UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Julyana Monteiro de Andrade Brito
Karina Rodrigues Ximenes de Souza

ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS NA OBTENÇÃO DE NANOCELULOSE DO EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS

Rio de Janeiro
2025

Julyana Monteiro de Andrade Brito
Karina Rodrigues Ximenes de Souza

ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS NA OBTENÇÃO DE NANOCELULOSE DO EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadora: Profa. Dra. Michelle Gonçalves Mothé
Co-Orientadora: Dra. Larissa Morais Viana

Rio de Janeiro
2025

CIP - CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Souza, Karina Rodrigues Ximenes de
Brito, Julyana Monteiro de Andrade

S729e ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS NA OBTENÇÃO DE NANOCELULOSE DO EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS/ Karina Rodrigues Ximenes de Souza, Julyana Monteiro de Andrade Brito. -- Rio de Janeiro, 2025.
96 f.

Orientadora: Michelle Gonçalves Mothé.
Coorientadora: Larissa Morais Viana .
Trabalho de conclusão de curso(graduação)- Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2025.

1. nanocelulose. 2. eucalipto. 3. embalagens sustentáveis.4.extração da nanocelulose.I.Mothé, Michelle Gonçalves, orient. II. Viana , Larissa Morais , coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Julyana Monteiro de Andrade Brito

Karina Rodrigues Ximenes de Souza

ESTUDO COMPARATIVO DE METODOLOGIAS NA OBTENÇÃO DE NANOCELULOSE DO EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS SUSTENTÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 15 de julho de 2025.

_____

Profa. Dra. Michelle Gonçalves Mothé - EQ/UFRJ

_____

Dra. Naienne da Silva Santana - EQ/UFRJ

_____

Prof. Dr. Marcelo Mendes Viana – EQ/UFRJ

Rio de Janeiro
2025

A todas as meninas e mulheres, que um dia sonharam ocupar lugares que pareciam impossíveis. Não há nada que não sejamos capazes de realizar. Vocês me inspiram a seguir conquistando o mundo.

(Julyana)

Aos meus irmãos, Francisco e Arthur (in memorian), que me guiam além da vida. Sem a força de vocês nada seria possível. Obrigada por me inspirarem e serem a luz da minha vida.

(Karina)

AGRADECIMENTOS JULYANA

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, Jaqueline e Beto, por me darem a vida e por caminharem comigo em cada passo, sonhando meus sonhos, acreditando em mim e celebrando minhas conquistas como se fossem deles. Essa vitória é nossa. Amo vocês.

À minha família, minha eterna gratidão pelo apoio incondicional, pelas caronas, refeições, brincadeiras e palavras de incentivo. Em especial, à Karen, minha prima-irmã, que foi meu alicerce nos dias difíceis, obrigada por me ouvir, acolher e tornar minha caminhada mais leve. Te amo profundamente.

Aos meus amigos de todas as fases da vida — do ensino fundamental à FIOCRUZ — obrigada por serem presença constante, abrigo, riso e parceria. Cada um de vocês contribuiu para a realização deste sonho.

Aos professores que marcaram minha trajetória, desde o IFRJ até a UFRJ, sou imensamente grata por tanto aprendizado e inspiração. Um agradecimento especial à professora Tuane Vieira, que me orienta desde o técnico e sempre acreditou no meu potencial, e à professora Michelle Mothé, minha orientadora neste trabalho, pela condução atenciosa e inspiradora. Estendo também meus agradecimentos à Larissa Viana, que nos auxiliou e co-orientou ao longo dessa jornada tornando-a menos pesada.

À Karina, minha parceira de trabalho, obrigada por dividir comigo os desafios, as dúvidas e também as alegrias. Você é uma amiga admirável e tenho orgulho da trajetória que estamos construindo. Estarei sempre torcendo por você.

A Universidade Federal do Rio de Janeiro e a Escola de Química deixo registrado meus mais sinceros sentimentos de gratidão. Ter a oportunidade de cursar uma faculdade pública de qualidade é um privilégio que poucas pessoas têm. Entrar na EQ-UFRJ foi um sonho, sair dela formada é um ainda maior.

Por fim, agradeço a Deus, que esteve comigo em cada etapa, mesmo quando me senti sozinha. Foi Ele quem me sustentou e fortaleceu. Obrigada, Jesus, por ser minha luz, apesar das minhas falhas.

AGRADECIMENTOS KARINA

Primeiramente, começo dedicando minha mais profunda gratidão e saudade aos meus irmãos, Francisco e Arthur. A ausência de vocês é sentida todos os dias, mas a lembrança do amor que compartilhamos me fortalece. Vocês seguem vivos em mim, sendo parte essencial da minha história, em cada conquista e passo que dou.

Aos meus pais, Francisco e Ximenes, e aos meus avós, Ernestina e Valdemar, meu eterno agradecimento. Obrigada pelos conselhos, pela paciência e por nunca desistirem de mim. Vocês me ensinaram o valor do estudo, da honestidade e da persistência. Obrigada por terem me criado com tanto amor, cuidado e dedicação, por cada sacrifício e por acreditarem nos meus sonhos como se fossem os seus.

Ao meu amor, Diogo, obrigada por ser meu apoio incondicional. Por estar ao meu lado nos dias bons e, principalmente, nos dias difíceis. Sua presença me acalma, me inspira e me dá forças para seguir mesmo quando tudo parece pesado demais. Sua parceria foi essencial para que eu conseguisse atravessar essa jornada com coragem e confiança.

À minha orientadora, Michelle Mothé, e à minha co-orientadora, Larissa Viana, registro minha gratidão pela orientação dedicada, pelo olhar atento e pela confiança no meu trabalho. O incentivo e compromisso com a pesquisa foram essenciais para a realização deste projeto.

Aos amigos da UFRJ, Ana Flávia, Karen e Julyana, obrigada por dividirem essa caminhada comigo. Cada conversa, desabafo e risada tornou tudo mais leve. Que privilégio ter vivido essa fase com vocês. Agradeço, em especial, à minha dupla Julyana, por dividir essa reta final com tanta parceria, leveza e comprometimento, continue sendo essa luz por onde passa.

Às amigas que a vida profissional me deu, Victória, Bianca e Gabriela, agradeço pelo incentivo, pelas palavras certas e por me ajudarem a crescer, pessoal e profissionalmente. Levarei vocês sempre comigo e guardo cada aprendizado e cada memória com carinho.

À minha irmã de vida, Geovanna, obrigada por ser esse elo constante. Por me conhecer tão bem, ouvir meus silêncios e me acolher sem julgar. A nossa amizade é um refúgio precioso.

Por fim, a agradeço à UFRJ por ter sido o espaço que me desafiou, acolheu e me formou como uma profissional. É um imenso orgulho poder falar que sou filha de Minerva!

"Deveríamos ser lembrados pelas coisas que fazemos. Elas importam mais do que tudo. Mais do que aquilo que dizemos ou da nossa aparência. As coisas que fazemos sobrevivem a nós. São como monumentos que as pessoas erguem em honra dos herois depois que eles morrem."

R. J. Palacio

RESUMO

BRITO, Julyana Monteiro de Andrade; SOUZA, Karina Rodrigues Ximenes de. **Estudo Comparativo de Metodologias na Obtenção de Nanocelulose do Eucalipto para Produção de Embalagens Sustentáveis**. Rio de Janeiro, 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025.

Com o aumento da demanda por soluções ambientalmente sustentáveis, os materiais biodegradáveis têm se destacado como alternativas promissoras aos polímeros sintéticos, especialmente em aplicações como embalagens. Nesse contexto, a nanocelulose tem atraído atenção devido às suas propriedades físico-químicas, como alta resistência mecânica, biodegradabilidade e capacidade de formar filmes. Este trabalho tem como objetivo revisar metodologias de obtenção de nanocelulose a partir do eucalipto, destacando seu potencial para uso em embalagens sustentáveis. O estudo foi desenvolvido por meio de revisão bibliográfica e análise comparativa de diferentes métodos de extração, como processos químicos, físicos e enzimáticos, através de artigos obtidos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. A celulose extraída da fibra de eucalipto passa por diversas etapas, podendo incluir purificação, tratamentos mecânicos e/ou químicos que promovem a fibrilação em escala nanométrica. Nos estudos avaliados, a caracterização da nanocelulose foi realizada por técnicas como microscopia eletrônica, espectroscopia no infravermelho, difração de raios X e análise térmica, confirmando a presença de fibras nanométricas com alta cristalinidade, pureza e boa estabilidade térmica. Os resultados observados também indicaram que a nanocelulose obtida apresentou morfologia fibrilar bem definida, elevado grau de cristalinidade e resistência térmica compatível com aplicações industriais, evidenciando o potencial do eucalipto como matéria-prima. Essa viabilidade é especialmente relevante para países como o Brasil, onde a planta é amplamente cultivada.

Palavras-chave: nanocelulose; eucalipto; extração da nanocelulose; embalagens sustentáveis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Principais países exportadores de celulose no ano de 2023.....18
Figura 3.2 - Principais países produtores de celulose.....18
Figura 3.3 - Área plantada no Brasil, por espécie, em 2023.....19
Figura 4.1 - Planta *Cyperus papyrus* que dá origem ao papiro.....21
Figura 4.2 - Representação de um dos papiros que compõem o "Livro dos Mortos".....22
Figura 4.3 - Ilustração representativa de Cai Lun, o inventor do papel.....23
Figura 4.4 - Fibras naturais: exemplo de fibra vegetal, mineral e animal.....24
Figura 4.5 - Estrutura de uma fibra vegetal - Imagem MEV se refere à fibra do eucalipto....26
Figura 4.6 - Plantação de Árvores de Eucalipto.....27
Figura 4.7 - Dados da Produção da Silvicultura no Brasil em 2023.....28
Figura 4.8 - Estrutura da Lignocelulose.....30
Figura 4.9 - Estrutura química das unidades estruturais da hemicelulose.....31
Figura 4.10 - Representação das estruturas químicas dos 3 monômeros aromáticos que constituem a lignina.....32
Figura 4.11 - Fórmula química da celulose.....33
Figura 4.12 - Representação das ligações hidrogênio intra e intermoleculares e regiões cristalinas e amorfas das CNFs.....35
Figura 4.13 - Esquema do processo de obtenção das CFCs.....38
Figura 4.14 - Hidrólise ácida em vermelho, em regiões amorfas.....38
Figura 4.15 - Esquema do processo de obtenção das CNCs.....39
Figura 4.16 - Esquema geral da obtenção da nanocelulose.....40
Figura 4.17 - Aplicações da nanocelulose nos setores industriais.....41
Figura 4.18 - Membrana de nanocelulose vegetal aplicada no tratamento de queimaduras...42
Figura 4.19 - Principais destinos da exportação na cadeia de árvores cultivadas no ano de 2023 [Milhões de US$].....46
Figura 4.20 - Produção de celulose no Brasil [Milhões de toneladas].....46
Figura 4.21 - Maiores destinos das exportações brasileira de celulose do setor de árvores cultivadas em 2023 [%].....47
Figura 4.22 - Destino da produção de papel [Milhões de toneladas].....48
Figura 4.23 - Produção de papel no Brasil por tipo em 2023 [Milhões de toneladas].....48
Figura 4.24 - Maiores destinos das exportações brasileiras de papel do setor de árvores cultivadas, em 2023 [%].....49

Figura 4.25 - Produção de resíduo plástico bem gerenciado e mal gerenciado no mundo (em quilotonelada).....51
Figura 4.26 - Geração de resíduos plásticos per capita (2024).....51
Figura 5.1 - Página inicial da base de dados *Web of Science*, com destaque para o local onde foram inseridas as palavras chave utilizadas para a busca.....55
Figura 5.2 - Página inicial da base de dados *Scopus*, com destaque para o local onde foram inseridas as palavras chave utilizadas para a busca.....56
Figura 5.3 - Resultados obtidos das buscas, e seleção de anos para filtragem dos artigos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.....56
Figura 5.4 - Filtros disponíveis para seleção dos resultados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.....57
Figura 5.5 - Resumo da metodologia para busca e realização das tabelas e gráficos do estudo científico em artigos.....58
Figura 6.1 - Fluxograma PRISMA para o processo de seleção dos artigos.....61
Figura 6.2 - Abordagens utilizadas na obtenção da nanocelulose.....68
Figura 6.3 – Tipos de nanocelulose mais produzidos pelos artigos analisados.....69
Figura 6.4 – Comparação das Propriedades da Nanocelulose: Artigos vs Literatura.....72

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Lista preliminar de palavras-chaves.....53
Tabela 5.2 - Lista de palavras-chaves representativas.....54
Tabela 6.1 - Lista do quantitativo de artigos para a lista preliminar de palavras-chaves.....59
Tabela 6.2 - Lista do quantitativo de artigos para a lista de palavras-chaves selecionadas para o projeto.....60
Tabela 6.3 – Artigos selecionados para revisão bibliográfica.....61
Tabela 6.4 – Copilado dos resultados obtidos na análise dos artigos.....66
Tabela 6.5 – Quadro comparativo dos dados obtidos nos artigos analisados e na literatura.....71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFM	Microscopia de Força Atômica
BC	Celulose bacteriana
BPF	Boas Práticas de Fabricação
CMNF	Celulose Micro/Nanofibrilada Carboxilada
CNC	Cristais de celulose
CNF	Nanofibrilas de celulose
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
GC/MS	Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Cristalinidade
LC-MFC	Celulose Microfibrilada com Lignina
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PFI	*Pulverizer Fiberizer*
TEMPO	Composto químico 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil
TGA	Análise Termogravimétrica
Tmáx	Temperatura de Degradação Térmica
WoS	*Web of Science*
XRD	Difração de Raios X

Sumário

1. INTRODUÇÃO 15
2. OBJETIVO 17
2.1. OBJETIVO GERAL 17
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17
3. MOTIVAÇÃO 18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21
4.1. BREVE HISTÓRICO DO PAPEL 21
4.2. DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES 24
4.2.1. FIBRAS NATURAIS 24
4.2.2. ÁRVORE DO EUCALIPTO 27
4.2.3. COMPONENTES LIGNOCELULÓSICOS 30
4.2.4. CELULOSE 32
4.2.5. NANOCELULOSE 34
4.2.6. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO 37
4.3. APLICAÇÕES DA NANOCELULOSE NA INDÚSTRIA 40
4.4. AVANÇOS TECNOLÓGICOS 44
4.5. INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE 45
4.6. USO DE POLÍMEROS SINTÉTICOS 50
5. METODOLOGIA 53
5.1. SELEÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVES 53
5.2. BUSCA DE ARTIGOS 54
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO 59
6.1. MAPEAMENTO DOS ARTIGOS 59
6.2. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO 63
6.3. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO 69
6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS 73
7. CONCLUSÃO 75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 76

1. INTRODUÇÃO

A celulose é um polímero natural amplamente utilizado na indústria devido à sua abundância e versatilidade, sendo um dos principais componentes das paredes celulares de plantas (KLEMM et al., 2011). Sua aplicação abrange desde a produção de papel até usos em biomateriais, sendo também a matéria-prima fundamental para a obtenção de materiais avançados.

Entre esses materiais, destaca-se a nanocelulose, que é um material de dimensões nanométricas que mantém as propriedades fundamentais da celulose, mas com características aprimoradas, como maior resistência mecânica, leveza e alta área superficial (BHATNAGAR et al., 2015). Esse processo de conversão para nanocelulose ocorre por meio de tratamentos mecânicos, químicos ou enzimáticos que desestruturam as fibras da celulose em nanoescala, resultando em um material com novas possibilidades de aplicação, especialmente no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis (MOON et al., 2011; ABITBOL et al., 2016). Cada uma dessas metodologias apresenta vantagens e desafios específicos, como consumo energético, rendimento e impacto ambiental, que precisam ser cuidadosamente avaliados para garantir um equilíbrio entre eficiência produtiva e sustentabilidade (EICHHORN et al., 2010).

Tanto a celulose quanto a nanocelulose são obtidas a partir de fontes lignocelulósicas, incluindo resíduos agroindustriais e agroflorestais. Dentre as diversas matérias-primas disponíveis para a obtenção da nanocelulose, o eucalipto destaca-se como uma das fontes mais promissoras, especialmente no Brasil, que ocupa posição de destaque como um dos principais produtores mundiais de celulose (ANDRADE et al., 2010). Seu rápido crescimento, elevada produtividade por hectare e ampla disponibilidade tornam essa matéria-prima altamente viável para a produção de nanocelulose em larga escala. Além disso, sua composição, caracterizada por alto teor de celulose e baixo teor de lignina, favorece a extração de nanofibras de celulose com elevada pureza e desempenho estrutural significativo (GONÇALVES et al., 2019).

A nanocelulose derivada do eucalipto, portanto, desperta particular interesse por reunir essas características, tornando-se uma alternativa estratégica para a indústria de embalagens sustentáveis (KLEMM et al., 2011). Nesse contexto, sua aplicação possibilita a substituição progressiva dos polímeros sintéticos, cujo descarte inadequado contribui significativamente para a poluição ambiental (MOHAN et al., 2018). A transição para embalagens biodegradáveis à base de celulose não apenas reduz o acúmulo de plásticos no meio ambiente, mas também

fomenta um uso mais eficiente da biomassa florestal, promovendo a sustentabilidade da cadeia produtiva (SPENCE et al., 2011; HUBBE et al., 2017). Além disso, a nanocelulose apresenta propriedades de barreira que a tornam uma alternativa viável para aplicações em embalagens, contribuindo para a conservação de alimentos e reduzindo a dependência de polímeros derivados do petróleo (SYVERUD; STENSTAD; GRAFF, 2011).

Além dos benefícios ambientais, a incorporação da nanocelulose do eucalipto ao setor de embalagens atende às exigências regulatórias cada vez mais rigorosas e agrega valor econômico à cadeia de produção florestal (SHARMA et al., 2020). Empresas que adotam essa abordagem fortalecem sua competitividade ao atender à crescente demanda dos consumidores por produtos ecologicamente responsáveis (LIMA et al., 2019). Ademais, a valorização de resíduos industriais da produção de papel e celulose cria novas oportunidades econômicas, estimulando a inovação e a implementação de ciclos produtivos mais eficientes e sustentáveis (LACY; RUTQVIST, 2015).

2. OBJETIVO

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo realizar um monitoramento científico, em bases de busca de artigos científicos sobre metodologias para extração da nanocelulose a partir de fibras naturais da árvore do eucalipto, com potencial aplicação na produção de embalagens sustentáveis.

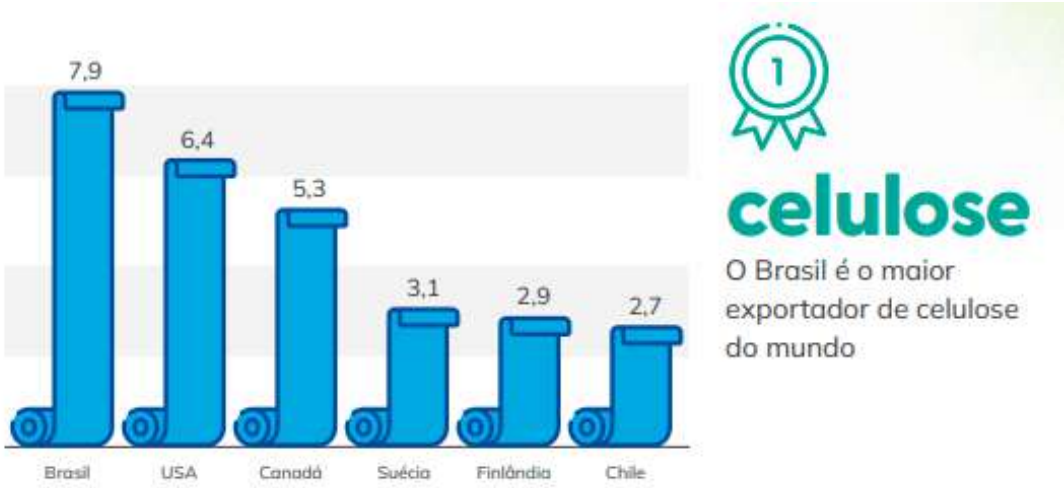
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar as bases de busca científica *Web of Science* e *Scopus* para gerar matriz de informações com base em artigos científicos publicados nos últimos 20 anos sobre a obtenção de nanocelulose a partir de processos de fibrilação utilizando como matéria-prima as fibras vegetais do eucalipto;
- Aplicar a metodologia PRISMA para determinar quais artigos serão detalhados a partir da seleção e combinação de palavras-chave específicas nas bases de busca;
- Identificar os principais países de origem das publicações e as principais tecnologias utilizadas de modo a discutir o papel do Brasil como instrumento de incentivo de inovação no setor de papel e celulose;
- Analisar e comparar os diferentes métodos de fibrilação da nanocelulose por meio de um estudo comparativo nas bases de artigos selecionados.

