, o aproveitamento dessas fibras permite agregar valor a resíduos agrícolas frequentemente subutilizados. Por outro lado, desafios como a sazonalidade da oferta, a necessidade de armazenamento, o elevado teor de cinzas e limitações logísticas ainda restringem seu uso em larga escala (Wang et al., 2021; Yadav et al., 2024).

A crescente pressão sobre os recursos florestais e o aumento da demanda global por produtos celulósicos têm intensificado a busca por fontes alternativas de biomassa para usos tradicionais, como papel, biocombustíveis e insumos químicos de base renovável. Nesse contexto, os resíduos agrícolas lignocelulósicos destacam-se como uma fonte abundante e amplamente disponível, gerada durante as etapas de cultivo, colheita e processamento de alimentos. Estima-se que cerca de 2 bilhões de toneladas de resíduos agroindustriais sejam geradas anualmente no mundo, compostas por diferentes proporções de celulose, hemicelulose, lignina e extractivos, o que evidencia seu elevado potencial como matéria-prima lignocelulósica (Millati et al., 2019; Afolalu et al., 2021; Koul et al., 2022). Apesar de parte desse material ser reaproveitada para fins energéticos ou manutenção da fertilidade do solo, uma parcela significativa ainda é descartada inadequadamente, contribuindo para impactos ambientais como emissões de gases de efeito estufa e degradação do solo (Phiri et al., 2024).

As propriedades de polpação das matérias-primas não madeireiras estão associadas às características morfológicas e químicas das fibras, bem como ao grau de dificuldade envolvido em sua deslignificação e individualização. A avaliação do desempenho dessas fontes na produção de celulose envolve critérios como a viabilidade econômica, a morfologia das fibras, a eficiência na remoção da lignina, a adequação aos métodos de polpação disponíveis e a qualidade da polpa obtida, incluindo aspectos como cor, facilidade de branqueamento, capacidade de drenagem e comportamento durante o refino (Liu et al., 2018).

De modo geral, as fibras não madeira apresentam vantagens relevantes em comparação às fibras madeireiras tradicionais. Por serem provenientes, em sua maioria, de culturas de rápido

crescimento, permitem renovação em curtos intervalos de tempo. Além disso, o menor teor médio de lignina facilita a polpação sob condições mais brandas, com redução de temperatura e menor consumo de reagentes químicos, resultando em menor custo operacional e menor impacto ambiental. Essas fibras também tendem a demandar menor energia no refino, favorecendo a eficiência do processo. (Rousu et al., 2002; Rodríguez et al., 2008).

Do ponto de vista produtivo, a simplicidade relativa dos processos de polpação de fibras não madeira possibilita a implantação de unidades industriais de menor porte, contribuindo para a descentralização da produção e para o aproveitamento regional da biomassa. Ademais, a utilização de resíduos agrícolas e subprodutos de culturas alimentares agrega valor à cadeia produtiva rural, promovendo benefícios socioeconômicos e novas fontes de renda para agricultores (Liu et al., 2018).

Apesar dessas vantagens, a madeira continua sendo a principal matéria-prima da indústria de celulose e papel, em razão de sua ampla disponibilidade ao longo do ano, maior uniformidade das fibras, bom rendimento na polpação e relação favorável entre fibras úteis e células indesejáveis. Espécies como *Eucalyptus* e *Pinus* destacam-se por apresentarem propriedades adequadas à produção de polpas de alta qualidade, consolidando sua predominância no setor (Fearon et al., 2020; Gao et al., 2021).

Ainda assim, diante das limitações associadas à expansão florestal e das crescentes exigências por sustentabilidade, a exploração de fibras alternativas tem ganhado relevância. Resíduos agrícolas e culturas fibrosas como palha de trigo, palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, bambu, cânhamo e sisal apresentam, em muitos casos, propriedades físico-químicas compatíveis com as da madeira, como elevado teor de celulose e menor conteúdo de lignina, além de alta disponibilidade anual (Li et al., 2018).

Embora atualmente representem menos de 3% da produção global de polpa, essas fibras desempenham papel estratégico em países como China e Índia, onde a elevada oferta de resíduos agrícolas e restrições históricas ao uso de madeira favoreceram seu desenvolvimento (Abd El-Sayed et al., 2020). Nesse sentido, as fibras alternativas configuram-se como potencial alternativo ambientalmente promissor para a diversificação das fontes de matéria-prima da indústria celulósica no século XXI.

2.4 Métodos de extração de celulose a partir de resíduos agrícolas

A crescente demanda por celulose e a escassez de recursos florestais renováveis têm incentivado a exploração de fontes alternativas de fibras, especialmente os resíduos agrícolas.

Estes materiais, ricos em materiais lignocelulósicos, são gerados em larga escala pela agricultura mundial e muitas vezes descartados de forma inadequada. A utilização desses materiais para extração de celulose representa uma estratégia promissora dentro dos princípios da bioeconomia e da economia circular. No entanto, a natureza heterogênea e a composição química variável dos resíduos agrícolas impõem desafios tecnológicos específicos, exigindo processos de extração adaptados a cada tipo de biomassa (Fahmy et al., 2017; Worku et al., 2023).

2.5 Composição e características dos resíduos agrícolas

A matriz lignocelulósica presente nos resíduos agrícolas é constituída, em sua maioria, por celulose (35-50%), hemicelulose (20-35%) e lignina (10-30%), além de extractivos, cinzas e sílica, cujas proporções variam entre as espécies e entre partes da planta. Por exemplo, a palha de arroz possui alto teor de sílica (no geral, até 16,7%), enquanto o bagaço de cana apresenta elevada proporção de parênquima (Fahmy et al., 2017). Essa heterogeneidade impõe desafios operacionais, sobretudo em termos de eficiência de polpação, uniformidade da polpa e recuperação de químicos no processo industrial.

A estrutura física também influencia a capacidade de polpação dos materiais. Resíduos com estrutura aberta, como palhas e bagaço, são mais acessíveis à penetração dos reagentes químicos. Já materiais mais lenhosos, como os talos de algodão, demandam tratamentos mais intensivos para liberação das fibras (Worku et al., 2023).

Além disso, as fibras curtas provenientes de plantas não madeireiras apresentam excelente capacidade de formação e propriedades de resistência satisfatórias. No entanto, possuem baixa resistência úmida, o que torna necessário adicionar certa quantidade de polpa de madeira para melhorar a processabilidade durante a produção (Abd El-Sayed et al., 2020).

2.5.1 Características químicas

A constituição química dos resíduos agrícolas é representada majoritariamente por carboidratos estruturais (celulose e hemicelulose) e compostos fenólicos (lignina). A celulose possui estrutura linear e altamente cristalina, conferindo resistência mecânica às fibras. A hemicelulose apresenta estrutura amorfa e heterogênea, e é composta por diferentes monossacarídeos, como xilose, manose, arabinose e galactose, os quais conferem flexibilidade às paredes celulares vegetais. A lignina, por sua vez, é um polímero tridimensional de unidades

fenilpropanóides (principalmente, derivados dos álcoois coniferílico, sinapílico e p-cumarílico), que age como agente cimentante entre as fibras, dificultando sua separação mecânica ou química (Li et al., 2023).

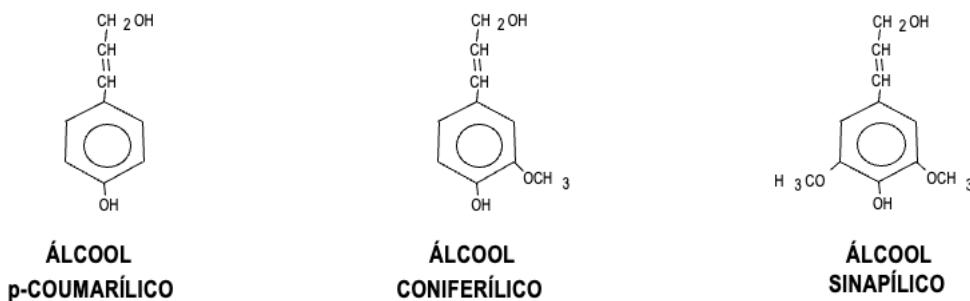


Figura 1 – Estruturas químicas dos principais monolignóis precursores da lignina.

Um dos principais desafios da polpação de materiais não madeireiros é o alto teor de sílica, que compromete o sistema de recuperação química. Enquanto o teor de cinzas em plantas não madeireiras varia de 1% a 20%, em madeiras duras e macias é geralmente inferior a 1%, o que evita esse tipo de problema no processamento da madeira (Fengel e Wegener, 1989).

A estrutura química tanto da madeira quanto dos materiais não madeireiros é composta, majoritariamente, por três componentes: celulose, hemicelulose e lignina. Embora a concentração desses componentes varie entre as espécies, a proporção média é de aproximadamente 50% de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina (Casey, 1980). No entanto, a composição química das fibras vegetais não madeireiras pode variar significativamente, a depender do tipo de planta, do solo e das condições de cultivo.

De modo geral, essas fibras apresentam menor teor de lignina e maior teor de pentosanas (hemiceluloses) em comparação à madeira. As fibras provenientes de caules (como bagaço de cana, palhas e talos) possuem propriedades químicas mais próximas das madeiras duras (folhosas) do que das madeiras macias (coníferas) (Hawanis et al., 2024). A principal diferença, porém, está no maior teor de cinzas e sílica presente nas fibras não madeireiras (Abd El-Sayed et al., 2020). Dados sobre a composição lignocelulósica dos principais resíduos agrícolas serão apresentados à frente.

A análise da Tabela 3 evidencia diferenças significativas na constituição lignocelulósica dos principais resíduos agrícolas, as quais têm implicações diretas sobre sua recalcitrância e sobre a escolha de rotas tecnológicas para o aproveitamento industrial (Zhang et al., 2019; Beig et al, 2020). Resíduos com maiores teores de celulose apresentam, em princípio, maior potencial para a produção de materiais celulósicos, enquanto variações no conteúdo de hemicelulose e,

sobretudo, de lignina influenciam a eficiência dos processos de pré-tratamento e deslignificação (Díez et al., 2020; Pisano et al., 2021) discutidos ao longo deste capítulo.

Biomassas com maior fração lignínica tendem a demandar pré-tratamentos mais intensivos, o que pode elevar custos operacionais e impactos ambientais, ao passo que resíduos com menor teor de lignina apresentam maior suscetibilidade à digestão química e enzimática (Huang et al., 2022). Assim, os dados apresentados na Tabela 3 reforçam que a viabilidade do uso de fibras não madeireiras não depende exclusivamente da disponibilidade do resíduo, mas de um conjunto integrado de características químicas, tecnológicas e operacionais, em consonância com as limitações logísticas e ambientais previamente discutidas.

Estudos de diferentes resíduos mostram grande variação em açúcares estruturais (26–67% de massa seca) e em hemicelulose/lignina, o que define quais tecnologias são tecnicamente e economicamente adequadas para cada biomassa (Díez et al., 2020; Pisano et al., 2021). Assim, a viabilidade de fibras não madeira depende de um conjunto integrado de composição química, arquitetura de parede, resposta a pré-tratamentos, logística e impactos ambientais, não apenas de volume disponível (Beig et al., 2020; Pisano et al., 2021).

Tabela 3: Constituição lignocelulósica (celulose, hemicelulose, lignina, extractivos e cinzas) dos principais tipos de resíduo de acordo com cultura agrícola expressos em porcentagem (%).

Cultura agrícola	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Extractivos (%)	Cinzas (%)	Fonte
Bagaço de cana	42,19	27,6	21,56	5,63	2,84	de Moraes Rocha et al., 2015
Bagaço de cana	55,6-57,4	23,90-24,50	24,35-26,30	-	-	Jayaprakash et al., 2022
Bagaço de cana	42,2	27,6	21,6	5,6	2,8	de Moraes Rocha et al., 2015
Bagaço de cana	43,1	27,1	21,3	2,1	1,5	Area et al., 2019
Bagaço de cana	37,7	29,4	32,9	-	-	Larraondo, 1995
Bagaço de cana	53,2	14,6	32,2	-	12,3	Marrugo et al., 2016
Bagaço de cana	42,34	28,6	21,7	-	-	Salehi et al., 2014; Abd El-Sayed, 2020;
Bagaço de cana	43,1	22,82	24,09	-	-	Araújo et al., 2019
Bagaço de cana	32-44	-	19-24	-	1,5-5	Sridach, 2010
Bagaço de cana	30,2	56,7	13,4	-	1,9	El-Tayeb, 2012
Bagaço de maçã	7,2	-	23,5	-	-	Araújo et al., 2019
Bagaço de uva	15,3	5	38	-	8,8	Rodriguez et al., 2018
Bagaço de uva	27,9	9,1	63	-	-	Araújo et al., 2019
Casca de algodão	44,35	11,2	16,15	-	-	Araújo et al., 2019
Casca de arroz	36,2	19,8	23,9	2,32	12,5	Rambo et al., 2015
Casca de arroz	34,1	15,8	19	8,2	15	Dagnino et al., 2013
Casca de arroz	35	33	23	-	-	Araújo et al., 2019
Casca de soja	35	22,8	7,6	6,8	1,1	Rambo et al., 2015
Caule do milho	36-38	10-30	4-11	-	-	Sambusti, 2013
Caule do milho	38,33-40,31	25,21-32,22	7,32-21,45	-	-	Jayaprakash et al., 2022
Caule do milho	69,92	-	18,16	-	10,97	Worku et al., 2023
Caule do milho	82,1	-	7,3	-	24,9	Worku et al., 2023
Caule do milho	61,2	19,3	6,9	-	10,8	El-Tayeb, 2012
Espiga de milho	31,2-45	35-43,1	15-16,5	-	-	Araújo et al., 2019
Fruto do óleo de palma	40-50	20-30	20-30	-	-	Araújo et al., 2019
Hardwood	43-47	25-35	16-24	-	-	Li et al., 2023
Palha de milho	40,8	34	22	3,2	-	Chacker et al., 2014

Continua ...

Tabela 3: Constituição lignocelulósica (celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas) dos principais tipos de resíduo de acordo com cultura agrícola expressos em porcentagem (%).

Cultura agrícola	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Extrativos (%)	Cinzas (%)	Fonte
Palha de arroz	27-44	14-34	13-26	-	-	Sambusti, 2013
Palha de arroz	28,42-48,33	23,22-28,45	12,65-16,72	-	-	Jayaprakash et al., 2022
Palha de arroz	41,2	19,5	21,9	-	-	Abd El-Sayed et al., 2020
Palha de arroz	39,5-41	24,4-31	15,9-24	-	-	Araújo et al., 2019
Palha de arroz	60,7	-	12,16	-	15-20	Worku et al., 2023
Palha de arroz	41	31	24	4	-	Chacker et al., 2014
Palha de arroz	28-36	-	12-16	-	15-20	Sridach, 2010;
Palha de milho	37-39	23-31	14-18	-	-	Lee, 1997; Sills e Gossett, 2012; Saha et al., 2013
Palha de milho	40,8	34	22	-	-	Araújo et al., 2019
Palha de soja	35,3	16,9	21,7	5,8	10,6	Cabrera et al., 2015
Palha de soja	44-83	24,3 ± 3	5-14	-	-	Araújo et al., 2019
Palha de soja	44,2	5,9	19,2	-	-	Gonzalez et al., 2023
Palha de soja	42,39	22,05	18,93	-	4,43	Gonzalez et al., 2023
Palha de soja	37,83	18,77	19,73	-	-	Gonzalez et al., 2023
Palha de soja	37,3	25,53	34,29	-	-	Gonzalez et al., 2023
Palha de trigo	27-42	11-27	14-21	-	-	Sambusti, 2013
Palha de trigo	48,8	51,2	-	-	10,6	Fermanelli et al., 2020
Palha de trigo	39,7	30,6	17,7	-	7,7	Espinosa et al., 2017
Palha de trigo	38,2	36,3	15	-	-	Abd El-Sayed et al., 2020
Palha de trigo	30-40,8	38,32-50	15-22,45	-	-	Araújo et al., 2019
Palha de trigo	69,84	-	22,33	-	11,63	Worku et al., 2023
Palha de trigo	35-40	30-35	10-15	-	-	Tufail et al., 2020
Palha de trigo	29-35	-	16-21	-	4-9	Sridach, 2010
Sugar beet waste	26,3	18,5	2,5	-	3,8	El-Tayeb, 2012
Talo de algodão	40,4	-	20,9	-	-	Araújo et al., 2019
Talo de algodão	62,79	-	23,79	-	4,99	Worku et al., 2023
Talo de uva	16	5,8	30,8	-	10,2	Rodriguez et al., 2018
Topo e folhas da cana	39,8	28,6	22,5	-	-	Araújo et al., 2019

2.5.2 Características morfológicas

As fibras não madeira apresentam elevada diversidade morfológica e anatômica, refletindo a ampla gama de espécies vegetais e resíduos agrícolas dos quais se originam. Diferentemente das fibras de madeira, que apresentam organização estrutural relativamente homogênea dentro de cada grupo botânico, as fibras alternativas incluem materiais provenientes de plantas anuais, culturas fibrosas e subprodutos agroindustriais, resultando em grande variabilidade de comprimento, diâmetro, espessura da parede celular e razão comprimento/diâmetro (Abd El-Sayed et al., 2020; Ferdous et al., 2021). Essas características morfológicas influenciam diretamente o comportamento das fibras ao longo das etapas de polpação, refino, formação da folha e nas propriedades físico-mecânicas do papel. A Tabela 4 apresenta valores típicos dessas propriedades morfológicas para diferentes matérias-primas não madeireiras, evidenciando a amplitude dimensional observada entre resíduos agrícolas e culturas fibrosas.

Do ponto de vista anatômico, os resíduos agrícolas diferem significativamente da madeira. Enquanto a madeira é composta majoritariamente por células condutoras longas e bem organizadas, como traqueídes e fibras lenhosas, os resíduos agrícolas lignocelulósicos apresentam uma estrutura mais heterogênea, caracterizada pela presença de fibras curtas, células parenquimáticas, vasos dispersos, fragmentos epidérmicos, tricomas e camadas de cutícula cerosa (Fahmy et al., 2017; Abd El-Sayed et al., 2020). Essa heterogeneidade estrutural tende a comprometer a formação de ligações interfibrilares eficientes, resultando em polpas com menor resistência mecânica quando comparadas às polpas de madeira.

Em resíduos agrícolas predominam fibras de pequeno comprimento com diâmetros reduzidos, lúmen estreito e paredes celulares delgadas (Fahmy et al., 2017; Ferdous et al., 2021), conforme ilustrado na Tabela 4. Essas características favorecem a nível de colapsamento das fibras e a formação da folha, porém limitam o desenvolvimento de ligações entre microfibrilas de celulose, refletindo-se em menores valores de resistência à tração e ao rasgo do papel. Além disso, a elevada proporção de células parenquimáticas nesses resíduos pode aumentar a retenção de água e dificultar a drenagem durante a formação da folha (Abd El-Sayed et al., 2020).

A presença significativa de células de paredes finas, como o parênquima observado no bagaço de cana-de-açúcar e em talos de milho, também impacta a integridade mecânica do papel produzido. Essas células são facilmente colapsáveis e contribuem pouco para o reforço estrutural da rede fibrosa, além de favorecerem a geração de finos durante o refino (Fahmy et

al., 2017). Em contrapartida, resíduos como sabugo de milho, talos de algodão e o próprio bagaço de cana apresentam uma fração relativamente maior de fibras verdadeiras, com morfologia mais próxima à das fibras lenhosas, o que lhes confere melhor desempenho na polpação e maior potencial como substitutos parciais das polpas de madeira dura (Tsalagkas et al., 2021).

Por outro lado, culturas fibrosas específicas, como cânhamo, kenaf, sisal e linho, distinguem-se pela presença de fibras longas, com comprimentos que podem superar aqueles observados em madeiras de coníferas, como apresentado na Tabela 4. Essas fibras apresentam elevada razão comprimento/diâmetro e paredes celulares mais espessas, resultando em maior rigidez e capacidade de reforço mecânico da folha de papel, especialmente no que se refere à resistência ao rasgo e à tração (Abd El-Sayed et al., 2020; Ferdous et al., 2021). Tais características tornam essas matérias-primas particularmente atrativas para aplicações especiais e produtos de maior valor agregado, embora seu uso em larga escala ainda seja limitado por questões de disponibilidade, custo e adaptação aos processos industriais convencionais.

De forma integrada, a variabilidade morfológica e anatômica das fibras não madeireiras representa simultaneamente um desafio tecnológico e uma oportunidade estratégica para a indústria de celulose e papel. Embora a heterogeneidade estrutural exija ajustes nos processos de polpação, refino e formação da folha, essas fibras possibilitam a produção de materiais com propriedades específicas, complementando ou substituindo, em determinados contextos, as fibras de madeira tradicionais (Abd El-Sayed et al., 2020; Ferdous et al., 2021). Assim, o conhecimento aprofundado das características morfológicas e anatômicas das fibras alternativas é fundamental compor a análise da viabilidade técnica, otimizar rotas de processamento e ampliar seu uso em estratégias de diversificação de matérias-primas e sustentabilidade do setor celulósico.

Tabela 4: Valores de comprimento (cm), diâmetro (μm) e espessura da parede (μm) das fibras não madeireiras compilados a partir de diferentes estudos da literatura, podendo variar em função da espécie, condições de cultivo, maturidade da planta e método de polpação.

Fibra não-madeira	Comprimento da fibra (mm)	Diâmetro da fibra (μm)	Espessura da parede (μm)	Fonte
Palha de trigo	0,7 – 1,1	10 – 18	3 – 5	Ferdous et al. (2021); Fahmy et al. (2017)
Palha de arroz	0,6 – 1,0	8 – 16	2 – 4	Ferdous et al. (2021); Abd El-Sayed et al. (2020)
Bagaço de cana-de-açúcar	1,0 – 1,7	18 – 25	4 – 6	Tsalagkas et al. (2021); Abd El-Sayed et al. (2020)
Palha de milho	0,8 – 1,2	12 – 20	3 – 5	Ferdous et al. (2021); Fahmy et al. (2017)
Bambu	1,5 – 3,0	15 – 25	4 – 8	Abd El-Sayed et al. (2020); Liu et al. (2018)
Kenaf	2,0 – 6,0	20 – 30	5 – 10	Ferdous et al. (2021); Liu et al. (2018)
Cânhamo	5,0 – 25	20 – 40	5 – 10	Ferdous et al. (2021); Abd El-Sayed et al. (2020)
Sisal	2,5 – 4,0	20 – 30	6 – 10	Ferdous et al. (2021); Liu et al. (2018)

2.5.3 Características físicas

Fisicamente, os resíduos agrícolas são caracterizados por baixa densidade aparente (entre 90 e 180 kg/m^3), alta porosidade, elevada área superficial por volume e teor de umidade considerável quando frescos (Abd El-Sayed et al., 2020). Essas propriedades influenciam negativamente aspectos logísticos, como o transporte e o armazenamento, além de impactarem a impregnação com reagentes químicos durante o cozimento e a remoção térmica da umidade nos processos industriais (Fahmy et al., 2017).

Nesse contexto, a baixa densidade, comparada à da madeira ($400\text{--}600 \text{ kg m}^{-3}$), implica maior volume para transporte da mesma massa seca, demandando mais energia por tonelada útil de material processado. Além disso, resíduos como palha de arroz e trigo possuem alta proporção de células não-fibrosas (células parenquimáticas, epidérmicas, vasos condutores, tricomas, etc) e conteúdo significativo de sílica, o que dificulta a drenagem da polpa e prejudica o desempenho em máquinas papeleiras (Abd El-Sayed et al., 2020; Tsalagkas et al., 2021). Essas características influenciam diretamente a logística de transporte, a eficiência da impregnação por reagentes químicos e a taxa de remoção térmica da umidade nos secadores industriais.

A distribuição do tamanho das partículas dos resíduos influencia diretamente a eficiência dos processos de Trituração e cozimento. Partículas muito finas podem causar problemas como entupimentos nos equipamentos e favorecer a formação excessiva ou

condensação da lignina (sobre delignificação), o que dificulta a remoção desse componente e compromete a qualidade do processo. Por outro lado, partículas muito grossas podem resultar em um cozimento desigual, prejudicando a uniformidade e eficiência do tratamento. Além disso, a presença de sílica, especialmente em resíduos como palha de arroz e trigo, aumenta a abrasividade do material, acelerando o desgaste dos equipamentos industriais e elevando os custos de manutenção (Orellana et al., 2020; Li et al., 2023).

As características que compõem os resíduos agrícolas, quando analisadas em conjunto, determinam o desempenho do resíduo ao longo das etapas de preparo, polpação e branqueamento. Por isso, a compreensão integrada das propriedades químicas, físicas e morfoanatômicas é essencial para otimizar a escolha da matéria-prima e do processo mais adequado.

2.6 Pré-tratamento dos resíduos agrícolas

Antes da polpação propriamente dita, os resíduos precisam passar por etapas de preparação que incluem limpeza, corte e remoção de impurezas. O objetivo do pré-tratamento é romper a estrutura recalcitrante da biomassa, tornando a celulose e a hemicelulose mais acessíveis para enzimas ou microrganismos durante processos de conversão, como a produção de açúcares, biocombustíveis e outros bioproductos. Diversos métodos de pré-tratamento são utilizados, incluindo abordagens físicas (moagem, extrusão), químicas (alcalinas, ácidas), físico-químicas (explosão a vapor, água quente) e biológicas (enzimas, fungos), cada uma com vantagens e limitações específicas. A escolha do método depende do tipo de biomassa e do produto desejado, mas todos visam aumentar a porosidade, remover lignina e/ou hemicelulose e facilitar a ação enzimática ou microbiana (Bhatia et al., 2020; Mankar et al., 2021; Chen et al., 2024).

O principal objetivo do pré-tratamento de resíduos agrícolas e outras biomassas lignocelulósicas é, nestes casos, reduzir o consumo de energia e reduzir custos, por consequência. O pré-tratamento assegura a preservação do açúcar formado, protegendo-o contra a degradação e reduzindo a geração de compostos inibitórios.

2.7 Polpação

Polpação é o conjunto de operações que tem como objetivo liberar as fibras de celulose presentes nas paredes celulares vegetais, promovendo a desagregação da matriz lignocelulósica

que as mantém coesas. Isso é realizado por métodos físicos (mecânicos), químicos, físico-químicos ou biológicos, dependendo do tipo de biomassa e das propriedades desejadas da polpa final (Li et al., 2023; Worku et al., 2023). Na prática, a polpação envolve: remoção da lignina, que atua como agente aglutinante entre as fibras; preservação ou modificação da hemicelulose, à depender do método; liberação das fibras de celulose, que serão transformadas em papel ou em outros produtos celulósicos.