3. MOTIVAÇÃO

Ao analisar o cenário econômico brasileiro, pode-se dizer que o Brasil é o maior exportador de celulose do mundo, tendo exportado aproximadamente US$ 1,5 bilhão a mais que os Estados Unidos, segundo colocado (Figura 3.1) (Relatório anual IBÁ, 2024).

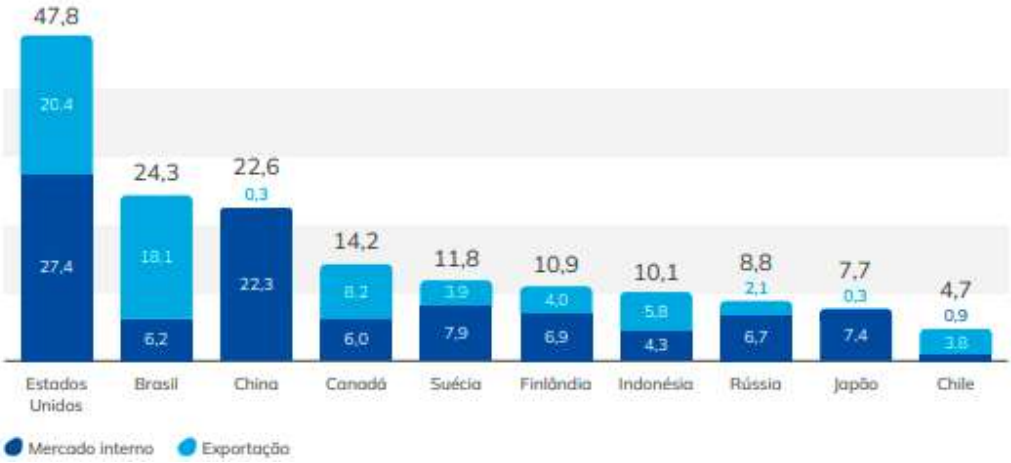
Figura 3.1 - Principais países exportadores de celulose no ano de 2023.



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Em 2023, a produção brasileira de celulose atingiu 24,3 milhões de toneladas. Líder mundial na exportação desse produto, o Brasil é o segundo maior produtor no ranking global (Figura 3.2), atrás somente dos Estados Unidos (Relatório anual IBÁ, 2024).

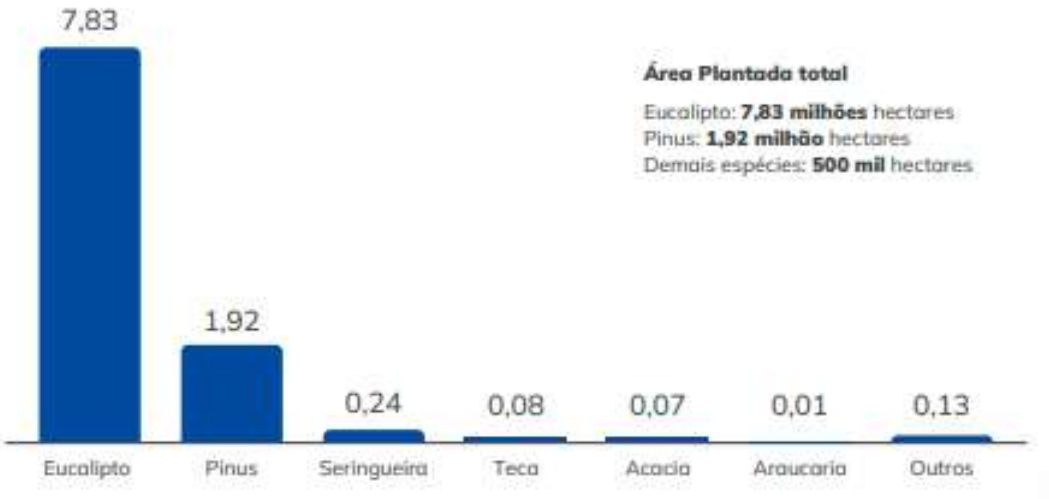
Figura 3.2 - Principais países produtores de celulose.



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

É importante ressaltar que dentre os tipos de plantios mais comuns no Brasil, o eucalipto se destaca, abrangendo 7,8 milhões de hectares, o que corresponde a 76% da área total plantada (Figura 3.3). Esse número representa um crescimento de 41% nos últimos dez anos, evidenciando a importância dessa espécie para a economia brasileira (Relatório anual IBÁ, 2024).

Figura 3.3 - Área plantada no Brasil, por espécie, em 2023.



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Sendo assim, é inegável a importância econômica da celulose no cenário atual brasileiro, assim como o eucalipto destaca-se como a principal matéria prima para a extração da celulose. Ainda sobre o contexto brasileiro, é importante destacar que, aproximadamente 500 bilhões de itens plásticos descartáveis são produzidos anualmente para consumo imediato e descarte. Desses, 87% são utilizados como embalagens, enquanto os 13% restantes correspondem a produtos de uso único, como sacolas plásticas e talheres (Oceana, 2024).

Nesse mesmo contexto, a nanocelulose surge como uma alternativa a celulose, podendo ser obtida da mesma matéria prima. Ademais, ela pode ser utilizada na confecção de embalagens, já que possibilita ser convertida em lâminas e estruturas, como filmes transparentes ou laminados, além de ser adicionada a diversos materiais de alto desempenho para uso industrial (CUNHA et al., 2017).

Portanto, diante da crescente preocupação com a sustentabilidade e da necessidade de reduzir a dependência de polímeros sintéticos, este estudo busca contribuir para o desenvolvimento e aprimoramento de soluções inovadoras para as indústrias. Além de reforçar

a importância da sustentabilidade na cadeia produtiva, a pesquisa pretende impulsionar avanços tecnológicos que ampliem as possibilidades de aplicação da nanocelulose, tornando-a uma alternativa viável e eficiente aos polímeros convencionais.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. BREVE HISTÓRICO DO PAPEL

Muito antes do surgimento do papel, os egípcios já faziam uso do papiro, um material de escrita produzido a partir da planta *Cyperus papyrus* (Figura 4.1), cultivada às margens do rio Nilo. Desde o terceiro milênio a.C., o papiro foi essencial para a documentação governamental, religiosa e literária do Antigo Egito, espalhando-se posteriormente para a Grécia e Roma (PARKER, 1972).

Figura 4.1 - Planta *Cyperus papyrus* que dá origem ao papiro.

Fonte: BBC Gardeners' World Magazine, 2025.

O papiro era altamente valorizado e comercializado em larga escala, sendo utilizado na produção de manuscritos, contratos e registros oficiais (CARRINGTON, 2005), exemplo visto na Figura 4.2. No entanto, apesar de sua importância, ele apresentava limitações, como sua fragilidade, suscetibilidade à umidade e dificuldade de produção em grandes quantidades, o que restringia sua disseminação em algumas regiões (HARRIS, 1995). Essas restrições incentivaram a busca por novos materiais que permitissem um registro mais eficiente e acessível da informação, o que se tornou um desafio central ao longo da Antiguidade (DIRINGER, 1953).

Figura 4.2 - Representação de um dos papiros que compõem o “Livro dos Mortos”.

Fonte: GALILEU. Papiro de 16 metros com texto do “Livro dos Mortos” é encontrado no Egito, 2023.

Foi na China antiga que um novo suporte de escrita revolucionaria a disseminação do conhecimento. Desenvolvido por volta de 105 d.C. por Cai Lun (do chinês, T’sai Lun), o papel se destacava pela leveza, flexibilidade e facilidade de produção (TSIEN, 1985). Embora algumas evidências arqueológicas sugerem que formas rudimentares de papel já existiam antes dessa data, Cai Lun foi o responsável por sistematizar sua fabricação (Figura 4.3) e aprimorar sua qualidade (NEEDHAM, 1985). Seu método utilizava fibras vegetais, como seda, bambu, cânhamo e amoreira, trituradas e misturadas com água para formar uma polpa que, após prensagem e secagem, resultava em folhas prontas para uso (HUNTER, 1943). Com sua praticidade e menor custo em comparação ao papiro, o papel rapidamente se tornou indispensável para registros administrativos, religiosos e acadêmicos, consolidando-se como um dos mais importantes meios de comunicação da história (BLOCH, 2001). Além disso, conforme Bloom (2001), a difusão do papel na Ásia e, posteriormente, na Europa, foi fundamental para o desenvolvimento da escrita e da impressão, facilitando a circulação do conhecimento em níveis sem precedentes.

Figura 4.3 - Ilustração representativa de Cai Lun, o inventor do papel.

Fonte: SHINE, 2025.

No mundo islâmico, a disseminação do papel se deu a partir do século VIII, após a Batalha de Talas, em 751, quando os chineses capturados transmitiram o conhecimento sobre sua fabricação para os árabes, permitindo a criação de centros de produção de papel em Bagdá, Samarcanda e outras regiões (BLOOM, 2001; TSCHUDI, 2011). Esse avanço foi fundamental para o florescimento intelectual da Idade Média, facilitando a produção de manuscritos e registros administrativos (TSCHUDI, 2011). Com o tempo, a expansão do uso do papel na Europa se consolidou na preservação e transmissão do conhecimento (BLOOM, 2001). Durante a Idade Média, sua disseminação foi crucial para o avanço da educação, das ciências e da religião, culminando, no século XV, com a invenção da prensa tipográfica por Johannes Gutenberg, que revolucionou a produção de livros e documentos, promovendo transformações sociais significativas (EISENSTEIN, 1979).

À medida que os séculos avançaram, o papel manteve sua importância central na sociedade, mas novos desafios surgiram. No século XX, com a crescente preocupação ambiental, diversas iniciativas foram adotadas para tornar sua produção mais sustentável (SMOOK, 2002). Movimentos ecológicos e regulamentações governamentais mais rígidas impulsionaram mudanças significativas na indústria papeleira, levando ao desenvolvimento de novas técnicas para reduzir o desmatamento e minimizar os resíduos industriais (HUBBE et al., 2008). A introdução de processos mais eficientes, como a reutilização de fibras recicladas

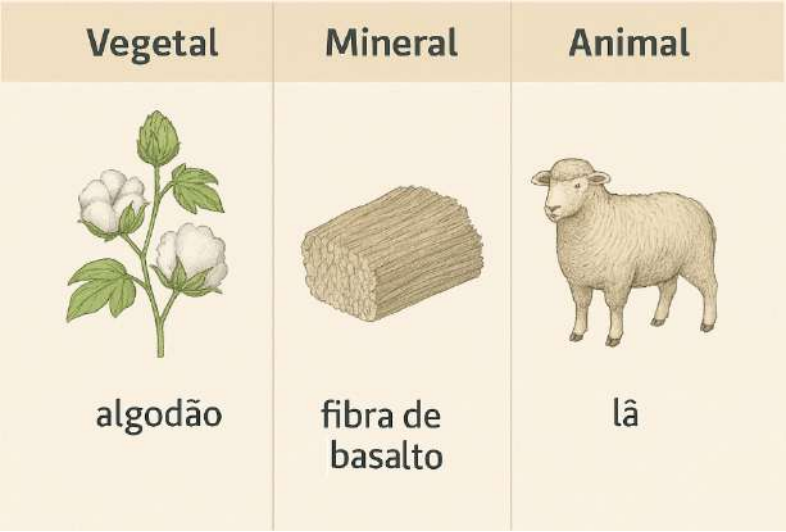
(GAVILLET et al., 2005), demonstrou um compromisso crescente com a redução dos impactos ambientais. Além disso, pesquisas avançadas sobre materiais à base de celulose permitiram a criação de alternativas biodegradáveis e sustentáveis, ampliando as possibilidades para um futuro menos dependente de recursos naturais não renováveis (GARCIA-OLIVA et al., 2018). Ainda, com a grande necessidade de reduzir a dependência dos polímeros sintéticos, o papel e seus derivados, como a nanocelulose, passaram a ser explorados como alternativas para a substituição de materiais plásticos, especialmente no setor de embalagens.

4.2. DEFINIÇÕES E CLASSIFICAÇÕES

4.2.1. FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais são materiais têxteis originados de fontes biológicas e são amplamente empregadas em diversas aplicações devido à sua característica sustentável, ao conforto que proporcionam e às suas propriedades físicas vantajosas (SOUZA, 2020). Elas podem ser divididas, conforme sua origem, em três grupos principais: fibras vegetais, animais e minerais (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Fibras naturais: exemplo de fibra vegetal, mineral e animal.



Fonte: Elaboração própria.

As fibras de origem vegetal são compostas majoritariamente por celulose, um polímero estrutural presente na parede celular das plantas, o que garante alta resistência e boa capacidade de absorver umidade (SILVA et al., 2018). Podem ser extraídas de diferentes partes da planta, como as sementes (caso do algodão), caules (como o linho, a juta e o cânhamo), folhas (como

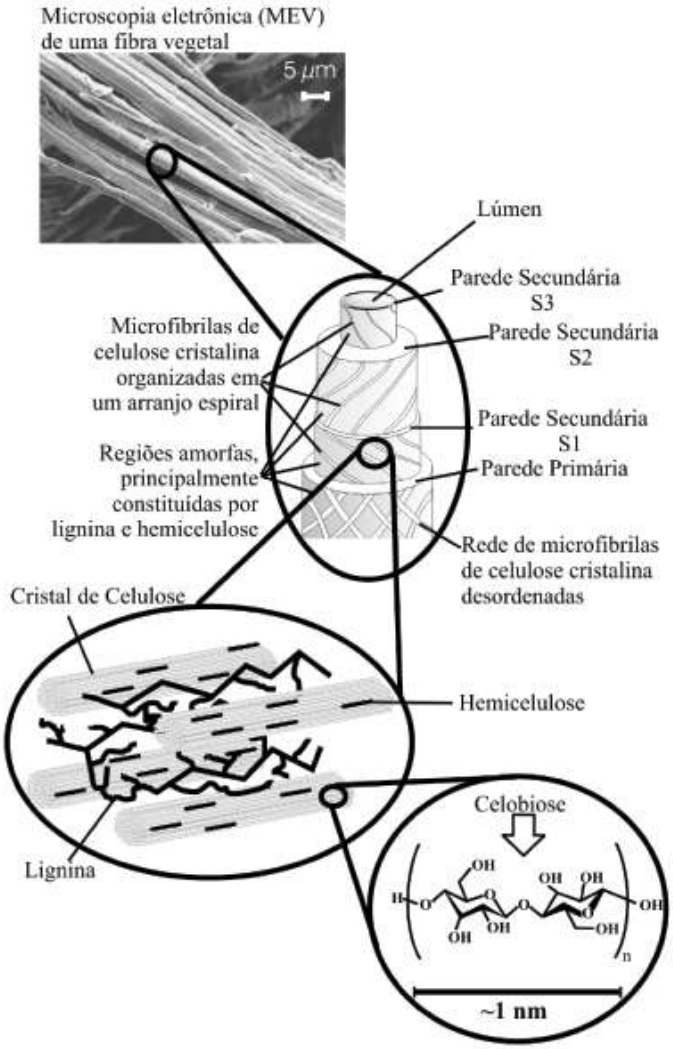
o sisal) e frutos (como o coco) (MARTINS, 2019). O algodão, por exemplo, é reconhecido por sua suavidade e ampla utilização no setor têxtil, enquanto o linho, por apresentar uma estrutura mais firme, é usado na produção de tecidos duráveis.

As fibras de origem animal, por sua vez, são formadas principalmente por proteínas como a queratina e a fibroína, que conferem alta elasticidade e excelentes propriedades térmicas (ALMEIDA; COSTA, 2021). Entre os exemplos mais conhecidos estão a lã — retirada da ovelha e muito apreciada por seu poder de isolamento térmico — e a seda — obtida do casulo do bicho-da-seda, notável por seu brilho e textura suave (FERREIRA, 2020).

Por último, embora menos frequentes, as fibras minerais também têm seu valor, especialmente na indústria, por sua durabilidade e resistência ao calor. O amianto é o exemplo mais representativo desse grupo, sendo empregado em áreas como a construção civil e na fabricação de materiais com alta resistência térmica (CARVALHO, 2017).

Ao compararmos com as fibras sintéticas, as fibras vegetais (Figura 4.5) apresentam uma diversidade de benefícios. Em um aspecto ambiental, ao serem carburadas, segregam apenas o carbono que foi absorvido durante a sua vida e são biodegradáveis e renováveis. No aspecto social, contribuem de forma significativa na geração de emprego no meio rural. Em termos mecânicos, são superiores por serem mais leves e resistentes, além disso tem baixos custos e baixo gasto energético em sua produção (JACOB; THOMAS, 2002).

Figura 4.5 - Estrutura de uma fibra vegetal - Imagem MEV se refere à fibra do eucalipto.



Fonte: Silva et. al, 2009.

Sob a perspectiva tecnológica, é válido ressaltar que o emprego de fibras vegetais para formação de compósitos poliméricos ajuda a reduzir a poluição ambiental. Essa alternativa apresenta menor impacto ambiental e pode ser utilizada em diversos ramos da indústria (CARASCHI; LEÃO, 2000).

Dentre as fibras vegetais, ressaltam-se aquelas oriundas do eucalipto, as quais têm se destacado de forma significativa no setor papeleiro, consolidando-se como uma das principais matérias-primas utilizadas pela indústria. Tal protagonismo é atribuído à elevada produtividade das florestas plantadas de eucalipto, bem como à notável compatibilidade da qualidade de sua madeira com os requisitos técnicos para a produção de celulose e papel (DARSANA, 2016).

4.2.2. ÁRVORE DO EUCALIPTO

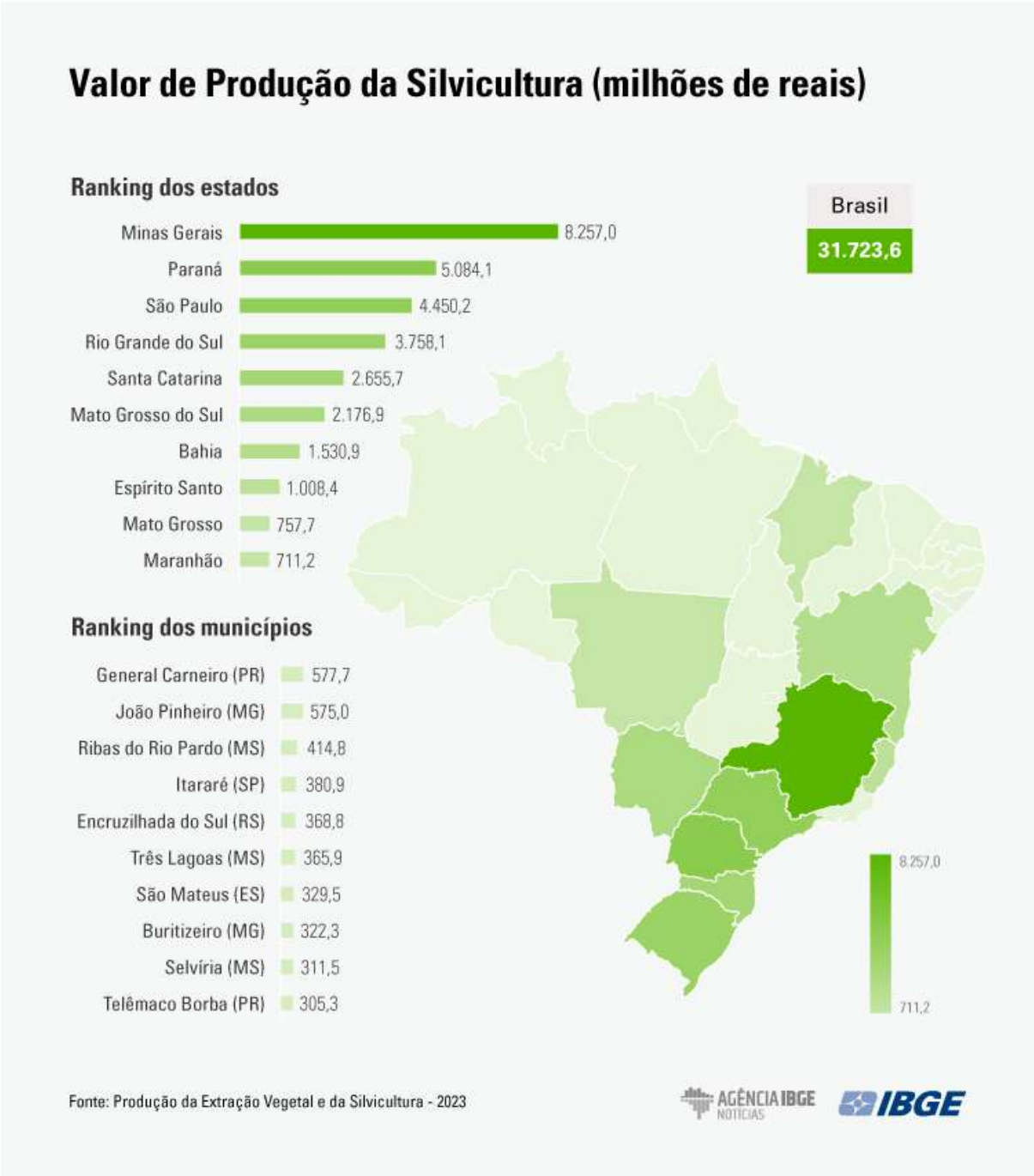
A árvore do eucalipto (Figura 4.6) é amplamente reconhecida por sua notável capacidade de adaptação, rápido crescimento e elevado rendimento por hectare (TURNBULL, 1999; STAPE et al., 2010; GONÇALVES et al., 2013). Originária da Austrália, foi introduzida no Brasil no início do século XX e, desde então, passou a ocupar papel central no setor florestal (ALMEIDA et al., 2010; ABRAF, 2013; BARROS et al., 2019).

Figura 4.6 - Plantação de Árvores de Eucalipto.

Fonte: TORABRÁS, 2025.

Sua rusticidade, resistência a pragas e adaptação a diversos tipos de solo explicam sua ampla difusão pelo território nacional, sendo cultivada principalmente em regiões como Minas Gerais, São Paulo, Espírito Santo, Bahia e Mato Grosso do Sul (SILVA, 2018; ABRAF, 2013) (Figura 4.7). Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o Brasil é líder mundial na produtividade de florestas plantadas, alcançando médias superiores a 40 m^3/ha/ano, graças às condições edafoclimáticas favoráveis e aos avanços no melhoramento genético da espécie (IBÁ, 2021). Isso permite ao país manter-se como um dos maiores exportadores globais de celulose, com forte presença nos mercados da Europa e Ásia.

Figura 4.7 - Dados da Produção da Silvicultura no Brasil em 2023.



Fonte: IBGE, 2024.

Atualmente, o eucalipto desempenha um papel crucial em diversas cadeias produtivas. Sua madeira é utilizada na produção de energia (lenha e carvão vegetal), móveis, estruturas de construção civil, postes, dormentes ferroviários e painéis de madeira reconstituída (IBÁ, 2021). Além disso, o óleo essencial extraído das folhas, rico em eucaliptol, é aplicado nas indústrias farmacêutica, cosmética e de aromaterapia, consolidando a multifuncionalidade desta espécie

(REZENDE et al., 2020). O mel de eucalipto, por sua vez, vem se destacando no mercado por seu sabor marcante e propriedades terapêuticas (SANTOS; NASCIMENTO, 2017). Ainda, somada a essas inúmeras aplicações, destaca-se também a sua importância estratégica para a indústria de papel e celulose, um dos setores mais beneficiados por esse cultivo, onde a celulose de fibra curta, por exemplo, é amplamente utilizada na produção de papéis de alta qualidade como papel higiênico, guardanapos, papel sulfite e papéis especiais (GOMES; MARTINS, 2019; PELISSARI et al., 2022).

Além de sua relevância industrial, o cultivo do eucalipto também promove o desenvolvimento regional. A instalação de grandes empresas do setor florestal em áreas rurais tem gerado impactos positivos, como a geração de empregos, o aumento da arrecadação de impostos locais e o estímulo à infraestrutura das cidades (BARROS; MOURA, 2020; LIMA et al., 2016). Programas de fomento florestal também incentivam pequenos e médios produtores a cultivarem eucalipto, fortalecendo a economia familiar rural e promovendo inclusão produtiva.

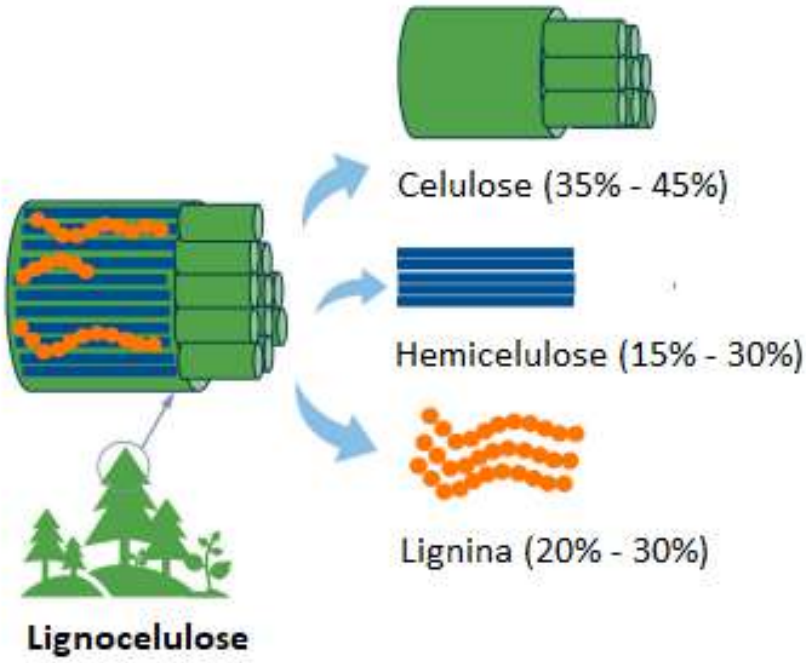
Portanto, o eucalipto representa muito mais do que uma espécie exótica adaptada ao Brasil. Ele é hoje um dos pilares da economia florestal, contribuindo significativamente para o PIB agroindustrial, as exportações e o desenvolvimento tecnológico (ABRAF, 2013; IBGE, 2021). Sua utilização em setores como energia, construção civil, farmacêutico, apicultura e, sobretudo, celulose e papel, reforça sua versatilidade e importância estratégica (GONÇALVES et al., 2019; SILVA; MELO, 2020). Com o avanço das pesquisas em manejo florestal e inovação industrial, a tendência é que sua presença se torne ainda mais relevante nas próximas décadas, consolidando o Brasil como referência internacional em silvicultura (OLIVEIRA; SANTOS, 2020; FONSECA; AMARAL, 2021; EMBRAPA, 2022; LIMA; BARROS, 2023).

Com todos esses atributos, o eucalipto se consolida como uma das espécies florestais mais estratégicas do Brasil, tanto do ponto de vista econômico quanto científico (GONÇALVES et al., 2013; ABRAF, 2013; STAPE et al., 2010). Mais recentemente, a espécie tem ganhado destaque também em pesquisas voltadas à valorização de biomassa lignocelulósica, uma área de grande relevância para a bioeconomia e para a produção de insumos renováveis (CARVALHO et al., 2020; CHUM et al., 2011; ZHU; PAN; WANG, 2009). A biomassa do eucalipto é rica em componentes lignocelulósicos, como a celulose, a hemicelulose e a lignina, que compõem a estrutura da parede celular vegetal (MOSIER et al., 2005; FENGEL; WEGENER, 1984; SUN; CHENG, 2002).

4.2.3. COMPONENTES LIGNOCELULÓSICOS

A lignocelulose é uma estrutura complexa presente nas paredes celulares das plantas, composta por três principais biopolímeros: celulose, hemicelulose e lignina (Figura 4.8) (SI et al, 2020). Suas fontes mais comuns incluem resíduos agrícolas, como casca de arroz, sorgo, bagaço de cana-de-açúcar e palha de milho, além de madeira, gramíneas e resíduos florestais (JETTI et al., 2024).

Figura 4.8 - Estrutura da Lignocelulose.

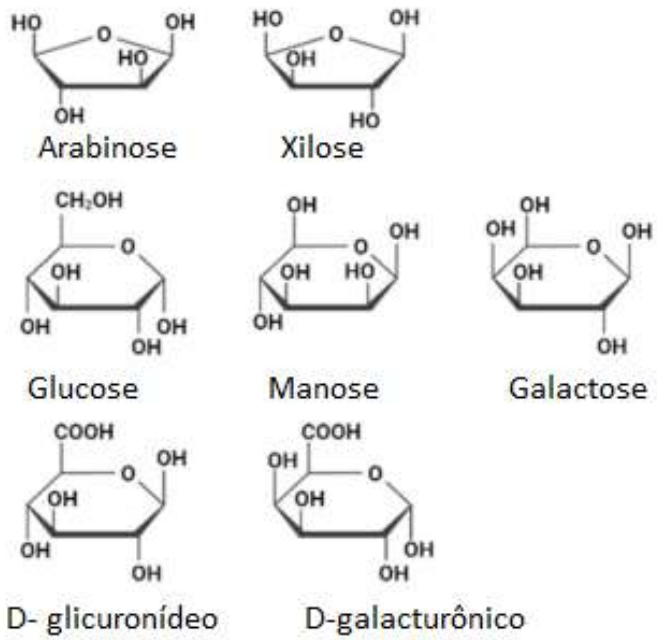


Fonte: Adaptado de HUANG et al, 2025.

A biomassa lignocelulósica destaca-se por sua elevada renovabilidade e capacidade de biodegradação, configurando-se como uma matéria-prima promissora para o desenvolvimento de substitutos sustentáveis e ecologicamente adequados aos plásticos convencionais (SU et al., 2020 ; LI et al., 2023). Porém, apesar de seu grande potencial, a biomassa lignocelulósica ainda não é plenamente explorada devido a limitações tecnológicas (KASINATH et al., 2021). A sua conversão direta em produtos de alto valor agregado é dificultada pela diversidade química de seus componentes (DEVI et al., 2022). Assim, uma estratégia eficaz envolve a separação prévia desses constituintes por meio de métodos físicos, químicos ou biológicos. Uma vez isolados, os componentes da lignocelulose podem ser transformados em diversos produtos de alto valor (MANKAR et al., 2021).

A hemicelulose é o segundo polissacarídeo mais abundante na natureza, representando cerca de 30% da biomassa lignocelulósica (PERIYASAMY et al., 2023). Sua composição varia conforme a origem da biomassa e inclui monossacarídeos como xilose, glicose, arabinose e manose (Figura 4.9). Em plantas lenhosas e herbáceas, predominam diferentes tipos de hemiceluloses, como xilanas e glucomananas. Estruturalmente, trata-se de um heteropolissacarídeo ramificado, ligado por ligações β-(1→4), que se associa à celulose e à lignina na parede celular por meio de interações hidrofóbicas, ligações de hidrogênio, iônicas ou covalentes (OKOLIE et al., 2021; PENG et al., 2012).

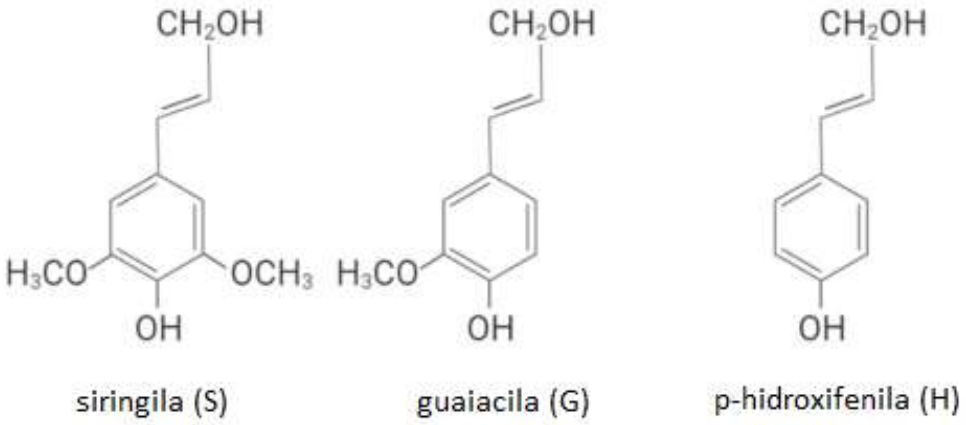
Figura 4.9 - Estrutura química das unidades estruturais da hemicelulose.



Fonte: Adaptado de ZHEN et al., 2025.

A lignina é um polímero orgânico complexo formado por três monômeros aromáticos (Figura 4.10) — guaiacila (G), siringila (S) e p-hidroxifenila (H) — interligados de forma aleatória por ligações éster (KUMAR, BISWAS et al., 2023; SURYADI et al., 2022). Presente na parede celular vegetal, sua função estrutural está associada ao fortalecimento das células, além de contribuir para a resistência à degradação por sua natureza hidrofóbica (SHENG et al., 2021). As principais fontes de lignina são madeiras duras, madeiras macias e gramíneas, que diferem tanto na concentração quanto na composição dos monômeros. Essas variações influenciam diretamente as propriedades físico-químicas da lignina e seu aproveitamento industrial (LIAO et al., 2020; LI et al., 2015).

Figura 4.10 - Representação das estruturas químicas dos 3 monômeros aromáticos que constituem a lignina.



Fonte: Adaptado de ZHEN et al., 2025.

Por fim, o composto em maior abundância na lignocelulose é a celulose. A celulose destaca-se como um dos reforços mais utilizados em biocompósitos, em razão de sua ampla disponibilidade, notáveis propriedades mecânicas e de barreira, além de sua natureza hidrofílica (BENITO-GONZÁLEZ et al., 2019).

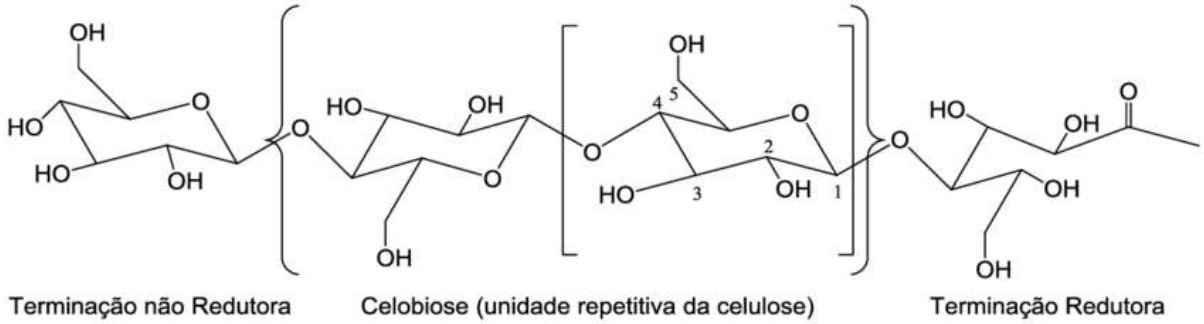
4.2.4. CELULOSE

A celulose é um polímero natural de cadeia longa pertencente à classe dos polissacarídeos, também denominados carboidratos. Esse biopolímero constitui uma fração significativa da composição das paredes celulares das plantas, representando aproximadamente um terço de sua massa total (FENGEL; WEGENER, 1984). No interior dessas estruturas, a celulose encontra-se associada a outros componentes, como a hemicelulose, que se intercala entre suas microfibrilas, e a lignina, cuja função é unir as fibras e conferir à madeira sua resistência característica frente a esforços mecânicos (BIAZUS et al., 2010; ROWELL, 2005).

Quimicamente, a celulose é formada por um polissacarídeo de origem natural composto por unidades repetitivas de β-D-glicopiranose, ligadas por ligações glicosídicas do tipo β(1→4) (Figura 4.11), sendo sua fórmula empírica $(C_6H_{10}O_5)_n$. Essa configuração confere à celulose uma estrutura linear e altamente organizada, favorecendo a formação de fortes interações intermoleculares via ligações de hidrogênio (KLEMM et al., 2005; MOON et al., 2011). Como resultado, a celulose apresenta elevada cristalinidade e baixa solubilidade em água e solventes orgânicos convencionais (MARSHALL; AUSTIN, 2013; HABIBI et al., 2010), características

que influenciam diretamente suas propriedades mecânicas e suas diversas aplicações industriais e tecnológicas (O'SULLIVAN, 1997).

Figura 4.11 - Fórmula química da celulose.



Fonte: Adaptado de SAVIGNON; GONÇALVES, 2016.

Além disso, a celulose é a principal matéria-prima para a produção de papel e outros materiais. Extraída de fibras vegetais, ela pode ser classificada conforme sua origem, processo de fabricação e destinação final, elementos essenciais para entender sua sustentabilidade e aplicabilidade industrial. Segundo Reis (2021), as fibras celulósicas podem ser divididas em virgens e recicladas.

As fibras virgens são obtidas diretamente da madeira, passando por processos químicos e mecânicos para a produção da polpa celulósica. No Brasil, a celulose é predominantemente derivada de árvores plantadas de pinus e eucalipto, que representam mais de 98% do volume total. A celulose extraída do eucalipto, em especial, destaca-se por sua alta eficiência, devido ao rápido crescimento da árvore e ao baixo custo de produção (IBÁ, 2024). Esse tipo de fibra é amplamente utilizado na fabricação de papel, embalagens e tecidos devido à sua resistência e qualidade estrutural (SILVA et al., 2017).

Já a celulose reciclada é obtida a partir da reutilização de materiais descartados, como aparas industriais e papéis usados coletados por meio da reciclagem. A adoção de fibras recicladas reduz significativamente o impacto ambiental, pois minimiza a extração de novos recursos naturais e a quantidade de resíduos sólidos descartados (SOUZA et al., 2019).

O processo de obtenção da celulose varia conforme a finalidade do material produzido. Algumas fibras passam por tratamentos químicos para aumentar sua resistência e durabilidade, enquanto outras são submetidas apenas a processos mecânicos de refinamento. O processo

Kraft, por exemplo, é amplamente utilizado para a purificação da celulose, removendo impurezas e garantindo fibras de alta qualidade para a indústria (GULER; OZEN, 2014). Esse refinamento promove alterações estruturais na celulose, aumentando a resistência mecânica do papel, o que pode variar conforme o tipo de fibra utilizada (MORAES et al., 2013).

A destinação da celulose é diversificada, abrangendo a produção de papel, tecidos, bioplásticos, biocombustíveis, embalagens biodegradáveis e até compósitos aplicados nas indústrias automotiva e da construção civil. A escolha entre celulose virgem e reciclada depende das exigências do produto final e dos critérios ambientais envolvidos na produção (GARCIA et al., 2020; MARTINS; FERREIRA, 2021).

Além dessas aplicações tradicionais, a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico vêm expandindo as possibilidades de uso da celulose. Um dos avanços mais promissores nesse campo é a conversão da celulose em nanocelulose, um material obtido por meio do processamento de fibras celulósicas em escala nanométrica que tem despertado grande interesse em diversas áreas, desde embalagens sustentáveis até dispositivos eletrônicos, biomedicina e compósitos avançados, representando um potencial inovador na utilização desse biopolímero (KLEMM et al., 2011; MOON et al., 2011; HABIBI et al., 2010).

4.2.5. NANOCELULOSE

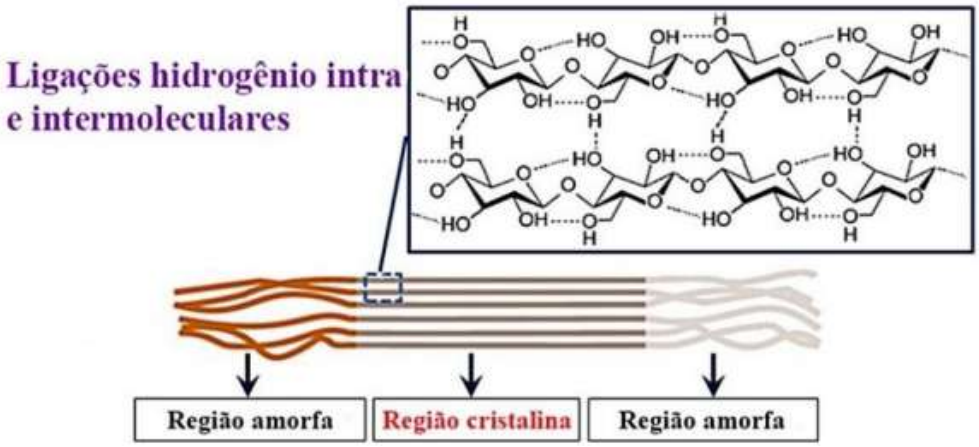
A preocupação cada vez maior com os impactos ambientais decorrentes do uso excessivo de polímeros sintéticos derivados do petróleo tem incentivado o desenvolvimento de materiais sustentáveis, entre os quais a nanocelulose se destaca como uma alternativa promissora (KLEMM et al., 2011; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017). Derivada da celulose — o polímero natural mais abundante na Terra —, a nanocelulose é obtida por meio da desagregação da celulose convencional em estruturas com dimensões nanométricas (HUBBE et al., 2008; MOON et al., 2011). Essa conversão resulta em materiais com propriedades únicas, como alta resistência mecânica, transparência, leveza e capacidade de formar filmes com excelente desempenho como barreira contra gases (AZIZI SAMIR; ALLOIN; DUFRESNE, 2005; AHANKARI et al., 2021; SROUR et al., 2020).