A polpação é o processo de separação das fibras celulósicas presentes na parede celular das plantas lignocelulósicas, como madeira e resíduos agrícolas, com o objetivo de produzir polpa, ou seja, matéria-prima para papéis, embalagens e bioproductos (Biermann, 1996). Cada método de polpação (como soda, kraft, organossolv, termomecânica ou biológica) altera as fibras de maneira distinta, influenciando as propriedades finais da polpa quanto à resistência, cor, pureza e rendimento (Li et al., 2023).

Sistemas químicos e bioquímicos removem de forma eficiente a lignina e a hemicelulose da categoria de resíduo palha, de modo geral. No entanto, esses métodos apresentam algumas limitações, como a necessidade de altas temperaturas de reação, elevada poluição por solventes e a impossibilidade de reutilização das soluções empregadas. Por isso, são necessários estudos adicionais sobre a extração da celulose, com foco no desenvolvimento de sistemas de baixo custo que promovam a proteção ambiental e permitam a reciclagem dos solventes utilizados (Byung-Hwan et al., 2003; Gírio et al., 2010; Wang et al., 2013).

2.7.1 Propriedades de polpação de matérias-primas não madeireiras

As propriedades de polpação referem-se às características do material durante o processo de produção de polpa, como a estrutura das fibras e a facilidade de deslignificação. A avaliação inclui fatores como viabilidade econômica das fibras, dificuldade de separação das fibras, adaptabilidade aos métodos de polpação, cor, capacidade de branqueamento, drenagem e desempenho no refino (Liu et al., 2018).

As fibras não madeireiras apresentam vantagens como: crescimento rápido anual, menor teor de lignina, menor consumo de energia e produtos químicos, possibilidade de operação em pequenas fábricas com processos simplificados, facilidade no refino das fibras e geração de renda adicional ao setor agrícola por meio do aproveitamento de resíduos de culturas alimentares (Rousu et al., 2002; Rodríguez et al., 2008).

Uma grande fração da constituição dos resíduos agrícolas é celulose. No entanto, a hemicelulose e a lignina são fatores que dificultam a extração de celulose. A presença desses

componentes reduz a eficiência e a eficácia da celulose extraída. Portanto, outros métodos devem ser utilizados para remover produtos secundários dos resíduos agrícolas (Riseh et al., 2024). A seguir são apresentados alguns métodos de extração de celulose e as vantagens e desvantagens de cada método.

Alguns resíduos agrícolas apresentam difícil decomposição devido à sua estrutura físico-química complexa. Para superar essa barreira, a biomassa é submetida a processos de pré-tratamento, que modificam seus constituintes (celulose, hemicelulose e lignina) e aumentam a eficiência de conversão e extração.

2.8 Inteligência competitiva na indústria florestal

A inteligência competitiva (IC) é considerada uma ferramenta estratégica para organizações que buscam liderar no mercado a partir de inovação (Fernandes, 2012; Domenes e Urdan, 2019). Por definição, a IC é o processo sistemático de coleta, análise e disseminação de informações sobre o ambiente externo de uma organização, com o objetivo de apoiar a tomada de decisões estratégicas e garantir vantagem competitiva. Esse conceito abrange o monitoramento de concorrentes, tendências de mercado, avanços tecnológicos e fatores políticos ou econômicos que possam impactar o negócio. Nos últimos anos, a inteligência competitiva evoluiu para incorporar ferramentas digitais, análise de big data e inteligência artificial, permitindo análises em tempo real e previsões mais precisas sobre movimentos do mercado e dos concorrentes (Calof, 2008; Cekuls, 2024). A prática vai além da simples coleta de dados pois envolve o planejamento, análise estratégica e comunicação eficaz dos *insights* obtidos. Sua aplicação é fundamental para identificar oportunidades, antecipar riscos e sustentar o crescimento organizacional em ambientes de negócios cada vez mais dinâmicos e complexos (Rouach e Santi, 2001; Madureira et al., 2023).

As principais ferramentas utilizadas em inteligência competitiva (IC) incluem análise SWOT, benchmarking, monitoramento de concorrentes e mineração de dados, além de métodos mais avançados como mineração de textos, mineração web e ferramentas de visualização de informações (Bose, 2008; Calof, 2017, 2020; Stetsenko et al., 2021). Ferramentas digitais como Google Analytics, Similarweb, Alexa e sistemas automatizados de coleta e análise de dados também são amplamente empregadas para monitorar tendências de mercado e comportamento dos concorrentes (Sadeghiani et al., 2022). O uso de inteligência artificial e algoritmos de aprendizado de máquina tem crescido, permitindo análises preditivas e automação de processos de coleta e interpretação de dados (Rubinger et al., 2022). Além disso, a análise de opiniões de

clientes em redes sociais e reviews online tornou-se uma fonte valiosa para extrair insights comparativos sobre produtos e serviços. Outras práticas comuns incluem análise da cadeia de valor, segmentação de mercado, análise de mídias sociais e avaliação de riscos tecnológicos, econômicos e políticos. Essas ferramentas, quando integradas, oferecem uma visão abrangente do ambiente competitivo e apoiam decisões estratégicas mais assertivas (Bose, 2008; Stetsenko et al., 2021).

O setor florestal brasileiro destaca-se mundialmente na produção e exportação de celulose, o que reforça a necessidade de práticas sustentáveis e inovadoras para enfrentar desafios como oscilações de mercado, exigências ambientais e a crescente demanda por produtos de baixo carbono (Silva e Souza Maciel, 2022). A competitividade do Brasil nesse setor é sustentada por vantagens comparativas, especialmente na exportação de celulose, onde o país apresenta desempenho forte e consistente no comércio internacional (Santos et al., 2022). Investimentos em melhoramento genético de espécies florestais, como eucalipto e pinus, têm elevado a produtividade, a qualidade da madeira e a adaptação às condições locais, fortalecendo ainda mais a posição do país (Assis e Resende, 2011).

A diversificação de produtos, com o desenvolvimento de bioproductos inovadores como nanocelulose, fibras têxteis de madeira e derivados de lignina, amplia as oportunidades e diferencia o setor brasileiro no cenário global (Maximo et al., 2022). Práticas de economia circular, como o aproveitamento de resíduos para geração de energia e a redução do uso de recursos virgens, também contribuem para a sustentabilidade e eficiência das operações (Silva et al., 2020). A produtividade e a flexibilidade de investimentos, aliadas à adoção de tecnologias e à integração com biorefinarias, garantem a competitividade internacional das empresas exportadoras (Kerr, 2015). Dessa forma, a consolidação de vantagens competitivas passa pela inovação, sustentabilidade e capacidade de adaptação às demandas globais, assegurando o crescimento e a liderança do Brasil no setor florestal.

A inteligência competitiva desempenha um papel estratégico no setor florestal ao promover o aprendizado organizacional, fortalecer a resiliência das empresas e antecipar tendências, especialmente no contexto da transição para uma economia de baixo carbono (Zeng e Jiang, 2023; Wang, 2025). Essa abordagem contribui para a gestão eficiente dos recursos naturais e estimula a inovação em produtos de base florestal, otimizando operações e garantindo a sustentabilidade de longo prazo do setor (SCIP, 2024). No Brasil, a indústria de celulose tem se destacado em desempenho ESG (ambiental, social e de governança), impulsionada pela adoção de boas práticas ambientais e certificações reconhecidas internacionalmente, o que

reforça sua competitividade em mercados cada vez mais orientados por critérios ESG (KPMG ESG Yearbook, 2023; Zeng e Jiang, 2023; Wang, 2025)

O uso da IC como instrumento de apoio aos processos estratégicos ainda é relativamente recente entre as empresas brasileiras (Domenes e Urdan, 2019). No caso específico da indústria de base florestal, observa-se que a aplicação e o estudo da IC permanecem praticamente ausentes (Santos et al., 2022). As razões para a ausência de estruturas de IC nesse setor não foram amplamente abordadas na literatura, mas podem estar relacionadas a fatores como uma cultura organizacional conservadora, a falta de consciência sobre os benefícios da IC, a percepção de um ambiente com baixa competitividade, além de restrições de recursos e escassez de expertise para sua implementação eficaz (Santos et al., 2022). Apesar desses desafios, o setor florestal apresenta condições favoráveis para a adoção de práticas de IC, com potencial para fortalecer sua competitividade, promover a sustentabilidade e aumentar a capacidade de adaptação frente às mudanças do mercado e do contexto externo.

O ciclo da IC oferece ferramentas que aprimoram o desempenho interno das organizações e facilitam decisões estratégicas ao transformar informações em insights acionáveis, essenciais para navegar em ambientes de negócios complexos e dinâmicos (Štefániková e Masárová, 2014; Cekuls, 2024). A adoção contínua da IC permite antecipar movimentos de concorrentes, identificar oportunidades e riscos, apoiar o desenvolvimento de novos negócios e revisar constantemente abordagens estratégicas, promovendo a sustentabilidade e a vantagem competitiva de longo prazo (Olszac et al., 2023; Afanasyeva et al., 2024). Entre os principais benefícios estão a melhoria da qualidade das informações, decisões mais rápidas e fundamentadas, identificação ágil de ameaças e oportunidades, e maior eficiência organizacional (Olszac et al., 2023). A integração da IC aos sistemas de informação executiva potencializa o desempenho organizacional, influenciando positivamente o comportamento decisório de líderes e equipes (Yin, 2018). Além disso, a IC contribui para a inovação, o monitoramento do ambiente externo, a compreensão das preferências dos clientes e a adaptação a mudanças de mercado. Dessa forma, a IC se consolida como um instrumento estratégico indispensável para organizações que buscam crescimento sustentável e resiliência em mercados competitivos (Olszac et al., 2023; Cekuls, 2024).

A IC tem grande potencial na indústria florestal, especialmente como ferramenta para antecipar cenários de escassez e orientar estratégias mais sustentáveis e adaptativas. A IC permite o monitoramento contínuo de tendências de demanda por produtos florestais, preços de mercado, comportamento dos consumidores e mudanças em regulamentações governamentais, fatores essenciais para a tomada de decisões estratégicas e para a identificação de oportunidades

e ameaças no setor. Além disso, a análise sistemática das estratégias, produtos e práticas operacionais dos concorrentes possibilita ajustes rápidos e fundamentados, promovendo maior resiliência e inovação nas empresas florestais (Korhonen et al., 2018; Kolev et al., 2022; Medvedev et al., 2024). No âmbito da gestão de recursos naturais, a análise de dados facilita o manejo florestal, a mitigação de impactos ambientais e a maximização da sustentabilidade, apoiando também a identificação de riscos operacionais, ambientais, legais e de mercado (Santos et al., 2022; SCIP, 2024).

Como suporte à tomada de decisão estratégica, a IC favorece a formulação de estratégias de longo prazo, a expansão para novos mercados, o investimento em tecnologias emergentes e a gestão de crises. Nesse contexto, destaca-se o uso de resíduos agrícolas como alternativa estratégica para a produção de celulose, diversificando as fontes de matéria-prima, reduzindo a pressão sobre florestas plantadas e agregando valor a subprodutos agroindustriais.

Por meio do monitoramento contínuo de tendências de mercado, regulamentações ambientais, dinâmica do uso da terra e estratégias de concorrentes, a IC permite identificar pressões sobre a oferta de madeira e orientar decisões mais proativas e adaptativas. No setor florestal, essa abordagem subsidia o planejamento do suprimento ao integrar informações sobre produtividade, disponibilidade regional de biomassa, custos logísticos e riscos climáticos, ampliando a resiliência da cadeia produtiva.

REFERÊNCIAS

- Abd El-Sayed, E. S.; El-Sakhawy, M.; El-Sakhawy, M. A.-M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp e Paper Research Journal*, v. 35, n. 2, p. 215–230, 2020.
- Andrade, A.; Henríquez-Gallegos, S.; Albornoz-Palma, G.; Pereira, M. Effect of the chemical and structural characteristics of pulps of Eucalyptus and Pinus on the deconstruction of the cell wall during the production of cellulose nanofibrils. *Cellulose*, v. 28, p. 5387–5399, 2021.
- Araújo, D. J. C.; Machado, A. V.; Vilarinho, M. C. L. G. Availability and suitability of agroindustrial residues as feedstock for cellulose-based materials: Brazil case study. *Waste and biomass valorization*, v. 10, n. 10, p. 2863–2878, 2019.
- Area, C. M.; Felissia, F. E.; Vallejos, M. E. Ethanol-water fractionation of sugar cane bagasse catalyzed with acids. *Cellulose Chemistry and Technology*, v. 43, p. 271-279, 2009.
- Assis, T. F.; Resende, M. D. V. Genetic improvement of forest tree species. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 11, p. 44-49, 2011.
- Beig, B.; Riaz, M.; Naqvi, S. R.; Hassan, M.; Zheng, Z.; Karimi, K.; Pugazhendhi, A.; Atabani, A. E.; Chi, N. T. L. Current challenges and innovative developments in pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: A review. *Bioresource Technology*, v. 339, p. 125670, 2021.
- Bhatia, S.K.; Jagtap, S.S.; Bedekar, A.A.; Bhatia, R.K.; Patel, A.K.; Pant, D.; Rajesh Banu, J.; Rao, C.V.; Kim, Y.-G.; Yang, Y.-H. Recent developments in pretreatment technologies on lignocellulosic biomass: Effect of key parameters, technological improvements, and challenges. *Bioresource technology*, v. 300, p. 122724, 2020.
- Biermann, Christopher J. *Handbook of pulping and papermaking*. Elsevier, 1996.
- Bose, R. Competitive intelligence process and tools for intelligence analysis. *Industrial Management e Data Systems*, v. 108, n. 4, p. 510–528, 2008.
- Bousfield, C. G.; Morton, O.; Edwards, D. P. Climate change will exacerbate land conflict between agriculture and timber production. *Nature Climate Change*, v. 14, n. 10, p. 1071-1077, 2024.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Indústria de papel e celulose anuncia investimentos de R\$ 105 bilhões*. 1 ago. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/agosto/industria-de-papel-e-celulose-anuncia-investimentos-de-r-105-bilhoes>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- Calof, J.; Arcos, R.; Sewdass, N. Competitive intelligence practices of European firms. In: *Corporate Foresight and Innovation Management*. Routledge, 2020. p. 34-47.
- Calof, J. L.; Arcos, R.; Sewdass, N. Competitive intelligence practices of European firms. *Technology Analysis e Strategic Management*, v. 30, p. 658–671, 2017.
- Calof, J. L.; Wright, S. Competitive intelligence: A practitioner, academic and inter-disciplinary perspective. *European Journal of marketing*, v. 42, n. 7/8, p. 717-730, 2008.

- Carlström, I. E.; Rashad, A.; Campodoni, E.; Sandri, M.; Syverud, K.; Bolstad, A. I.; Mustafa, K. Cross-linked gelatin-nanocellulose scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Letters*, v. 264, p. 127326, 2020.
- Carrasco, G.; Almeida, A. C.; Falvey, M.; Olmedo, G. F.; Taylor, P.; Santibañez, F.; Coops, N. Effects of climate change on forest plantation productivity in Chile. *Global Change Biology*, v. 28, n. 24, p. 7391–7409, 2022.
- Casey, J. P. Pulp and paper: chemistry and chemical technology. Volume I. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, 1980. p. 152–155.
- Cekuls, A. The Evolution of Competitive Intelligence in a Complex Business Environment. *Journal of Intelligence Studies in Business*, v. 14, n. 2, 2024.
- Cavalli, J. P.; Frank De Araújo, E.; Reichert, J. M. Eucalyptus growth responses to soil water storage capacity in Arenosols and Acrisols soils: Wood and biomass stock modelling. *Sustainability*, v. 14, n. 19, p. 12215, 2022.
- Chaker, A.; Mutjé, P.; Vilar, M. R.; Boufi, S. Agriculture crop residues as a source for the production of nanofibrillated cellulose with low energy demand. *Cellulose*, v. 21, n. 6, p. 4247–4259, 2014.
- Chauhan, S.; Meena, B. L. Introduction to pulp and paper industry: Global scenario. *Physical Sciences Reviews*, v. 6, n. 5, p. 81–109, 2021.
- Chen, J.; Ma, X.; Liang, M.; Guo, Z.; Cai, Y.; Zhu, C. Physical–Chemical–Biological Pretreatment for Biomass Degradation and Industrial Applications: A Review. In: *Waste*. MDPI, 2024. p. 451-473
- Da Silva, J. C. G. L.; de Souza Maciel, A. International trade standards and competitiveness of the chemical wood pulp and conifer sawn wood sectors of Brazil and Chile front of major world exporters. *Forest Policy and Economics*, v. 137, p. 102706, 2022.
- Da Silva, F. A.; Simioni, F. J.; Hoff, D. N. Diagnosis of circular economy in the forest sector in southern Brazil. *Science of the total Environment*, v. 706, p. 135973, 2020.
- Dagnino, E. P.; Chamorro, E. R.; Romano, S. D.; Felissia, F. E.; Area, M. C. Optimization of the acid pretreatment of rice hulls to obtain fermentable sugars for bioethanol production. *Industrial crops and products*, v. 42, p. 363–368, 2013.
- De Las Heras-Rosas, C.; Herrera, J. Innovation and competitive intelligence in business: a bibliometric analysis. *International Journal of Financial Studies*, v. 9, n. 2, p. 31, 2021.
- Díez, D., Urueña, A., Piñero, R., Barrio, A., & Tamminen, T. Determination of hemicellulose, cellulose, and lignin content in different types of biomasses by thermogravimetric analysis and pseudocomponent kinetic model (TGA-PKM method). *Processes*, v. 8, n. 9, p. 1048, 2020.
- Domenes, P. M.; Urdan, A. T. O processo de implantação da inteligência competitiva em uma empresa de 'facilities services'. *Revista Administração em Diálogo*, v. 21, n. 3, p. 115–130, 2019.

- Duque-Acevedo, M.; Ulloa-Murillo, L. M.; Belmonte-Ureña, L. J.; Camacho-Ferre, F.; Mercl, F.; Tlustoš, P. Sustainable and circular agro-environmental practices: a review of the management of agricultural waste biomass in Spain and the Czech Republic. *Waste Management e Research*, v. 41, n. 5, p. 955–969, 2023.
- Elli, E. F.; Sentelhas, P. C.; Bender, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 474, p. 118365, 2020.
- EL-Tayeb, T. S.; Abdelhafez, A. A.; Ali, S. H.; Ramadan, E. M. Effect of acid hydrolysis and fungal biotreatment on agro-industrial wastes for obtainment of free sugars for bioethanol production. *Brazilian Journal of Microbiology*, v. 43, n. 4, p. 1523–1535, 2012.
- Espinosa, E.; Sánchez, R.; Otero, R.; Domínguez-Robles, J.; Rodríguez, A. A comparative study of the suitability of different cereal straws for lignocellulose nanofibers isolation. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 103, p. 990–999, 2017.
- Fahmy, Y.; Mobarak, F.; El-Sakhawy, M.; Fadl, M. H. Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: Background overview and future prospects. *International Journal of ChemTech Research*, v. 10, n. 2, p. 424–448, 2017.
- Fall, A. B.; Burman, A.; Wågberg, L. Cellulosic nanofibrils from eucalyptus, acacia and pine fibers. *Nordic Pulp e Paper Research Journal*, v. 29, n. 1, p. 176–184, 2014.
- Fearon, O.; Kuitunen, S.; Ruuttunen, K.; Alopaeus, V.; Vuorinen, T. Detailed modeling of kraft pulping chemistry: delignification. *Industrial e Engineering Chemistry Research*, v. 59, p. 12977–12985, 2020.
- Fengel, D.; Wegener, G. *Wood—Chemistry, ultrastructure, reactions*. 2. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.
- Fermanelli, C. S.; Córdoba, A.; Pierella, L. B.; Saux, C. Pyrolysis and copyrolysis of three lignocellulosic biomass residues from the agro-food industry: A comparative study. *Waste management*, v. 102, p. 362–370, 2020.
- Fernandes, F. C. Inteligência e gestão estratégica: uma relação sinérgica. *Revista Brasileira de Inteligência*, v. 7, p. 21–30, 2012.
- Fišerová, M.; Gigac, J.; Stankovska, M.; Opalena, E. Influence of bleached softwood and hardwood kraft pulps on tissue paper properties. *Cellulose Chemistry and Technology*, v. 53, n. 5–6, p. 469–477, 2019.
- Frazier R. M.; Vivas K. A.; Azuaje I., Vera R.; Pifano A.; Forfora N.; Jameel H.; Ford E.; Pawlak J.J.; Venditti R.; Gonzalez R. Beyond cotton and polyester: An evaluation of emerging feedstocks and conversion methods for the future of fashion industry. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, v. 9, n. 2, p. 130-159, 2024.
- Gao, X.; Li, M.; Zhang, H.; Tang, X.; Chen, K. Fabrication of regenerated cellulose films by DMAc dissolution using parenchyma cells via low-temperature pulping from Yunnan-endemic bamboos. *Industrial Crops and Products*, v. 160, p. 113116, 2021.

Gontard, N.; Sonesson, U.; Birkved, M.; Majone, M.; Bolzonella, D.; Celli, A.; Angellier-Coussy, H.; Jang, G. S.; Verniquet, A.; Broeze, J.; Schaer, B. A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 48, p. 614–654, 2018.

Gonzalez, P. G. A.; Gariboti, J. C. J.; Silva, J. F. L.; Lopes, E. S.; Abaide, E. R.; Lopes, M. S.; Concha, V. O. C.; Felisbino, R. F.; Gomes, E. L.; Tovar, L. P. Soybean straw as a feedstock for value-added chemicals and materials: Recent trends and emerging prospects. *Bioenergy research*, v. 16, 2022.

González, P.; Vega, M.; Zaror, C. Life cycle inventory of pine and eucalyptus cellulose production in Chile: effect of process modifications. In: Towards Life Cycle Sustainability Management. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 259–266, 2011.

Gonzalo, A.; Bimbela, F.; Sánchez, J. L.; Labidi, J.; Marín, F.; Arauzo, J. Evaluation of different agricultural residues as raw materials for pulp and paper production using a semichemical process. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 184–193, 2017.

Hassegawa, M.; Van Brusselen, J.; Cramm, M.; Verkerk, P. J. Wood-based products in the circular bioeconomy: Status and opportunities towards environmental sustainability. *Land*, v. 11, n. 12, p. 2131, 2022.

Hawanis, H. S. N.; Ilyas, R. A.; Jalil, R.; Ibrahim, R.; Majid, R. A.; Ab Hamid, N. H. Insights into lignocellulosic fiber feedstock and its impact on pulp and paper manufacturing: A comprehensive review. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 40, p. e00922, 2024.

Huang, C.; Jiang, X.; Shen, X.; Hu, J.; Tang, W.; Wu, X.; Ragauskas, A.; Jameel, H.; Meng, X.; Yong, Q. Lignin-enzyme interaction: A roadblock for efficient enzymatic hydrolysis of lignocellulosics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 154, p. 111822, 2022.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. *Relatório anual 2025*. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf> Acesso em: 10 dez 2025.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. *Relatório anual 2023*. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

Jahan, M. S.; Rahman, M. M.; Ni, Y. Alternative initiatives for non-wood chemical pulping and integration with the biorefinery concept: a review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 15, n. 1, p. 100–118, 2021.

Jayaprakash, K.; Osama, A.; Rajagopal, R.; Goyette, B.; Karthikeyan, O. P. Agriculture waste biomass repurposed into natural fibers: a circular bioeconomy perspective. *Bioengineering*, v. 9, n. 7, p. 296, 2022.

Kallio, A. M. I. Wood-based textile fibre market as part of the global forest-based bioeconomy. *Forest Policy and Economics*, v. 123, p. 102364, 2021.

Kamarian, S.; SONG, J. I. Review of literature on eco-friendly sandwich structures made of non-wood cellulose fibers. *Journal of Sandwich Structures e Materials*, v. 24, n. 3, p. 1653–1705, 2022.

- Kaur, D.; Bhardwaj, N. K.; Lohchab, R. K. Prospects of rice straw as a raw material for paper making. *Waste Management*, v. 60, p. 127-139, 2017.
- Kerr, R. B. Competitiveness of the Brazilian pulp industry: A real options analysis of a forestry investment. *Práticas em Contabilidade e Gestão*, v. 2, n. 1, 2014.
- Kolev, K.; Stoenchev, N.; Iliev, N.; Milchev, G.; Tsoklinova, M. Indicators and sub-indicators characterizing competitiveness of forestry companies. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, v. 22, n. 3.1, p. 357-364, 2022.
- Korhonen, J.; Hurmekoski, E.; Hansen, E.; Toppinen, A. Firm-level competitiveness in the forest industries: Review and research implications in the context of bioeconomy strategies. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 48, n. 2, p. 141-152, 2018.
- KPMG. *KPMG ESG Yearbook Brasil 2023: sumário executivo*. 2023. Disponível em: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/br/pdf/2023/6/KPMG-ESG-Yearbook-Brasil-2023-Sumario-Executivo.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2024.
- Larrahondo, J. E. Calidad de la Caña de Azúcar. In: CENICAÑA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali, CENICAÑA, 1995. p.337-354.
- Li, P.; Xu, Y.; Yin, L.; Liang, X.; Wang, R.; Liu, K. Development of raw materials and technology for pulping—a brief review. *Polymers*, v. 15, n. 22, p. 4465, 2023.
- Liu, Q.; Lu, Y.; Aguedo, M.; Jacquet, N.; Ouyang, C.; He, W.; Yan, C.; Bai, W.; Guo, R.; Goffin, D.; Song, J.; Richel, A. Isolation of high-purity cellulose nanofibers from wheat straw through the combined environmentally friendly methods of steam explosion, microwave-assisted hydrolysis, and microfluidization. *ACS Sustainable Chemistry e Engineering*, v. 5, p. 6183–6191, 2017.
- Liu, Z.; Wang, H.; Hui, L. Pulping and papermaking of non-wood fibers. *Pulp and Paper Processing*, v. 1, p. 4–31, 2018.
- Madureira, L.; Popović, A.; Castelli, M. Competitive intelligence: A unified view and modular definition. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 173, p. 121086, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121086>.
- Magalhães Jr., A. I.; Carvalho, J. C. de; Pereira, G. V. de M.; Karp, S. G.; Câmara, M. C.; Medina, J. D. C.; Soccol, C. R. Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, bioproducts e biorefining*, v. 13, n. 6, p. 1505–1519, 2019.
- Mankar, A. R.; Pandey, A.; Modak, A.; Pant, K. K. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, v. 334, p. 125235, 2021.
- Marrugo, G.; Valdés, C. F.; Chejne, F. Characterization of Colombian agroindustrial biomass residues as energy resources. *Energy e fuels: an American Chemical Society journal*, v. 30, n. 10, p. 8386–8398, 2016.
- Martins, F. B.; Benassi, R. B.; Torres, R. R.; de Brito Neto, F. A. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on *Eucalyptus* plantations in South America. *Science of The Total Environment*, v. 825, p. 153820, 2022.