Do ponto de vista estrutural, a nanocelulose mantém a mesma estrutura química da celulose, porém apresenta propriedades físico-químicas diferenciadas devido à sua morfologia em escala nanométrica, como alta área superficial específica, elevada cristalinidade e notável resistência mecânica (JONOUBI et al., 2015; HABIBI et al., 2010). Essas propriedades são

diretamente influenciadas pelo tipo específico de nanocelulose, cuja classificação se baseia na origem da matéria-prima e nos métodos de obtenção utilizados. Assim, a nanocelulose pode ser agrupada em três formas principais: (i) nanofibrilas de celulose (CNF), obtidas geralmente por métodos mecânicos ou combinados com pré-tratamentos químicos, caracterizadas por uma estrutura flexível e entrelaçada; (ii) cristais de celulose (CNC), também chamados de nanocristais de celulose, que apresentam alto grau de cristalinidade e são comumente extraídos por hidrólise ácida; e (iii) celulose bacteriana (BC), produzida por bactérias do gênero *Komagataeibacter*, a qual apresenta elevada pureza e propriedades únicas como alta porosidade e retenção de água (KLEMM et al., 2011; SIRO; PLACKETT, 2010; THAKUR et al., 2020).

Cada uma dessas formas apresenta características estruturais e funcionais distintas, que influenciam diretamente suas aplicações tecnológicas. Dentre elas, as nanofibrilas de celulose se destacam por sua versatilidade e estrutura específica. Também conhecidas como celulose microfibrilada, são compostas por longas e flexíveis fibrilas com diâmetro entre 5 e 60 nanômetros e comprimento na escala micrométrica (SPENCE et al., 2010). Estruturalmente, as CNFs apresentam uma combinação de regiões cristalinas e amorfas (Figura 4.12), o que resulta em propriedades mecânicas superiores, alta tenacidade, transparência e capacidade de formação de redes tridimensionais por ligações de hidrogênio. Essas características tornam as CNFs ideais para diversas aplicações, incluindo reforço de compósitos poliméricos, filmes biodegradáveis, embalagens sustentáveis, hidrogéis, aerogéis e até condutores flexíveis quando funcionalizadas com nanomateriais condutores (SEHAQUI et al., 2011; LIU et al., 2017; YANG et al., 2019).

Figura 4.12 - Representação das ligações hidrogênio intra e intermoleculares e regiões cristalinas e amorfas das CNFs.



Fonte: NASCIMENTO, 2018.

Já os cristais de celulose (CNC), por sua vez, são obtidos por meio de hidrólise ácida controlada da celulose, removendo as regiões amorfas e preservando apenas as regiões cristalinas. Trata-se de partículas curtas, rígidas e com alto grau de cristalinidade, geralmente com diâmetro entre 5 e 20 nm e comprimento variando de 100 a 500 nm, dependendo da fonte da celulose e do método de extração (MOON et al., 2011). Esse material apresenta elevada rigidez, com módulo de elasticidade superior a 100 GPa, estabilidade térmica e propriedades anisotrópicas, sendo ideal para o reforço de matrizes poliméricas e amplamente estudado em aplicações como nanocompósitos e revestimentos (MORRIS et al., 2019). Além disso, sua alta área superficial, birrefringência e capacidade de formar fases coloidais ordenadas permitem seu uso em sensores, materiais ópticos, encapsulamento de fármacos e formulações de tinta ou revestimentos funcionais (EICHLORN et al., 2010; SHAH et al., 2015). A funcionalização superficial dos CNCs também tem possibilitado avanços em aplicações biomédicas e em engenharia de tecidos.

Por fim, a celulose bacteriana (BC) representa uma forma de nanocelulose com características morfológicas e funcionais únicas. A BC é sintetizada diretamente na forma de uma rede de nanofibrilas altamente puras, isentas de lignina e hemicelulose, com diâmetro de aproximadamente 20 – 100 nm, formando uma estrutura tridimensional densa e interconectada (JANG et al., 2017; LIN et al., 2013). Essa rede confere ao material excelente capacidade de retenção de água (superior a 99%), alta cristalinidade, transparência e resistência mecânica. Essas propriedades tornam a BC especialmente atrativa para aplicações biomédicas, como curativos para feridas, pele artificial, membranas para liberação controlada de fármacos e scaffolds para engenharia de tecidos (COSTA et al., 2017; UL-Islam et al., 2012). Além disso, sua compatibilidade com polímeros naturais e sintéticos tem impulsionado sua utilização em filmes biodegradáveis, embalagens alimentícias e materiais eletrônicos flexíveis (ZHANG et al., 2019).

Essa versatilidade da nanocelulose, aliada às suas propriedades excepcionais, também tem mostrado grande potencial em outras áreas, como no setor de embalagens. Uma das suas aplicações mais promissoras é como substituto dos plásticos convencionais, especialmente pela sua biodegradabilidade, renovabilidade, baixa permeabilidade a gases como oxigênio e dióxido de carbono, e alta resistência mecânica — características que são extremamente valorizadas na conservação e proteção de produtos, especialmente alimentos (SROUR et al., 2020; AHANKARI et al., 2021).

Além disso, a nanocelulose pode ser combinada com outros polímeros naturais, como amido, quitosana ou alginato, para melhorar sua resistência à umidade ou agregar novas funcionalidades, como propriedades antimicrobianas (SYLVESTRE et al., 2019). Em comparação com os filmes de polímeros sintéticos derivados de petróleo, que podem levar séculos para se degradar no ambiente, a nanocelulose apresenta uma taxa de decomposição significativamente mais rápida, contribuindo para a redução da poluição ambiental e do acúmulo de resíduos sólidos (RAO et al., 2021). Do ponto de vista ambiental e socioeconômico, a produção de nanocelulose pode ser integrada a cadeias produtivas de resíduos agrícolas ou florestais, aproveitando sobras de biomassa e agregando valor a materiais de baixo custo. Essa abordagem se alinha aos princípios da economia circular e promove o desenvolvimento sustentável (KLEMM et al., 2011; JONOUBI et al., 2015). A viabilidade técnica e econômica da produção de nanocelulose tem avançado consideravelmente nos últimos anos, com diversas iniciativas industriais e acadêmicas voltadas à sua escalabilidade e integração em produtos comerciais.

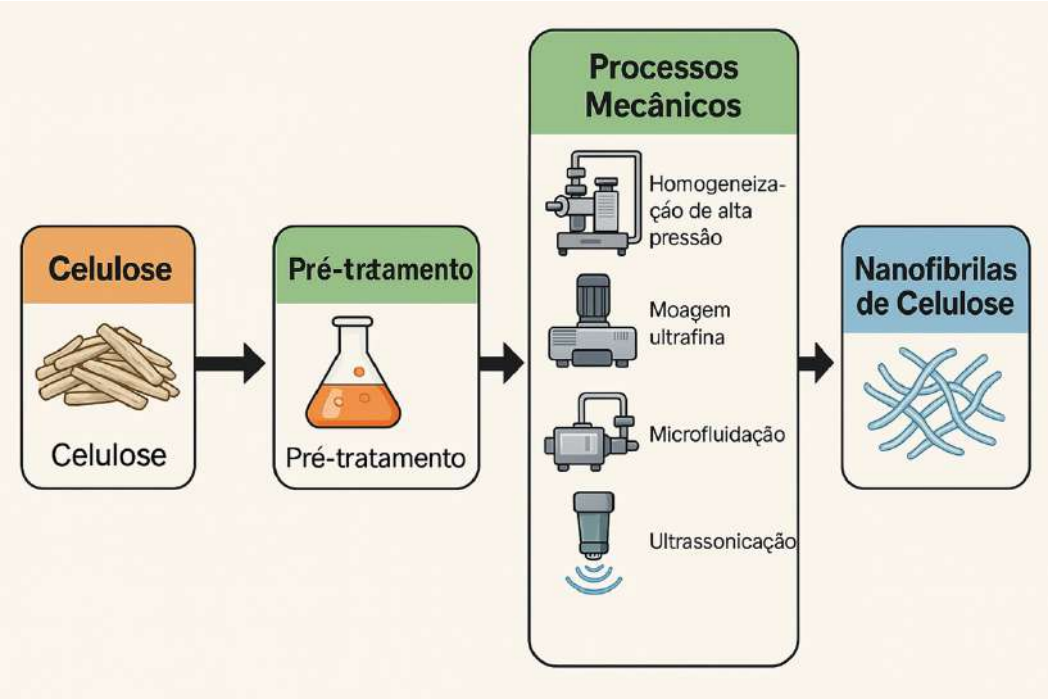
4.2.6. MÉTODOS DE EXTRAÇÃO

A extração da nanocelulose consiste na desagregação da estrutura hierárquica das fibras de celulose até seus constituintes em escala nanométrica. Os produtos resultantes são geralmente classificados em três principais tipos, já mencionados anteriormente: celulose nanofibrilada, celulose nanocristalina e celulose bacteriana. Cada uma dessas formas de nanocelulose exige métodos específicos de produção, que influenciam diretamente suas propriedades físico-químicas, o rendimento obtido e suas possíveis aplicações (MOON et al., 2011; KLEMM et al., 2011; JONOUBI et al., 2015).

Dentre essas formas, destaca-se, primeiramente, a produção de CNFs, que normalmente requer processos mecânicos intensivos para sua obtenção. Esses processos consistem em submeter as fibras de celulose a forças de cisalhamento, pressão e impacto, promovendo a desagregação das microfibrilas. Entre as técnicas mais utilizadas têm-se a homogeneização de alta pressão, moagem ultrafina, microfluidação e ultrassonicação (MOON et al., 2011). Apesar de eficazes, esses métodos demandam elevado consumo energético, podendo ultrapassar 30.000 kWh por tonelada de CNF produzida (HENRIKSEN et al., 2008). Para contornar esse desafio, são frequentemente empregados pré-tratamentos químicos, como a oxidação com catalisador TEMPO (2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxil), que introduz grupos carboxílicos na superfície das fibras, facilitando sua fibrilação com menor energia (ISOGAI; SUZUKI, 2018), ou ainda

tratamentos enzimáticos com endoglucanases, que promovem a despolimerização parcial da celulose (ISOGAI; SUGINO; SATO, 2011; JONOUBI et al., 2015). Esse processo de produção foi esquematizado na Figura 4.13 a seguir:

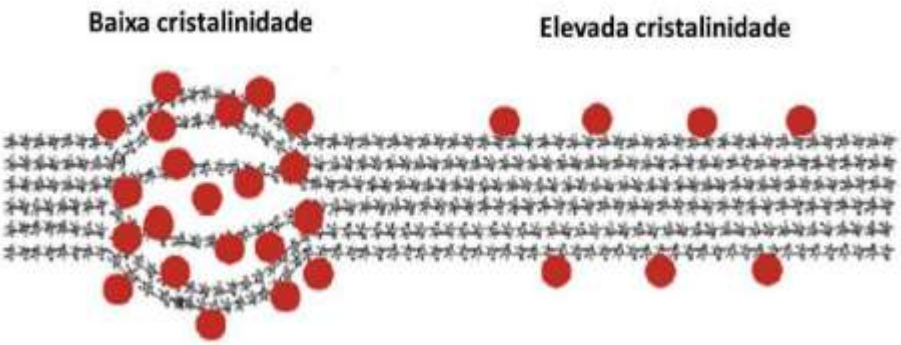
Figura 4.13 - Esquema do processo de obtenção das CFCs.



Fonte: Elaboração própria.

A extração de CNC, por sua vez, baseia-se predominantemente em métodos químicos, especialmente a hidrólise ácida. O processo utiliza ácidos fortes, como ácido sulfúrico ou clorídrico, para remover seletivamente as regiões amorfas da celulose, preservando as regiões cristalinas (HABIBI; LUCIA; ROJAS, 2010), conforme Figura 4.14.

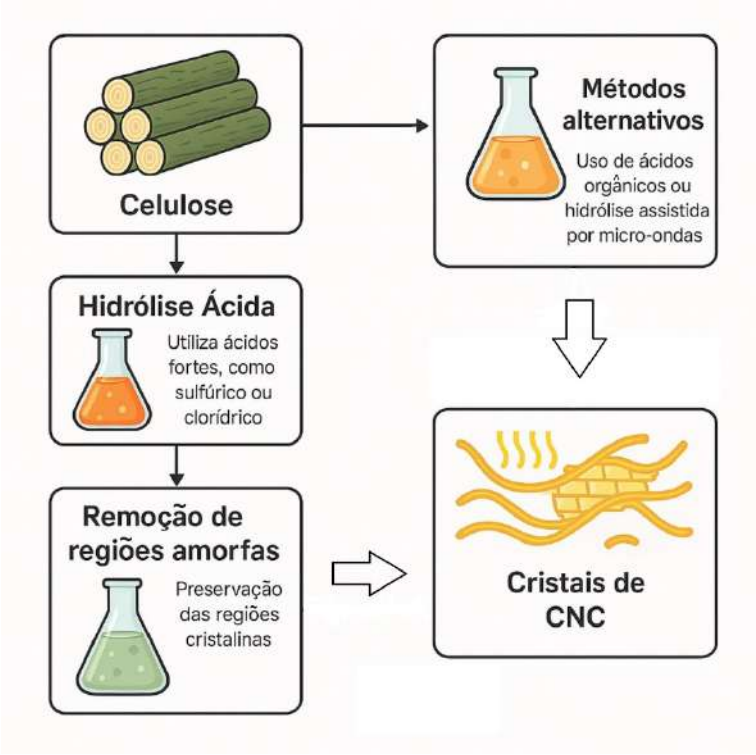
Figura 4.14 - Hidrólise ácida em vermelho, em regiões amorfas.



Fonte: Adaptada de DAMASIO, 2025.

A hidrólise com ácido sulfúrico é amplamente adotada por permitir a obtenção de cristais com alta estabilidade coloidal, devido à introdução de grupos sulfato na superfície das nanopartículas (HABIBI; LUCIA; ROJAS, 2010). Contudo, esse processo apresenta limitações quanto à degradação térmica e ao risco ambiental, exigindo controle rigoroso de pH e descarte adequado dos resíduos ácidos (JONOUBI et al., 2015). Alternativas mais verdes estão sendo estudadas, como o uso de ácidos orgânicos (ex.: ácido oxálico) ou sistemas de hidrólise assistida por micro-ondas, que reduzem o tempo de reação e o impacto ambiental (ZHAO et al., 2013). Um esquema do processo de obtenção pode ser visualizado abaixo, na Figura 4.15:

Figura 4.15 - Esquema do processo de obtenção das CNCs.



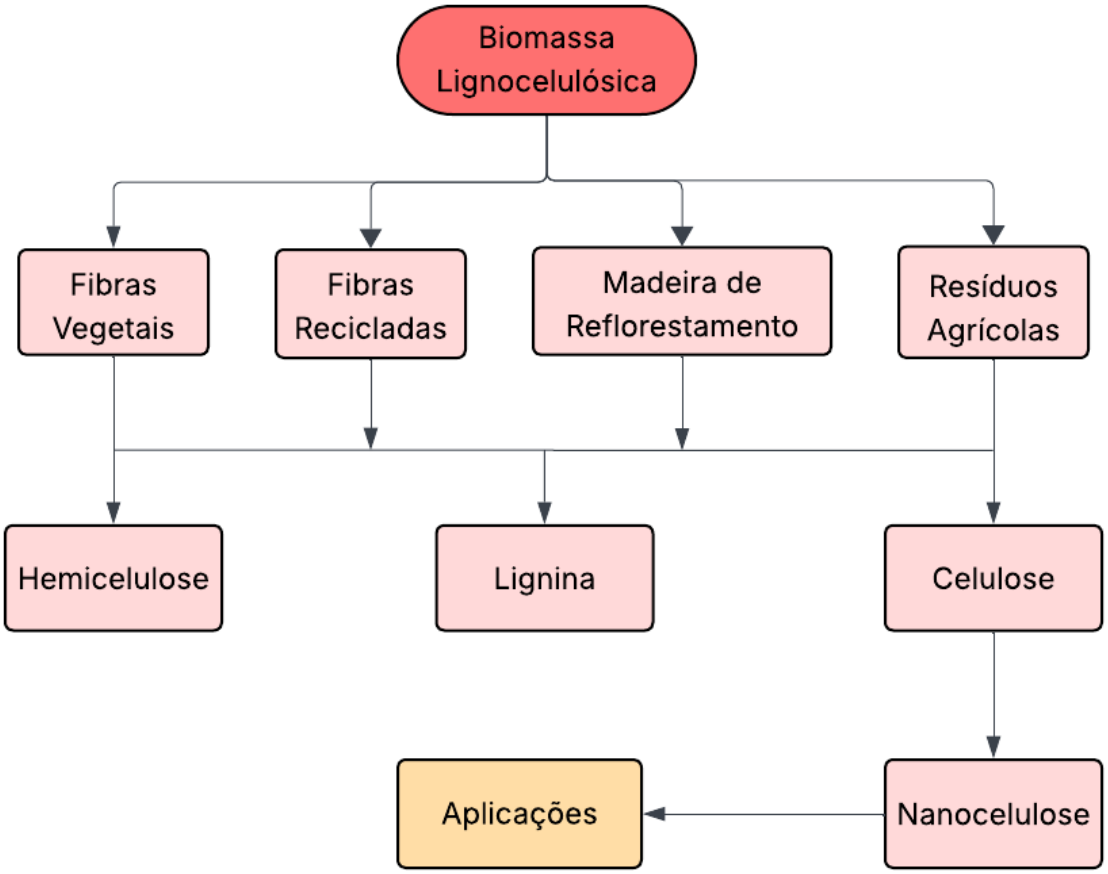
Fonte: Elaboração própria.

Por outro lado, a celulose bacteriana é produzida diretamente por microrganismos como *Gluconacetobacter xylinus* em meio de cultura rico em açúcares, como a glicose. Durante o crescimento bacteriano, a celulose é sintetizada e extrudada na forma de nanofibrilas altamente puras e com elevada cristalinidade, formando uma rede tridimensional densa e gelatinosa (IGUCHI; YAMANAKA; BUDHIAWAN, 2000). Diferentemente da CNF e CNC, que requerem extração e purificação de biomassa vegetal, a BC não contém lignina e hemicelulose, o que elimina a necessidade de etapas de pré-tratamento químico, sendo particularmente atrativa para aplicações biomédicas, farmacêuticas e alimentícias (SHODA; SUGANO, 2005).

No entanto, seu alto custo de produção e baixos rendimentos volumétricos ainda são entraves à sua utilização em escala industrial (UL-ISLAM et al., 2012).

De forma geral, a escolha do método de extração está diretamente relacionada às características desejadas da nanocelulose, à fonte de celulose utilizada e à aplicação final pretendida. A tendência atual da pesquisa tem sido o desenvolvimento de métodos híbridos e mais ecológicos, visando à viabilidade técnica, econômica e ambiental da produção em larga escala. Um esquema geral da obtenção de nanocelulose pode ser visto na Figura 4.16 a seguir:

Figura 4.16 - Esquema geral da obtenção da nanocelulose.



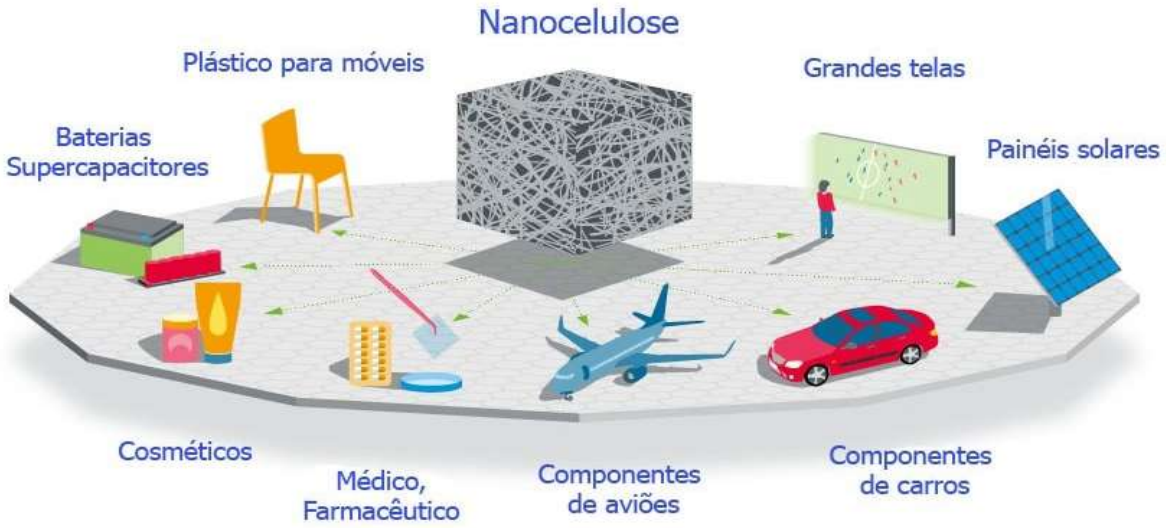
Fonte: Elaboração própria.

4.3. APLICAÇÕES DA NANOCELULOSE NA INDÚSTRIA

Como já mencionado, a nanocelulose tem se destacado como um material versátil e promissor devido às suas propriedades singulares (SILVA et al., 2020). Essas características impulsionam seu uso em diversas indústrias, incluindo as de embalagens sustentáveis, têxtil,

farmacêutica, papel e celulose, automotiva e eletrônica (Figura 4.17). Sua origem renovável e o potencial para substituir materiais derivados do petróleo reforçam seu papel estratégico na transição para uma economia circular e de baixo impacto ambiental.

Figura 4.17 - Aplicações da nanocelulose nos setores industriais.



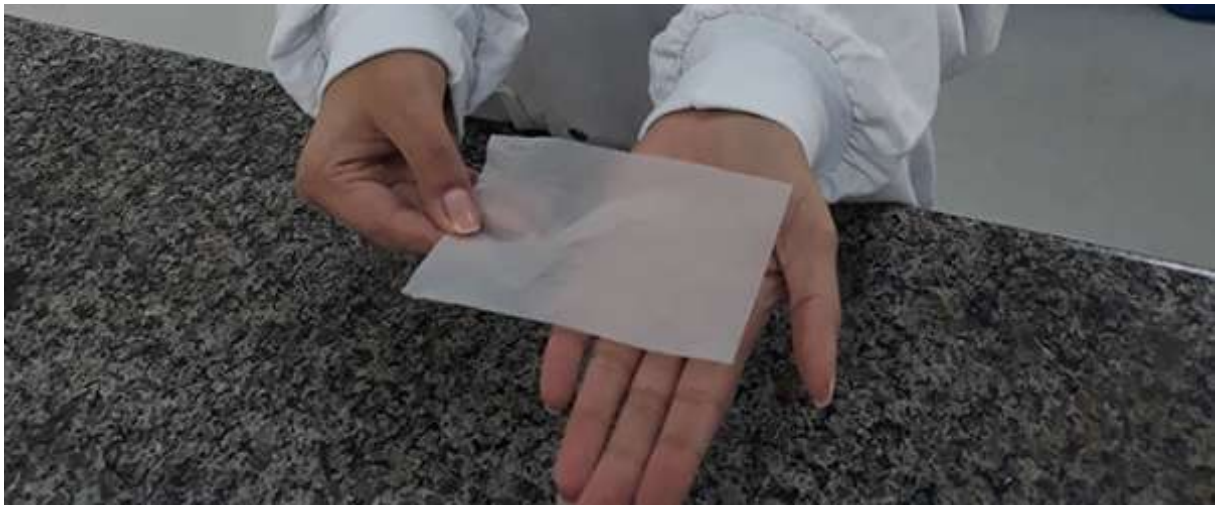
Fonte: Adaptado de GEA GROUP, 2025.

No setor de embalagens, a nanocelulose surge como alternativa sustentável aos polímeros sintéticos, contribuindo significativamente para a redução do impacto ambiental (OLIVEIRA; SANTOS, 2021). Além de ser biodegradável, apresenta excelente desempenho como barreira contra gases e umidade, prolongando a vida útil dos produtos. Filmes à base de nanocelulose demonstram alta resistência mecânica e boas propriedades ópticas, sendo considerados candidatos viáveis para substituir plásticos convencionais (COSTA et al., 2019). Além disso, há também crescente interesse no desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes, com nanocelulose funcionalizada, capazes de oferecer propriedades antimicrobianas ou atuar como indicadores de frescor (FERREIRA; LIMA, 2022). A incorporação de nanopartículas, como prata ou óxidos metálicos, potencializa seu efeito bactericida, ampliando sua aplicação nas indústrias alimentícia e farmacêutica.

Este último segmento, em particular, tem se beneficiado amplamente das propriedades versáteis da nanocelulose. No setor farmacêutico, o material tem se mostrado um suporte eficiente para sistemas de liberação controlada de fármacos, devido à sua biocompatibilidade e capacidade de retenção de substâncias ativas (RODRIGUES et al., 2020). Sua estrutura

favorece a produção de hidrogéis e *scaffolds* utilizados na engenharia de tecidos, com impactos relevantes na medicina regenerativa. Curativos inteligentes, desenvolvidos a partir da nanocelulose, apresentam potencial para acelerar o processo de cicatrização e prevenir infecções (MARTINS; ALMEIDA, 2021) (Figura 4.18).

Figura 4.18 - Membrana de nanocelulose vegetal aplicada no tratamento de queimaduras.



Fonte: Adaptada de NEO MONDO, 2018.

Além disso, sua incorporação em *bioinks* tem sido explorada na bioimpressão 3D de tecidos e órgãos artificiais, ampliando ainda mais suas aplicações em contextos de medicina personalizada (MARKSTEDT et al., 2015).

Essa versatilidade, porém, estende-se para além do campo biomédico, contribuindo significativamente para avanços em setores como o têxtil. Nessa área, a nanocelulose tem sido empregada para aumentar a resistência, flexibilidade e durabilidade dos materiais, viabilizando a produção de tecidos funcionais com propriedades antimicrobianas, antialérgicas e hidrofóbicas (FERREIRA; LIMA, 2022). Tais características são especialmente valorizadas em vestuários esportivos, hospitalares e de segurança. Além disso, o desenvolvimento de fibras biodegradáveis a partir dessa matéria-prima representa uma alternativa sustentável frente à poluição gerada pelos tecidos sintéticos. Avanços recentes também apontam sua aplicação em tecidos inteligentes, capazes de responder a estímulos externos, como variações de temperatura e umidade, impulsionando a inovação na moda tecnológica (MA et al., 2021).

Já na indústria automotiva, a nanocelulose vem sendo utilizada na formulação de compósitos leves e resistentes, fundamentais para a redução do peso veicular e o aumento da

eficiência energética (SOUZA et al., 2023). Esses materiais apresentam elevada resistência ao impacto, podendo substituir componentes tradicionais sem comprometer a segurança. Além disso, têm sido empregados no desenvolvimento de tintas automotivas, componentes eletrônicos embarcados e baterias sustentáveis, contribuindo para a redução da pegada de carbono na mobilidade elétrica. Essa mesma capacidade de integrar sustentabilidade e alto desempenho também impulsiona sua aplicação no campo da eletrônica, onde é explorada como substrato para dispositivos flexíveis, sensores biodegradáveis, supercapacitores e baterias ecológicas (COSTA et al., 2019). A nanocelulose tem se mostrado especialmente promissora na produção de eletrônicos vestíveis e transparentes, alinhando-se à crescente demanda por tecnologias de baixo impacto ambiental (TAKADA et al., 2020).

Além desses setores de alta tecnologia, o amplo potencial de aplicação da nanocelulose também se evidencia na indústria de papel e celulose, onde, especialmente na forma de CNFs e CNCs, tem se destacado por suas propriedades estruturais e mecânicas, como alta área superficial e notável resistência à tração (OLIVEIRA; SANTOS, 2021). Sua aplicação permite o reforço de papéis, melhorando propriedades físicas como resistência ao rasgo e ao estouro, mesmo em concentrações reduzidas. Adicionalmente, possibilita a diminuição do uso de fibras convencionais e aditivos químicos, contribuindo para processos mais sustentáveis e economicamente eficientes (COSTA et al., 2019). Outra frente de aplicação relevante é a melhoria da qualidade de papéis reciclados, compensando a perda de desempenho mecânico após sucessivos ciclos de reaproveitamento (FERREIRA; LIMA, 2022). A nanocelulose também é empregada em revestimentos, promovendo acabamento mais uniforme e propriedades funcionais adicionais, como brilho e resistência ao desgaste, sem repetir os atributos de barreira e funcionalidades antimicrobianas já amplamente explorados no setor de embalagens (OLIVEIRA; SANTOS, 2021).

Dessa forma, a nanocelulose consolida-se como um material estratégico e multifuncional, com potencial para transformar diversos setores industriais (SOUZA et al., 2023; COSTA et al., 2019). Esse potencial decorre de suas propriedades excepcionais, que, aliadas à sua origem renovável, a tornam altamente compatível com as exigências atuais de sustentabilidade (TAKADA et al., 2020). Nesse contexto, é esperado uma ampla adoção futura da nanocelulose em diferentes cadeias produtivas. No entanto, para que esse cenário se concretize, o avanço das pesquisas e a otimização dos processos de produção tornam-se fundamentais, pois são eles que permitirão ampliar sua acessibilidade e aplicação em escala industrial. Com isso, a nanocelulose pode desempenhar um papel central na promoção de

inovações alinhadas aos princípios da economia verde, contribuindo para uma transição mais sustentável nos sistemas industriais contemporâneos (OLIVEIRA; SANTOS, 2021; FERREIRA; LIMA, 2022).

4.4. AVANÇOS TECNOLÓGICOS

Embora a nanocelulose apresente propriedades excepcionais e um amplo espectro de aplicações potenciais, seu mercado ainda não alcançou pleno desenvolvimento. Um dos principais entraves para a viabilidade industrial está na ausência de equipamentos de medição adequados aos processos, capazes de realizar a caracterização da nanocelulose com a precisão e rapidez exigidas (RIBEIRO et al., 2019). Adicionalmente, o elevado consumo de energia necessário para sua produção pode dificultar sua inserção comercial. No entanto, considera-se viável que a aplicação da nanocelulose em usos mais avançados e tecnológicos compense seus custos atuais, sem impedir sua utilização na fabricação em escala de produtos com alto valor agregado (RESHMY et al., 2020).

A perspectiva para a produção comercial de nanocelulose voltada a diferentes aplicações finais é promissora, sobretudo diante do avanço contínuo das tecnologias globais — desde que haja uma atuação conjunta e estratégica entre o setor industrial e o meio acadêmico (NOREMYLIA et al., 2022). Quando se trata, por exemplo, das aplicações futuras da nanocelulose no setor alimentício, seu uso para a preservação de frutas e vegetais se destaca como uma área de grande relevância. O desenvolvimento de políticas rigorosas de segurança e de padrões estabelecidos pelas autoridades reguladoras é crucial para assegurar que revestimentos e materiais de embalagem à base de nanocelulose sejam utilizados de forma segura e eficiente na conservação de alimentos (JIN, 2022; CHOUDHARY et al., 2021).

Para integrar essas organizações regulatórias e disponibilizar grandes volumes de dados sobre a segurança e a eficácia da nanocelulose na preservação alimentar, é necessário realizar projetos de pesquisa colaborativa. Dentre os fatores essenciais, destacam-se avaliações toxicológicas detalhadas, estudos sobre a pureza do material, rotulagem clara, adesão às Boas Práticas de Fabricação (BPF), sustentabilidade ambiental e harmonização das regulamentações internacionais. A comunicação dessas questões regulatórias é fundamental para garantir a inclusão responsável e segura da nanocelulose na preservação de alimentos, aumentar a confiança dos consumidores e estabelecer um uso sustentável e eficiente dessa tecnologia inovadora no setor alimentício (GOYAL et al., 2023).

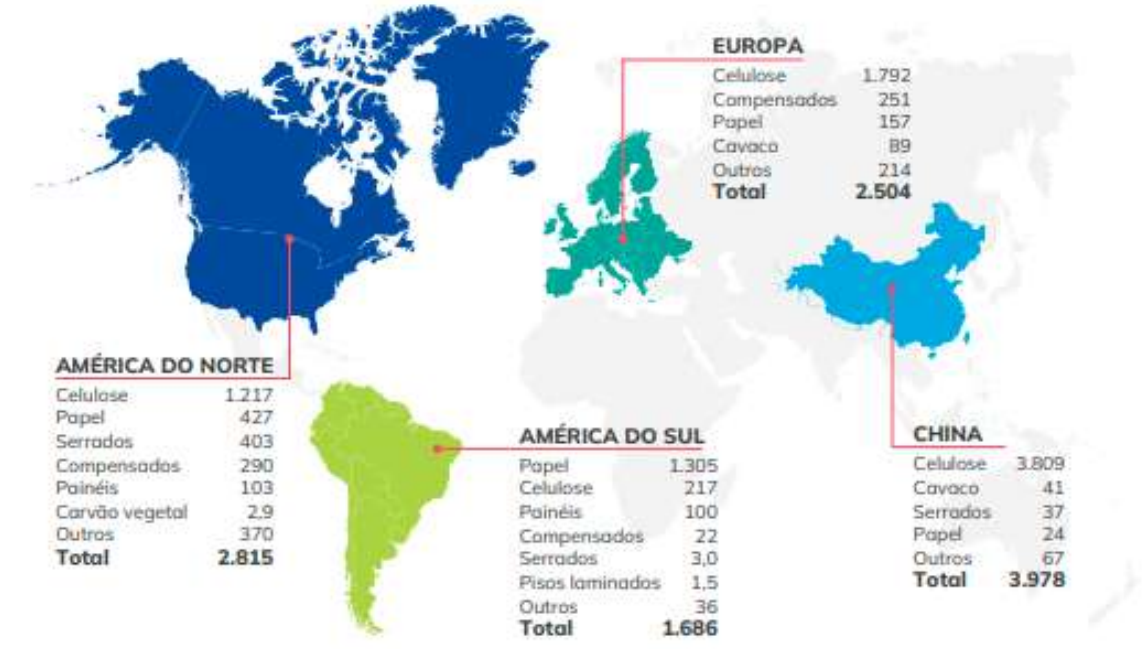
Apesar dos desafios, a nanocelulose também apresenta grande potencial na engenharia de membranas multifuncionais, com aplicações em remoção de poluentes e corantes. Exemplos práticos já demonstram sua eficácia, indicando um futuro promissor para o desenvolvimento de membranas ambientalmente corretas e altamente eficientes (JAFFAR et al, 2022). Outro fato que se destaca é que a utilização da nanocelulose bacteriana tem alto potencial industrial e biomédico, mas seus avanços tecnológicos enfrentam desafios como alto custo de produção e limitações funcionais. Estratégias como novos métodos de cultivo, uso de resíduos como substrato e engenharia genética visam tornar sua produção mais eficiente e econômica. Além disso, modificações com biopolímeros e agentes antimicrobianos podem ampliar suas aplicações, especialmente em curativos, engenharia de tecidos e dispositivos médicos. O sucesso comercial da BC depende da capacidade de produzi-la em larga escala com propriedades ajustáveis e custo reduzido (SHARMA et al, 2019).

4.5. INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

No cenário brasileiro, a indústria de árvores plantadas segue em contínua expansão, exercendo um papel fundamental na consolidação da bioeconomia, tanto no mercado nacional quanto no internacional. Essa realidade evidencia a relevância estratégica do setor florestal para o desenvolvimento sustentável da economia brasileira (Relatório anual IBÁ, 2024).

Analisando o cenário, no que diz respeito à exportação de produtos derivados da cadeia de árvores cultivadas em 2023, observa-se que: Ásia, América do Norte e Europa concentraram 73% das exportações do setor. A China foi o principal destino, com 31% do total exportado. A América do Norte ocupou o segundo lugar, já o continente Europeu representou 20% do total (Figura 4.19). Destaca-se também o fato de que os dois principais produtos exportados são a celulose e o papel, ressaltando a importância dos mesmos para a economia brasileira e mundial (MDIC, 2024).

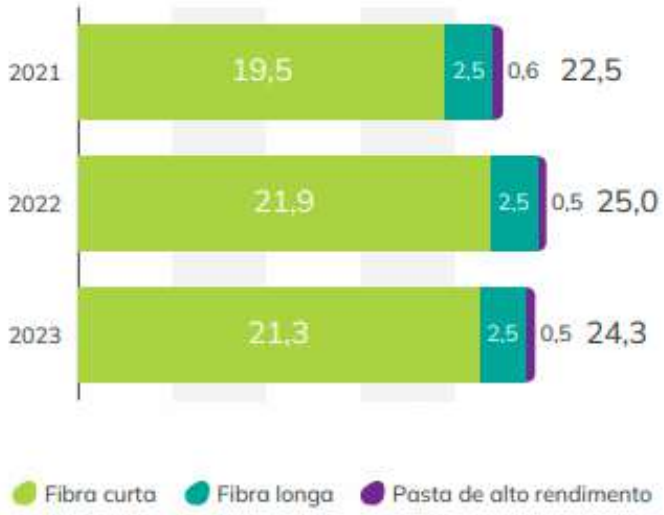
Figura 4.19 - Principais destinos da exportação na cadeia de árvores cultivadas no ano de 2023 [Milhões de US$].



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Em 2023, o Brasil alcançou uma produção de 24,3 milhões de toneladas de celulose, sendo 21,3 milhões de toneladas de fibra curta, 2,5 milhões de fibra longa e 0,5 milhão de pasta de alto rendimento (Figura 4.20). Esse desempenho reflete uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,4% ao longo da última década (Relatório anual IBÁ, 2024).

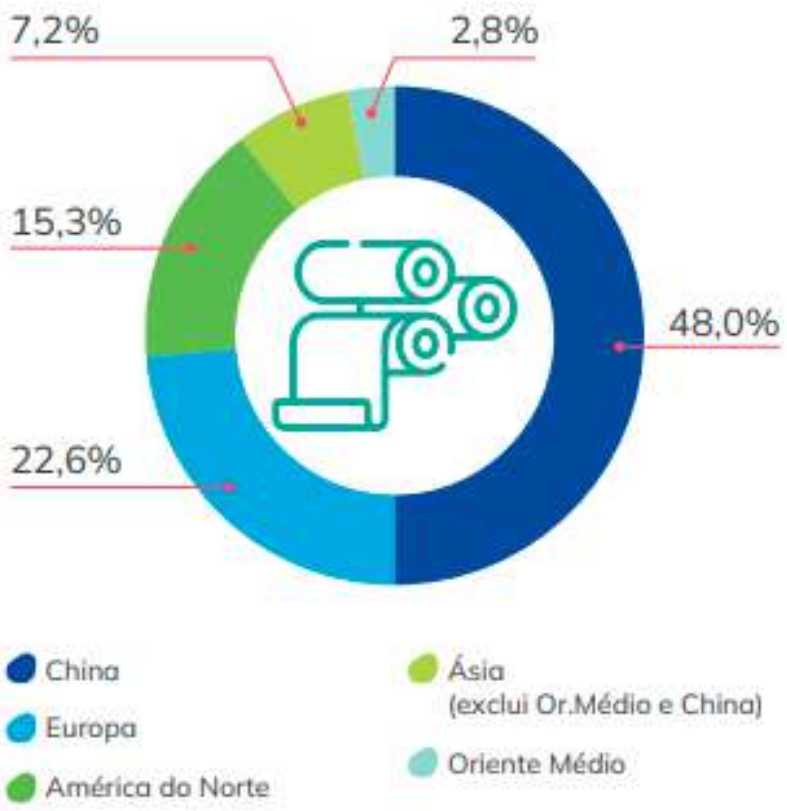
Figura 4.20 - Produção de celulose no Brasil [Milhões de toneladas].



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Também em 2023, a China e a Europa foram os principais destinos das exportações brasileiras de celulose, representando 48,0% e 22,6%, respectivamente (Figura 4.21). A celulose corresponde a 63% do valor total exportado pelo setor de árvores cultivadas, o que representa um aumento em sua participação nas exportações em comparação a 2022 (MDIC, 2024).