- Maximo, Y. I., Hassegawa, M., Verkerk, P. J., e Missio, A. L. Forest bioeconomy in Brazil: Potential innovative products from the forest sector. *Land*, v. 11, n. 8, p. 1297, 2022.
- Medeiros, G.; Florindo, T.; Talamini, E.; Fett Neto, A.; Ruviaro, C. Optimising tree plantation land use in Brazil by analysing trade-offs between economic and environmental factors using multi-objective programming. *Forests*, v. 11, n. 7, p. 723, 2020.
- Medvedev, S.; Ivantsova, E.; Mokhirev, A. Development of a model for increasing the competitiveness of forest industry enterprises. In: *BIO Web of Conferences. EDP Sciences*, 2024. p. 14006.
- Morais, F. P.; Bértolo, R. A.; Curto, J. M.; Amaral, M. E.; Carta, A. M.; Evtyugin, D. V. Characterization data of pulp fibres performance in tissue papers applications. *Data in Brief*, v. 29, p. 105253, 2020.
- Nechyporchuk, O.; Belgacem, M. N.; Bras, J. Production of cellulose nanofibrils: a review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, v. 93, p. 2–25, 2016.
- Nones, D. L., Brand, M. A., Ampessan, C. G. M., e Friederichs, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 16, n. 2, p. 155-164, 2017.
- Olszak, C. M.; Bartuś, K.; Sączewska-Piotrowska, A. Competitive Intelligence as a Lever of Added Value. *Procedia Computer Science*, v. 225, p. 1796-1805, 2023.
- Orellana, B. B. M. A.; Do Vale, A. T.; Orellana, J. B. P.; Chaves, B. S.; Moreira, A. C. M. Caracterização de resíduos agroindustriais da região do Distrito Federal para fins energéticos. *Energia na agricultura*, v. 35, n.1, p. 46-61, 2020.
- Pisano, I.; Gottumukkala, L.; Hayes, D. J.; Leahy, J. J. Characterisation of Italian and Dutch forestry and agricultural residues for the applicability in the bio-based sector. *Industrial Crops and Products*, v. 171, p. 113857, 2021.
- Phiri, R.; Mavinkere Rangappa, S.; Siengchin, S. Agro-waste for renewable and sustainable green production: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, p. 139989, 2024.
- Przybysz Buzała, K.; Kalinowska, H.; Przybysz, P.; Małachowska, E. Conversion of various types of lignocellulosic biomass to fermentable sugars using kraft pulping and enzymatic hydrolysis. *Wood Science and Technology*, v. 51, p. 873–885, 2017.
- Quintana, E.; Valls, C.; Roncero, M. B. Dissolving-grade pulp: a sustainable source for fiber production. *Wood Science and Technology*, v. 58, n. 1, p. 23-85, 2024.
- Rambo, M. K. D.; Schmidt, F. L.; Ferreira, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. *Talanta*, v. 144, p. 696–703, 2015.
- Riki, J. T. B.; Sotannde, O. A.; Oluwadare, A. O. Anatomical and chemical properties of wood and their practical implications in pulp and paper production: a review. *Journal of Research in forestry, wildlife and environment*, v. 11, n. 3, p. 358-368, 2019.

- Riseh, R. S.; Vazvani, M. G.; Hassanisaadi, M.; Thakur, V. K. Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. *Industrial Crops and Products*, v. 208, p. 117904, 2024.
- Rocha, G. J. M.; Nascimento, V. M.; Gonçalves, A. R.; Silva, V. F. N.; Martín, C. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. *Industrial crops and products*, v. 64, p. 52–58, 2015.
- Rodias, E.; Aivazidou, E.; Achillas, C.; Aidonis, D.; Bochtis, D. Water-energy-nutrients synergies in the agrifood sector: a circular economy framework. *Energies*, v. 14, n. 1, p. 159, 2020.
- Rodríguez, A.; Moral, A.; Serrano, L.; Jiménez, L.; Castro, E.; López, F. Rice straw pulp obtained by using various methods. *Bioresource Technology*, v. 99, n. 8, p. 2881–2886, 2008.
- Rodriguez, R.; Mazza, G.; Fernandez, A.; Saffe, A.; Echegaray, M. Prediction of the lignocellulosic winery wastes behavior during gasification process in fluidized bed: Experimental and theoretical study. *Journal of environmental chemical engineering*, v. 6, n. 4, p. 5570–5579, 2018.
- Rouach, D.; Santi, P. Competitive intelligence adds value: Five intelligence attitudes. *European management journal*, v. 19, n. 5, p. 552-559, 2001.
- Rousu, P.; Rousu, P.; Anttila, J. Sustainable pulp production from agricultural waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 35, n. 1, p. 85–103, 2002.
- Rubinger, L.; Gazendam, A.; Ekhtiari, S.; Bhandari, M. Machine learning and artificial intelligence in research and healthcare. *Injury*, v. 54, p. S69-S73, 2023.
- Sadeghiani, A.; Shokouhyar, S.; Ahmadi, S. How digital startups use competitive intelligence to pivot. *Digital Business*, v. 2, n. 2, p. 100034, 2022.
- Sambusiti, C. Physical, chemical and biological pretreatments to enhance biogas production from lignocellulosic substrates. Tese de doutorado (Environmental and Infrastructure Engineering). 224f. Politecnico di Milano, Itália.
- Santos, T. B.; Santos, G. A.; Canal, G. B. Potencial da inteligência competitiva na indústria florestal. Boletim Técnico SIF, Viçosa-MG, n. 12, p. 1-5, dez. 2022. ISSN 2763-6860. Disponível em: https://sif.org.br/wp-content/uploads/2024/05/Boletim-Dez_22_Final.pdf. Acesso em: 22 jul. 2025.
- Santos, H. F.; Silva, M. L. D.; Soares, N. S.; Diniz, F. F.; Coelho Junior, L. M. Brazil's competitiveness in exportation of forest products from 2008 to 2018. *Revista Árvore*, v. 46, p. e4617, 2022.
- Šedík, P.; Tkáč, F.; Moravčíková, D. The potential of non-wood pulp in European circular bioeconomy. In: Zero waste management and circular economy. Brno: Mendel University Press, 2021. p. 370–379. <https://doi.org/10.11118/978-80-7509-820-7-0370>

- Seki, Y., S., F.; Erdoğan, Ü. H.; Atagür, M.; Seydibeyoğlu, M. Ö. A review on alternative raw materials for sustainable production: novel plant fibers. *Cellulose*, v. 29, n. 9, p. 4877-4918, 2022.
- Sridach, W. The environmentally benign pulping process of non-wood fibers. *Suranaree J. Sci. Technol*, v. 17, n. 2, p. 105-123, 2010.
- Štefániková, L.; Masàrovà, G. The need of complex competitive intelligence. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 110, p. 669-677, 2014.
- Stetsenko, S.; Sorokina, L.; Izmailova, K.; Bielenkova, O.; Tytok, V.; Emelianova, O. Model of a company competitiveness control by means of artificial intelligence tools. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2021. Volume 9. № 2, February 2021, pp. 60, v. 65, 2021.
- Strategic Consortium of Intelligence Professionals – SCIP. *Strategic insights for sustainable forest management – leveraging competitive intelligence. I_MAG*, Summer 2024 Edition, 22 p.
- Tsalagkas, D.; Börcsök, Z.; Pásztor, Z.; Gryc, V.; Csóka, L.; Giagli, K. A comparative fiber morphological analysis of major agricultural residues (used or investigated) as feedstock in the pulp and paper industry. *BioResources*, v. 16, n. 4, p. 7935, 2021.
- Tufail, T.; Saeed, F.; Afzaal, M.; Ain, H. B. U.; Gilani, S. A.; Hussain, M.; Anjum, F. M. Wheat straw: A natural remedy against different maladies. *Food science e nutrition*, v. 9, n. 4, p. 2335–2344, 2021.
- UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. 2023 data brief on pulp, paper and paperboard. Geneva: UNECE, 2023. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2023-11/2023-data-brief-pap-final-web_1.pdf. Acesso em: 01 dez 2025.
- Vallejo, M.; Cordeiro, R.; Dias, P. A. N.; Moura, C.; Henriques, M.; Seabra, I. J.; Malça, C. M.; Morouço, P. Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn, grape, pomegranate, strawberry-tree fruit and fava. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 8, p. 1–12, 2021.
- Vieira, T. A. S.; Arriel, T. G.; Zanuncio, A. J. V.; Carvalho, A. G.; Branco-Vieira, M.; Carabineiro, S. A. C.; Trugilho, P. F. Determination of the chemical composition of Eucalyptus spp. for cellulosic pulp production. *Forests*, v. 12, n. 12, p. 1649, 2021.
- Wang, B. ESG Performance and Corporate Competitive Advantage. In: Proceedings of the 4th International Conference on Business and Policy Studies, 2025. DOI: 10.54254/2754-1169/156/2025.20652. 7 p.
- Wang, Y.; Yuan, Z. W.; Tang, Y. Enhancing food security and environmental sustainability: a critical review of food loss and waste management. *Resources, Environment and Sustainability*, v. 4, p. 100023, 2021.
- Worku, L. A.; Bachheti, A.; Bachheti, R. K.; Rodrigues Reis, C. E.; Chandel, A. K. Agricultural residues as raw materials for pulp and paper production: overview and applications on membrane fabrication. *Membranes*, v. 13, n. 2, p. 228, 2023.

Wu, Q.; Yan, D.; Umair, M. Assessing the role of competitive intelligence and practices of dynamic capabilities in business accommodation of SMEs. *Economic Analysis and Policy*, v. 77, p. 1103–1114, 2023.

Xu, Y., Du, A., Wang, Z., Zhu, W., Li, C., e Wu, L. Effects of different rotation periods of Eucalyptus plantations on soil physiochemical properties, enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure and diversity. *Forest Ecology and Management*, v. 456, p. 117683, 2020.

Yadav, C.; Yadav, P.; Joshi, A.; Meena, M.; Harish; Arora, J. Agricultural waste and its impact on the environment. In: *Transforming agriculture residues for sustainable development: from waste to wealth*. Cham: Springer Nature Switzerland, p. 3–19, 2024.

Yin, C. Measuring organizational impacts by integrating competitive intelligence into executive information system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 29, n. 3, p. 533-547, 2018.

Zeng, L.; Jiang, X. ESG and corporate performance: Evidence from agriculture and forestry listed companies. *Sustainability*, v. 15, n. 8, p. 6723, 2023.

CAPÍTULO 1: Resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de celulose na América Latina: disponibilidade e potencial estratégico

RESUMO

A crescente demanda global por celulose, aliada às pressões ambientais e ao risco de futuras limitações na oferta de madeira, tem intensificado o interesse por fontes alternativas de fibras, com destaque para os resíduos agrícolas. Este capítulo investiga a disponibilidade de resíduos lignocelulósicos da agricultura com potencial para a produção de celulose na América Latina, com foco em quatro países com expressiva atividade agrícola: Brasil, Argentina, Colômbia e Chile. A partir da revisão da literatura e análise de bancos de dados oficiais, foram identificadas as principais culturas e estimadas as quantidades de resíduos gerados, utilizando coeficientes de conversão específicos. Os resíduos selecionados foram avaliados com base na composição lignocelulósica, notadamente os teores de celulose, hemicelulose e lignina, parâmetros fundamentais para a eficiência nos processos de polpação. Os resultados indicam que o bagaço de cana-de-açúcar, a palha de milho, a casca de arroz e a palha de trigo são os resíduos mais abundantes e com maior viabilidade técnica. Ao fomentar o aproveitamento desses materiais, a América Latina pode fortalecer sua competitividade na bioeconomia, reduzir a dependência de insumos florestais e agregar valor a cadeias produtivas agrícolas ainda subutilizadas. Essa estratégia contribui para um modelo de indústria celulósica mais resiliente, circular e ambientalmente sustentável na região.

Palavras-chave: Resíduos agrícolas; Celulose; Celulose e papel; América Latina; Fibras Alternativas; Bioeconomia circular.

Chapter 1: Agricultural residues as raw material for cellulose production in Latin America: availability and strategic potential

ABSTRACT

The growing global demand for cellulose, coupled with environmental concerns and the risk of future limitations in wood supply, has driven increasing interest in alternative fiber sources, particularly lignocellulosic agricultural residues. This chapter investigates the availability of agricultural waste suitable for cellulose production in Latin America, focusing on Brazil, Argentina, Colombia, and Chile, countries with robust agricultural sectors and significant biomass generation. Through literature review and analysis of official databases, major crops were identified and their corresponding residue volumes estimated using established conversion factors. The selected residues were then analyzed based on their lignocellulosic composition — including cellulose, hemicellulose, and lignin content, which are key determinants of pulping efficiency. Results show that sugarcane bagasse, corn stover, rice husk, and wheat straw are among the most abundant and technically viable residues. By promoting the use of these materials, Latin America can enhance its competitiveness in the bioeconomy, reduce dependence on wood-based inputs, and create value from underutilized waste streams. This approach supports a more resilient and circular model for the pulp and paper industry in the region.

Keywords: Agricultural residues; Cellulose; Pulp and paper; Latin America; Alternative fibers; Circular bioeconomy.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a América Latina emergiu como protagonista no mercado global de celulose, consolidando-se como um polo exportador estratégico, especialmente com a expansão da indústria baseada em plantações de eucalipto e pinus no Brasil, Chile e Uruguai. Esses três países, que até os anos 1980 tinham participação tímida no setor, passaram a responder juntos por mais de um terço das exportações mundiais de celulose, com o Brasil liderando globalmente em produtividade e volume exportado. Essa transformação só foi possível graças a políticas públicas voltadas à silvicultura comercial, investimentos em pesquisa genética e incentivos à instalação de fábricas integradas com plantações. A produção brasileira, por exemplo, alcançou 19 milhões de toneladas em 2019, com mais de 70% destinadas à exportação (Klein e Luna, 2022; Sampaoli et al., 2023).

A América Latina consolidou-se nas últimas décadas como um dos polos mais competitivos da indústria global de celulose, especialmente na produção de fibras curtas obtidas de espécies folhosas (eucalipto, principalmente). A região se beneficia de fatores estruturais como clima favorável, elevada produtividade florestal e baixos custos operacionais, com destaque para o Brasil, líder mundial em exportações de celulose. Em 2023, os países latino-americanos concentraram cerca de 49% da capacidade global de produção de celulose de hardwood, com custo médio de produção em torno de US\$ 321 por tonelada, o que reforça sua posição estratégica no fornecimento para os mercados europeu e asiático (Timberland Investment Group, 2024).

Países como Brasil, Chile e Uruguai lideram essa expansão ao combinarem avanços florestais e investimentos industriais robustos. A América Latina foi responsável por 18% das exportações globais de celulose em 2023, atendendo especialmente mercados europeus e asiáticos (CEPI, 2023). Esse avanço está associado não apenas à eficiência operacional, mas também à adoção de práticas alinhadas às exigências ambientais e de competitividade global. Desde 2000, a participação da região na produção mundial passou de 13,8% para 38,4%, impulsionada por fusões estratégicas, a exemplo da Suzano e Fibria, e pela reorganização geográfica do setor (Timberland Investment Group, 2024).

Além do protagonismo florestal, a América Latina também se destaca na produção agropecuária, respondendo por cerca de 16% da produção agrícola mundial (Magalhães et al., 2019). Essa atividade intensiva gera grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, provenientes de cultivos como cana-de-açúcar, milho, soja, trigo e banana, que são frequentemente subutilizados. No entanto, esses resíduos apresentam composição química

favorável, com altos teores de celulose e hemicelulose e baixos níveis de lignina, características que os torna tecnicamente viáveis como matéria-prima alternativa para a produção de celulose e bioproductos (Liu et al., 2018; Sampaolesi et al., 2023).

Estima-se que, até 2025, a produção de biomassa lignocelulósica na América do Sul, por exemplo, atinja 900 milhões de toneladas anuais, sendo capaz de gerar mais de 550 milhões de toneladas de açúcares fermentáveis ou 670 milhões de toneladas de bio-óleo (Magalhães et al., 2019). Essa disponibilidade oferece à região a oportunidade de se consolidar como líder na transição para uma economia baseada em recursos renováveis. Além da valorização ambiental, o aproveitamento desses resíduos pode agregar valor comercial à cadeia agroindustrial, estimular o desenvolvimento de biorrefinarias e mitigar impactos ambientais associados ao descarte inadequado.

A conversão de resíduos agrícolas lignocelulósicos em celulose está alinhada aos princípios da bioeconomia e da economia circular, pois promove a redução de resíduos, a substituição de insumos fósseis e a diversificação da base industrial. Entretanto, para que essa rota seja tecnicamente viável, é necessário compreender não apenas a quantidade disponível de biomassa, mas também sua composição, propriedades físico-químicas e distribuição territorial (Riseh et al., 2024). Tal abordagem exige uma avaliação integrada entre setores agrícola, florestal e industrial.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os principais aspectos relacionados à geração de resíduos agrícolas no Brasil, Argentina, Colômbia e Chile, com foco em seu aproveitamento como fonte alternativa para a produção de celulose. Por meio de uma revisão bibliográfica ampla, analisam-se as três culturas agrícolas de maior volume em cada país, com estimativas da quantidade de resíduos gerados, sua disponibilidade técnica e características relevantes de sua composição, com base em dados de instituições oficiais e literatura científica especializada.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi avaliar os principais aspectos relacionados à geração de resíduos lignocelulósicos na América do Sul, com destaque para Brasil, Chile, Colômbia e Argentina, com foco em seu potencial aproveitamento como fonte alternativa para a produção de celulose e papel.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada para o presente trabalho consistiu em uma ampla revisão de literatura, cujo escopo foi delimitar e analisar os aspectos relacionados à geração e aproveitamento dos resíduos agrícolas na produção de celulose e papel. Para tanto, foram seguidos os seguintes passos:

1. Estratégia de busca e palavras-chave

Foram realizadas buscas em diversas plataformas acadêmicas e bases de dados internacionais utilizando os seguintes termos-chave:

- Primary: "agriculture residue", "agricultural waste", "agroindustrial waste", "cellulose", "biomass".
- Termos complementares foram também considerados para ampliar o escopo da pesquisa: "bioresidues", "lignocellulosic biomass", "sustainable agriculture waste" e "waste valorization"

Foram realizadas buscas em diversas plataformas acadêmicas e bases de dados internacionais, como Scopus, ScienceDirect (Elsevier), SciELO e Google Scholar, com o objetivo de identificar estudos relevantes sobre o uso de resíduos agrícolas e agroindustriais na produção de celulose e papel. Utilizaram-se termos-chave primários como “agriculture residue”, “agricultural waste”, “agroindustrial waste”, “cellulose” e “biomass”. Além disso, foram incorporados termos complementares, com a finalidade de ampliar o escopo da pesquisa, como “bioresidues”, “lignocellulosic biomass”, “sustainable agriculture waste” e “waste valorization”. A seleção dos estudos considerou critérios como pertinência temática, rigor metodológico e contribuição para o campo da bioeconomia e da valorização de resíduos lignocelulósicos, compondo assim um panorama abrangente das abordagens existentes na literatura.

2. Seleção dos países e culturas

Para a delimitação do escopo, optou-se por considerar as três principais culturas produzidas, em termos de volume de produção (toneladas), nos países delimitados: Argentina, Colômbia, Chile e Brasil. Esses países foram escolhidos devido à sua significativa participação na economia sul-americana e à representatividade nas exportações agrícolas, fatores que

reforçam a relevância dos resíduos gerados por essas culturas para o estudo. Essa escolha possibilitou uma análise comparativa entre os países e culturas, considerando o potencial de geração e aproveitamento dos resíduos.

3. Fontes de Dados e Coleta de Informação

Os dados referentes à produção agrícola, referente ao ano de 2023, foram obtidos a partir das seguintes fontes:

- FAO (Food and Agriculture Organization): Para dados globais e regionais de produção agrícola, disponíveis em FAOSTAT;
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento): Para informações específicas sobre as culturas com maior potencial de geração de resíduos, especialmente aquelas de relevância no contexto brasileiro.

4. Conversão da Produção Agrícola em Volume de Resíduo

A conversão do volume produzido de cada cultura agrícola em volume estimado de resíduo foi realizada utilizando coeficientes de conversão extraídos compilados da literatura especializada, conforme a metodologia proposta por Magalhães Jr. et al. (2019). Esses coeficientes permitiram uma aproximação quantitativa do potencial de resíduos a partir da produção agrícola, assegurando que as estimativas fossem comparáveis entre os diferentes países e culturas analisadas.

$$\text{Resíduo (ton)} = \text{Produção agrícola (ton)} \times \text{Coeficiente de geração de resíduo (CGR)}$$

A razão de geração de resíduo representa a proporção, em base seca, entre o peso do resíduo agrícola produzido e o peso do produto principal da cultura, como a relação entre palha e grão no trigo. Esses valores podem variar significativamente devido a fatores como práticas agrícolas adotadas, fertilidade do solo e condições climáticas (Lu, 2020; Korav et al. 2022). Como os coeficientes utilizados neste estudo são oriundos de diferentes fontes da literatura, muitas vezes baseados em regiões distintas, seus resultados devem ser interpretados como estimativas aproximadas, que refletem uma variabilidade técnica, ambiental e cultural própria da geração de resíduos agrícolas.

Para compor a análise, também foi considerada a disponibilidade técnica dos resíduos agrícolas com potencial para produção de celulose, foi adotado um índice já estabelecido na literatura, conforme metodologia proposta por Araújo et al. (2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fontes de biomassa celulósica de origem não madeireira, como resíduos agrícolas e agroindustriais, representam uma alternativa promissora à polpa tradicional de madeira. Além de serem renováveis, abundantes e de baixo custo, esses materiais geralmente apresentam menor teor de lignina e maior concentração de hemicelulose em comparação com matérias-primas florestais (Abd El-Sayed et al., 2020). Isso resulta em menor consumo de energia e produtos químicos nos processos de deslignificação e purificação das fibras.

Dado o baixo valor econômico de suas aplicações atuais e o alto valor agregado de potenciais produtos celulósicos, há uma oportunidade significativa de transformar esses resíduos em matérias-primas valiosas. À medida que a indústria de celulose adota práticas mais sustentáveis, é esperado um avanço nas pesquisas voltadas ao aproveitamento de biomassas alternativas, impulsionando ainda mais a economia circular e promovendo um crescimento econômico ambientalmente responsável e sustentável (Nechyporchuk et al., 2016; Gontard et al., 2018).

A seguir, são apresentados os resultados por país, com destaque para:

- Volume de produção agrícola e área colhida de cada cultura para o ano de 2023;
- Estimativa de resíduos gerados com base no coeficiente de geração de resíduos;
- Composição lignocelulósica desses resíduos, com base na literatura científica especializada.

Os dados de estimativas de resíduos foram calculados apenas para as 3 principais culturas de cada país, conforme exposto na tabela 1. Os coeficientes técnicos de geração de resíduos utilizados na equação, estão reunidos na tabela 2, juntamente aos CGRs de outras culturas agrícolas economicamente importantes. Para o cálculo da estimativa do resíduo, foi adotada a média entre os coeficientes encontrados na literatura. A unidade do coeficiente de geração de resíduo é tonelada de resíduo produzido para cada tonelada da cultura agrícola.

Essas informações subsidiam a discussão sobre a viabilidade técnica e ambiental do uso desses resíduos como matéria-prima alternativa para a indústria de celulose, considerando os princípios da bioeconomia e da economia circular.

América Latina

A América Latina é responsável pela produção de 17% de toda a polpa celulósica produzida no mundo, enquanto, em contraste, o consumo da polpa na região é de apenas 5,6%. As exportações de polpa oriundas da região reduziram em 13,2% de 2022 em comparação ao ano de 2021, enquanto a importação aumentou em 9,9% no mesmo período (CEPI, 2022).

Na América do Sul, por sua vez, as principais commodities agrícolas incluem cana-de-açúcar, soja e milho, que juntas representam mais de 80% da produção agrícola do continente, superando um bilhão de toneladas anuais. Outros cultivos também se destacam, como trigo, mandioca, arroz, banana e palma de óleo. O processamento desses cultivos gera grandes volumes de resíduos sólidos, tanto de origem agrícola (como palha, folhas e ramos) quanto de processamento agroindustrial (como bagaço, cachos e cascas), apresentando composições e volumes diversos (Magalhães Jr. et al., 2019).

Brasil

O Brasil é, notadamente, o maior produtor agrícola da América do Sul e, por consequência, o principal país potencial em gerar resíduos lignocelulósicos agrícolas da região. De acordo com os dados da FAO analisados neste estudo, as três culturas agrícolas com maior volume de produção no país são: cana-de-açúcar, soja e milho (Tabela 1). Amplamente cultivadas em estados como São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Paraná e Minas Gerais, essas culturas constituem a base do agronegócio brasileiro e representam um expressivo potencial para a geração de resíduos com características físico-químicas favoráveis ao aproveitamento industrial.

Tabela 1 - Estimativa de geração de resíduos (ton) nos países Argentina, Brasil, Chile e Colômbia, com base na produção agrícola do ano de 2023 (ton), do coeficiente médio de geração de resíduo (CGR) de acordo com os resíduos disponíveis de culturas agrícolas, de acordo com a disponibilidade do resíduo (%) e o volume disponível (ton).