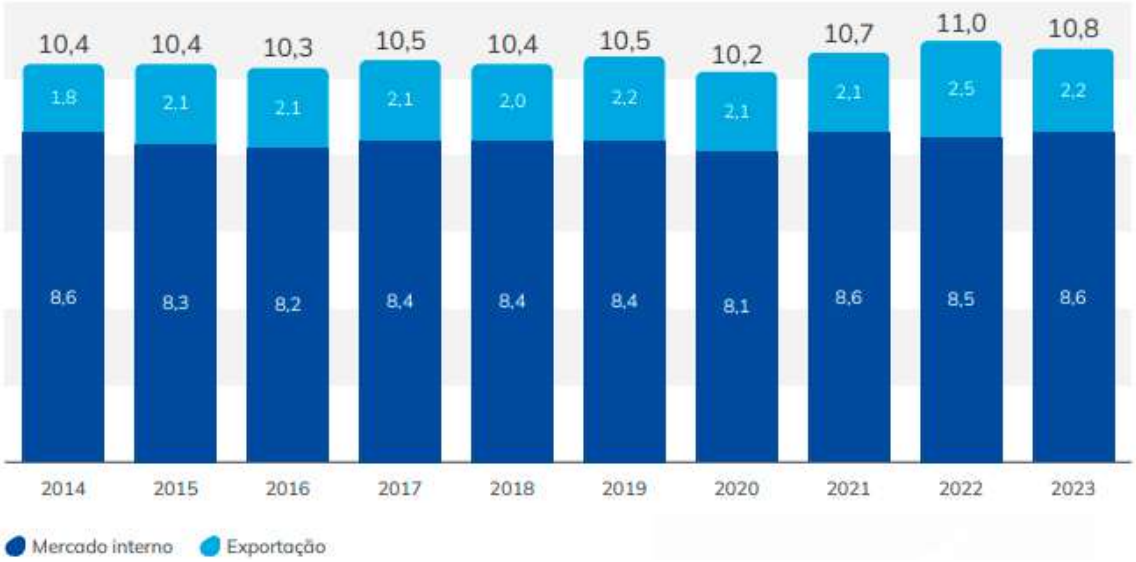
Figura 4.21 - Maiores destinos das exportações brasileira de celulose do setor de árvores cultivadas em 2023 [%].



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Ainda em 2023, o Brasil produziu 10,8 milhões de toneladas de papel, apresentando uma ligeira redução de 1,8% em relação a 2022 e um CAGR de 0,5% nos últimos dez anos. O mercado interno seguiu sendo o principal destino (Figura 4.22), absorvendo 79,8% da produção, o que equivale a 8,6 milhões de toneladas, com um aumento de 1,2% em comparação a 2022. As demais 2,2 milhões de toneladas foram destinadas à exportação (Relatório anual IBÁ, 2024).

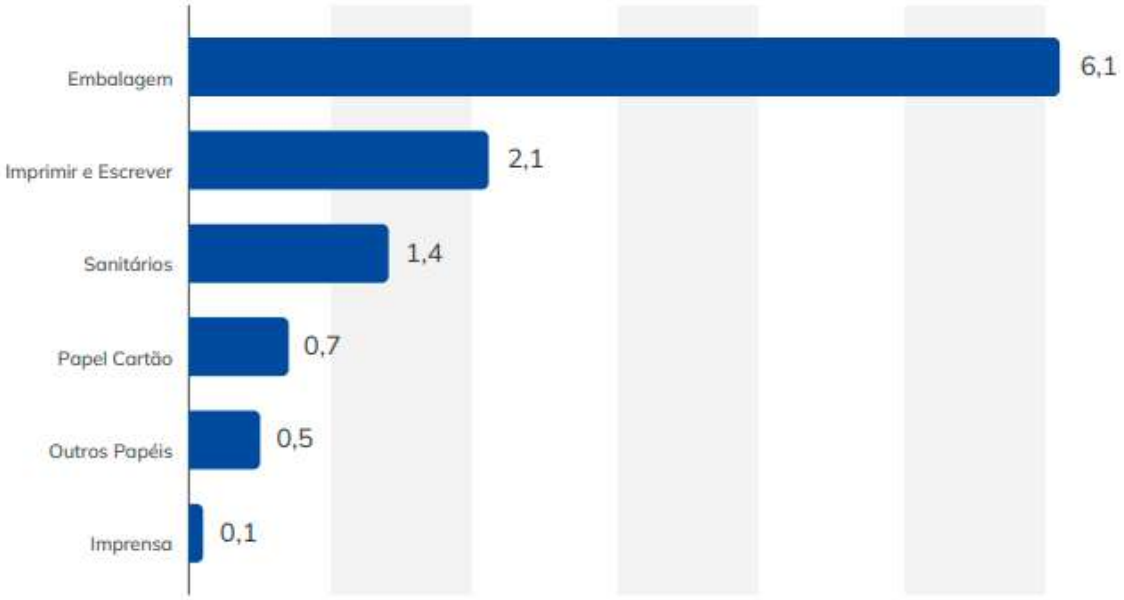
Figura 4.22 - Destino da produção de papel [Milhões de toneladas].



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Considerando o cenário apresentado em 2023, os papéis para embalagem lideraram a produção brasileira, representando 56% do total (Figura 4.23), tal fato demonstra a relevância desse produto na indústria de papel. Com uma produção de 10,8 milhões de toneladas e um crescimento de 4% nos últimos cinco anos, o Brasil manteve a 9ª posição no ranking global de produtores de papel, com a China continuando a ser o maior produtor mundial (Relatório anual IBÁ, 2024).

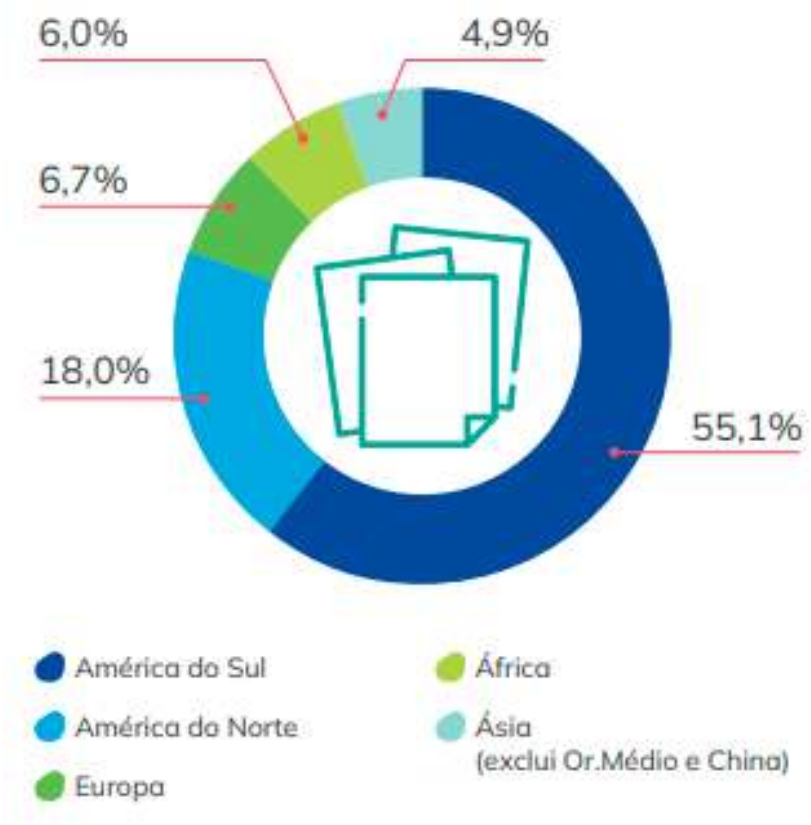
Figura 4.23 - Produção de papel no Brasil por tipo em 2023 [Milhões de toneladas].



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

A América do Sul se manteve como o principal destino das exportações brasileiras de papel em 2023, respondendo por 55,1% do total (Figura 4.24). Em segundo lugar, aparece a América do Norte, que recebeu 18% das exportações (MDIC, 2024).

Figura 4.24 - Maiores destinos das exportações brasileiras de papel do setor de árvores cultivadas, em 2023 [%].



Fonte: Relatório Anual da Indústria Brasileira de Árvores, 2024.

Pode-se dizer então que a indústria brasileira de papel e celulose se destaca como um setor estratégico para a economia, com forte desempenho nas exportações e produção sustentada por práticas florestais renováveis. Sua relevância é evidenciada pela presença global, especialmente nos mercados asiático, europeu e americano, e pela contribuição significativa para o desenvolvimento sustentável e a bioeconomia do país.

4.6. USO DE POLÍMEROS SINTÉTICOS

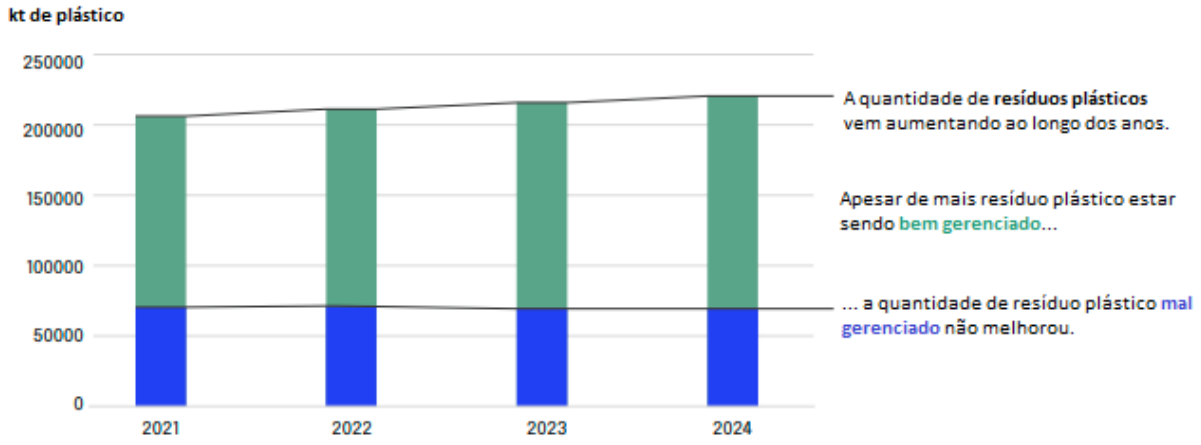
Os avanços na química orgânica contribuíram significativamente para o desenvolvimento de polímeros sintéticos, possibilitando, a partir da década de 1830, a criação de compostos orgânicos capazes de substituir materiais naturais como madeira, couro e fibras (BOWER, 2002).

Com o passar dos anos, a expansão da indústria do petróleo e dos derivados petroquímicos ampliou as fontes de matéria-prima, impulsionando o desenvolvimento de novos polímeros amplamente aplicados em processos e equipamentos industriais. Paralelamente, houve avanços nos maquinários de transformação, como extrusoras e injetoras, que contribuíram para consolidar a demanda por esses materiais (BOWER, 2002).

Como resultado desse crescimento contínuo, há cerca de 10 anos atrás, a produção mundial de polímeros já ultrapassava a marca de 100 milhões de toneladas, sendo em sua maioria derivados de matérias-primas de origem petrolífera. Nesse contexto, os polímeros também passaram a ser alvo de críticas, frequentemente associados aos impactos ambientais negativos. Isso se deve principalmente ao fato de serem produzidos a partir de fontes não renováveis, apresentarem baixa capacidade de degradação biológica e permanecerem no ambiente por longos períodos, agravando os problemas ambientais (FRANCHETTI; MARCONATO, 2006).

Diante desse cenário, a alta demanda de produção tem contribuído para a intensificação de um desafio global: a crescente geração de resíduos plásticos. Em 2024, essa produção foi estimada em 220 milhões de toneladas (Figura 4.25). No entanto, os países apresentam diferentes níveis de capacidade para gerenciar adequadamente esses resíduos, sendo que apenas alguns contam com sistemas de gestão mais avançados. Estima-se que, mundialmente, cerca de 69,5 milhões de toneladas de resíduos plásticos tenham sido mal gerenciadas no mesmo ano, gerando risco significativo de contaminação ambiental (PERREARD et al., 2024).

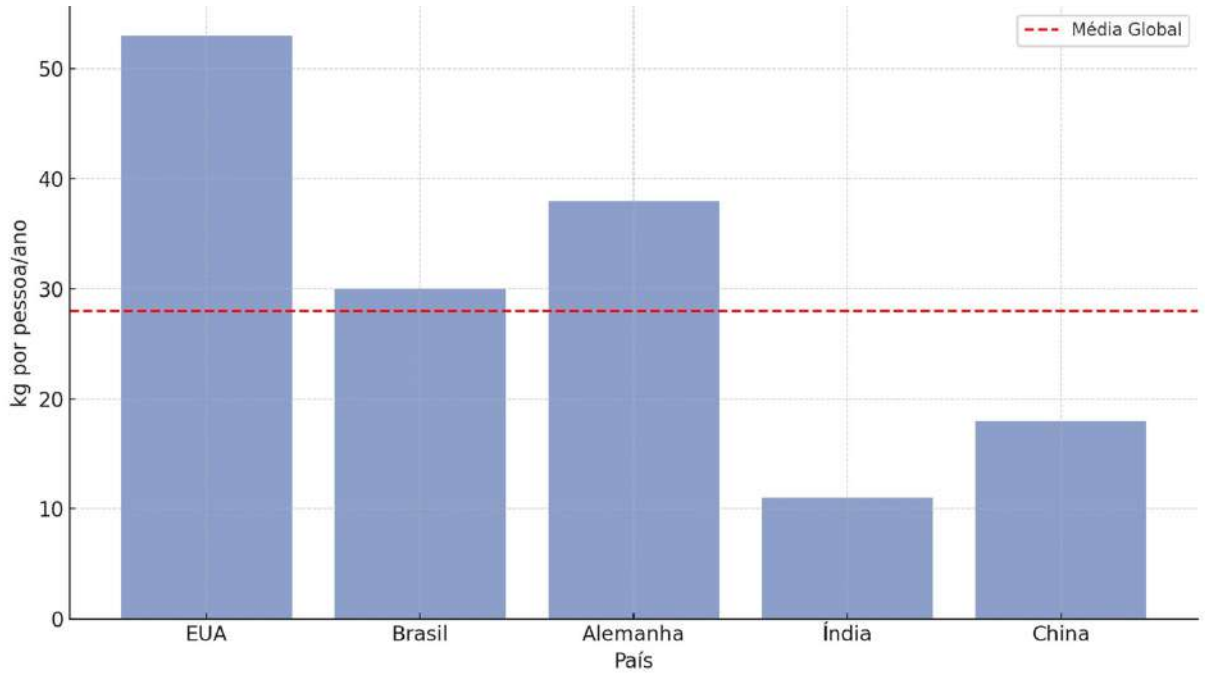
Figura 4.25 - Produção de resíduo plástico bem gerenciado e mal gerenciado no mundo (em quilotonelada).



Fonte: Adaptado de PERREARD et al., 2024.

A poluição plástica global resulta da soma das contribuições individuais de cada país, refletindo tanto os níveis de consumo quanto a eficiência na gestão dos resíduos. Estima-se uma média de 28 kg de resíduos plásticos gerados por pessoa ao ano. Ainda que países com menor geração per capita, como a China (Figura 4.26), apresentem grandes volumes totais devido à alta população, o problema é amplamente distribuído e evidencia a urgência de estratégias globais coordenadas para mitigar os impactos ambientais (PERREARD et al., 2024).

Figura 4.26 - Geração de resíduos plásticos per capita (2024).



Fonte: Elaboração própria, com dados adaptados de PERREARD et al., 2024.

Dessa forma, se torna cada vez mais urgente o desenvolvimento de novas tecnologias de produção com o propósito de se obter polímeros com um menor impacto ambiental. Destacando-se também os processos produtivos que geram produtos ambiental e ecologicamente melhores, com potencial substitutivo aos polímeros sintéticos.

5. METODOLOGIA

5.1. SELEÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVES

Inicialmente, realizou-se uma análise detalhada do tema do trabalho, identificando os principais conceitos e termos relevantes para a pesquisa. Como o estudo tem foco em metodologias de obtenção de nanocelulose do eucalipto para a produção de embalagens sustentáveis, selecionou-se como primeira palavra-chave "*nanocelullose*''. Variações desta palavra também foram consideradas, tais como "*nanofiber*" e "*nanofibril*", além de "*cellulose*", principal matéria-prima para obtenção da nanocelulose. Ainda em relação ao tema, foram cogitadas as palavras "*eucalyptus*", "*packaging*" e "*sustainability*" por serem de grande relevância para o estudo.

Como forma de aprimorar a busca dos artigos e reduzir o número dos mesmos, fez-se a junção do termo "*eucalyptus*" com algumas das palavras-chaves já previamente selecionadas, obtendo as seguintes novas palavras: "*eucalyptus nanofiber*", "*eucalyptus nanofibril*", "*eucalyptus nanocellulose*", "*eucalyptus packaging*" e "*eucalyptus food packaging*".

Utilizando o mesmo raciocínio citado anteriormente, fez-se o mesmo jogo de palavras, dessa vez, utilizando o termo "*nanocellulose*". As novas palavras-chaves obtidas foram: "*nanocellulose treatment eucalyptus*", "*nanocellulose eucalyptus packaging*", "*nanocellulose sustainability eucalyptus*" e "*nanocellulose nanofiber eucalyptus sustainability packaging*".

Em ambos os casos de combinação de termos, verificou-se que a alteração da ordem das palavras não contribuiu para o aumento dos números dos artigos, tampouco para sua diminuição. Portanto, a partir do contexto abordado para seleção das palavras-chaves, elaborou-se uma lista preliminar de termos relacionados ao tema do trabalho, que se encontra na Tabela 1 abaixo:

Tabela 5.1 - Lista preliminar de palavras-chaves.

Palavras-chaves
Nanocellulose
Nanofiber
Nanofibril
Cellulose
Eucalyptus
Packaging

Sustainability
eucalyptus nanofiber
eucalyptus nanofibril
eucalyptus nanocellulose
eucalyptus packaging
eucalyptus food packaging
nanocellulose treatment eucalyptus
nanocellulose eucalyptus packaging
nanocellulose sustainability eucalyptus
nanocellulose nanofiber eucalyptus sustainability

Fonte: Elaboração própria.

Com base nesta lista preliminar, aplicou-se um critério de relevância e abrangência para selecionar as palavras-chave mais representativas. Foram priorizados termos específicos que descrevem o conteúdo do trabalho de forma clara e objetiva. Os termos selecionados considerando tais fatores se encontram na Tabela 2 a seguir:

Tabela 5.2 - Lista de palavras-chaves selecionadas.

Palavras-chaves
nanocellulose eucalyptus packaging
nanocellulose sustainability eucalyptus
nanocellulose nanofiber eucalyptus sustainability packaging

Fonte: Elaboração própria.

5.2. BUSCA DE ARTIGOS

Para monitorar as metodologias de obtenção da nanocelulose e realizar a seleção dos artigos, primeiramente foi necessário selecionar quais seriam as bases de dados a serem utilizadas. Algumas foram analisadas, como: *Google Scholar*, Scielo, *Web of Science*, *Scopus*, IEEE *Xplore* e *ScienceDirect*. Selecionou-se então as bases de busca *Web of Science* e *Scopus*. Tais bases de dados foram escolhidas devido à sua facilidade de acesso e maior disponibilidade gratuita dos artigos, além de possuírem uma ampla variedade de publicações relacionadas ao tema abordado.

- ***Web of Science* (WoS):**

A *Web of Science* é uma plataforma de pesquisa acadêmica que dá acesso a uma vasta base de dados como artigos, conferências, patentes e livros científicos. É amplamente utilizada para buscar informações em uma grande diversidade de áreas. A plataforma é reconhecida pela catalogação de periódicos de alta qualidade, muitos dos quais são referência em suas áreas. Com recursos de pesquisa avançada e filtros específicos, facilita a localização de material relevante de forma rápida e precisa.

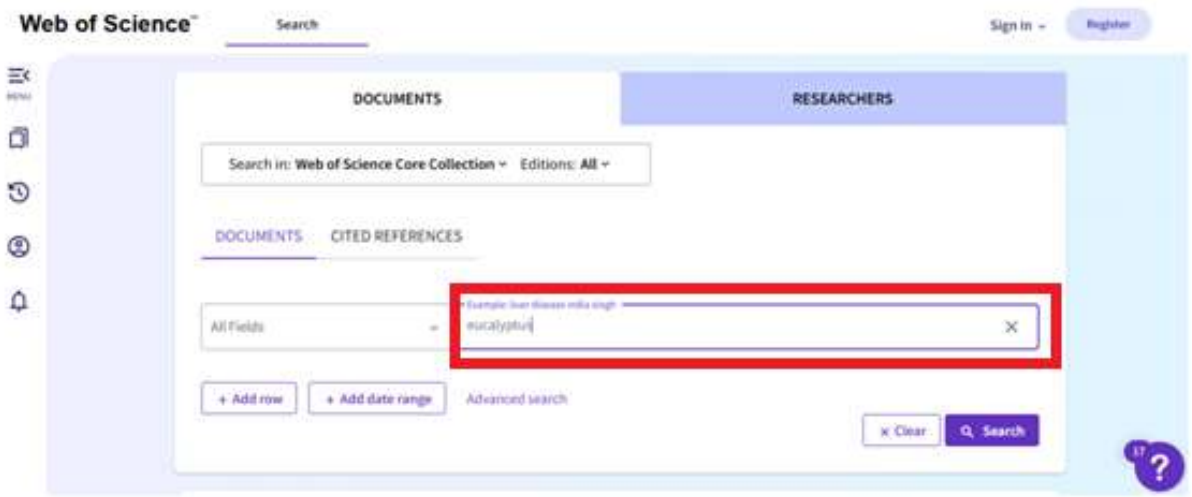
- ***Scopus*:**

A *Scopus* é uma base de dados científica que reúne artigos acadêmicos, conferências e patentes de diversas áreas do conhecimento. Ela oferece ferramentas que permitem realizar buscas detalhadas com filtros para refinar os resultados. É amplamente utilizada para revisar a literatura e avaliar a relevância e qualidade das fontes científicas.