País	Cultura agrícola	Produção total (ton)	Resíduo	CGR	Estimativa de resíduos (ton)	Disponibilidade do resíduo (%)	Volume disponível (ton)
Argentina	Milho	41.409.448	Palha	2,23	92.343.069	40	36.937.227,62
			Espiga	1	41.409.448	40	16.563.779,2
	Soja	25.044.978	Palha	1,78	44.580.061	75	33.435.045,63
			Vagem	1,09	27.299.026	-	-
	Cana-de-açúcar	15.436.339	Palha	0,24	3.704.721	75	2.778.541,101
			Bagaço	0,27	4.167.812	10	416.781,1652
Brasil	Cana-de-açúcar	782.585.836	Palha	0,24	187.820.601	75	140.865.450,5
			Bagaço	0,27	211.298.176	10	21.129.817,57
	Soja	152.144.238	Palha	1,78	270.816.744	75	203.112.557,7
			Vagem	1,09	165.837.219	-	-
	Milho	131.950.246	Palha	2,23	294.249.049	40	117.699.619,4
			Espiga	1	131.950.246	40,	52.780.098,4
Chile	Uvas	2.320.962	Cascas e sementes	0,4	928.385	0	0
	Maçãs	1.475.950	Bagaço	0,28	413.266	50	206.632,9496
	Trigo	1.289.774	Palha	1,34	1.728.297	-	-
Colômbia	Cana-de-açúcar	32.415.575	Palha	0,24	7.779.738	75	5.834.803,486
			Bagaço	0,27	8.752.205	10	875.220,5228
	Fruta de dendê	8.321.197	Geral	1,6	804.198	-	-
			Palha	0,65	1.953.965	75	1.465.473,75
	Arroz	3.006.100	Casca	1,32	3.968.052	25	992.013

Fonte: FAO, 2023

Tabela 2 - Produção agrícola (ton) e área colhida (ha) dos países Argentina, Brasil, Chile e Colômbia de acordo com as culturas agrícolas e a principal estados produtora em cada país.

País	Cultura agrícola	FAO		Principais estados/departamentos produtores
		Área colhida (ha)	Produção (ton)	
Argentina	Milho	8.104.641	41.409.448	Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe e La Pampa
	Soja	14.356.922	25.044.978	Buenos Aires, Catamarca, Chaco e Cordoba
	Cana-de-açúcar	509.289	15.436.339	Tucumán
	Trigo	5.488.728	12.555.860	Buenos Aires, Santa Fe, Entre Ríos e Cordoba
	Semente de girassol	2.453.245	5.018.874	Buenos Aires, Chaco, Santa Fe e La Pampa
	Cevada	1.589.966	4.695.914	Buenos Aires
	Batatas	65.767	2.365.998	Buenos Aires e partes de Córdoba e Mendoza
	Limões e limas	58.368	1.998.273	Tucumán
	Sorgo	500.421	1.610.102	Santa Fe, Córdoba, Entre Ríos e Buenos Aires
	Uvas	204.847	1.455.312	Mendoza
Brasil	Cana-de-açúcar	10.065.599	782.585.836	SP, GO, MG, PR, MS
	Soja	44.447.552	152.144.238	MT, PR, RS, GO, BA
	Milho	22.316.340	131.950.246	MT, PR, GO, MS, MG
	Mandioca fresca	1.201.440	18.514.317	PA, PR, BA, MA, CE
	Laranjas	575.437	17.615.667	SP, MG, PR, BA, SE
	Arroz	1.482.748	10.285.663	RS, SC, TO, MA, MT
	Trigo	3.330.303	7.730.188	RS, PR, SC, SP, MS
	Algodão em caroço, sem descarregar	1.709.425	7.496.603	MT, BA, GO, MS, MA
	Bananas	456.522	6.825.724	BA, SP, MG, SC, PA
	Sorgo	1.344.408	4.498.299	GO, MG, MT, BA, SP
Chile	Uvas	171.931	2.320.962	Valparaíso, Santiago, O'Higgins
	Maçãs	29.006	1.475.950	Maule, O'Higgins, Bío-Bío
	Trigo	216.733	1.289.774	Araucanía, Bío-Bío, Los Lagos
	Tomates	12.754	930.111	Metropolitana, Valparaíso, Maule
	Batatas	28.986	843.119	Los Lagos, Araucanía, Los Ríos

Continua..

Tabela 2 - Produção agrícola (ton) e área colhida (ha) dos países Argentina, Brasil, Chile e Colômbia de acordo com as culturas agrícolas e a principais estados produtora em cada país.

País	Cultura agrícola	FAO		Principais estados/departamento produtores
		Área colhida (ha)	Produção (ton)	
Chile	Milho	50.061	543.126	Maule, Bío-Bío, Araucanía
	Cerejas	63.495	465.348	Maule, O'Higgins, Metropolitana
	Ameixas e endrinas	15.995	433.935	Maule, O'Higgins, Metropolitana
	Cebolas	8.494	409.514	Coquimbo, Maule, Metropolitana
	Cana-de-açúcar	375.928	32.415.575	Valle del Cauca
	Fruta de dendê	502.624	8.321.197	Meta, Casanare, Cesar
Colômbia	Arroz	667.500	3.006.100	Meta, Tolima, Casanare
	Banana-da-terra	279.229	2.589.361	Antioquia, Valle del Cauca, Tolima
	Batatas	112.975	2.573.450	Cundinamarca, Boyacá, Nariño
	Bananas	105.574	2.554.287	Magdalena, La Guajira, Antioquia (Urabá)
	Milho	473.192	1.949.538	Córdoba, Antioquia, Meta
	Abacates	106.714	1.085.766	Antioquia, Caldas, Tolima
	Mandioca fresca	100.670	1.061.253	Córdoba, Sucre, Bolívar

Fonte: FAO, 2023.

Paralelamente à sua relevância agrícola, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário global da indústria de celulose. Apesar dos impactos associados à pandemia de Covid-19, o setor apresentou crescimento de 6,6% em 2020 em relação ao ano anterior, evidenciando sua capacidade de adaptação às novas dinâmicas de consumo, tanto no mercado industrial quanto no doméstico. Nesse contexto, o país manteve-se como o segundo maior produtor mundial de celulose, com uma produção de 21,0 milhões de toneladas, atrás apenas dos Estados Unidos. A reputação internacional da celulose brasileira, amplamente reconhecida por sua qualidade e por sua origem sustentável e certificada, reforça a posição do país como protagonista no mercado global de produtos florestais (IBÁ, 2021).

Além disso, o Brasil se consolida como o principal produtor e exportador de celulose da América do Sul, figurando como líder global em exportações. Entre 2015 e 2019, o país exportou, em média, 13,4 milhões de toneladas por ano, o que corresponde a aproximadamente 24% das exportações mundiais de celulose química oriunda de madeira (Klein e Luna, 2022). No entanto, embora apresente uma capacidade instalada relevante para a produção de celulose não madeireira, estimada em 182 mil ton ano⁻¹, essa modalidade representa apenas cerca de 8% da capacidade total nacional, evidenciando um subaproveitamento estratégico das alternativas à madeira (Abd El-Sayed et al., 2020). Apesar do predomínio do eucalipto como matéria-prima, o país reúne condições técnicas e agroambientais favoráveis à ampliação do uso de resíduos agrícolas, especialmente em unidades descentralizadas e biorrefinarias.

A base produtiva da indústria nacional de celulose é majoritariamente sustentada por florestas plantadas de eucalipto (75%) e pinus (25%), espécies exóticas que apresentaram elevada adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras. Esse modelo foi historicamente viabilizado por políticas públicas de incentivo, como o Código Florestal de 1965 e a reforma tributária de 1966, que instituíram mecanismos de isenção fiscal para investimentos em reflorestamento (Klein e Luna, 2022). Contudo, em paralelo à silvicultura intensiva, o Brasil se destaca pela elevada produção agroindustrial, especialmente de cana-de-açúcar, cuja produção média anual ultrapassa 750 milhões de toneladas, posicionando o país como o maior produtor da commodity no continente. Esse volume gera quantidades expressivas de bagaço e palha, resíduos ricos em celulose (até 53,2%) e hemiceluloses, com elevado potencial para processos de polpação (Sampaolesi et al., 2023).

A queima de resíduos da cana-de-açúcar, especialmente bagaço e palha, representa uma das principais fontes de bioeletricidade no Brasil e contribui de forma significativa para a matriz elétrica renovável do país. Essa bioenergia, gerada em usinas de cogeração que utilizam o

bagaço como combustível, tem figurado entre as fontes mais relevantes de energia renovável, com participação expressiva na geração total de eletricidade (Magalhães Jr. et al., 2019).

De forma complementar, a expressiva participação brasileira na produção mundial de milho (11%) e soja (50%) reforça o potencial do país como fornecedor abundante de palhas e caules agrícolas, materiais lignocelulósicos que apresentam teores de celulose de até 39%, ampliando as possibilidades de diversificação do suprimento de fibras para a indústria de base florestal (Magalhães Jr. et al., 2019).

Chile

País de histórica expertise na produção de celulose, o Chile está entre os maiores produtores do mundo, contribuindo com cerca de 2,8% da produção mundial e 6,9% da produção com destino a exportação (EPE, 2022). Em 2023, o país exportou US\$ 2,7 bilhões, ocupando a sexta posição no ranking, liderada pelo Brasil. Neste mesmo ano, o pioneiro alcançou 4,7 milhões de toneladas de polpa produzidas (IBÁ, 2024).

No contexto da produção agrícola analisada, a viticultura destaca-se como a principal cultura em volume (Tabela 1). O Chile figura entre os maiores produtores e exportadores mundiais de uvas de mesa, embora tenha registrado queda significativa na produção nas últimas safras, em parte devido ao aumento da concorrência internacional (USDA, 2023; ITC, 2024). Do ponto de vista industrial, a vitivinicultura gera anualmente cerca de nove milhões de toneladas de bagaço, correspondentes a aproximadamente 20% da massa das uvas destinadas à vinificação, configurando um resíduo agroindustrial de grande relevância e elevado potencial de aproveitamento em cadeias produtivas associadas à bioeconomia e à economia circular (Goula et al., 2016).

Nesse sentido, a literatura já apresenta estudos que exploram o uso do bagaço de uva em aplicações tecnológicas, com destaque para a produção de nanocristais de celulose. Esses trabalhos demonstram que o bagaço pode ser processado para a obtenção de materiais com elevada cristalinidade e boa estabilidade térmica e mecânica, adequados para o reforço de embalagens, géis e outros nanocompósitos. Tais aplicações ampliam as possibilidades de valorização desse resíduo agroindustrial em setores como o alimentício, farmacêutico e o de materiais avançados (Coelho et al., 2018).

Embora o Chile não apresente um volume agrícola tão expressivo quanto o de alguns países vizinhos, o país compensa essa limitação com uma forte atuação no setor florestal. A indústria florestal chilena, baseada principalmente em plantações de *Pinus* e *Eucalyptus*,

contribui de forma relevante para a produção de celulose, posicionando o Chile como o quarto maior exportador mundial entre 2015 e 2019 (Klein e Luna, 2022). Mais de 90% da produção nacional é destinada ao mercado externo, o que evidencia a vocação exportadora e o elevado grau de tecnificação do setor.

Do ponto de vista da biomassa agrícola e florestal, o Chile gera resíduos relevantes provenientes tanto da indústria vitivinícola quanto da cadeia madeireira, incluindo restos de poda e bagaço de uva (Sampaolesi et al., 2023). Embora os volumes absolutos sejam inferiores aos observados em grandes produtores agrícolas, esses resíduos apresentam características favoráveis para processos de polpação e bioconversão, além de elevado valor agregado em aplicações de nicho, como celuloses especiais e papéis diferenciados, a exemplo do chamado “papel de uva”.

Colômbia

A Colômbia se destaca na América do Sul como um importante produtor agroindustrial, com elevado potencial para valorização de resíduos lignocelulósicos na cadeia de produção de celulose. O país é responsável por aproximadamente 25% da biomassa residual direta da América do Sul, atrás apenas do Brasil. Esse volume provém majoritariamente da produção de cana-de-açúcar, especialmente para açúcar mascavo, cujos resíduos incluem bagaço e restos de moagem (Sampaolesi et al., 2023).

A composição dos resíduos colombianos demonstra qualidade significativa para aplicação em biorrefinarias voltadas à produção de celulose. O bagaço de cana colombiano apresenta teores de celulose que podem alcançar 53,2%, com até 29,4% de hemicelulose, o que o posiciona entre os materiais mais promissores da região para delignificação e polpação. Além disso, resíduos da produção de açúcar da cana também revelam composição favorável, com teores de celulose entre 36% e 43,6%, reforçando o potencial dessa biomassa residual para conversão em polpa celulósica (Sampaolesi et al., 2023). Outro diferencial relevante da Colômbia reside na gestão estruturada de resíduos urbanos. Estima-se que cerca de 52,7% da biomassa residual indireta do país provenha de resíduos de poda de árvores urbanas, um tipo de biomassa frequentemente negligenciado, mas com potencial significativo para aplicações industriais e energéticas (Sampaolesi et al., 2023).

O país é colocado em 5º lugar no mundo em capacidade instalada de produção de celulose a partir de fibras não madeireiras: 252 mil toneladas/ano, representando 46,8% da capacidade instalada nacional, posicionando o país entre os cinco maiores produtores mundiais

de polpa não madeireira (Abd El-Sayed et al., 2020). A Colômbia é citada como um país que já domina tecnicamente a produção de polpa a partir de fibras lignocelulósicas não madeireiras, mas ainda precisa avançar em escala, especialização e parcerias internacionais.

No setor de produção de oleaginosas, a Colômbia é líder continental na produção de palma de óleo, representando 53% da produção sul-americana. Essa cadeia produtiva gera grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, como cachos de frutos, casca de amêndoas, fibra de mesocarpo e folhas. Esses resíduos apresentam teores de celulose médios que variam entre 28% e 46%, sendo adequados para a produção tanto de bioenergia quanto de materiais renováveis como celulose microfibrilada ou enzimas (Magalhães Jr. et al., 2019).

A projeção para 2025 aponta que a Colômbia será uma das líderes regionais na geração de biomassa vegetal, com destaque para os resíduos provenientes da produção de cana-de-açúcar, óleo de palma e arroz. As estimativas indicam que esses resíduos devem alcançar volumes de aproximadamente 13 milhões de toneladas cada para a cana-de-açúcar e o óleo de palma, e cerca de 3,4 milhões de toneladas no caso do arroz (Magalhães Jr. et al., 2019).

Embora o uso atual da biomassa lignocelulósica na Colômbia esteja majoritariamente voltado para a geração de energia elétrica por cogeração em usinas, estudos apontam que o país pode ser protagonista na produção regional de açúcares fermentáveis e celulose alternativa. É estimado que, somando as principais *commodities* agrícolas (cana, milho e soja), a produção potencial de biomassa lignocelulósica na América do Sul pode atingir 900 milhões de toneladas até 2025, sendo a Colômbia um dos principais contribuintes. Essa biomassa permitiria, em teoria, a produção de 550 milhões de toneladas de açúcares fermentáveis ou celulose regenerada, abrindo caminho para produtos de alto valor agregado (Magalhães Jr. et al., 2019).

Apesar de não figurar entre os principais exportadores de celulose atualmente, a Colômbia possui uma base científica e tecnológica favorável à implantação de biorrefinarias, incluindo a possibilidade de uso de enzimas produzidas a partir de microbiota fúngica nativa, como celulases e ligninases (Sampaolesi et al., 2023). Essa abordagem pode viabilizar processos enzimáticos mais baratos e adaptados ao perfil da biomassa local.

Portanto, o cenário colombiano revela uma oportunidade estratégica para diversificação da matriz produtiva e para inserção sustentável na cadeia latino-americana da celulose, especialmente considerando os avanços em tecnologias de valorização de resíduos e as políticas públicas voltadas à bioeconomia circular.

Argentina

De acordo com os dados da FAO (2023), as principais culturas agrícolas produzidas na Argentina são milho, soja, cana-de-açúcar e trigo, correspondente a uma produção de cerca de 94,4 milhões de toneladas no ano de 2023. As regiões com maior destaque são de Buenos Aires, Córdoba, Santa Fe, Tucumán, entre outras. Além disso, Argentina é o terceiro maior produtor de cana-de-açúcar da América do Sul, gerando volumes expressivos de bagaço, resíduo lignocelulósico valioso para produção de bioenergia, bioproductos e possivelmente celulose alternativa (Magalhães et al., 2019).

A Argentina destaca-se como uma das principais potências agrícolas da América do Sul, com vastas áreas cultivadas e uma produção expressiva de grãos, especialmente soja, milho, trigo e girassol. O setor agroindustrial argentino é altamente mecanizado e orientado para a exportação, contribuindo significativamente para o PIB nacional e gerando milhões de toneladas de produtos agrícolas a cada safra. Além dos grãos, o país também se destaca na produção de frutas, vinhos, açúcar, carnes e derivados do leite, formando uma base diversificada para a geração de resíduos agroindustriais (Sampaolesi et al., 2023).

No contexto da geração de resíduos lignocelulósicos da produção agrícola, a Argentina ocupa uma posição de destaque na região, especialmente em relação aos chamados resíduos indiretos, aqueles provenientes do processamento industrial de matérias-primas agrícolas. O país é responsável por cerca de 45% do total de biomassa residual indireta gerada na região, superando inclusive o Brasil nesse aspecto. Os principais resíduos indiretos argentinos são subprodutos das indústrias madeireira (31%) e alimentícia, com destaque para resíduos de usinas de processamento de amendoim, girassol, frutas (banana, mirtilo, cítricos, frutas de caroço), além de resíduos urbanos sólidos e resíduos de poda de árvores. Já entre os resíduos diretos, destacam-se o bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de chá, videira, banana e arroz, além de resíduos florestais (Sampaolesi et al., 2023).

A valorização desses resíduos agrícolas representa uma grande oportunidade para a Argentina avançar em direção a uma economia circular e sustentável. Diversos estudos e projetos científicos têm focado no aproveitamento desses resíduos para a produção de bioenergia, biocombustíveis, biopolímeros e outros bioproductos de alto valor agregado. No país, o desenvolvimento e a inovação tecnológica no setor de biomassa lignocelulósica ainda são limitados quando comparados a outros países líderes mundiais. Segundo levantamento de bancos de patentes especializados, entre 2008 e 2018, a América do Sul registrou cerca de 480 patentes relacionadas ao termo “lignocel”, das quais apenas 5% tiveram origem na Argentina. O país ocupa a segunda posição na região, atrás do Brasil (que responde por 89% dos depósitos

sul-americanos), mas ainda está distante de polos globais como China, Estados Unidos e União Europeia, que concentram milhares de registros (Magalhães et al., 2019).

Assim, a Argentina não apenas se consolida como produtora agrícola, mas também como um polo estratégico potencial para o desenvolvimento de tecnologias de valorização de resíduos, contribuindo para a sustentabilidade regional e global.

PRINCIPAIS CULTURAS AGRÍCOLAS PRODUZIDAS NA AMÉRICA LATINA

Cana de açúcar

A cana-de-açúcar, principal cultura produzida no Brasil em volume, gera resíduos como folhas e ponteiras (palha) e bagaço, este último já parcialmente utilizado em sistemas de cogeração de energia. A constituição lignocelulósica desta cultura agrícola o que o torna um material promissor para aplicações como a produção de celulose ou bioetanol. A grande vantagem desse resíduo está na sua abundância e na existência de uma infraestrutura logística parcialmente desenvolvida em torno das usinas sucroalcooleiras (Magalhães Jr. et al., 2019).

Estudos indicam que o bagaço de cana-de-açúcar é um material promissor para a indústria de papel. Entende-se que a substituição das fibras de eucalipto por fibras de bagaço resultou em papéis com melhor resistência ao rasgo, maior resistência à tração, além de melhorias na porosidade e no teor de umidade (Paula et al., 2019). A composição química do bagaço de cana varia conforme a região e o processo industrial, mas, em geral, apresenta teores elevados de celulose (entre 37% e 53%), hemicelulose (14% a 29%) e lignina (21% a 33%).

A cana-de-açúcar desempenha um papel central na geração de biomassa residual na América do Sul, sendo especialmente relevante em países como Brasil e Colômbia, que juntos respondem por 97% da biomassa residual direta da região. Essa biomassa provém, sobretudo, das extensas plantações da cultura, que é amplamente cultivada para fins alimentícios e energéticos. Além disso, cerca de 20% da biomassa residual indireta está relacionada à indústria alimentícia, tendo a cana como um dos principais insumos (Alegre, 2020).

O principal resíduo gerado a partir da cana-de-açúcar é o bagaço, subproduto resultante da extração do caldo durante a produção de açúcar, etanol e biocombustíveis de primeira geração (Rocha et al., 2015). Esse bagaço é tradicionalmente utilizado na cogeração de energia dentro das próprias usinas, mas vem sendo cada vez mais valorizado como matéria-prima em biorrefinarias para a obtenção de produtos de maior valor agregado, como bioetanol de segunda geração e bioproductos derivados da celulose (Magalhães et al., 2019).

A produção de bagaço de cana é expressiva em diversos países sul-americanos. O Brasil, maior produtor mundial de cana, concentra os maiores volumes desse resíduo, seguido por Colômbia e Argentina (Magalhães et al., 2019). No Paraguai, o bagaço representa a principal fonte de biomassa indireta, especialmente associada à produção de bioetanol. Segundo estimativas da indústria, para cada quilo de cana-de-açúcar processada, obtém-se aproximadamente 0,320 kg de bagaço. No Peru, por sua vez, a cana representa cerca de 27% dos resíduos agrícolas diretos do país (Sampaolesi et al., 2023)

No Brasil, a cana-de-açúcar responde por aproximadamente 41% do total de resíduos agrícolas gerados no país, destacando-se pelo potencial de aproveitamento industrial de seus resíduos lignocelulósicos. Apesar da composição química favorável desses materiais para uso em produtos celulósicos, ambos apresentam usos competitivos consolidados. O bagaço é majoritariamente utilizado para cogeração de energia nas próprias usinas, enquanto a palhada é parcialmente mantida no campo por razões agronômicas, além de competir com usos como queima e alimentação animal. Considerando essas restrições, estimativas conservadoras indicam que apenas 10% do bagaço e 75% da palhada estariam disponíveis para novos usos (Araújo et al., 2019).

No caso do bagaço de cana, a escolha entre seu uso como combustível nas caldeiras das usinas ou como matéria-prima para a fabricação de papel envolve uma análise cuidadosa do custo de substituição energética. Em muitas usinas, o bagaço é essencial para gerar energia térmica e elétrica, e sua retirada para outros fins requer fontes energéticas alternativas, que podem aumentar os custos operacionais. Essa realidade impõe desafios para a cadeia de suprimento de fibras para a indústria de papel (Abd El-Sayed et al., 2020).

Na literatura é indicada como alternativa o uso de complexos industriais integrados, que unem usinas de açúcar e fábricas de papel, como uma solução promissora. Essa integração reduz significativamente os custos logísticos com o transporte do bagaço e otimiza o uso da energia gerada no próprio sistema. Além disso, facilita o aproveitamento do bagaço recém-produzido, ainda úmido e com características físico-químicas ideais para o processo de polpação, reduzindo perdas por degradação durante o armazenamento (Abd El-Sayed et al., 2020).

Além disso, é importante considerar que o bagaço apresenta uma composição favorável à fabricação de papel, com 43,2% de celulose alfa, 21,2% de pentosas, e 18,2% de lignina, sendo comparável à polpa de madeira dura. Sua fibra média tem comprimento de 1,7 mm e diâmetro de 0,02 mm, o que permite sua aplicação em uma ampla variedade de papéis, como

para impressão e escrita, papel cartão, papel toalha, e papéis especiais como glassine e à prova de gordura, inclusive podendo ser misturado a polpa de madeira.

Em resumo, a viabilidade econômica do uso do bagaço de cana como insumo para a indústria papeleira depende de uma avaliação integrada dos custos energéticos, da logística e da valorização do resíduo. A criação de sistemas industriais compartilhados ou integrados representa uma das soluções mais sustentáveis e eficientes para lidar com o uso competitivo dessa biomassa tão estratégica.

Soja

A soja é um dos cultivos agrícolas mais relevantes da América do Sul, especialmente no Brasil e na Argentina. Essa região é responsável por cerca de 50% da produção mundial de soja, o que ressalta sua importância estratégica tanto para a economia regional quanto para a agroindústria global. No Brasil, a soja gera 32% dos resíduos agrícolas do país, ficando atrás apenas da cana-de-açúcar (28%) e à frente do milho (19%). Esse volume expressivo de biomassa residual evidencia o grande impacto do cultivo de soja na geração de resíduos agroindustriais. Na Argentina, a soja também desempenha papel fundamental, sendo responsável por aproximadamente 45% da biomassa indireta do continente, oriunda em grande parte do processamento industrial e da cadeia alimentícia relacionada (Magalhães Jr. et al., 2019).

A soja é um dos principais cultivos agrícolas do mundo, desempenhando um papel crucial na economia global. Na safra 2024/25, a produção mundial de soja atingiu 420,87 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 146,71 milhões de hectares, segundo dados do USDA. O Brasil consolidou-se como o maior produtor mundial, com uma produção recorde de 167,87 milhões de toneladas, ocupando 47,52 milhões de hectares e apresentando uma produtividade média de 3.533 kg ha^{-1} . Entre os estados brasileiros, destaca-se Mato Grosso, líder nacional na produção, responsável por 49,63 milhões de toneladas e uma produtividade de 3.897 kg ha^{-1} , enquanto Goiás apresenta a maior produtividade média do país, com 4.122 kg ha^{-1} (Embrapa, 2025).

O custo estimado da palha de soja é de aproximadamente US\$ 28 dólares por tonelada, considerando fatores como transporte, tamanho da biorrefinaria, incentivos e participação dos agricultores. Por outro lado, a palha de trigo alcança 53 dólares por tonelada, representando uma diferença de 89%, disparidade que torna a palha de soja uma alternativa mais atraente para processos industriais. Estudos sobre a viabilidade econômica de biorrefinarias que utilizam

palha de soja ainda são escassos, mas há estimativas promissoras (Gonzalez et al., 2023; Golecha, 2016). A produção de soja no Brasil e na Argentina gera, além dos grãos, uma quantidade significativa de resíduos agrícolas, especialmente palha. No caso do Brasil, esse coproduto pode representar entre 120% e 150% da massa dos grãos colhidos, o que corresponde a cerca de 116 milhões de toneladas de palha apenas em safras específicas. A composição da palha de soja apresenta cerca de 34–35 % de celulose, 16–17 % de hemicelulose e aproximadamente 22 % de lignina, valores que a tornam adequada para aplicações como biopolímeros, produção de celulose, papel e materiais biocompósitos (Liu et al., 2015; Tapia-Blácido et al., 2017).

A composição dos resíduos agrícolas da soja é rica em celulose e hemicelulose, polímeros que podem ser decompostos por processos químicos, físicos ou enzimáticos para a obtenção de açúcares fermentáveis. Para isso, são utilizados diversos processos de pré-tratamento, como hidrólise ácida ou alcalina, explosão a vapor, uso de solventes orgânicos e hidrólise enzimática, que têm o objetivo de quebrar a estrutura lignocelulósica dos resíduos (Riseh et al., 2024).

A palha de soja, resíduo agrícola gerado durante o cultivo dessa leguminosa, apresenta elevado potencial para aplicações industriais e energéticas. A geração desse resíduo está diretamente associada à produtividade dos grãos, a qual varia conforme condições climáticas, práticas de manejo e adaptação regional da cultura. Do ponto de vista energético, a palha de soja possui poder calorífico inferior de aproximadamente $14,6 \text{ MJ kg}^{-1}$, o que a caracteriza como uma fonte relevante de biomassa renovável. No entanto, recomenda-se que cerca de 70% desse material permaneça no campo a fim de preservar a fertilidade do solo e a ciclagem de nutrientes, embora seja tecnicamente possível ampliar a taxa de remoção mediante estratégias adequadas de reposição nutricional. Esse equilíbrio entre aproveitamento e conservação reforça o papel estratégico da palha de soja no contexto de práticas agrícolas sustentáveis e da bioeconomia (EPE, 2014).

Além disso, a palha de soja tem sido amplamente estudada devido à sua elevada proporção de celulose em relação à lignina, um fator determinante na eficiência dos processos de deslignificação e conversão para biocelulose. Estudos revelam que a razão celulose/lignina da palha de soja é uma das mais altas entre os resíduos agrícolas, o que a torna uma escolha técnica preferível para o desenvolvimento de produtos derivados de celulose (Araújo et al., 2019).

A disponibilidade de resíduos da soja também é um fator estratégico. No Brasil, onde a área cultivada de soja é superior a 38 milhões de hectares, a quantidade total de resíduos gerados

é estimada em milhões de toneladas anuais. Calcula-se que mais de 75% desses resíduos estejam disponíveis para aplicações industriais, uma vez que não são usados para alimentação animal ou outras práticas agrícolas competitivas. Essa abundância, combinada com a distribuição geográfica do cultivo, facilita a logística e a viabilidade econômica de sua coleta e processamento (Araújo et al., 2019).

Diferentemente de outras matérias-primas comuns em biorrefinarias, como milho e cana-de-açúcar, a soja se destaca por oferecer uma grande variedade de componentes fundamentais para a criação de biorrefinarias com uma ampla gama de produtos. O óleo de soja, por exemplo, pode ser transformado em biodiesel por meio do processo de transesterificação. Os resíduos da biomassa resultantes do descascamento e da extração são ricos em celulose, sendo excelentes para a produção de papel. Já a lignina e as hemiceluloses, após passarem por processos de separação e solubilização, formam um licor negro que pode ser utilizado como combustível em caldeiras de recuperação. Nesse sistema, o calor gerado é suficiente para atender à demanda energética da operação, com a possibilidade de exportar o excedente como energia elétrica (Gonzales et al., 2023).

A alta disponibilidade da palha de soja, com aproximadamente 75% de sua geração considerada apta para usos técnicos, reforça seu potencial como matéria-prima versátil em biorrefinarias e indústrias sustentáveis. Essa ampla disponibilidade permite que a palha de soja seja utilizada em diversas aplicações competitivas, incluindo a produção de bioetanol celulósico, materiais lignocelulósicos, como papel e nanocelulose, e geração de energia renovável por gaseificação ou queima direta. Além disso, sua abundância e baixo custo tornam a palha de soja uma alternativa viável e atraente em comparação com outras biomassas, como a palha de trigo, especialmente em regiões onde o cultivo de soja é predominante. Essa combinação de disponibilidade e competitividade posiciona a palha de soja como um recurso estratégico para o desenvolvimento de uma bioeconomia sustentável (Gonzalez et al., 2023; Araújo et al., 2019).

Milho

O milho (*Zea mays* L.) é a cultura de grãos mais produzida no mundo, sendo um alimento básico para muitas populações e um dos principais componentes da ração animal (Vallejo et al., 2021).

O milho é um dos cereais mais cultivados no mundo, sendo uma cultura de importância central para segurança alimentar, nutrição animal e cadeia industrial de bioproductos. Segundo

dados da FAO, produção global de milho ultrapassou 1,24 bilhão de toneladas em 2023, com os Estados Unidos, China e Brasil entre os principais produtores mundiais. Esse volume de produção gera grandes quantidades de resíduos agroindustriais, principalmente palha (folhas e colmos) e sabugo (a parte central da espiga) (Millat et al., 2019). Assim como outros resíduos agrícolas, os coprodutos do milho são fontes lignocelulósicas, podendo alcançar uma composição média de até 69,2% de celulose, 22,8% de hemicelulose e 8% de lignina no sabugo (Millat et al., 2019). As fibras de milho são compostas principalmente por lignina, celulose e hemicelulose, com propriedades específicas para diferentes aplicações em biorrefinarias (Chen et al., 2009; Van Dongen et al., 2011; Zhang et al., 2012);.

Os resíduos do milho, como o sabugo e a palha, possuem alta densidade energética e são amplamente aproveitados na produção de bioenergia, materiais compósitos, adsorventes, catalisadores e diversos bioquímicos de valor agregado (Barbosa et al., 2022). O sabugo de milho, em particular, é fonte de carbono ativado para supercapacitores e outros materiais avançados (Reddyguntla et al., 2023).

Entre as aplicações energéticas, destaca-se o uso do sabugo de milho como biomassa sólida, podendo ser empregado diretamente na queima em caldeiras ou previamente processado na forma de carvão vegetal ou pellets. No entanto, o avanço mais significativo tem ocorrido na área de biocombustíveis de segunda geração (2G). O sabugo é um dos principais insumos utilizados na produção de bioetanol 2G, com várias iniciativas piloto e comerciais (Gandam et al., 2022). A elevada proporção de celulose e hemicelulose contribui para altas taxas de conversão em etanol, enquanto a lignina pode ser aproveitada termicamente ou para síntese de materiais (Steven et al., 2023). Além do bioetanol, a biomassa do milho tem sido explorada para a produção de xilitol, ácido láctico, enzimas hidrolíticas, açúcares fermentáveis, antioxidantes, compostos fenólicos e furfural, entre outros produtos de interesse da química verde.

Os talos de milho são utilizados como fonte de energia no meio rural e alimentação animal, enquanto a palha de milho é amplamente empregada em fertilizantes, alimentação, cultivo de cogumelos comestíveis e como matéria-prima industrial (Ritota e Manzi, 2019; Zárate-Salazar et al., 2020). A palha melhora o teor de matéria orgânica, a fertilidade do solo e suas propriedades físico-químicas (Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2019). De toda forma, estas categorias de resíduos também podem ser consideradas como fontes viáveis para a obtenção de fibras de celulose (de Andrade et al., 2019).

Apesar do seu enorme potencial, a adoção industrial dos resíduos do milho ainda enfrenta desafios estruturais e logísticos. A coleta mecanizada e eficiente do sabugo e da palha, sem comprometer a estrutura do solo e a fertilidade, exige tecnologias específicas e integração

com sistemas de produção mecanizados. Além disso, os custos de transporte e estocagem de uma biomassa com baixa densidade aparente e alto volume tornam-se um fator limitante, principalmente em regiões distantes de polos industriais ou biorrefinarias. Ademais, o transporte e armazenamento acarretam elevados custos, uma vez que essa biomassa possui baixa densidade aparente ($20\text{-}40 \text{ kg/m}^3$ solto; até cerca de 200 kg/m^3 em fardos), o que exige espaços e esforços logísticos consideráveis (Sokhansanj et al., 2002).

Mesmo com esses impeditivos, é consenso na literatura que o milho e seus resíduos constituem uma das fontes mais promissoras de biomassa agrícola para produção de energia, bioquímicos e materiais sustentáveis. A valorização da palha e do sabugo de milho representa não apenas uma oportunidade de diversificação de renda para produtores, mas também uma estratégia de agregação de valor à cadeia produtiva, redução do desperdício e fortalecimento da transição para uma economia de baixo carbono (Fleschhut et al., 2016).

A disponibilidade dos resíduos do milho é notadamente expressiva. A produção anual brasileira de milho (131,9 milhões de toneladas em 2023) gera três principais resíduos: sabugo, palha/casca, e restos de campo. Considerando uma proporção de 40% referente a taxa de remoção sustentável e considerando 60% de uso competitivo (Araújo et al., 2019), a disponibilidade anual estimada para cada categoria resíduo é de:

- **Sabugo de milho:** $2.993 \text{ mil ton ano}^{-1}$
- **Palha/casca de milho:** $1.995 \text{ mil ton ano}^{-1}$
- **Restos deixados no campo:** $17.778 \text{ mil ton ano}^{-1}$

Esse volume faz do milho uma das principais fontes de biomassa lignocelulósica no Brasil. A composição química média desses resíduos reforça sua atratividade: o sabugo apresenta celulose entre 31,2 e 45%, hemicelulose entre 35 e 43,1% e lignina entre 15 e 16,5%. A palha contém cerca de 40,8% de celulose, 34% de hemicelulose e 22% de lignina (Tabela 2), o que os torna altamente adequados para produção de nanocelulose, biofilmes, compósitos biodegradáveis e reforços de polímeros naturais.

Trigo

A palha de trigo é um dos resíduos lignocelulósicos mais gerados globalmente, sendo considerada um subproduto abundante, renovável e de baixo custo da agricultura. Estima-se que cerca de 529 milhões de toneladas de palha de trigo sejam produzidas anualmente no

mundo, com destaque para a União Europeia, China e Estados Unidos como principais geradores. Apenas a China acumula mais de 110 milhões de toneladas desse resíduo por safra (Millati et al., 2019). No Brasil, a produção de trigo, concentrada majoritariamente no Sul do país (especialmente no Paraná e Rio Grande do Sul), gera aproximadamente 6 milhões de toneladas de palha por ano, das quais pelo menos 50% poderiam ser tecnicamente disponíveis para aproveitamento industrial e energético (Tufail et al., 2020).

A composição química da palha de trigo revela seu alto valor como biomassa. Trata-se de um material lignocelulósico constituído, em média, por 35–45% de celulose, 20–30% de hemicelulose e 10–25% de lignina, além de conter quantidades significativas de cinzas (7–10%), sílica (até 46%) e outros minerais como potássio, magnésio e cálcio. Esses componentes estruturais, embora ofereçam resistência mecânica à planta, dificultam sua conversão bioquímica, exigindo pré-tratamentos físicos, químicos ou biológicos que rompam as ligações entre os polímeros da parede celular (Millati et al., 2019; Tufail et al., 2020). O interesse industrial sobre a palha de trigo tem crescido significativamente devido ao seu potencial de conversão em bioproductos de alto valor agregado, alinhados aos princípios da bioeconomia e da economia circular. Entre os principais usos, destacam-se a produção de bioetanol de segunda geração, biogás, bio-hidrogênio, nanocelulose, polpas para papel, painéis compostos, compósitos *bio-based* e coprodutos de alto valor, com forte ênfase na valorização da lignina (Sholokhova et., 2025).

No setor de celulose e papel, a palha de trigo foi historicamente utilizada como matéria-prima alternativa à madeira. No entanto, foi sendo substituída em larga escala devido à dificuldade no tratamento do licor negro contendo altos teores de sílica, o que prejudica a recuperação de álcalis no processo *Kraft*. Com o avanço do *biopulping* (biopolpação), processo que utiliza fungos e enzimas para remover lignina de maneira seletiva, a palha de trigo volta a ser uma alternativa de insumo. Estudos demonstram que a aplicação de enzimas como xilanase e pectinase pode aumentar o rendimento da polpa, reduzir o número *kappa* (indicador de lignina residual) e melhorar propriedades óticas e mecânicas do papel, como brilho, índice de rasgo e comprimento de ruptura (Li et al., 2023).

Além disso, a palha de trigo também apresenta propriedades interessantes para uso na produção de materiais compósitos e compósitos estruturais biodegradáveis. Sua leveza, baixa densidade e elevada disponibilidade tornam o material atrativo para substituição parcial ou total da madeira em painéis aglomerados, embalagens biodegradáveis e aplicações de isolamento térmico e acústico (Tufail et al., 2020). A utilização de fibras naturais como a do trigo em

substituição às sintéticas pode reduzir significativamente o impacto ambiental de diversos setores industriais, desde a construção civil até o setor automotivo.

Do ponto de vista ambiental, a valorização da palha de trigo como recurso/insumo tecnológico pode contribuir de forma significativa para mitigar impactos negativos relacionados ao seu descarte inadequado. A queima da palha a céu aberto, ainda praticada em muitas regiões (como a Índia), contribui para a emissão de gases poluentes e material particulado, além de comprometer a qualidade do solo e da biodiversidade (Riseh et al., 2024). A incorporação de forma desmedida da palha ao solo, por outro lado, pode dificultar práticas agrícolas subsequentes.

Apesar de seu potencial, o aproveitamento industrial da palha de trigo ainda enfrenta desafios relevantes. Do ponto de vista tecnológico, destacam-se os custos associados aos pré-tratamentos necessários para romper a estrutura lignocelulósica. Embora a literatura indique que métodos alcalinos sejam eficazes para resíduos agrícolas como arroz, trigo, milho e sorgo, ao promover a remoção parcial da lignina e o aumento do rendimento de celulose (Riseh et al., 2024), sua aplicação em escala industrial pode ser limitada por custos operacionais e pela necessidade de tratamento dos efluentes gerados. Além disso, aspectos logísticos relacionados à coleta, transporte e armazenamento da palha representam entraves adicionais, uma vez que se trata de um material volumoso e de baixo valor econômico intrínseco. Por fim, a remoção excessiva desse resíduo sem práticas adequadas de manejo pode comprometer a fertilidade do solo e o equilíbrio orgânico dos sistemas agrícolas (Araújo et al., 2019).

Com base no relatório da Market Research Future (2024) sobre o mercado global de palha de trigo (*wheat straw*), é possível observar um cenário de forte crescimento, impulsionado pelas crescentes demandas por soluções sustentáveis e biodegradáveis, especialmente no setor de alimentos e bebidas. Em 2024, o mercado foi avaliado em US\$ 1,5 bilhão, com projeção de crescimento para US\$ 3,5 bilhões até 2034, o que representa uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 8,84% no período de 2025 a 2034. Esse avanço é sustentado pelo aumento do consumo de embalagens ecológicas, substituição de plásticos de uso único, e pelo aproveitamento de resíduos agrícolas na economia circular.

Nesse contexto, o uso da palha de trigo tem se diversificado entre vários setores. No setor agrícola, ela é valorizada como material de cobertura do solo e na alimentação animal. Já no setor industrial, destaca-se na produção de biomassa para geração de energia, papel reciclado, biocompósitos, embalagens biodegradáveis e até mesmo materiais têxteis. Entre as aplicações mais representativas, destacam-se a cama animal, a produção de papel, e o uso como

matéria-prima energética, com participação expressiva na composição de *pellets* e briquetes (Tufail et al., 2020).

É importante considerar o uso competitivo dos resíduos agrícolas como fonte alternativa da produção de celulose. Na tabela 3 é possível observar a fração de subproduto de diversas culturas agrícolas que fica disponível subtraindo a fração que será empregada para outros usos mais consolidados, como a queima para geração de energia, alimentação animal e produção de biofertilizante, entre outros. É importante ressaltar que o volume em abundância da maioria dos resíduos avaliados até aqui, por si só, não indica necessariamente a grandeza de matéria-prima disponível para abastecimento de uma fábrica de celulose, por exemplo.

Tabela 3 - Disponibilidade média de resíduos agrícolas para uso na produção de bioprodutos a base de celulose. Retirado e adaptado de: Araújo, Machado e Vilarinho, 2019.

Resíduo	Disponibilidade (%)	Usos competitivos
Bagaço de cana-de-açúcar	10	Queimado em caldeiras de vapor no próprio moinho para produzir eletricidade.
Folhas/pontas de cana-de-açúcar	75	Não identificado
Casca de milho, sabugo e palha	40	Alimentação animal
Casca de arroz	25	Secagem, geração de pó em moinhos de arroz e produção de cama para frangos.
Palha de arroz	75	Geralmente queimado no campo de colheita.
Palha de feijão	50	Utilizado para produzir carvão ativado e como substrato para a produção de outras culturas.
Palha de mandioca	75	Utilizado como ração animal, mas seu princípio tóxico limita esse tipo de aplicação.
Resíduos de laranja	0	Aromatizante e ração animal.
Resíduos de uva	0	Utilizado nas indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética.
Resíduos de coco	90	Biomassa, compósitos, fertilizante agrícola, carvão ativado e enchimento para bancos automotivos.
Caroço e casca de manga	50	Alimentação animal
Bagaço de tomate	50	Fracionamento de componentes, extração de carotenoides e biocombustíveis.
Casca de batata	50	Ração para gado
Bagaço de maçã	50	Fertilizante orgânico e ração animal
Casca de cacau	50	Valorização energética
Casca de café	50	Camas para animais
Talo de algodão	75	Não identificado
Palha de soja	75	Não identificado

Fonte: Adaptado de Araújo, Machado e Vilarinho (2019).

5 Considerações finais

Apesar do elevado potencial técnico e ambiental, ainda são escassos os estudos que avaliem de forma abrangente o impacto econômico da incorporação de resíduos agrícolas na produção de papel e celulose. No entanto, evidências apontam que, em determinados contextos, especialmente em países com ampla disponibilidade de resíduos lignocelulósicos e mercados favoráveis, é possível viabilizar a produção de papel utilizando 100% de matéria-prima residual, desde que observadas certas condições. Por outro lado, a substituição parcial ou total de insumos tradicionais por resíduos agrícolas de baixo custo apresenta-se como uma estratégia eficaz para reduzir significativamente o custo por tonelada de celulose produzida, ao mesmo tempo em que pode promover avanços em sustentabilidade e economia circular (Gonzalo et al., 2017).

O uso de fibras oriundas de resíduos agrícolas também é considerado uma das formas de direcionar esforços para endereçar preocupações ambientais da indústria de papel (Chauhan e Lal Meena, 2020). Sob a perspectiva morfológica, a literatura indica que as fibras de palha de trigo, talos de milho, palha de canola, bagaço de cana-de-açúcar e casca de coco apresentaram os parâmetros mínimos necessários, sendo, portanto, consideradas as mais apropriadas para os processos de fabricação de papel (Tsalagkas et al., 2021).

Fibras não madeireiras, como os resíduos agrícolas, podem ser utilizadas para a produção de celulose e papel de forma mais sustentável, por serem renováveis, abundantes e de baixo custo. Entre os materiais já empregados por diversas empresas do setor estão os talos de algodão, palhas de arroz e de trigo, bagaço de cana-de-açúcar e talos de milho (Worku et al., 2023).

O aproveitamento de resíduos agrícolas na produção de celulose e produtos de valor agregado representa uma oportunidade estratégica de alto impacto ambiental, econômico e social. Esses resíduos oferecem uma alternativa sustentável à biomassa lenhosa, contribuindo para a redução do desmatamento, a mitigação das mudanças climáticas e a promoção da economia circular. Além de gerar renda adicional para agricultores e fomentar novos mercados verdes, o uso de resíduos lignocelulósicos possibilita a produção de produtos biodegradáveis, bioenergia e biofertilizantes, além de insumos para papel e outros biocompósitos (Sholokhova et al., 2025).

A celulose, principal componente fibroso desses resíduos, é o polímero natural mais abundante da Terra, e vem sendo cada vez mais utilizada como matéria-prima renovável na

agricultura, indústria, medicina e embalagens. Apresenta propriedades desejáveis para diversos setores da bioeconomia como ser biodegradável, leveza, resistência mecânica, facilidade de modificação química e alta hidrofobicidade, características consideradas ideais para a fabricação de filmes, compósitos, hidrogéis, aerogéis e biofertilizantes de liberação controlada. Além disso, sua abundância e baixo custo tornam a celulose extraída de resíduos agrícolas uma solução acessível e promissora para países em desenvolvimento (Carlström et al., 2020; Vallejo et al., 2021).

Estudos destacam que resíduos fibrosos, como palhas e bagaços, possuem elevada concentração de celulose e baixo teor de lignina recalcitrante, sendo mais facilmente polpáveis e exigindo menos etapas de branqueamento do que a madeira. Esses materiais, amplamente distribuídos globalmente, podem ser cultivados em solos pobres e com pouca água, garantindo um fornecimento previsível de matéria-prima. Ainda assim, desafios técnicos persistem, como o alto teor de umidade das palhas (chegando a 70%), a presença de sílica, o curto comprimento das fibras e a dificuldade de alcançar altos níveis de alvura sem o uso de agentes clorados (Worku et al., 2023).

É importante evidenciar que a análise do uso de resíduos agrícolas no contexto da bioeconomia, exige dados georreferenciados, padronizados e atualizados sobre oferta e demanda de biomassa, para orientar políticas públicas e estratégias de aproveitamento. Assim, entende-se que a inclusão de variáveis socioeconômicas na análise é essencial para compreender a dinâmica dos sistemas de bioenergia e promover uma conexão eficaz entre os fornecedores de resíduos e as unidades consumidoras de biomassa. Logo, o setor de produção de celulose e papel se beneficiaria dessas práticas organizadas e orientadas a geração de resultado (Klein e Luna, 2022).

Portanto, diante do exposto, o uso inteligente dos resíduos agrícolas, especialmente para extração e aplicação da celulose, representa uma estratégia essencial para atender à crescente demanda por materiais sustentáveis, reduzir impactos ambientais, diversificar fontes de energia e fortalecer economias locais. Essa abordagem não apenas substitui recursos não renováveis, como também valoriza subprodutos agrícolas antes descartados, inserindo-os em cadeias produtivas de alto valor e contribuindo para a construção de um futuro mais resiliente e sustentável.

Perspectivas futuras para o uso de biomassa agrícola na produção de celulose

A prospecção futura da produção de celulose a partir de biomassa não madeireira destaca o potencial do uso de resíduos agrícolas lignocelulósicos como palha de arroz, trigo, bagaço de cana e talos de milho, que possuem estruturas menos densas e, por isso, podem ser processados sob pressão atmosférica, eliminando a necessidade de reatores de alta pressão e reduzindo os custos de capital. No entanto, o elevado volume inerente à biomassa agrícola dificulta o transporte, e a quantidade disponível localmente muitas vezes não é suficiente para operações em larga escala (Jahan et al., 2020).

Para viabilizar essa cadeia produtiva, propõe-se o envolvimento direto dos agricultores por meio de sociedades cooperativas, semelhantes às existentes entre produtores de cana na Índia e EUA. Com apoio de empreendedores e ONGs, essas cooperativas podem integrar moinhos de celulose a biorrefinarias, agregando valor aos resíduos com impacto ambiental mínimo. Além da celulose, subprodutos como lignina e hemiceluloses podem ser convertidos em produtos *biobased* (baseados em matéria-prima biológica), substituindo parcialmente derivados do petróleo. Essa abordagem integrada e sustentável promove benefícios econômicos diretos aos agricultores e impulsiona o desenvolvimento das economias locais (Jahan et al., 2020).

Além disso, para que um resíduo agrícola lignocelulósico seja considerado viável na produção de papel e papelão, é necessário que esteja disponível em grande quantidade e que sua oferta seja estável e contínua ao longo dos anos. O material deve ser de fácil coleta, enfardamento e transporte até o local de processamento. Além disso, deve apresentar baixo custo e não possuir outra aplicação mais valiosa ou lucrativa do que seu uso na fabricação de papel. Também é essencial que o material possa ser armazenado por, no mínimo, um ano sem sofrer deterioração significativa, e que as exigências para seu armazenamento e proteção não representem custos elevados (Fahmy et al., 2017).

A produção de fibras naturais emprega milhões de pessoas, especialmente em países em desenvolvimento, onde predominam operações de pequeno e grande porte. Essas fibras são majoritariamente cultivadas em climas tropicais e subtropicais, típicos dessas regiões. Nos últimos anos, a biorrefinaria da biomassa agrícola celulósica para obtenção de fibras tem ganhado destaque. Apesar do grande potencial e baixo custo desses materiais, ainda há carência de integração de processos e desenvolvimento tecnológico específicos. Para viabilizar a produção eficiente, é necessário adaptar os métodos às exigências de custo, quantidade e qualidade das fibras, conforme suas aplicações (Jayaprakash et al., 2022).

6 CONCLUSÕES

A América Latina apresenta alta disponibilidade de resíduos agrícolas lignocelulósicos, com destaque para bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, casca de arroz e palha de trigo como os mais abundantes e promissores para a indústria de celulose.

Esses resíduos possuem composição química e características morfológicas semelhantes às madeiras folhosas (eucalipto), sendo tecnicamente viáveis para polpação desde que submetidos a pré-tratamentos adequados.

Apesar da grande geração anual, o aproveitamento desses resíduos na cadeia produtiva ainda é limitado, indicando um potencial estratégico inexplorado para agregar valor à cadeia agrícola e diversificar o fornecimento de fibras.

A inteligência competitiva é essencial para mapear oportunidades regionais e posicionar a indústria florestal latino-americana frente aos desafios de sustentabilidade e segurança no suprimento de fibras.

O Brasil possui uma infraestrutura robusta e em expansão para o aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar tanto para energia quanto, cada vez mais, como base para produtos derivados, incluindo celulose.

Entre os resíduos agrícolas avaliados, o bagaço de cana-de-açúcar se destaca como a alternativa mais recomendada para a produção de celulose na América Latina, devido à sua ampla disponibilidade, composição lignocelulósica favorável e ao maior número de estudos e tecnologias de processamento desenvolvidos, o que o torna uma opção viável para implementação em curto e médio prazo.