A estratégia de busca adotada teve como objetivo recuperar um número suficiente de artigos para construir um panorama do tema ao longo das duas últimas décadas.

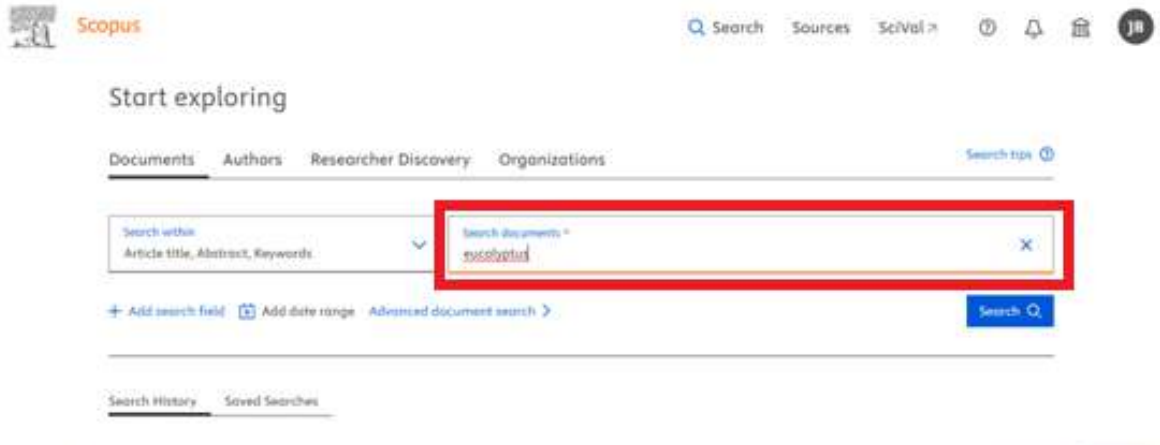
As Figura 5.1 e Figura 5.2 mostram a página inicial das bases de dados, e o local onde a palavra chave foi inserida para realizar a busca, respectivamente para WoS e Scopus.

Figura 5.1 - Página inicial da base de dados *Web of Science*, com destaque para o local onde foram inseridas as palavras chave utilizadas para a busca.



Fonte: *Web of Science*, 2025.

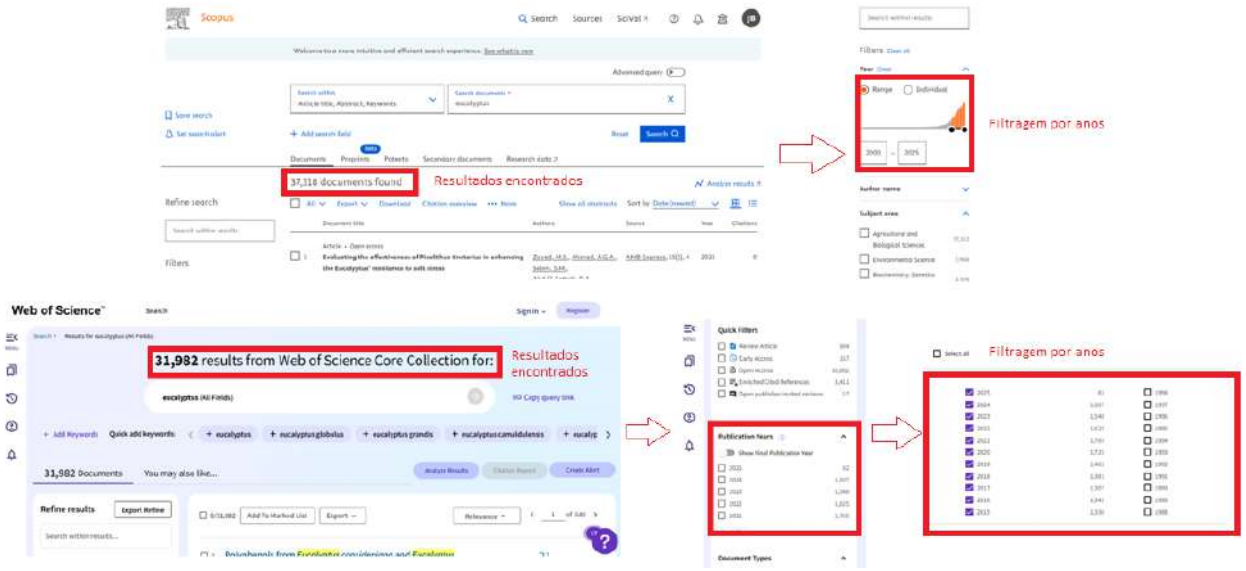
Figura 5.2 - Página inicial da base de dados *Scopus*, com destaque para o local onde foram inseridas as palavras chave utilizadas para a busca.



Fonte: *Scopus*, 2025.

Os resultados obtidos para a busca são exibidos como demonstrado na Figura 5.2.3. Em ambas as bases de dados é possível, nas abas laterais, selecionar as publicações por ano de interesse. Para o estudo em questão, foram analisadas as publicações dos últimos 20 anos.

Figura 5.3 - Resultados obtidos das buscas, e seleção de anos para filtragem dos artigos nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.

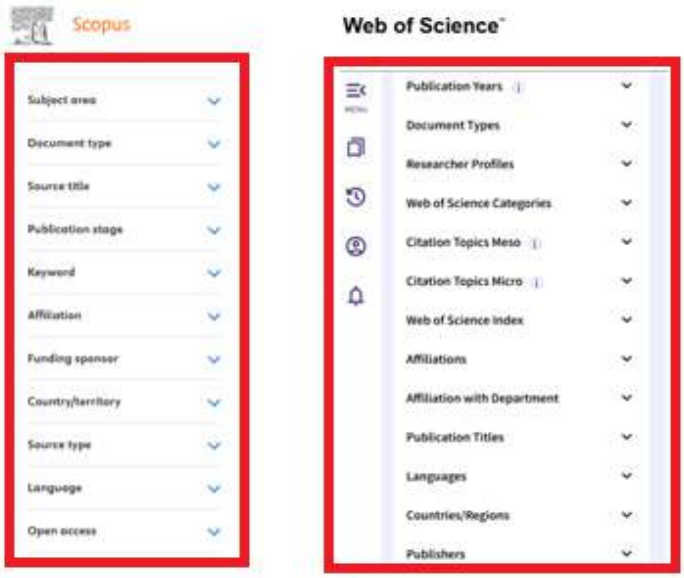


Fonte: *Scopus*; *Web of Science*, 2025.

Após realizada a filtragem dos anos de interesse, um novo resultado da busca é gerado. Esse resultado, por consequência, apresenta um menor número de artigos que a busca inicial. É possível ainda, como pode-se observar na Figura 5.2.4, realizar outros tipos de filtragem nos

resultados, basta selecionar os filtros que desejados nas respectivas abas laterais de cada base de dados.

Figura 5.4 - Filtros disponíveis para seleção dos resultados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*.

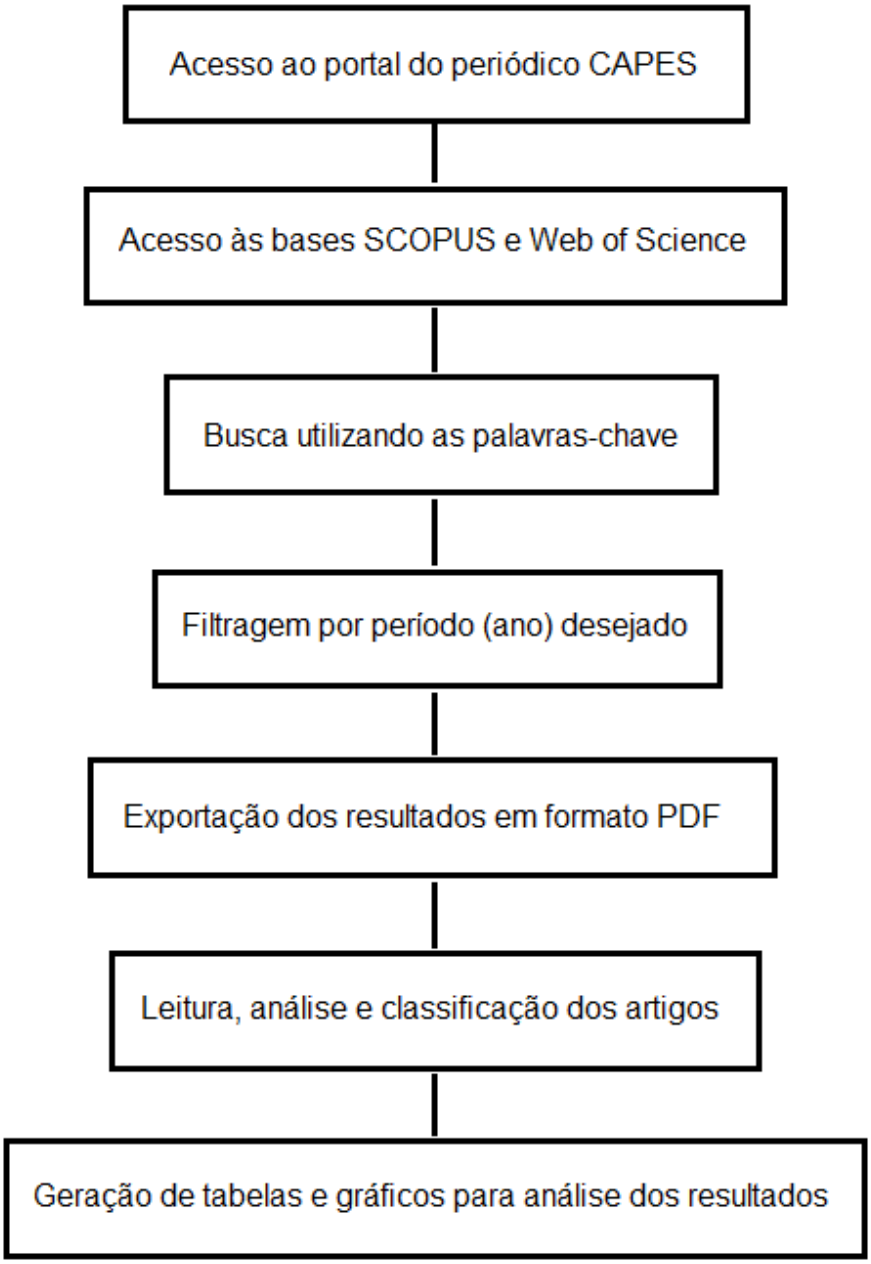


Fonte: *Scopus*; *Web of Science*, 2025.

Após realizada a filtragem e selecionados os artigos, os mesmos foram exportados no formato PDF para uma melhor análise dos dados e discussão das metodologias e resultados, podendo assim manter aqueles que tivessem maior relação com o assunto abordado.

A Figura 5.5 apresenta um diagrama de blocos com o resumo da metodologia para busca e realização das tabelas e gráficos do estudo científico em artigos.

Figura 5.5 - Resumo da metodologia para busca e realização das tabelas e gráficos do estudo científico em artigos.



Fonte: Elaboração própria.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. MAPEAMENTO DOS ARTIGOS

A partir das buscas realizadas nas bases de dados escolhidas, foram identificados, para cada uma das palavras-chaves pré-definidas na Tabela 5.1, os quantitativos de artigos demonstrados na Tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1 - Lista do quantitativo de artigos para a lista preliminar de palavras-chaves.

Palavras-Chaves	*Web of Science*	*Scopus*
Nanocellulose	11439	12432
Nanofiber	38829	53545
Nanofibril	1887	2284
Cellulose	252485	288976
Eucalyptus	444407	450088
Packaging	424924	241935
Sustainability	31487	36549
eucalyptus nanofiber	41	79
eucalyptus nanofibril	25	26
eucalyptus nanocellulose	189	124
eucalyptus packaging	233	177
eucalyptus food packaging	74	58
nanocellulose treatment eucalyptus	65	46

Fonte: Elaboração própria.

Já para a lista de palavras-chaves selecionadas para esse projeto (Tabela 5.2), o quantitativo de artigos pode ser visualizado na Tabela 6.2 abaixo:

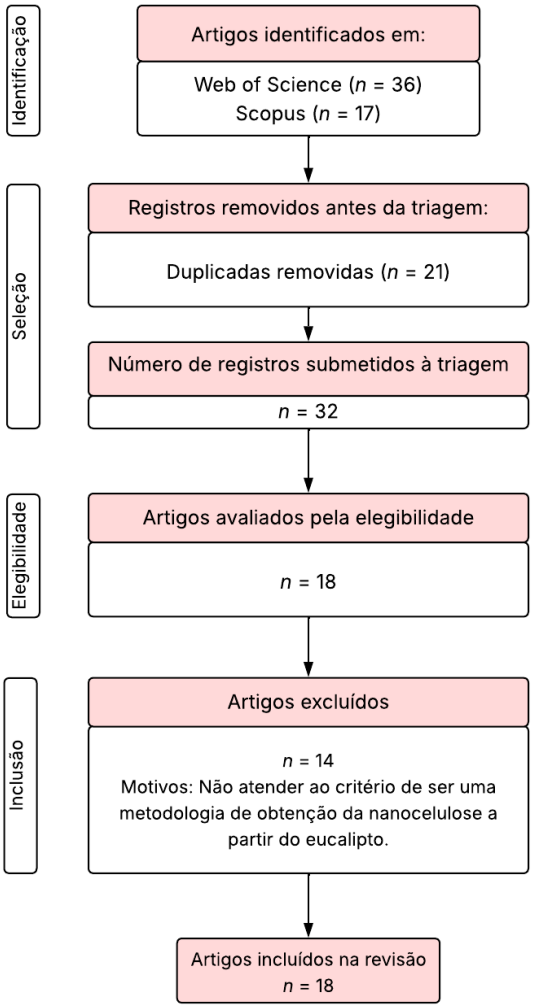
Tabela 6.2 - Lista do quantitativo de artigos para a lista de palavras-chaves selecionadas para o projeto.

Palavras-Chaves	*Web of Science*	*Scopus*
nanocellulose eucalyptus packaging	25	10
nanocellulose sustainability eucalyptus	11	6
nanocellulose nanofiber eucalyptus sustainability packaging	0	1
Total de cada base	36	17
Total para análise	53	

Fonte: Elaboração própria.

Neste trabalho, foram considerados para análises apenas os quantitativos de artigos baseados nas palavras-chave selecionadas, descritas na Tabela 5.2. As somas dos artigos das duas bases de dados para essas palavras-chaves em questão resultaram em 53 artigos (36 estudos oriundos da *Web of Science* e 17 do *Scopus*), conforme apresentado na Tabela 6.2. Após a exclusão de 21 estudos duplicados, restaram 32 artigos para a triagem metodológica. Desses, 14 artigos foram desconsiderados nesta revisão por não se enquadrar no critério de elegibilidade adotado. Esse critério exigia que os artigos tivessem uma metodologia de obtenção da nanocelulose a partir do eucalipto como matéria-prima, excluindo-se os estudos focados em nanocristais. O processo de seleção está representado no fluxograma PRISMA (PAGE, M. J. et al., 2021) conforme ilustrado na Figura 6.1.

Figura 6.1 - Diagrama de blocos para aplicação da metodologia PRISMA no processo de seleção dos artigos.



Fonte: Elaboração própria.

Assim, após análise minuciosa dos artigos selecionados inicialmente, 18 estudos foram incluídos para esta revisão, conforme apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Artigos selecionados para revisão bibliográfica.

N° Artigo	Ano de publicação	Título
1	2023	A comparative study of lignin-containing microfbrillated cellulose fibers produced from softwood and hardwood pulps
2	2017	Cellulose nanofibrils/nanoclay hybrid composite as a paper coating: Effects of spray time, nanoclay content and corona discharge on barrier and mechanical properties of the coated papers
3	2022	Cellulose nanostructures obtained using enzymatic cocktails with different compositions

4	2021	Computational Simulation Tools to Support the Tissue Paper Furnish Management: Case Studies for the Optimization of Micro/Nano Cellulose Fibers and Polymer-Based Additives
5	2022	Effect of overlapping cellulose nanofibrils and nanoclay layers on mechanical and barrier properties of spray-coated papers
6	2017	Eucalyptus Wood nanofibrils as Reinforcement of Carrageenan and Starch Biopolymers for Improvement of Physical Properties
7	2023	Innovative system based on natural polyelectrolyte complex and cellulose micro/nanofbers to improve drainability and properties of recycled paper
8	2018	Morphological, Physical and Thermal Characterization of Microfibrillated Cellulose
9	2020	Nanocellulose reinforcement in paper produced from fiber blending
10	2023	Nanocellulose Coating on Kraft Paper
11	2024	Nanocellulose-Phenol Formaldehyde Adhesive System for Engineered Wood Products: Review
12	2018	Obtaining Hydrophobic Aerogels of Unbleached Cellulose Nanofibers of the Species Eucalyptus sp. and Pinus elliottii
13	2022	Optimization of reagent consumption in TEMPO-mediated oxidation of Eucalyptus cellulose to obtain cellulose nanofibers
14	2022	Preparation and benchmarking of novel cellulose nanopaper
15	2022	Procurement and Characterization of Biodegradable Films made from Blends of Eucalyptus, Pine and Cocoa Bean Shell Nanocelluloses
16	2024	Removal of Glyphosate with Nanocellulose for Decontamination Purposes in Aquatic Systems
17	2024	Sustainable synthesis pathways: Bacterial nanocellulose from lignocellulosic biomass for circular economy initiatives
18	2015	Transparent nanocellulose-pigment composite films

Fonte: Elaboração própria.

6.2. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE OBTENÇÃO

A análise dos 18 artigos selecionados revela a predominância e diversidade de métodos utilizados para a obtenção de nanocelulose, refletindo um campo de pesquisa em contínua evolução. Os principais processos empregados incluem técnicas mecânicas (como a fibrilação), químicas (com destaque para a oxidação TEMPO), biológicas/enzimáticas (uso de blendas enzimáticas) e biológicas (produção bacteriana). Esses métodos são amplamente documentados na literatura científica, que os classifica em três categorias principais: mecânicos, químicos e enzimáticos, cada um com vantagens específicas dependendo do tipo de produto desejado (KLEMM et al., 2011; MOON et al., 2011).

A fibrilação mecânica, empregada na maioria dos artigos selecionados, permanece como um dos métodos mais utilizados devido à sua escalabilidade industrial e aplicabilidade a diversas fontes de celulose. Embora os artigos 1, 2, 6, 9, 10, 11 e 16 tenham adotado somente metodologias de moagem ultrafina, apenas o artigo 1 identificou que a presença residual de lignina nas fibras de madeira dura e macia influencia o grau de fibrilação, classificando o material como LC-MFC (microfibrilada com lignina). Essa observação está em conformidade com Ago et al. (2016), que demonstram que a lignina pode tanto dificultar quanto facilitar a fibrilação, dependendo da estrutura da parede celular e do tipo de pré-tratamento aplicado. Ainda, o artigo 12 se destaca por realizar o método de moagem em moinhos de bolas e de utilizar celulose não branqueada, um recurso sustentável e econômico, como também apontado por Lavoine et al. (2012), onde se preservam componentes como a lignina para reduzir etapas químicas e consumo energético. Além disso, ambos os estudos obtiveram resultados semelhantes, indicando uma melhora significativa das propriedades mecânicas do papel, tornando-o mais resistente e durável, corroborando os fatos expostos por Costa et al. (2019).

Adicionalmente, os artigos 5, 8 e 14, reforçam a viabilidade do refino mecânico como uma alternativa eficiente e sustentável, ao alcançar nanofibrilação significativa sem o uso de tratamentos químicos, além de apresentar melhorias nas propriedades mecânicas e de barreira, como a redução da permeabilidade ao oxigênio e vapor d'água conforme destacado por Spence et al. (2011) e Lavoine et al. (2012). Essa abordagem evita a utilização de reagentes agressivos, reduzindo os impactos ambientais e os custos associados ao tratamento de resíduos, diferentemente do artigo 15 e 18, que mesmo utilizando processo similar, envolve etapas de pré-tratamentos químicos para a remoção de lignina e hemicelulose. Além disso, esse método também preserva melhor a integridade das fibras e permite maior controle sobre o grau de

fibrilação, resultando em materiais com bom desempenho funcional. Estudos como o de Herrick et al. (1983) mostram que a nanofibrilação mecânica é capaz de produzir redes densas de nanofibrilas, promovendo elevada resistência à tração e propriedades de barreira superiores. Além disso, os artigos analisados demonstraram bom desempenho energético do processo, especialmente em escala piloto com refinadores de disco, onde geraram nanopapel com propriedades comparáveis às de métodos mais complexos, como também relatado por Klemm et al. (2011) e Saito et al. (2009). Jiang et al. (2014) complementa evidenciando que a estrutura resultante favorece a formação de filmes com baixa permeabilidade e boa estabilidade dimensional.