REFERÊNCIAS

- Abd El-Sayed, E. S.; El-Sakhawy, M.; El-Sakhawy, M. A.-M. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp e Paper Research Journal*, v. 35, n. 2, p. 215–230, 2020.
- Alegre, M. FAO update of biomass balance for energy purposes in Argentina (in Spanish). Buenos Aires: FAO, 2020. (Technical Documents Collection, n. 19).
- Araújo, D. J. C.; Machado, A. V.; Vilarinho, M. C. L. G. Availability and suitability of agroindustrial residues as feedstock for cellulose-based materials: Brazil case study. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, p. 2863–2878, 2019.
- Barbosa, B. M., Vaz Jr, S., Colodette, J. L., De Siqueira, H. F., Da Silva, C. M. S., e Cândido, W. L. Effects of Kraft lignin and corn residue on the production of Eucalyptus pellets. *BioEnergy Research*, v. 16, n. 1, p. 484-493, 2023. Chen, L. J.; Xing, L.; Hana, L. Renewable energy from agro-residues in China: solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 2689–2695, 2009. DOI: 10.1016/j.rser.2009.06.025.
- Coelho, C. C. S.; Michelin, M.; Cerqueira, M. A.; Gonçalves, C.; Tonon, R. V.; Pastrana, L. M.; Freitas-Silva, O.; Vicente, A. A.; Cabral, L. M. C.; Teixeira, J. A. Cellulose nanocrystals from grape pomace: production, properties and cytotoxicity assessment. *Carbohydrate Polymers*, v. 192, p. 327–336, 2018.
- Confederação Europeia de Indústria de Papel – CEPI. *Key statistics 2023*. Bruxelas: CEPI, 2024. Disponível em: <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2024/09/Key-Statistics-2023-FINAL-2.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- De Andrade, M. R.; Nery, T. B. R.; de Santana e Santana, T. I.; Leal, I. L.; Rodrigues, L. A. P.; de Oliveira Reis, J. H.; Druzian, J. I.; Machado, B. A. S. Effect of cellulose nanocrystals from different lignocellulosic residues to chitosan/glycerol films. *Polymers*, v. 11, p. 658, 2019.
- de Moraes Rocha, G. J.; Nascimento, V. M.; Goncalves, A. R.; Silva, V. F. N.; Martín, C. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. *Industrial Crops and Products*, v. 64, p. 52–58, 2015.
- Devi, S.; Gupta, C.; Jat, S. L.; Parmar, M. S. Crop residue recycling for economic and environmental sustainability: the case of India. *Open Agriculture*, v. 2, n. 1, p. 486–494, 2017. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. *Celulose e papel: relatório de estudo setorial*. Rio de Janeiro: EPE; IEA Bioenergy; IBA, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-650/Pulp%20and%20paper_EPE+IEA_Portugu%C3%AAs_2022_01_25_IBA.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.
- Fahmy, Y.; Mobarak, F.; El-Sakhawy, M.; Fadl, M. H. Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: Background overview and future prospects. *International Journal of ChemTech Research*, v. 10, n. 2, p. 424–448, 2017.
- Fleschhut, M.; Hülsbergen, K. J.; Thurner, S.; Eder, J. Analysis of different corn stover harvest systems. *Landtechnik*, v. 71, p. 252-270, 2016.

Gandam, P. K.; Chinta, M. L.; Pabbathi, N. P. P.; Baadhe, R. R.; Sharma, M.; Thakur, V. K.; Sharma, G. D.; Ranjitha, J.; Gupta, V. K. Second-generation bioethanol production from corncob – A comprehensive review on pretreatment and bioconversion strategies, including techno-economic and lifecycle perspective. *Industrial Crops and Products*, v. 186, p. 115245, 2022.

Golecha, R. Minimizing the cost of agriculture waste for cellulosic biofuels. *Strategic Planning for Energy and the Environment*, v. 36, n. 2, p. 14–21, 2016.

Gontard, N.; Sonesson, U.; Birkved, M.; Majone, M.; Bolzonella, D.; Celli, A.; Angellier-Coussy, H.; Jang, G.-S.; Verniquet, A.; Broeze, J.; Schaer, B. A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 48, p. 614–654, 2018.

Gonzalez, M.; Pereira-Rojas, J.; Villanueva, I.; Aguero, B.; Silva, I.; Velasquez, I.; Delgado, B.; Hernandez, J.; Rodriguez, G.; Labrador, H.; Barros, H.; Pereira, J. Preparation and characterization of cellulose fibers from Meghatyrsus maximus: applications in its chemical derivatives. *Carbohydrate Polymers*, v. 296, p. 119918, 2022.

Goula, A. M.; Thymiatis, K.; Kaderides, K. Valorization of grape pomace: drying behavior and ultrasound extraction of phenolics. *Food and Bioproducts Processing*, v. 100, p. 132–144, 2016. Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. *Relatório anual 2023*. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. *Relatório anual 2024*. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025. International Trade Centre – ITC. *Trade Map*. 2024. Disponível em: <http://www.trademap.org>. Acesso em: 2 maio 2025.

Klein, H. S.; Luna, F. V. The development of a modern cellulose industry in South America. *Latin American Research Review*, v. 57, n. 4, p. 753–774, 2022.

Korav, S.; Rajanna, G. A.; Yadiv, D. B.; Paramesha, V.; Mohan, C. M.; Jha, P. K.; Singh, S.; Singh, S. Impacts of mechanized crop residue management on rice-wheat cropping system—a review. *Sustainability*, v. 14, n. 23, p. 15641, 2022.

Li, P.; Xu, Y.; Yin, L.; Liang, X.; Wang, R.; Liu, K. Development of raw materials and technology for pulping—a brief review. *Polymers*, v. 15, n. 22, p. 4465, 2023.

Liu, Z.; Cao, Y.; Wang, Z.; Ren, H.; Lai, Y. The Utilization of Soybean Straw. I. Fiber Morphology and Chemical Characteristics. *BioResources*, v. 10, n. 2, 2015.

Lu, X. A meta-analysis of the effects of crop residue return on crop yields and water use efficiency. *PLoS One*, v. 15, n. 4, p. e0231740, 2020.

Magalhães Jr, A. I.; de Carvalho, J. C.; de Melo Pereira, G. V.; Karp, S. G.; Câmara, M. C.; Medina, J. D. C.; Soccol, C. R. Lignocellulosic biomass from agro-industrial residues in South America: current developments and perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 13, n. 6, p. 1505–1519, 2019.

Market Research Future. *Wheat Straw Market – Forecast to 2034*. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/wheat-straw-market-38422>. Acesso em: 20 jun. 2025.

Nechyporchuk, O.; Belgacem, M. N.; Bras, J. Production of cellulose nanofibrils: a review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, v. 93, p. 2–25, 2016.

Paula, I. D.; Guerta, A. C.; Martinez, R. M. Comparison of eucalypt, pine, and sugarcane cellulose fibers used for paper production. *Revista Árvore*, v. 43, n. 4, p. e430411, 2019. Reddygunta, K. K. R.; Beresford, R.; Šiller, L.; Berlouis, L.; Ivaturi, A. Activated carbon utilization from corn derivatives for high-energy-density flexible supercapacitors. *Energy e Fuels*, v. 37, n. 23, p. 19248–19265, 2023.

Riseh, R. S.; Vazvani, M. G.; Hassanisaadi, M.; Thakur, V. K. Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries. *Industrial Crops and Products*, v. 208, p. 117904, 2024.

Ritota, M.; Manzi, P. Pleurotus spp. cultivation on different agri-food by-products: example of biotechnological application. *Sustainability*, v. 11, p. 5049, 2019.

Sampaolesi, S.; Briand, L. E.; Saparrat, M. C. N.; Toledo, M. V. Potentials of biomass waste valorization: case of South America. *Sustainability*, v. 15, n. 10, p. 8343, 2023. Sholokhova, A.; Varžinskas, V.; Rutkaitė, R. Valorization of agro-waste in bio-based and biodegradable polymer composites: a comprehensive review with emphasis on Europe perspective. *Waste and Biomass Valorization*, v. 16, n. 4, p. 1537–1571, 2025.

Sokhansanj, S.; Turhollow, A.; Cushman, J.; Cundiff, J. Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy. *Biomass and bioenergy*, v. 23, n. 5, p. 347-355, 2002.

Steven, S.; Culsum, N. T. U.; Sophiana, I. C.; Febijanto, I.; Syamsudin, E.; Ghazali, N.; Nadirah, N.; Soekotjo, E. S. A.; Hidayatullah, I. M. Potential of corn cob sustainable valorization to fuel-grade bioethanol: a simulation study using SuperPro Designer®. *Evergreen: Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences e Green Asia Strategy*, v. 10, n. 4, p. 2287–2298, dez. 2023.

Tapia-Blácido, D. R.; Maniglia, B. C.; e Martelli-Tosi, M. Biopolymers from sugarcane and soybean lignocellulosic biomass. *Sustainable Polymers from Biomass*, p. 227-253, 2017.

Timberland Investment Group. *Global wood pulp market: structure and dynamics*. Disponível em: <https://timberlandinvestmentgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TIG-White-Paper-Global-Wood-Pulp-Market-Structure-and-Dynamics.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

Tufail, T.; Saeed, F.; Afzaal, M.; Ain, H. B. U.; Gilani, S. A.; Hussain, M.; Anjum, F. M. Wheat straw: a natural remedy against different maladies. *Food Science e Nutrition*, v. 9, n. 4, p. 2335–2344, 2021.

United States Department of Agriculture – USDA. *Fresh apples, grapes, and pears: world markets and trade*. 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/fruit.pdf>. Acesso em: 18 maio 2025.

Vallejo, M.; Cordeiro, R.; Dias, P. A. N.; Moura, C.; Henriques, M.; Seabra, I. J.; Malça, C.; Morouço, P. Recovery and evaluation of cellulose from agroindustrial residues of corn,

grape, pomegranate, strawberry-tree fruit and fava. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 8, p. 1–12, 2021.

Van Der Merwe, J.-M.; Vink, N.; Cloete, K. The competitiveness of South African table grape exports in the European markets: threats from Peru and Chile. *Agrekon*, v. 63, n. 1–2, p. 97–112, 2024.

Van Dongen, F. E. M.; Van Eylen, D.; Kabel, M. A. Characterization of substituents in xylans from corncobs and stover. *Carbohydrate Polymers*, v. 86, p. 722–731, 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.05.007.

Zárate-Salazar, J. R.; Santos, M. N.; Caballero, E. N. M.; Martins, O. G.; Herrera, Á. A. P. Use of lignocellulosic corn and rice wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* Jacq.) cultivation. *SN Applied Sciences*, v. 2, p. 1–10, 2020.

Zhang, J.; Wei, Y.; Liu, J.; Yuan, J.; Liang, Y.; Ren, J.; Cai, H. Effects of maize straw and its biochar application on organic and humic carbon in water-stable aggregates of a Mollisol in Northeast China: a five-year field experiment. *Soil e Tillage Research*, v. 190, p. 1–9, 2019.

Zhang, J.; Wei, Y.; Liu, J.; Yuan, J.; Liang, Y.; Ren, J.; Cai, H. Effects of straw incorporation on soil organic matter and soil water-stable aggregates content in semiarid regions of Northwest China. *PLoS ONE*, v. 9, e92839, 2014.

Zhang, Y.; Ghaly, A. E.; Li, B. Physical properties of corn residues. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, v. 8, p. 44–53, 2012.

CAPÍTULO 2: Resíduos agrícolas lignocelulósicos na indústria de celulose na Europa e na China: desafios, inovações e posicionamento estratégico

RESUMO

A crescente pressão por práticas mais sustentáveis e pela redução da dependência da madeira como matéria-prima na indústria de celulose tem impulsionado, em escala global, o aproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos na produção. Este capítulo apresenta um panorama comparativo entre Europa e China, dois polos que vêm se destacando na adoção de fibras alternativas, com base em políticas públicas, avanços tecnológicos e estratégias industriais. A partir de uma revisão bibliográfica, foram identificados os principais tipos de resíduos lignocelulósicos utilizados, as culturas agrícolas predominantes e os métodos de produção celulose mais recorrentes. Na Europa, destacam-se resíduos como a palha de trigo, o bagaço de beterraba sacarina, o sabugo de milho e as fibras de linho e cânhamo, com forte presença em países como França, Alemanha, Polônia e Países Baixos. Já na China, além da elevada disponibilidade de resíduos como palha de arroz, palha de trigo e bagaço de cana, observa-se uma robusta estrutura industrial voltada à produção de celulose a partir de fontes não madeireiras, com destaque para inovações em escala comercial. Apesar de avanços significativos, persistem desafios relacionados à morfologia dos resíduos, alto teor de cinzas e sílica, baixa densidade aparente e limitações logísticas. O capítulo reforça que a valorização de resíduos agrícolas como matéria-prima estratégica é uma resposta concreta à possível escassez futura de madeira e posiciona Europa e China como líderes na transição para uma indústria celulósica mais circular, diversificada e sustentável.

Palavras-chave: Resíduos agrícolas; Europa; China; Fibras não madeira; Celulose alternativa; Economia circular.

Chapter 2: Lignocellulosic agricultural residues in the pulp and paper industry in Europe and China: challenges, innovations, and strategic positioning

ABSTRACT

The growing pressure for more sustainable practices and the need to reduce reliance on wood-based raw materials in cellulose industry have encouraged the global adoption of agricultural residues. This chapter presents a comparative overview of Europe and China — two hubs that have advanced considerably in the use of alternative fibers — supported by public policies, technological innovations, and industrial strategies. Through a literature review, the main types of agricultural residues, dominant crops, and prevailing extraction and pretreatment methods were identified. In Europe, wheat straw, sugar beet pulp, corn cobs, flax, and hemp fibers are among the most commonly used materials, particularly in countries like France, Germany, Poland, and the Netherlands. In China, the availability of rice straw, wheat straw, and sugarcane bagasse is exceptionally high, and the country has built a robust industrial structure focused on large-scale non-wood pulp production. Despite important advances, challenges remain related to anatomical heterogeneity, high ash and silica content, low bulk density, and logistical constraints. This chapter highlights the strategic importance of leveraging agricultural residues as a competitive response to potential future wood scarcity, positioning both Europe and China as key global players in the transition toward a more circular, diversified, and sustainable cellulose industry.

Keywords: Agricultural residues; Europe; China; Non-wood fibers; Alternative raw materials; Pulp and paper; Circular bioeconomy.

1 INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos em escala global tem colocado em evidência a necessidade de soluções sustentáveis para o seu reaproveitamento. De acordo com o relatório *What a Waste 2.0* de 2018 do Banco Mundial, estima-se que a produção mundial de resíduos alcance 2,6 bilhões de toneladas até 2030, sendo os resíduos de origem agrícola responsáveis por uma parcela significativa desse total. Nos países em desenvolvimento, esses resíduos chegam a representar entre 30% e 40% da massa total das culturas agrícolas, ao passo que nos países desenvolvidos, devido ao uso de técnicas mais eficientes de colheita e processamento, essa proporção varia de 10% a 20%.

Na Europa, estima-se que os resíduos agrícolas correspondam a cerca de 15% das perdas e desperdícios alimentares, totalizando aproximadamente 88 milhões de toneladas por ano (Kaza et al., 2018; FAO, 2019; Wang et al., 2021; Rajeswari et al., 2022). Além das implicações econômicas, esses resíduos, e os resíduos alimentares em particular, exercem forte impacto climático, tendo em vista a contribuição da agricultura para as emissões antropogênicas de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (Lynch et al., 2021; Maximilian et al., 2022).

A gestão inadequada desses resíduos intensifica seus impactos ambientais, incluindo a emissão de gases de efeito estufa e a poluição do solo e da água. Em muitos países em desenvolvimento, a queima de resíduos agrícolas após a colheita ainda é uma prática comum. Em contrapartida, na União Europeia, essa prática é amplamente proibida por legislações ambientais. Essa restrição, somada à alta disponibilidade e ao baixo custo da biomassa agrícola, tem estimulado o interesse europeu por alternativas sustentáveis de reaproveitamento. Nesse contexto, destaca-se o uso de resíduos agrícolas lignocelulósicos como matéria-prima na produção de celulose, em consonância com os princípios da economia circular e com as metas ambientais estabelecidas pela região (Sholokhova et al., 2025).

Além dos benefícios ambientais, o uso de resíduos lignocelulósicos de origem agrícola como insumo industrial tem ganhado destaque devido aos altos custos associados à celulose de origem madeireira. Diversos estudos vêm apontando os avanços científicos e tecnológicos que têm possibilitado o aproveitamento desses subprodutos de maneira economicamente viável, sobretudo em países em desenvolvimento com forte vocação agrícola (Chen et al., 2014; Cypriano et al., 2018; Jebali et al., 2018; Shi et al., 2018). Embora parte desses resíduos seja utilizada para fins energéticos ou como condicionador de solo, uma fração significativa ainda é descartada de forma inadequada, exigindo soluções inovadoras para sua valorização (Phiri et al., 2024).

Na Europa, apesar da robusta produção agrícola e da preocupação crescente com a sustentabilidade, o potencial de uso dos resíduos agroindustriais para a fabricação de materiais como biocompósitos e polímeros biodegradáveis ainda se encontra subaproveitado. A conformidade com normas ambientais e a demanda por produtos com menor impacto ambiental têm impulsionado estudos sobre a incorporação eficiente desses resíduos na cadeia de materiais *bio-based* (Sholokhova et al., 2025).

O desenvolvimento de cadeias de valor associadas a produtos de origem biológica representa um dos pilares estratégicos do Plano de Ação para a Economia Circular da União Europeia, bem como do Pacto Ecológico Europeu (*Green Deal*), que visa tornar o continente climaticamente neutro até 2050 (Thormann et al., 2021). Esse movimento é impulsionado não apenas por diretrizes políticas e regulatórias, mas também por mudanças no comportamento do consumidor, que demanda alimentos e materiais produzidos de forma mais sustentável (Gaffey et al., 2021; Trigo, 2021).

Diante desse cenário, torna-se imprescindível compreender como a geração, a gestão e o reaproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos têm se desenvolvido em regiões estratégicas como a Europa e a China, que se destacam tanto pela produção agrícola quanto pelo papel relevante no setor de celulose e papel. A análise integrada desses contextos permite identificar oportunidades e desafios para a valorização desses resíduos como fonte alternativa de fibras, contribuindo para a inovação tecnológica, a redução dos impactos ambientais e o avanço de modelos produtivos alinhados à bioeconomia e à economia circular. Assim, este capítulo tem como objetivo avaliar os principais aspectos relacionados à geração de resíduos agrícolas nessas regiões, com foco em seu potencial aproveitamento como matéria-prima na produção de celulose e papel.

2 OBJETIVO

Analizar os principais aspectos relacionados à geração de resíduos agrícolas na Europa e na China, com ênfase na avaliação de seu potencial como fonte alternativa de matéria-prima para a produção de celulose e papel, considerando os avanços tecnológicos, as políticas ambientais e as estratégias de aproveitamento sustentável adotadas em cada contexto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste capítulo segue abordagem semelhante à utilizada no Capítulo 1, mantendo a estrutura de revisão bibliográfica e análise de dados secundários com o objetivo de investigar o potencial de resíduos agrícolas como matéria-prima para a produção de celulose e papel. A principal diferença metodológica reside na delimitação geográfica do estudo, que neste caso foca exclusivamente nas regiões da Europa e da China, bem como na utilização exclusiva de dados extraídos da base estatística da FAO.

Vale ressaltar que, no presente trabalho, o termo Europa é utilizado com base em sua definição geográfica, abrangendo o conjunto de países situados no continente europeu, independentemente de sua filiação política ou econômica a blocos regionais. É importante destacar que Europa e União Europeia (UE) não são sinônimos. A União Europeia é um bloco político e econômico formado por 27 países membros, com instituições comuns e tratados de integração. No entanto, o continente europeu inclui também nações que não integram a UE, como Noruega, Suíça, Reino Unido, Ucrânia, entre outras. Assim, ao adotar o escopo “Europa”, busca-se uma abordagem abrangente e territorial, que considera a produção científica, tecnológica e industrial relacionada à celulose a partir de resíduos agrícolas em toda a região, e não apenas nos países pertencentes ao bloco europeu.

3.1 Estratégia de busca e seleção bibliográfica

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura em bases de dados internacionais (Scopus, ScienceDirect, Web of Science e Google Scholar), utilizando termos-chave como: “agricultural residue”, “non-wood fiber”, “lignocellulosic biomass”, “pulp and paper industry”, “Europe”, “China” e “waste valorization”. Estudos com foco na geração, gestão e reaproveitamento de resíduos agrícolas em contextos industriais sustentáveis foram priorizados, além de documentos institucionais relevantes à temática.

3.2 Seleção das regiões e culturas agrícolas

O recorte geográfico incluiu os países da Europa (considerados em conjunto) e a China, em função de sua relevância tanto no setor agrícola quanto na indústria de celulose e papel. Foram consideradas culturas de grande expressão na geração de resíduos agrícolas: trigo, milho, arroz e cana-de-açúcar na China; trigo, milho, cevada e beterraba na Europa. A seleção baseou-se no volume de produção agrícola anual, conforme dados mais recentes disponíveis.

3.3 Fonte de dados e coleta de informações

Todos os dados estatísticos utilizados foram obtidos exclusivamente da base FAOSTAT, da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) para o ano de 2023. Essa base foi escolhida por sua abrangência, confiabilidade e padronização internacional, permitindo uma análise comparável entre os dois contextos regionais.

3.4 Estimativa da geração de resíduos agrícolas

A estimativa do volume de resíduos agrícolas foi realizada com base na aplicação de coeficientes de conversão do tipo *residue-to-product ratio*, aqui tratados como Coeficiente de Geração de Resíduo (CGR), amplamente utilizados na literatura especializada. A fórmula geral foi aplicada conforme a metodologia proposta por Magalhães Jr. et al. (2019).:

$$\text{Resíduo (toneladas)} = \text{Produção agrícola (toneladas)} \times \text{CGR}$$

Os coeficientes adotados foram extraídos de estudos técnicos e científicos com foco nas culturas analisadas, sendo aplicados para estimar a quantidade de biomassa residual disponível em cada região. Como os coeficientes podem variar em função de práticas agrícolas, clima e tipo de solo, os resultados devem ser interpretados como estimativas técnicas de referência.

3.5 Avaliação do potencial técnico das fibras para a produção de celulose

Por fim, a análise incluiu uma avaliação qualitativa do potencial técnico dos resíduos selecionados, com base em dados secundários sobre teor de celulose, hemicelulose e lignina, parâmetros críticos para determinar a viabilidade do aproveitamento industrial na indústria de celulose.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção agrícola e estimativa de resíduos na Europa

De acordo com dados obtidos pela FAO (2023), a produção agrícola na Europa compreende as culturas apresentadas na tabela 1. As culturas agrícolas foram ranqueadas de

forma decrescente a partir da produção (em toneladas). Os maiores volumes de produção de culturas (em toneladas) na Europa são trigo, milho e cevada entre os cereais; uvas, maçãs e laranjas entre as frutas; e beterraba sacarina, batata e girassol no setor vegetal.

Tabela 1 – Produção (ton) e área colhida (ha) das principais culturas agrícolas da Europa.

Cultura agrícola	Área colhida (ha)	Produção (ton)
Trigo	61.481.984	269.261.046
Beterraba sacarina	3.031.247	188.492.225
Milho	16.460.089	119.026.798
Batata	4.056.645	99.810.329
Cevada	21.334.221	83.081.544
Semente de girassol	20.433.907	42.162.800
Semente de canola	10.646.195	30.518.070
Uvas	3.382.515	24.788.149
Tomates	394.865	21.474.752
Maçãs	901.926	17.519.472
Demais culturas	34.299.781	154.676.156
Total	176.423.375	1.050.811.342

Fonte: FAO, 2023.

Considerando os valores de CGR apresentados na tabela 2 (presente no capítulo 1) e no coeficiente de geração de resíduos da beterraba sacarina, a estimativa de resíduo agrícola para as 3 principais culturas (em produção - toneladas), é exposto na tabela 2 (deste capítulo). Para o cálculo de estimativa de geração de resíduos agrícolas, foi considerado o coeficiente de geração de resíduo industrial da beterraba sacarina de 0,23 - ou seja, para cada tonelada de cultura produzida, 230 quilos de resíduo é gerado (Gérard e Jayet, 2023).

Tabela 2 - Estimativa de geração de resíduos (ton) das principais culturas agrícolas produzidas na Europa, considerando, volume (ton), coeficiente de geração de resíduo e o tipo de resíduo.

Cultura	País	Volume	CGR	Tipo de resíduo	Estimativa de resíduos (ton)
Trigo	Rússia	91.500.000,00	1,34	Palha	122.610.000,00
Beterraba sacarina	Rússia	48.825.312,49	0,23	Bagaço	11.229.821,87
Milho	Ucrânia	31.030.440,00	2,23 1	Palha Espiga	69.197.881,20 30.906.318,24

Na Europa, a valorização de resíduos agroindustriais para a produção de polímeros biodegradáveis representa uma estratégia consolidada, sustentada por políticas públicas voltadas à bioeconomia circular e à substituição de materiais derivados de petróleo. Os principais resíduos agrícolas utilizados nesse contexto são provenientes de culturas amplamente

cultivadas na região, como trigo (palha e farelo), milho (sabugo e palha), beterraba, batata, arroz, cevada, banana, maçã, café, cânhamo e linhaça, além de subprodutos industriais como casca de frutas, bagaço de uva e resíduos do processamento de óleos vegetais (Sholokhova et al., 2025). A tabela 2, neste capítulo, corrobora os dados encontrados na literatura, onde as principais culturas produzidas em 2023, são majoritariamente aquelas apontadas na literatura.

Por exemplo, o mercado de palha de trigo na Europa está em expansão, impulsionado pela inovação e pelo foco crescente em práticas sustentáveis, especialmente nos setores de alimentos e bebidas. Países como Alemanha, Reino Unido, França e Itália lideram essa transformação, utilizando a palha de trigo como matéria-prima para embalagens biodegradáveis e ingredientes alternativos. A demanda por materiais sustentáveis está redefinindo padrões de consumo, enquanto empresas buscam soluções inovadoras para atender às regulamentações ambientais e às preferências dos consumidores por produtos mais responsáveis (Market Research Future, 2024).

No mesmo relatório da Market Research Future (2024), é evidenciado o cenário competitivo do mercado europeu, notadamente marcado por avanços tecnológicos em países como Espanha e Rússia, que buscam maximizar a eficiência no uso da palha de trigo. Empresas têm estabelecido colaborações estratégicas com agricultores para fortalecer cadeias de suprimento, garantindo qualidade e constância no fornecimento, além de gerar novas fontes de receita para os produtores. Essas iniciativas não apenas minimizam desperdícios, mas também promovem benefícios econômicos locais.

O relatório ainda destaca que o mercado europeu de palha de trigo passa por um crescimento substancial, impulsionado por tendências globais de sustentabilidade e inovação. Em 2023, o mercado em questão foi avaliado em US\$ 2,0 bilhões, com projeções para alcançar US\$ 4,2 bilhões até 2032, a uma taxa de crescimento anual de aproximadamente 7,8% no período de 2025 a 2034. Esse crescimento é impulsionado pela crescente demanda por produtos ecológicos e biodegradáveis, alinhados às políticas ambientais da União Europeia. A palha de trigo, abundante devido à produção significativa de trigo na região, está sendo aproveitada em diversas aplicações, incluindo embalagens sustentáveis, produção de papel, energia biomassa e materiais de construção. A valorização econômica da palha de trigo também está promovendo colaborações entre empresas e agricultores, fortalecendo as cadeias de suprimento e gerando novas fontes de receita para os produtores.

Na Europa, resíduos agrícolas como palha de trigo, milho e outros coprodutos da colheita representam uma fonte estratégica de biomassa para a produção de bioenergia e celulose. Mesmo sem incentivos específicos, a agricultura europeia já gera cerca de 120 milhões

de toneladas de matéria seca por ano. A introdução de um preço de mercado para esses resíduos lignocelulósicos pode estimular sua oferta. A um valor de 100 € tDM⁻¹ (euro por tonelada de matéria seca – *euros per tonne of dry matter*), a oferta aumenta em média 7,6%; com 200 €/tDM, o acréscimo pode chegar a 13%. Os resultados indicam que, mesmo com respostas moderadas, a precificação pode ampliar a disponibilidade desses materiais e fortalecer seu uso industrial em substituição à madeira (Gérard e Jayet, 2023).

A Europa desponta como uma das regiões com maior potencial sustentável para o aproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos na bioeconomia, impulsionada por diretrizes climáticas ambiciosas e políticas voltadas à transição energética. O continente gera anualmente cerca de 367 milhões de toneladas desse material, com um potencial técnico estimado em 212 milhões de toneladas e um potencial sustentável, de acordo com as restrições ambientais e técnicas, de cerca de 124 milhões de ton ano⁻¹. No entanto, a mobilização efetiva desse volume enfrenta obstáculos como competições por uso, variabilidade espacial e climática, e riscos associados à remoção excessiva de biomassa do solo, o que pode comprometer a fertilidade e o carbono orgânico. Estudos recentes demonstram que apenas entre 25% a 40% dos resíduos agrícolas podem ser extraídos com segurança sem prejuízo ambiental, especialmente considerando práticas conservacionistas e modelos agroecológicos regionais (Scarlat et al., 2019).

Além disso, o comportamento dos produtores agrícolas tem papel fundamental na viabilidade do uso de resíduos na produção de celulose e bioenergia. Nesse sentido, políticas que incentivam preços mais altos para a biomassa lignocelulósica tendem a estimular os agricultores a intensificarem a produção de resíduos a partir do aumento de área cultivada e uso de insumos agrícolas, como fertilizantes nitrogenados. Esse comportamento, embora eleve a oferta, pode gerar efeitos colaterais ambientais significativos, como aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio. Essa tensão entre metas bioenergéticas e compromissos ambientais evidencia a necessidade de maior integração entre políticas agrícolas, energéticas e ambientais. Assim, embora a Europa conte com tecnologia avançada, capacidade analítica territorial refinada e metas regulatórias claras, a expansão sustentável do uso de resíduos agrícolas para fins industriais depende de arranjos institucionais coordenados e do engajamento consciente dos produtores rurais (Gérard e Jayet, 2023).

Quanto aos aspectos tecnológicos da produção, de forma semelhante ao que ocorre com a palha de arroz, os dados experimentais sobre a caracterização física da palha de trigo, especialmente no que diz respeito ao tamanho de suas fibras, são comparados com outros materiais lignocelulósicos relevantes, como talos de girassol, brotos de videira, talos de

algodoeiro, podas de oliveira, talos de sorgo e madeiras de pinus e eucalipto (Eugenio et al., 2019). Essas fibras apresentam alto potencial de aplicação em compostos biológicos devido à sua boa relação resistência-peso, baixo custo, versatilidade e facilidade de processamento (Singh et al., 2023).

De outro lado, assim como confirma os dados obtidos pela FAO (2023) apresentados neste trabalho, o resíduo agroindustrial lignocelulósico da beterraba-sacarina, figura entre um dos maiores da Europa, gerando cerca de 57 milhões de toneladas anuais. A polpa de beterraba sacarina é um resíduo gerado em grandes quantidades pela indústria açucareira. Iniciativas inovadoras estão transformando esse desperdício em recursos valiosos. A constituição lignocelulósica da beterraba sacarina (*sugar beet*) é composta por partes aproximadamente iguais de celulose, hemicelulose e pectina, que totalizam entre 75% e 85% da sua composição (Karaky et al., 2021).

Na Polônia, o *Waste Lab* desenvolveu um método de baixo custo para converter folhas e bagaço de beterraba em produtos biodegradáveis, como embalagens, pratos e vasos, utilizando um processo que mistura polpa de folhas com materiais naturais e moldagem térmica, reduzindo o uso de plásticos. Paralelamente, existe outro projeto financiado pela UE com o objetivo de extrair microfibras de celulose, arabinose e ácido galacturônico da polpa de beterraba, criando produtos inovadores como reguladores de umidade e ingredientes para cosméticos. Essas abordagens destacam o potencial de resíduos abundantes como a beterraba-sacarina para fomentar modelos sustentáveis, reduzir impactos ambientais e agregar valor econômico (World Biomarket Insights, 2025).

Entre as principais culturas agrícolas produzidas na Europa, a palha de milho, subproduto abundante do cultivo de milho, destaca-se como um material natural promissor para reforço em biocompósitos, principalmente devido ao seu elevado teor de celulose. A fibra da palha é composta por duas partes distintas: uma camada externa densa, rica em celulose e com características semelhantes às fibras de madeira e cânhamo, e um miolo macio, absorvente, com baixa resistência mecânica, mas boa tenacidade (Qi et al., 2022; Feng et al., 2020).

Fatores como disponibilidade sazonal, infraestrutura para coleta e armazenamento, e demandas concorrentes de outras indústrias são determinantes na avaliação do potencial de mercado de fibras não madeireiras. Uma solução alternativa seria utilizar estes subprodutos agrícolas, como folhas, cascas e palhas, que não competem com alimentos e são matérias-primas de baixo custo. A disponibilidade desses materiais varia conforme o país, localização geográfica, práticas culturais e regulamentações políticas, priorizando recursos pouco utilizados ou de baixo valor que, atualmente, são queimados ou fermentados (Wojtasz et al., 2025).

Estima-se que, globalmente, cerca de 44% dos resíduos são deixados no campo, 33% são utilizados como ração ou cama para animais, 16% têm usos diversos fora da propriedade (como combustível doméstico e insumo industrial) e aproximadamente 6% são queimados no campo — prática que contribui significativamente para as emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Esses dados evidenciam os múltiplos usos e os dilemas de alocação dos resíduos agrícolas, bem como os conflitos de uso entre geração de energia, manutenção da saúde do solo e alimentação animal. A partir dessa visão integrada, torna-se evidente a importância de políticas públicas que considerem as particularidades regionais, o potencial agronômico e os impactos ambientais, buscando soluções sustentáveis e equilibradas para o aproveitamento dessa biomassa (Smerald et al., 2023).

Além disso, a disponibilidade local de resíduos agroindustriais é um fator determinante para sua valorização, especialmente no contexto europeu, onde a predominância de certas culturas influencia diretamente o tipo e o volume de biomassa residual gerada (Fahmy et al., 2017; Jimenez e Rodriguez, 2010). Contudo, a obtenção de dados quantitativos confiáveis sobre resíduos lignocelulósicos agrícolas na Europa ainda é limitada. Bases como a EUROSTAT não incluem resíduos gerados durante a colheita e o cultivo, como a palha, fração relevante para aplicações em biocompósitos (Duquennoi e Martinez, 2022). Estudos recentes apresentam discrepâncias nas estimativas: Bedoic et al. (2020) indicam uma produção anual de 2,6 bilhões de toneladas de resíduos, coprodutos e subprodutos agrícolas na Europa, enquanto o projeto europeu AgroCycle reporta cerca de 700 milhões de toneladas/ano, evidenciando diferenças metodológicas entre levantamentos (Sholokhova et al., 2025).

Com base nos dados da FAOSTAT, os cultivos com maior produção na Europa são: trigo, milho e cevada entre os cereais; uva, maçã e laranja entre as frutas; e beterraba, batata e girassol no setor hortícola. A geração estimada de resíduos dessas culturas foi calculada por meio da multiplicação das taxas médias de geração de resíduos nas etapas de cultivo, colheita e processamento (Bedoic et al., 2020), pelos volumes de produção registrados.

4.2 Projeções futuras e estratégias para o uso sustentável de resíduos agrícolas na Europa

Diante das metas climáticas ambiciosas estabelecidas pelo *European Green Deal* (Acordo Verde Europeu), a União Europeia tem aprofundado seus esforços na mobilização sustentável de biomassas residuais, com destaque para os resíduos agrícolas, florestais e urbanos. Ao estabelecer o acordo em 2019, os 27 Estados-Membros da União Europeia

comprometeram-se a reduzir as emissões em pelo menos 55% até 2030, em comparação com os níveis de 1990 (Comissão Europeia, 2021; Concawe, 2021).

O estudo coordenado pelo Imperial College London, estima que, em 2030, o potencial sustentável de biomassa nos países da UE e no Reino Unido variará entre 0,98 e 1,2 bilhão de toneladas secas, e em 2050, entre 1,0 e 1,3 bilhão de toneladas, considerando todos os mercados (energético e não-energético). Especificamente para uso de energia, esse potencial é estimado entre 520–860 milhões de toneladas secas em 2030 e 539–915 milhões em 2050, com parte desse volume sendo canalizado para o setor de transportes por meio da produção de biocombustíveis avançados (Concawe, 2021).

Entre essas fontes, os resíduos agrícolas, como palhas de cereais, resíduos da colheita do milho e culturas lignocelulósicas dedicadas, configuram um recurso abundante e estrategicamente relevante. Entretanto, a elevada disponibilidade técnica dessa biomassa não implica acesso irrestrito por parte da indústria de celulose, uma vez que esses materiais são objeto de crescente competição intersetorial. Usos concorrentes, como bioenergia, indústria química, aquecimento residencial e aplicações agrícolas, disputam o mesmo recurso, o que pode reduzir a fração efetivamente destinada à produção de celulose a partir de resíduos. Esse cenário evidencia que a ampliação do uso de fibras agrícolas no setor papeleiro depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também de arranjos institucionais e políticas públicas capazes de orientar a alocação da biomassa para aplicações de maior valor agregado e maior benefício ambiental, como a substituição parcial de fibras florestais por resíduos agrícolas (Concawe, 2021).

A despeito do avanço tecnológico, a manutenção do equilíbrio entre produtividade agrícola, conservação do solo, biodiversidade e segurança alimentar segue sendo um desafio central. O relatório ressalta que, mesmo com a redução prevista de 30% da área agrícola arável até 2050, as práticas aprimoradas de manejo e a utilização de terras marginais podem compensar essa perda sem comprometer o fornecimento de biomassa sustentável.

Nesse sentido, é possível afirmar que a Europa, com ênfase na União Europeia, de modo geral, está comprometida com a valorização dos resíduos agrícolas como parte essencial da transição energética e da economia circular. Combinando políticas públicas, pesquisa e inovação, é possível alcançar um modelo robusto de uso sustentável desses resíduos, com impactos positivos tanto para o meio ambiente quanto para a economia rural dos Estados-membros.

A crescente valorização dos produtos *bio-based* (produtos oriundos de matéria prima biológica) é um dos pilares das estratégias nacionais de bioeconomia na Europa. De acordo com

o relatório mais recente do *Knowledge Centre for Bioeconomy* da Comissão Europeia (2025), 12 países europeus já possuem estratégias dedicadas à bioeconomia, incluindo Alemanha, França, Finlândia, Itália e Portugal. Essas estratégias abrangem tanto a produção primária de biomassa (agricultura, florestas, aquicultura) quanto o processamento industrial (alimentos, madeira, papel e celulose, têxteis, químicos e bioenergia). Os produtos *bio-based*, como bioplásticos, biofármacos, bioestimulantes e bioquímicos, são abordados de forma recorrente nos planos nacionais, refletindo uma clara orientação para a substituição de insumos fósseis por matérias primas renováveis.

O mesmo relatório revela que o setor de celulose e papel aparece como área estratégica em quase todas as estratégias nacionais analisadas, ao lado de produtos de madeira e bioenergia. Isso demonstra que, embora o foco de parte dos investimentos esteja em energia e biocombustíveis, o setor de papel e celulose continua sendo considerado um dos principais destinos para biomassa processada, o que fortalece a relevância da produção de celulose a partir de resíduos agrícolas como alternativa à madeira.

A título de ilustração, a Nafici Environmental Research, com sede em West Sussex (Reino Unido), é um exemplo de empresa europeia que investe no uso de resíduos agrícolas como insumo para produção de polpa para papel e embalagens. Desde 2013, com o desenvolvimento do processo *Eco Pulp*, a empresa converte sobras de culturas como palha de trigo, cevada, aveia, entre outros, em polpa não branqueada, utilizando até 50% menos energia e 95% menos água do que os métodos convencionais (Nacifi Enrionment Research, 2025). O método é escalável, com plantas piloto no Reino Unido e China, além de uma planta comercial de 15 t/dia inaugurada em 2023, e pode ser integrado a fábricas já existentes, com práticas reais de economia circular ao aproveitar resíduos agrícolas antes descartados.

O sucesso do método *EcoPulping* também se reflete em parcerias sólidas com grandes empresas, como a *DS Smith*, que desde janeiro de 2024 realiza testes na Europa inserindo polpa de palha e grãos no processo de fabricação de papel, reduzindo em até 10% o uso de fibras virgens. Esses elementos posicionam a Nafici como um case de sucesso europeu na transformação de resíduos agrícolas em produtos de alto valor agregado, contribuindo para reduzir a pressão sobre florestas e recursos hídricos e fortalecendo a bioeconomia na região.

A crescente demanda por fontes alternativas de biomassa para a produção de celulose tem impulsionado o interesse pela utilização de resíduos agrícolas, sobretudo no contexto europeu. A União Europeia tem estabelecido metas ambiciosas de redução de emissões de gases de efeito estufa e de ampliação do uso de energias renováveis, o que reforça a importância de um aproveitamento mais eficiente dos recursos já disponíveis, sem provocar alterações

indesejadas no uso da terra ou prejuízos à fertilidade do solo (Scarlat et al., 2019; Pacto Ecológico Europeu, 2021). Dentre as possibilidades, os resíduos agrícolas, especialmente os derivados das culturas de trigo, cevada, milho, arroz, aveia, centeio, colza e girassol, apresentam-se como fontes promissoras de matéria-prima para a indústria de celulose (Vaz Júnior, 2020).

Scarlat et al. (2019) avaliaram o potencial de aproveitamento de resíduos agrícolas em 36 países europeus, considerando limitações técnicas e ambientais. Na União Europeia, estima-se que o volume que pode ser efetivamente mobilizado de forma sustentável seja de 124 milhões de toneladas de matéria seca por ano, cerca de 43% do potencial teórico, ou seja, a produção total de resíduos desconsiderando restrições de uso. As regiões com maior disponibilidade de resíduos sustentáveis incluem França, Ucrânia, Alemanha, Espanha, Polônia, Reino Unido, Romênia e Itália, países que lideram a produção agrícola no continente.

Ainda assim, segundo os mesmos autores, a retirada de resíduos deve ser cuidadosamente planejada, pois a manutenção do carbono do solo nem sempre é garantida. Por outro lado, a remoção excessiva de resíduos pode comprometer seriamente a sustentabilidade agrícola, reduzindo a entrada de matéria orgânica no solo e acelerando processos de degradação, como erosão e perda de carbono. Em diversos cenários simulados, observou-se que mesmo a manutenção total dos resíduos no campo não é suficiente para estabilizar os níveis de carbono orgânico no solo em determinadas regiões, evidenciando a necessidade de práticas complementares, como o uso de biofertilizantes, rotação de culturas e técnicas de cultivo conservacionistas.

Cabe destacar que, assim como no estudo analisado de Scarlat et al. (2019), o uso de dados de sensoriamento remoto com alta resolução espacial para identificar áreas prioritárias de coleta reforça a necessidade de uma abordagem multidisciplinar. Estudos sobre o uso e a disponibilidade de resíduos agrícolas como matéria-prima exigem uma análise integrada, que considere aspectos agronômicos, ambientais, tecnológicos e espaciais de forma articulada e abrangente.

Contudo, cabe ressaltar que a efetiva mobilização dessa matéria-prima dependerá de uma série de fatores além da disponibilidade biofísica, como políticas públicas, incentivos econômicos, organização da cadeia produtiva e adesão dos produtores rurais (Scarlat et al., 2019). Ainda assim, os dados apresentados demonstram que os resíduos agrícolas podem e devem assumir papel de destaque na bioeconomia europeia, com potencial relevante também para aplicações na indústria de celulose e papel.

4.3 Panorama geral da indústria de celulose e papel na Europa

Segundo o Timberland Investment Group (2024), a Europa ocupa uma posição intermediária no mercado global de celulose, equilibrando produção e consumo, mas enfrentando desafios estruturais relacionados a custos de produção mais elevados, estimados em cerca de US\$ 455 por tonelada de madeira de folhosas (hardwood). Em contrapartida, a região se destaca pela produção de celulose e papéis de alto valor agregado, com foco em papéis gráficos, embalagens sofisticadas e produtos premium. Esse posicionamento é fortemente sustentado por um compromisso histórico com a sustentabilidade, refletido em investimentos contínuos em processos industriais mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

Em escala global, apesar do avanço das tecnologias digitais, o consumo mundial de papel aumentou de 240 para 413 milhões de toneladas entre 1990 e 2016, sendo aproximadamente 77,3 milhões de toneladas consumidas na Europa. Historicamente, a produção de papel utilizava fibras herbáceas, como linho e palha; no entanto, o crescimento da demanda levou ao predomínio da madeira como principal matéria-prima. Mais recentemente, preocupações ambientais e climáticas têm incentivado consumidores, governos e a indústria a buscar alternativas mais sustentáveis, impulsionando pesquisas sobre o uso de resíduos agrícolas e materiais vegetais não madeireiros na produção de celulose (Fahmy et al., 2017; Kaur et al., 2018; Tofanica; Puitel, 2019).

Nesse contexto, a Regulamentação Europeia de Desmatamento (European Union Deforestation Regulation – EUDR), peça central do Pacto Ecológico Europeu, vem promovendo mudanças profundas no setor de celulose e papel na Europa. A EUDR exige que toda a celulose e produtos de papel comercializados na União Europeia sejam comprovadamente livres de desmatamento, impondo rigorosos requisitos de rastreabilidade e *due diligence*, entendida como o conjunto de procedimentos sistemáticos adotados pelas empresas para identificar, avaliar e mitigar riscos socioambientais ao longo de suas cadeias de suprimento. O não cumprimento da norma pode resultar em sanções severas, incluindo multas de até 4% do faturamento anual, apreensão de mercadorias e suspensão temporária da participação em licitações públicas (Fastmarkets, 2024; Wood Central, 2024).

Os impactos dessa regulamentação são particularmente relevantes para o segmento de celulose de mercado. Estima-se que cerca de 40% da celulose utilizada na Europa seja adquirida nesse formato, sendo que até 50% da celulose *kraft* branqueada de madeira dura consumida no continente é importada, principalmente do Brasil, América do Norte e Chile. Dificuldades de conformidade com a EUDR podem comprometer essas importações, reduzindo a oferta de

celulose para papel, pressionando preços e incentivando alternativas como o aumento do uso de papel reciclado e de matérias-primas não convencionais. Esse cenário pode levar à reorganização das cadeias globais de suprimento, elevar custos de produção na Europa e afetar sua competitividade internacional, ao mesmo tempo em que abre espaço para fornecedores de regiões externas à UE com diferentes níveis de controle ambiental.

De acordo com a Fastmarkets (2025), as exigências rigorosas da EUDR intensificam a pressão sobre as cadeias tradicionais de abastecimento, especialmente aquelas associadas à celulose importada de regiões classificadas como de maior risco ambiental. Esse contexto cria um ambiente favorável à diversificação das fontes de matéria-prima, estimulando o aproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos, como bagaço de cana-de-açúcar, palha de trigo, milho e arroz, que são abundantes, renováveis e apresentam menor impacto ambiental. Além de reduzir riscos regulatórios, a valorização desses resíduos fortalece cadeias produtivas rurais, promove inovação tecnológica e contribui para mitigar os custos adicionais decorrentes das novas exigências ambientais (Jahan et al., 2020).

Paralelamente, a produção de celulose na Europa continua fortemente associada a práticas sustentáveis, apoiada pelo uso predominante de florestas manejadas de forma responsável e certificadas por sistemas como PEFC e FSC (Wolf; Scheiner, 2022). O crescimento moderado do mercado europeu tem sido impulsionado, sobretudo, pela demanda por papel *tissue*, utilizado em produtos domésticos e de higiene, o que tem estimulado a expansão da produção de polpa química branqueada. Investimentos em tecnologias avançadas têm permitido ganhos de eficiência produtiva, redução de impactos ambientais e consolidação da liderança europeia em inovação no setor.

Esse compromisso também se reflete na incorporação de princípios da economia circular. Iniciativas como o projeto europeu *Paper Chain* demonstram o potencial da valorização de resíduos do setor florestal e industrial, transformando-os em matérias-primas secundárias por meio do reaproveitamento de fibras, extração de compostos químicos e geração de bioenergia. Os resultados indicam que estratégias baseadas em logística integrada, proximidade entre fontes de resíduos e unidades industriais, e substituição de aterros por valorização material ou energética são tecnicamente viáveis e economicamente atrativas, especialmente em países com elevados custos de disposição final (Processum et al., 2018; *Paper Chain*, 2020).

Esse movimento tende a se intensificar diante das tendências recentes de mercado. A crescente demanda por *tissue* e embalagens, associada a mudanças nos padrões de consumo e a desafios no comércio internacional, tem impulsionado a produção de polpas branqueadas e

reforçado o uso de certificações florestais. Com projeção de crescimento médio anual de cerca de 3,8% entre 2025 e 2030, o setor europeu de celulose e papel se prepara para absorver matérias-primas alternativas, alinhando competitividade econômica, sustentabilidade ambiental e inovação industrial (Mordor Intelligence, 2024).

4.4 Panorama geral da produção de celulose na China

A China é o principal motor do crescimento da demanda global por celulose, respondendo por mais de 90% do aumento do consumo nas últimas duas décadas, impulsionado pela rápida industrialização, urbanização e mudanças nos padrões de consumo, especialmente nos segmentos de *tissue*, embalagens e produtos de higiene (Timberland Investment Group, 2024). Embora tenha ampliado sua capacidade produtiva, alcançando 12,1% da produção global de *market pulp* em 2023, o país ainda depende fortemente de importações para suprir sua demanda interna. Em 2022, a China consumiu 112,95 milhões de toneladas de celulose, importou 29,64 milhões e exportou 8,58 milhões, reforçando sua dependência de fornecedores externos, especialmente da América Latina (Li et al., 2023; Timberland Investment Group, 2024).

Nesse contexto, a China se destaca também como líder na produção de celulose a partir de fibras não-madeira, resultado da combinação entre a abundância de resíduos agrícolas, como arroz e trigo, e a escassez de recursos florestais. O país possui, majoritariamente, florestas secundárias, degradadas por décadas de exploração excessiva e manejo inadequado desde o século XX. Embora programas como o *Natural Forest Protection Program* tenham ampliado a cobertura florestal, ainda persistem limitações na oferta de madeira (Abd El-Sayed et al., 2020; Liu et al., 2023).

Diante disso, o aproveitamento de resíduos agrícolas lignocelulósicos tornou-se uma alternativa estratégica para garantir o suprimento de fibras. Estima-se que a China gere anualmente cerca de 870 milhões de toneladas de biomassa agrícola, das quais aproximadamente 400 milhões de toneladas são tecnicamente aproveitáveis para fins industriais. As regiões leste, sudeste e nordeste concentram a maior parte dessa disponibilidade, favorecendo o abastecimento local da indústria de celulose (Zhang et al., 2023).

Alguns mercados asiáticos, como China e Índia, dependem fortemente do bagaço de cana e da palha de trigo, que juntos representam cerca de 70% da demanda por matérias-primas da indústria de celulose. Esses resíduos agrícolas lignocelulósicos apresentam potencial para substituir a biomassa de origem florestal, sendo fontes sustentáveis e economicamente viáveis

de fibras celulósicas. Suas estruturas são semelhantes às de outras fibras vegetais amplamente utilizadas na produção, tanto em composição quanto em propriedades físico-químicas. Resíduos agrícolas como cânhamo, palhas de arroz e trigo, além do bagaço de cana-de-açúcar, entre outras, surgem, assim, como alternativas promissoras aos materiais lenhosos na fabricação de celulose e papel (Jiménez et al., 2005; Kumar et al., 2009; Zhong et al., 2018).

A China destaca-se como potência agrícola global, com produção significativa nos seus principais cultivos. Em 2023, o país liderou a produção mundial de milho, arroz e trigo (Tabela 3) e, além de figurar no topo ou entre os primeiros nas principais culturas como soja, cana-de-açúcar, algodão, batata e diversos hortifrutigranjeiros. A Tabela 3 sintetiza as dez culturas predominantes, fornecendo subsídio para estimar o potencial de geração de resíduos agrícolas e destacar a relevância da China no fornecimento de matéria-prima não madeireira para a indústria de celulose.

Tabela 3 - Produção agrícola (ton) área colhida (ha) de diferentes culturas na China.

Cultura	Área colhida (ha)	Produção (ton)
Milho	44.256.978	289.086.202
Arroz	29.171.100	208.064.200
Trigo	23.629.200	136.596.100
Cana-de-açúcar	1.308.156	104.989.361
Batata	4.571.531	93.491.819
Pepino	1.326.633	80.217.603
Tomate	1.160.423	70.214.667
Melancia	1.495.331	63.960.354
Batata-doce	2.323.141	51.629.135
Maçã	1.996.632	49.603.050
Demais culturas	73.599.312	764.340.995
Total	184.838.437	1.912.193.486

Fonte: FAO, 2023.

A elevada produção agrícola chinesa, especialmente de cereais como milho, arroz e trigo, gera um volume expressivo de resíduos com potencial para aproveitamento industrial. Considerando o coeficiente médio de geração de resíduo por cultura, é possível estimar a disponibilidade anual de biomassa residual no país. A Tabela 4 apresenta essa estimativa para as principais culturas agrícolas da China, destacando a dimensão do recurso e seu papel estratégico no abastecimento de fibras não-madeira para a indústria de celulose.

Tabela 4 - Estimativa de geração de resíduos (ton) considerando tipo de resíduo, coeficiente de geração de resíduo (CGR) médio e produção (ton) para as principais culturas na China.

Cultura	Produção (ton)	CGR	Resíduo	Estimativa Resíduo (ton)
Milho	289.086.202	2,23	Palha	644.662.231
		1	Espiga	287.929.858
Arroz	208.064.200	0,65	Casca	135.935.277
		1,32	Palha	273.604.423
Trigo	136.596.100	1,34	Palha	183.038.774
		0,24	Palha	25.197.447
Cana-de-açúcar	104.989.361	0,27	Bagaço	27.822.181
		0,17	Topo e folhas	18.198.156

Fonte: FAO, 2023; CGR retirados da tabela 2 – página 22.

A China possui uma das maiores produções agrícolas do mundo, o que resulta em uma expressiva geração de biomassa residual. Os resíduos agrícolas representam cerca de 64% da biomassa residual total disponível no país, com destaque para a palha de cereais, esterco animal e resíduos do processamento agrícola. A produção teórica anual de biomassa agrícola é estimada em 870 milhões de toneladas, sendo que aproximadamente 400 milhões de toneladas são tecnicamente aproveitáveis, considerando limitações relacionadas à coleta, dispersão geográfica, uso tradicional na alimentação animal e práticas agronômicas de retorno ao solo (Zhang et al., 2023). Dentre os principais resíduos, a palha de milho lidera em potencial energético, seguida por arroz e trigo, culturas que também se destacam como fontes viáveis para a produção de celulose não-madeireira.

Além do grande volume disponível, a distribuição espacial da biomassa residual agrícola na China favorece seu uso industrial. As regiões com maior densidade de geração estão localizadas no leste, sudeste e nordeste do país, onde há alta concentração de atividades agrícolas e melhor infraestrutura logística. Isso contribui para reduzir os custos operacionais associados à coleta e ao transporte, tornando viável o abastecimento de unidades de produção de celulose baseada em fibras alternativas. Ainda segundo os autores, o aproveitamento desses resíduos para fins industriais, como produção de energia e papel, é uma estratégia cada vez mais considerada no planejamento ambiental e energético chinês. Portanto, a conjunção entre necessidade estratégica de reduzir a pressão sobre florestas, disponibilidade massiva de biomassa agrícola e políticas de incentivo ambiental, posiciona a China como um modelo funcional de integração entre agricultura e indústria de base florestal renovável (Zhang et al., 2023).

A China gera aproximadamente 80 milhões de toneladas de palha de trigo por ano, configurando-se como o principal resíduo agrícola do país (Huang et al., 2016). Apesar do

grande volume disponível, sua utilização na indústria de celulose ainda é limitada, principalmente devido a impactos ambientais e à baixa eficiência na recuperação de álcalis durante o processo de polpação (Melro et al., 2020). Como consequência, esse resíduo é majoritariamente enterrado no solo ou queimado a campo, práticas adotadas por serem rápidas e de baixo custo para preparo das áreas agrícolas (Liu et al., 2017). Adicionalmente, o resíduo sólido gerado na polpação apresenta estrutura complexa, dificultando seu reaproveitamento (Huang et al., 2016). Nesse contexto, o desenvolvimento de rotas tecnológicas economicamente viáveis para a valorização desses resíduos é essencial para o avanço da sustentabilidade ambiental (Bian et al., 2019).

Com exceção de Índia e China, a produção global de celulose a partir de fibras não madeireiras ainda é bastante restrita. Dados da FAOSTAT (2019) indicam que, desde a década de 1980, mais de 80% da celulose não madeireira no mundo tem sido produzida em países asiáticos. Nesses países, entre 1995 e 2018, a produção média de celulose oriunda de fibras alternativas à madeira foi estimada em aproximadamente 14.258.000 toneladas métricas. Já na Europa, os países membros da CEPI, que representam 92% da produção europeia de celulose e papel, registraram uma produção de celulose não madeireira equivalente a apenas 0,8% do total, cerca de 273.000 toneladas (CEPI, 2020).

A China está entre os principais países que mais utilizam fibras não madeireiras na produção de celulose e papel, em comparação com outras nações do mundo (Gonzalo et al., 2017). De acordo com a tabela 1 mostrado na página 16 deste trabalho, a China figura como país líder em capacidade de produção de celulose a partir de fibras não madeireiras. O país asiático em questão apresenta cerca de 71% da capacidade global de polpação a partir de matéria prima alternativas (Abd El-Sayed et al., 2020) e reforça seu papel pioneiro na adesão destas tecnologias.

A crescente adoção dessas fontes não convencionais reflete não apenas uma resposta à pressão ambiental, mas também uma oportunidade estratégica de diversificação produtiva, redução de impactos ambientais e fortalecimento da segurança no suprimento de matérias-primas. Nesse cenário, as fibras não-madeira podem assumir um papel central na transição do setor celulósico chinês rumo a uma matriz mais sustentável e resiliente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante da crescente pressão por cadeias produtivas mais sustentáveis, a presente dissertação buscou compreender o potencial técnico e estratégico das fibras não-madeireiras

como alternativa à celulose convencional, analisando realidades distintas e complementares entre China, Europa e América Latina. A análise comparativa revelou que, embora existam diferenças significativas nas motivações e níveis de adoção, o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de celulose representa uma tendência comum e promissora em todos os cenários estudados.

Embora a geração de resíduos agrícolas na China e em outros países de grande produção agropecuária seja volumosa, nem toda essa biomassa pode ser tecnicamente ou economicamente aproveitada pela indústria de celulose. Questões logísticas, como a dispersão geográfica das propriedades rurais, a falta de infraestrutura adequada para coleta e armazenamento, e os altos custos de transporte inviabilizam o uso de parte significativa dessa matéria-prima (Fahmy et al., 2017). Além disso, muitos resíduos agrícolas já têm destinação consolidada, sendo utilizados como ração animal, cobertura morta do solo ou fonte de energia térmica, o que limita sua disponibilidade para usos industriais (Araújo et al., 2019). Mesmo quando disponíveis, alguns resíduos apresentam características físico-químicas desfavoráveis, como alto teor de sílica, a exemplo de palha de arroz, baixa resistência da fibra, ou necessidade de processos mais intensivos de polpação e branqueamento, elevando os custos de produção (Orellana et al., 2020; Li et al., 2023).

Outro fator limitante diz respeito aos impactos ambientais e agronômicos da retirada excessiva de resíduos agrícolas do campo. A biomassa remanescente exerce função essencial na manutenção da fertilidade do solo, na retenção de umidade e na prevenção da erosão, especialmente em regiões sujeitas a degradação (Scarlat et al., 2019). Assim, práticas sustentáveis de manejo exigem que apenas uma fração dos resíduos seja retirada para fins industriais, respeitando os limites ecológicos de cada sistema agrícola. Somado a isso, a ausência de políticas públicas específicas, incentivos econômicos e tecnologias adaptadas ao processamento eficiente de fibras não-madeireiras ainda é um entrave à expansão dessa alternativa em muitos países (Jayaprakash et al., 2022). Diante desses fatores, a estimativa do “potencial técnico” de aproveitamento de resíduos deve sempre considerar aspectos logísticos, agronômicos, econômicos e ambientais, e não apenas o volume bruto gerado no campo.

Diante da crescente pressão por cadeias produtivas mais sustentáveis, esta dissertação teve como objetivo analisar o potencial técnico e estratégico das fibras não-madeireiras como alternativa à celulose tradicional de origem florestal. A abordagem proposta buscou compreender as motivações, oportunidades e desafios associados ao aproveitamento de resíduos agrícolas na produção de celulose, com ênfase nas realidades da China, Europa e

América Latina, três contextos distintos, mas interligados pela busca por soluções mais circulares e resilientes.

Os resultados revelam que a China lidera mundialmente a produção de celulose a partir de fibras não-madeireiras, impulsionada por fatores estruturais como a escassez de madeira, o histórico de degradação florestal e a abundante geração de resíduos agrícolas, especialmente arroz e trigo. A Europa, embora ainda restrita em escala produtiva, se destaca pelo avanço técnico-científico e por políticas públicas voltadas à bioeconomia, à redução da pegada ambiental e à segurança no suprimento de fibras. Já a América Latina apresenta um enorme potencial inexplorado: sua forte base agropecuária e sua posição de destaque como exportadora global de celulose indicam um caminho possível para diversificar a matriz produtiva e agregar valor localmente aos resíduos gerados no campo.

No entanto, a transição para uma cadeia de celulose baseada em resíduos agrícolas não é isenta de desafios. Apesar do alto volume teórico de biomassa disponível, nem toda essa fração é tecnicamente ou economicamente viável para uso industrial. Limitações logísticas como a dispersão geográfica das propriedades e os custos de coleta e transporte, se somam ao fato de que muitos resíduos já têm destinações consolidadas, como alimentação animal e práticas agronômicas. Além disso, propriedades físico-químicas desfavoráveis (como alto teor de sílica ou baixa resistência das fibras), bem como riscos ambientais relacionados à retirada excessiva de biomassa do solo, reduzem a fração de resíduo efetivamente aproveitável. A ausência de políticas públicas específicas, de incentivos econômicos e de infraestrutura adaptada também limita o avanço do setor em regiões com grande potencial, como a América Latina.

Ainda assim, as evidências apontam que o uso de fibras não-madeireiras pode representar uma resposta concreta e estratégica às demandas por descarbonização, inovação e circularidade. Ao transformar um passivo agrícola em recurso industrial, essa abordagem tem o potencial de mitigar impactos ambientais, ampliar a segurança no suprimento de fibras e gerar novos arranjos produtivos entre o campo e a indústria. A experiência chinesa, os avanços europeus e as oportunidades latino-americanas revelam caminhos possíveis, distintos, mas complementares, para construir uma cadeia de celulose mais sustentável e adaptada aos desafios do século XXI.

Esta dissertação contribui ao avanço teórico ao consolidar uma visão integrada do tema e oferecer bases para futuras pesquisas voltadas à avaliação técnica, econômica e ambiental da celulose não-madeireira. Como continuidade, recomenda-se a realização de estudos de caso industriais, análises do ciclo de vida da produção de celulose a partir de diferentes resíduos, e

o desenvolvimento de tecnologias específicas para materiais com baixa processabilidade, como a casca de arroz. Políticas públicas e arranjos logísticos também devem ser explorados como dimensões-chave para viabilizar essa transição em maior escala.

Em um mundo onde o resíduo agrícola ainda é amplamente subvalorizado, pensar em celulose a partir de palhas e bagaços é mais do que uma inovação tecnológica, é um convite à reinvenção da própria lógica produtiva. Transformar resíduos em recurso é, antes de tudo, transformar limites em possibilidades.

6 CONCLUSÕES

A Europa e a China possuem grande potencial para o uso de resíduos agrícolas como fontes alternativas de fibras na produção de celulose. Entre os principais resíduos disponíveis estão a palha de trigo, abundante em ambos os continentes; a palha de arroz, especialmente na China; o bagaço de cana-de-açúcar, com uso consolidado na China; e o bagaço de beterraba sacarina, relevante na Europa.

Na Europa, a palha de trigo é o resíduo agrícola mais indicado para a produção de celulose, devido à sua elevada geração, composição lignocelulósica favorável e fibras com propriedades semelhantes às das madeiras duras, o que facilita sua integração aos processos industriais. Já na China, destaca-se a palha de arroz como a alternativa mais recomendada, pela grande disponibilidade local e pela experiência acumulada no aproveitamento desse resíduo em processos de celulose não madeireira, apesar de suas características químicas exigirem soluções tecnológicas específicas.

A China lidera mundialmente a produção de celulose a partir de fibras não-madeireiras, graças a um forte modelo industrial, políticas públicas e investimentos tecnológicos. A Europa avança na incorporação de resíduos agrícolas em sua bioeconomia, fomentando uma indústria de celulose mais sustentável. Porém, desafios técnicos e logísticos, como o alto teor de cinzas e sílica, a sazonalidade e a infraestrutura, ainda limitam o aproveitamento.

Os exemplos da China e da Europa podem servir de referência para a América Latina na implementação de práticas mais sustentáveis e inovadoras no setor de papel e celulose, contribuindo para enfrentar desafios relacionados à escassez e à diversificação da matéria-prima na indústria.

7 CONCLUSÕES GERAIS

A análise integrada evidencia que o aproveitamento de resíduos agrícolas para a produção de celulose é uma alternativa sustentável, técnica e com potencial de viabilidade econômica para diversificar a matriz de fibras e reduzir a dependência de madeira.

Entre os resíduos com maior potencial global, destacam-se, na América Latina, o bagaço de cana-de-açúcar e a palha de milho, enquanto na Europa e na China sobressaem a palha de trigo, a palha de arroz e o bagaço de cana-de-açúcar. Esses resíduos apresentam elevada geração anual, boa logística de disponibilidade e composição lignocelulósica favorável aos processos de polpação, reforçando sua relevância para a indústria.

A América Latina ainda precisa superar barreiras logísticas e tecnológicas, enquanto Europa e China demonstram modelos mais robustos que podem servir de referência para políticas e inovação industrial no setor de papel e celulose.

Os métodos atuais para produzir celulose a partir de resíduos agrícolas são, em sua maioria, adaptações dos procedimentos convencionais para fibras florestais e apresentam limitações. Nesse sentido, se torna essencial desenvolver métodos específicos que considerem as características próprias desses resíduos, para otimizar a produção, aumentar a sustentabilidade e viabilizar a escala industrial.

O trabalho reforça a importância da integração entre setores agrícola, florestal e industrial, e do uso de inteligência competitiva como ferramenta estratégica para garantir a resiliência e sustentabilidade da indústria de celulose.

Na Europa, a palha de trigo é o resíduo agrícola mais indicado para a produção de celulose, devido à sua elevada geração, composição lignocelulósica favorável e fibras com propriedades semelhantes às das madeiras duras, o que facilita sua integração aos processos industriais. Já na China, destaca-se a palha de arroz como a alternativa mais recomendada, pela grande disponibilidade local e pela experiência acumulada no aproveitamento desse resíduo em processos de celulose não madeireira, apesar de suas características químicas exigirem soluções tecnológicas específicas.

REFERÊNCIAS

- Abd El-Sayed, E. S.; El-Sakhawy, M.; El-Sakhawy, M. A. Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp e Paper Research Journal*, v. 35, n. 2, p. 215–230, 2020.
- Araújo, D. J. C.; Machado, A. V.; Vilarinho, M. C. L. G. Availability and suitability of agroindustrial residues as feedstock for cellulose-based materials: Brazil case study. *Waste and Biomass Valorization*, v. 10, p. 2863–2878, 2019.
- Bedomić, R.; Čosić, B.; Duić, N. Technical potential and geographic distribution of agricultural residues, co-products and by-products in the European Union. *Science of the Total Environment*, v. 686, p. 568–579, 2019.
- Bian, H.; Yang, M.; Wang, Z.; Chen, L.; Wang, Z.; Wang, W.; Zhang, H. Utilization of agricultural residues for the preparation of biomass-based activated carbons: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 234, p. 1161–1173, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.034.
- Chen, M.; Zhang, X.; Liu, C.; Sun, R.; Lu, F. Approach to renewable lignocellulosic biomass film directly from bagasse. *ACS Sustainable Chemistry e Engineering*, v. 2, p. 1164–1168, 2014.
- Comissão Europeia. *Energy system factsheet: decarbonising our energy system to meet our climate goals*. Bruxelas, 2021. Acesso em: 20 jun. 2025.
- Concawe. *Sustainable biomass availability in the EU towards 2050: RED-II Annex IX, Parts A and B. Concawe Review*, v. 30, n. 2, 2021. Disponível em: <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Sustainable-biomass-availability-in-the-EU-towards-2050-RED-II-Annex-IX-Parts-A-and-B-Concawe-Review-30.2.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.
- Confederation of European Paper Industries – CEPI. *Key statistics report 2019*. 2020. Disponível em: <https://www.cepi.org>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- Cypriano, D. Z.; Da Silva, L. L.; Tasic, L. High value-added products from the orange juice industry waste. *Waste Management*, v. 79, p. 71–78, 2018.
- Duquennoi, C.; Martinez, J. European Union's policymaking on sustainable waste management and circularity in agroecosystems: the potential for innovative interactions between science and decision-making. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 6, p. 937802, 2022.
- European Commission – Joint Research Centre; Knowledge4Policy. *Factsheet: National strategies – Belgium (Fiche de synthèse : stratégies nationales – Belgique)*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 9 abr. 2025. 4 p. Disponível em: https://knowledge4policy.ec.europa.eu/sites/default/files/factsheet_national_BE_strategies_09_042025.pdf. Acesso em: 9 jul. 2025.
- Fahmy, Y.; Mobarak, F.; El-Sakhawy, M.; Fadl, M. H. Agricultural residues (wastes) for manufacture of paper, board, and miscellaneous products: background overview and future prospects. *International Journal of ChemTech Research*, v. 10, n. 2, p. 424–448, 2017.

Fastmarkets. *How the EU Deforestation Regulation (EUDR) will impact the pulp and paper industry*. 2024. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/eudr-impact-pulp-paper-industry/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Feng, J.; Zhang, W.; Wang, L.; He, C. Performance comparison of four kinds of straw/PLA/PBAT wood plastic composites. *BioResources*, v. 15, n. 2, p. 2596, 2020.

Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAOSTAT. *Forestry production and trade*. 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 2 jun. 2025.

Gaffey, J. et al. Understanding consumer perspectives of bio-based products — a comparative case study from Ireland and The Netherlands. *Sustainability*, v. 13, n. 11, p. 6062, 2021.

Gerard, F.; Jayet, P. A. European farmers' response to crop residue prices and implications for bioenergy policies. *Energy Economics*, v. 123, p. 106631, 2023.

Huang, C.; Wu, X.; Huang, Y.; Lai, C.; Li, X.; Yong, Q. Prewashing enhances the liquid hot water pretreatment efficiency of waste wheat straw with high free ash content. *Bioresource Technology*, v. 219, p. 583–588, 2016.

Jahan, M. S.; Rahman, M. M.; Ni, Y. Alternative initiatives for non-wood chemical pulping and integration with the biorefinery concept: a review. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 15, n. 1, p. 100–118, 2021.

Jayaprakash, K.; Osama, A.; Rajagopal, R.; Goyette, B.; Karthikeyan, O. P. Agriculture waste biomass repurposed into natural fibers: a circular bioeconomy perspective. *Bioengineering*, v. 9, n. 7, p. 296, 2022.

Jebali, Z.; Nabili, A.; Majdoub, H.; Boufi, S. Cellulose nanofibrils (CNFs) from *Ammophila arenaria*, a natural and a fast growing grass plant. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 107, p. 530–536, 2018.

Karaky, H.; Maalouf, C.; Bliard, C.; Gacoin, A.; El Wakil, N.; Polidori, G. Characterization of beet-pulp fiber reinforced potato starch biopolymer composites for building applications. *Construction and Building Materials*, v. 203, p. 711–721, 2019.

Kaur, D.; Bhardwaj, N. K.; Lohchab, R. K. A study on pulping of rice straw and impact of incorporation of chlorine dioxide during bleaching on pulp properties and effluents characteristics. *Journal of Cleaner Production*, v. 170, p. 174–182, 2018.

Kaza, S.; Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. Washington, DC: World Bank Publications, 2018.

Liu, Z.; Wang, W.J.; Ballantyne, A.; He, H.S.; Wang, X.; Liu, S.; Ciais, P.; Wimberly, M.C.; Piao, S.; Yu, K.; Yao, Q.; Liang, Y.; Wu, Z.; Fang, Y.; Chen, A.; Xu, W.; Zhu, J. Forest disturbance decreased in China from 1986 to 2020 despite regional variations. *Communications Earth e Environment*, v. 4, n. 1, p. 15, 2023.

Liu, Q.; Lu, Y.; Aguedo, M.; Jacquet, N.; Ouyang, C.; He, W.; Yan, C.; Bai, W.; Guo, R.; Goffin, D.; Song, J.; Richel, A. Isolation of high-purity cellulose nanofibers from wheat straw through the combined environmentally friendly methods of steam explosion, microwave-

assisted hydrolysis, and microfluidization. *ACS Sustainable Chemistry e Engineering*, v. 5, p. 6183–6191, 2017. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b01108.

Lynch, J.; Cain, M.; Frame, D.; Pierrehumbert, R. Agriculture's contribution to climate change and role in mitigation is distinct from predominantly fossil CO₂-emitting sectors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 4, p. 518039, 2021.

Market Research Future. *Wheat Straw Market – Forecast to 2034*. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/wheat-straw-market-38422>. Acesso em: 20 jun. 2025.

Maximilian, L.; Baharak, S.; Chen, W.-Y. *Handbook of climate change mitigation and adaptation*. 3. ed. Cham: Springer, 2022.

Melro, E.; Filipe, A.; Sousa, D.; Valente, A. J.; Romano, A.; Antunes, F. E.; Medronho, B. Dissolution of kraft lignin in alkaline solutions. *International journal of biological macromolecules*, v. 148, p. 688-695, 2020.

Mordor Intelligence. *Europe e MENA pulp market size e share analysis - growth trends e forecasts (2025–2030)*. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/europe-and-mena-pulp-market>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Orellana, B. B. M. A.; Do Vale, A. T.; Orellana, J. B. P.; Chaves, B. S.; Moreira, A. C. M. Caracterização de resíduos agroindustriais da região do Distrito Federal para fins energéticos. *Energia na agricultura*, v. 35, n.1, p. 46-61, 2020.

PaperChain. *The project*. 2020. Disponível em: <https://www.paperchain.eu/the-project/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Phiri, R.; Mavinkere Rangappa, S.; Siengchin, S. Agro-waste for renewable and sustainable green production: a review. *Journal of Cleaner Production*, v. 434, p. 139989, 2024.

Processum; LGI; Tecnalia; Acciona; UAVR; ZAG. *Raw materials supply scenario (Deliverable D2.3)*. *PaperChain Project*, jan. 2018. Disponível em: <https://www.paperchain.eu/wp-content/uploads/2020/04/paperChain-D02.3-EU-Raw-material-supply-scenario.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Qi, Z.; Wang, B.; Sun, C.; Yang, M.; Chen, X.; Zheng, D.; Yao, W.; Chen, Y.; Cheng, R.; Zhang, Y. Comparison of properties of poly(lactic acid) composites prepared from different components of corn straw fiber. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 23, p. 6746, 2022.

Rajeswari, S.; Baskaran, D.; Saravanan, P.; Rajasimman, M.; Rajamohan, N.; Vasseghian, Y. Production of ethanol from biomass — Recent research, scientometric review and future perspectives. *Fuel*, v. 317, p. 123448, 2022.

Scarlat, N.; Fahl, F.; Lugato, E.; Monforti-Ferrario, F.; Dallemand, J. F. Integrated and spatially explicit assessment of sustainable crop residues potential in Europe. *Biomass and Bioenergy*, v. 122, p. 257–269, 2019.

- Shi, S.; Zhang, M.; Ling, C.; Hou, W.; Yan, Z. Extraction and characterization of microcrystalline cellulose from waste cotton fabrics via hydrothermal method. *Waste Management*, v. 82, p. 139–146, 2018.
- Sholokhova, A.; Varžinskas, V.; Rutkaitė, R. Valorization of agro-waste in bio-based and biodegradable polymer composites: a comprehensive review with emphasis on Europe perspective. *Waste and Biomass Valorization*, v. 16, n. 4, p. 1537–1571, 2025.
- Singh, T.; Fekete, I.; Jakab, S. K.; Lendvai, L. Selection of straw waste reinforced sustainable polymer composite using a multi-criteria decision-making approach. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023.
- Smerald, A.; Rahimi, J.; Scheer, C. A global dataset for the production and usage of cereal residues in the period 1997–2021. *Scientific Data*, v. 10, n. 685, 2023.
- Thormann, L.; Neuling, U.; Kaltschmitt, M. Opportunities and challenges of the European Green Deal for the chemical industry: an approach measuring innovations in bioeconomy. *Resources*, v. 10, n. 9, p. 91, 2021.
- Timberland Investment Group. *Global wood pulp market: structure and dynamics*. Disponível em: <https://timberlandinvestmentgroup.com/wp-content/uploads/2024/09/TIG-White-Paper-Global-Wood-Pulp-Market-Structure-and-Dynamics.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- Tofanica, B. M.; Puitel, A. C. Optimization and design of alkaline pulping of rapeseed (*Brassica napus*) stalks. *Chemical Engineering Communications*, v. 206, n. 3, p. 378–386, 2019.
- Trigo, E. *The bioeconomy and food systems transformation: a view from the Americas*. 2021.
- Vaz Junior, S. *Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável*. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26 p. (Embrapa Agroenergia. Documentos, 31). ISSN 2177-4439. Disponível em: Infoteca-e Embrapa. Acesso em: 9 jul. 2025.
- Wang, Y.; Yuan, Z. W.; Tang, Y. Enhancing food security and environmental sustainability: a critical review of food loss and waste management. *Resources, Environment and Sustainability*, v. 4, p. 100023, 2021.
- Wojtasz, J. et al. Producing dissolving pulp from agricultural waste. *RSC Sustainability*, v. 3, n. 5, p. 2210–2220, 2025.
- Wojtasz, J.; Bengtsson, J.; Ulmefors, H.; Bernin, D.; Östlund, Å.; Yu, S. In-situ X-ray analysis of cold alkali dissolution of cellulose pulps of various origin. *Cellulose*, v. 32, n. 1, p. 115–131, 2025.
- Wolff, S.; Schweinle, J. Effectiveness and economic viability of forest certification: a systematic review. *Forests*, v. 13, n. 5, p. 798, 2022.
- World Biomarket Insights. *The beet goes on: valorising Europe's largest agro-waste pool*. Disponível em: <https://worldbiomarketinsights.com/the-beet-goes-on-valorising-europes-largest-agro-waste-pool/>. Acesso em: 19 jun. 2025.

Zhang, J.; Wei, J.; Guo, C.; Tang, Q.; Guo, H. The spatial distribution characteristics of the biomass residual potential in China. *Journal of Environmental Management*, v. 338, p. 117777, 2023.