O artigo 7 exemplifica um método misto/híbrido, combinando fibrilação mecânica (refino com *Pulverizer Fiberizer* - PFI), tratamento químico com ácido oxálico e homogeneização de alta pressão, para a produção de micro/nanofibrilas de celulose com características adequadas à melhoria da drenabilidade e das propriedades mecânicas do papel reciclado. A literatura recomenda essa integração de tratamentos químicos e mecânicos para aumentar a eficiência da fibrilação e reduzir o consumo energético (Lavoine et al., 2012; Klemm et al., 2011). A carboxilação promovida pelo ácido oxálico facilita a desfibrilação (Saito et al., 2006), enquanto a homogeneização de alta pressão contribui para a uniformidade das nanofibrilas (Spence et al., 2011). O uso de CMNFs (Celulose Micro/Nanofibrilada Carboxilada) como aditivos funcionais para reforço de papel reciclado também está alinhado com os achados de Hubbe et al. (2017), que evidenciam ganhos significativos em resistência mecânica e drenabilidade.

Complementarmente aos métodos mecânicos e híbridos, abordagens biológicas também ganham destaque. O artigo 3 explora a metodologia de hidrólise enzimática, com o uso de coquetéis enzimáticos compostos por celulases e hemicelulases como pré-tratamento, promovendo a degradação seletiva das frações amorfas da celulose e hemicelulose. Essa técnica reduz a demanda energética na fibrilação subsequente, além de preservar a integridade da cadeia polimérica através da ação sinérgica das enzimas, resultando em nanofibrilas com boas propriedades estruturais e menor degradação térmica, conforme discutido por Van Dyk e Pletschke (2012) e Pääkko et al. (2007).

O artigo 4 aprofunda essa abordagem ao comparar a sequência de aplicação dos tratamentos mecânicos e enzimáticos. Os resultados mostram que iniciar o processo com o tratamento enzimático (rota enzimático-mecânica) permite atingir propriedades finais

equivalentes à rota inversa (mecânico-enzimática), com uma expressiva redução de até 85% no consumo de enzimas. Isso representa um avanço importante tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, considerando o alto custo das enzimas. Apesar da literatura já reconhecer o potencial da combinação de métodos para aumentar a eficiência da produção de nanocelulose (Henriksson et al., 2007; Siro & Plackett, 2010), são raros os estudos que avaliam diretamente o impacto da ordem dos tratamentos. Assim, o artigo 4 contribui significativamente ao propor uma alternativa mais eficiente e sustentável, com implicações práticas para a viabilidade industrial da nanocelulose.

Já no campo dos métodos químicos, a oxidação mediada por TEMPO, como utilizada no artigo 13, é considerada um dos métodos mais eficazes para a obtenção de CNFs com elevada uniformidade e funcionalização superficial. Baseada na modificação seletiva das funções hidroxila da celulose em condições controladas, essa técnica introduz grupos carboxila que facilitam a individualização das nanofibrilas. O trabalho discute a otimização do uso de reagentes na produção de CNFs a partir de celulose de eucalipto, abordando a relação entre eficiência e sustentabilidade – uma preocupação amplamente discutida na literatura, especialmente por Saito et al. (2006) e Isogai et al. (2011), que destacam tanto a eficácia do método quanto os riscos ambientais associados ao uso excessivo de reagentes oxidantes, reforçando a importância do desenvolvimento de sistemas catalíticos mais eficientes.

Por fim, o artigo 17 propõe a produção de nanocelulose bacteriana a partir de biomassa lignocelulósica, através da metodologia de pré-tratamento hidrotérmico da biomassa, juntamente com a fermentação bacteriana, sendo um conjunto de métodos biotecnológico cada vez mais relevante em iniciativas de bioeconomia. A produção de BC por cepas como Komagataeibacter xylinus a partir de resíduos agrícolas é descrita como uma rota altamente pura e controlada, conforme Jozala et al. (2016), ainda que enfrente desafios quanto à produtividade e tempo de fermentação. O diferencial desse estudo está na valorização de resíduos lignocelulósicos como substrato, tal como serragem de eucalipto, o que fortalece a proposta de circularidade econômica.

Diante dessas considerações e de todas as análises realizadas, a Tabela 6.4 a seguir apresenta um compilado dos principais resultados obtidos ao longo deste estudo.

Tabela 6.4 – Resumo dos resultados obtidos na análise dos artigos

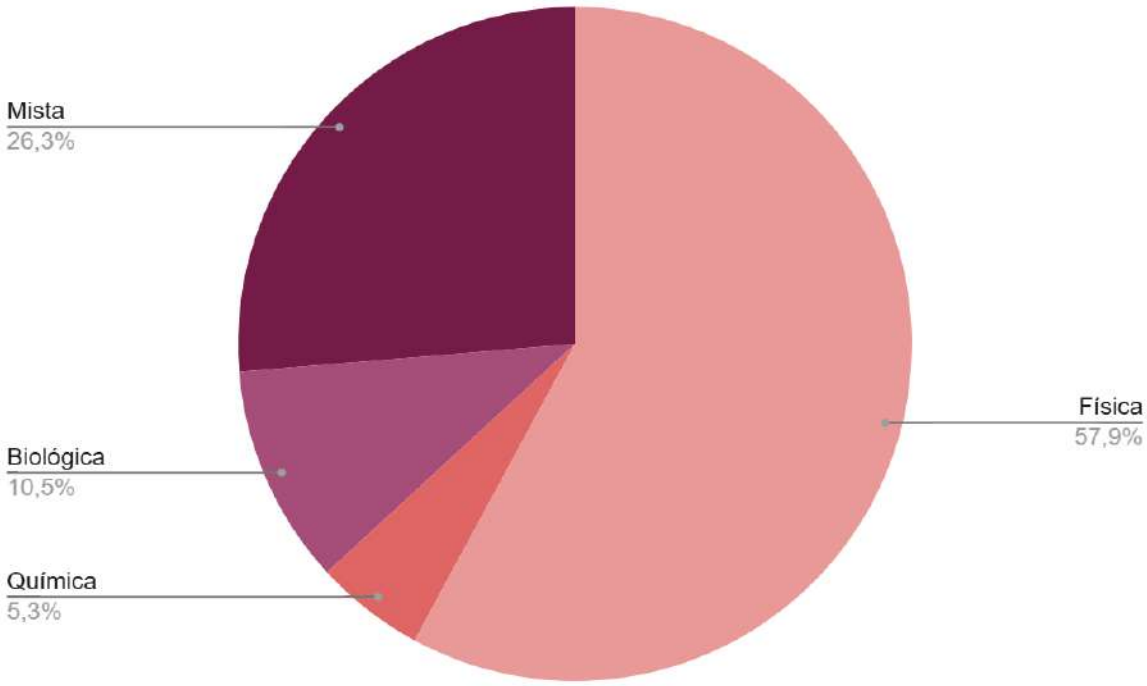
N° Artigo	Título	Abordagem	Método	Produto
1	A comparative study of lignin-containing microfbrillated cellulose fbers produced from softwood and hardwood pulps	Física	**Moagem Ultrafina**	LC-MFC
2	Cellulose nanofibrils/nanoclay hybrid composite as a paper coating: Effects of spray time, nanoclay content and corona discharge on barrier and mechanical properties of the coated papers	Física	**Moagem Ultrafina**	CNF
3	Cellulose nanostructures obtained using enzymatic cocktails with different compositions	Biológica	**Hidrólise Enzimática**	BC
4	Computational Simulation Tools to Support the Tissue Paper Furnish Management: Case Studies for the Optimization of Micro/Nano Cellulose Fibers and Polymer-Based Additives	Mista	**Refino Mecânico + Tratamento Enzimático**	CNF
5	Effect of overlapping cellulose nanofibrils and nanoclay layers on mechanical and barrier properties of spray-coated papers	Física	**Refino Mecânico**	CNF
6	Eucalyptus Wood nanofibrils as Reinforcement of Carrageenan and Starch Biopolymers for Improvement of Physical Properties	Física	**Moagem Ultrafina (Moagem Coloidal)**	CNF
7	Innovative system based on natural polyelectrolyte complex and cellulose micro/nanofbers to improve drainability and properties of recycled paper	Mista	**Fibrilação Mecânica (Refino + Homogeneização de Alta Pressão) + Tratamento Químico**	CNF
8	Morphological, Physical and Thermal Characterization of Microfibrillated Cellulose	Física	**Refino Mecânico**	CNF
9	Nanocellulose reinforcement in paper produced from fiber blending	Física	**Moagem Ultrafina**	CNF
10	Nanocellulose Coating on Kraft Paper	Física	**Moagem Ultrafina (Moagem Coloidal)**	CNF
11	Nanocellulose-Phenol Formaldehyde Adhesive System for Engineered Wood Products: Review	Física	**Moagem Ultrafina**	CNF

12	Obtaining Hydrophobic Aerogels of Unbleached Cellulose Nanofibers of the Species Eucalyptus sp. and Pinus elliottii	Física	**Moagem em moinhos de pedra**	CNF
13	Optimization of reagent consumption in TEMPO-mediated oxidation of Eucalyptus cellulose to obtain cellulose nanofibers	Química	**Oxidação Mediada por TEMPO + Homogeneização de Alta Pressão**	CMNF
14	Preparation and benchmarking of novel cellulose nanopaper	Física	**Refino Mecânico**	CNF
15	Procurement and Characterization of Biodegradable Films made from Blends of Eucalyptus, Pine and Cocoa Bean Shell Nanocelluloses	Mista	**Refino Mecânico + Pré-Tratamento Químico**	CNF
16	Removal of Glyphosate with Nanocellulose for Decontamination Purposes in Aquatic Systems	Física	**Moagem Ultrafina**	CNF
17	Sustainable synthesis pathways: Bacterial nanocellulose from lignocellulosic biomass for circular economy initiatives	Biológica	**Pré-Tratamento Hidrotérmico + Fermentação Bacteriana**	BC
18	Transparent nanocellulose-pigment composite films	Mista	**Refino Mecânico + Pré-Tratamento Químico**	CNF

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 6.2 a seguir apresenta a distribuição das abordagens utilizadas para obtenção de nanocelulose nos artigos analisados:

Figura 6.2 - Abordagens utilizadas na obtenção da nanocelulose.



Fonte: Elaboração própria.

Diante do gráfico da Figura 6.2, observa-se que:

- Abordagens físicas ainda são predominantes, correspondendo a 57,9% dos casos. Essa prevalência está relacionada à maturidade tecnológica desses métodos e à sua aplicabilidade industrial, como destacado por Klemm et al. (2011).

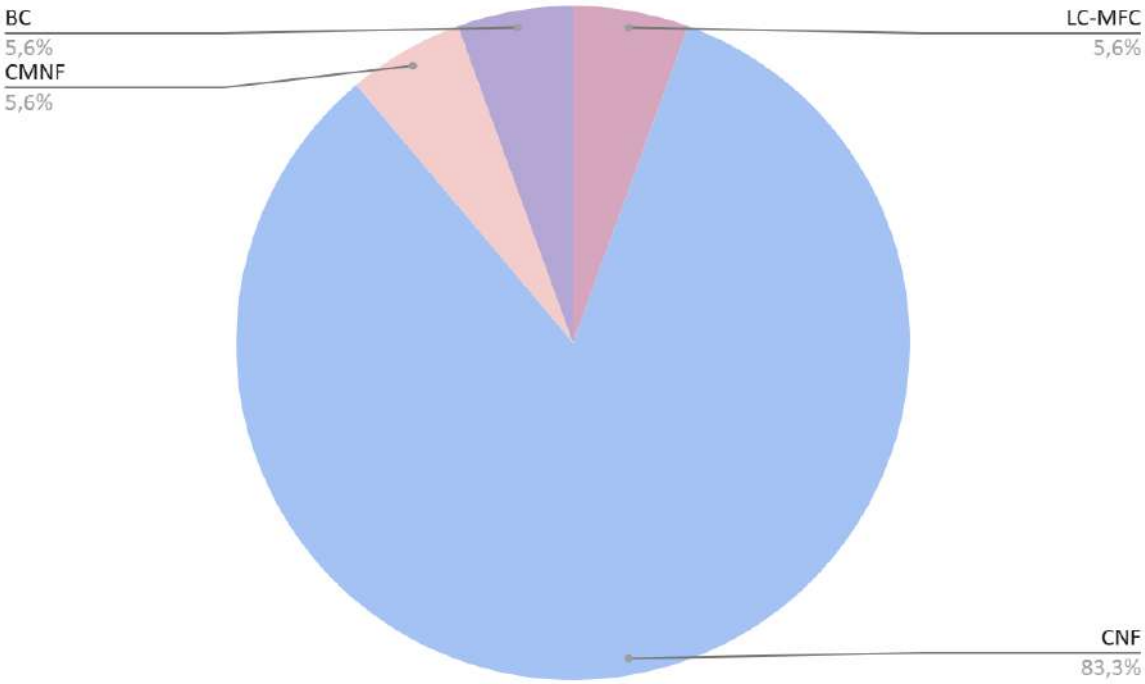
- Já as abordagens mistas/híbridas representam 26,3% dos métodos analisados, ganhando cada vez mais espaço pela eficiência do processo, reduzindo o consumo energético e obtendo materiais com melhores propriedades. Segundo Klemm et al. (2011), a combinação de métodos pode facilitar a fibrilação e tornar a produção mais viável.
- As abordagens biológicas, como o uso de coquetéis enzimáticos (artigo 3) e a produção bacteriana (artigo 17), representam 10,5% dos estudos. Embora menos frequentes, essas abordagens se alinham a tendências de sustentabilidade e uso de substratos renováveis, conforme relatado por Iguchi et al. (2000) e Jozala et al. (2016).

As abordagens químicas, com destaque para a oxidação TEMPO (artigo 13), aparecem em apenas 5,3% dos trabalhos. Apesar de eficiente para modificar propriedades superficiais,

essa técnica ainda enfrenta desafios relacionados ao custo e à sustentabilidade do processo (Isogai et al., 2011).

Além disso, com a Figura 6.3 abaixo também é possível analisar que, dos artigos analisados, a maior produção foi de CNFs, sendo 83,3%.

Figura 6.3 – Tipos de nanocelulose mais produzidos pelos artigos analisados.



Fonte: Elaboração própria.

6.3. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

A caracterização da nanocelulose é etapa fundamental para compreender suas propriedades e aplicações. Nos 18 artigos analisados, observam-se abordagens variadas quanto à caracterização, com destaque para métodos morfológicos, físico-químicos, térmicos, mecânicos e de desempenho funcional. A seguir, comparam-se os métodos aplicados entre os estudos e com a literatura.

- **Morfologia e Tamanho de Partícula:**

A maioria dos artigos realizou microscopia eletrônica de varredura (MEV) ou microscopia de força atômica (AFM) para análise morfológica das nanofibrilas de celulose (artigos 1, 3, 6, 8, 12). As imagens evidenciam fibrilas com diâmetros na faixa de 10 a 100 nm,

em conformidade com os dados amplamente reportados na literatura (Jiang et al., 2020; Moon et al., 2011).

- **Cristalinidade e Estrutura:**

A difração de raios X (XRD) foi usada por diversos autores (artigos 1, 8, 12, 13) para determinar o índice de cristalinidade (IC). Os valores de IC variam com o método de obtenção: a oxidação TEMPO (artigo 13) levou a índices mais altos, enquanto a presença de lignina (artigo 1) resultou em IC mais baixos. Esses resultados estão de acordo com revisões como Klemm et al. (2011), que descrevem reduções de cristalinidade em celulose parcialmente delignificada.

- **Potencial Zeta e Carga Superficial:**

O potencial zeta foi empregado em estudos como os artigos 3, 8 e 13 para avaliar a estabilidade coloidal e a carga superficial. Os valores variaram de -20 mV a -60 mV, especialmente nas nanoceluloses oxidativas (TEMPO), o que confirma o aumento da carga aniônica já descrito na literatura (Saito et al., 2007).

- **Análise Térmica:**

A análise termogravimétrica (TGA) e a calorimetria diferencial de varredura (DSC) foram usadas em pelo menos seis artigos (1, 6, 8, 12, 13, 15). A presença de lignina ou compostos hidrofóbicos (artigo 12) afetou a temperatura de degradação térmica (Tmax), reduzindo-a em comparação com nanoceluloses puras, o que está em consonância com resultados prévios de pesquisas como a de Missoum et al. (2013).

- **Propriedades Mecânicas:**

Testes de resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura foram amplamente aplicados (artigos 2, 5, 6, 9, 10, 11, 15). Os reforços com nanocelulose aumentaram significativamente a resistência de filmes e papéis, como reportado por Nair et al. (2014), com aumentos típicos de 50% a 200% na resistência à tração, dependendo da matriz e do grau de dispersão da nanocelulose.

- **Caracterização Química:**

Análises como FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) e pirólise-GC/MS foram aplicadas para verificar modificações químicas na celulose (artigos 1, 8,

12). As bandas típicas da celulose (O-H, C-H, C-O) foram confirmadas, além de sinais de oxidação (C=O), como descrito em estudos clássicos (Siro & Plackett, 2010).

- **Inovações em Caracterização:**

Alguns artigos se destacaram por apresentarem inovações nas metodologias de caracterização. O artigo 4, por exemplo, utilizou simulação computacional para prever propriedades funcionais da nanocelulose, representando um avanço no uso de ferramentas preditivas. Já o artigo 7 explorou a ação de complexos polieletrólitos naturais, com foco nos efeitos sobre a drenabilidade, que foram analisados por meio de métodos laboratoriais específicos. Por fim, o artigo 16 avaliou a capacidade de adsorção de poluentes, utilizando o glifosato como substância modelo e realizando testes de eficiência de remoção para medir o desempenho do material.

Portanto, os 18 artigos analisados cobrem uma gama diversa de métodos de caracterização da nanocelulose, com foco em propriedades morfológicas, térmicas, mecânicas e funcionais. De forma geral, os resultados obtidos estão em boa concordância com a literatura, podendo ser visto na Tabela 6.5 e na Figura 6.4, demonstrando que os métodos empregados são robustos e adequados para aplicações variadas.

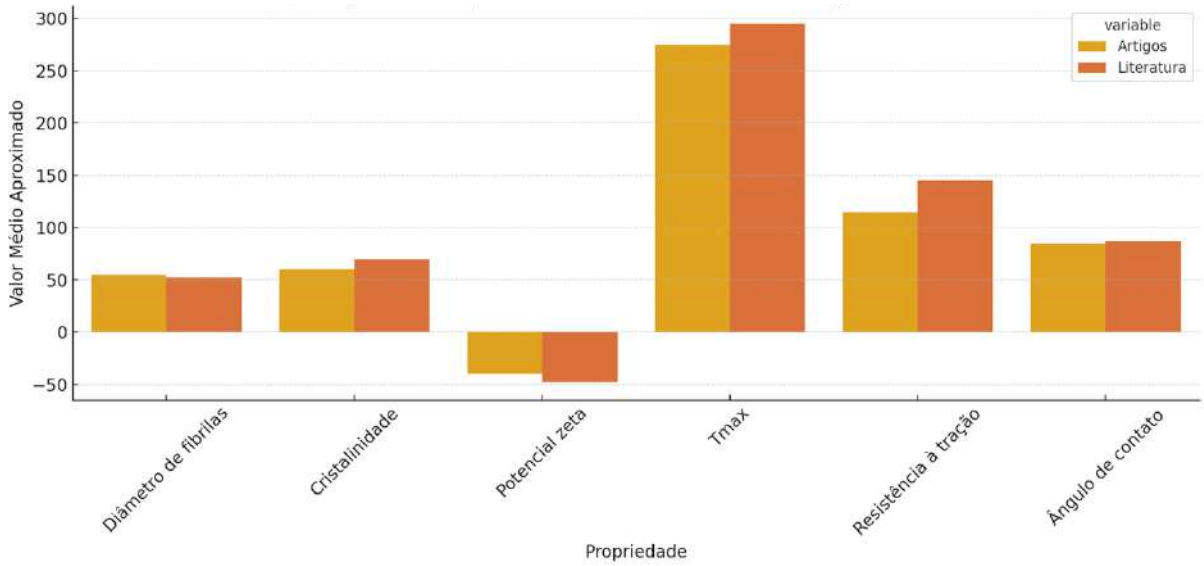
Tabela 6.5 – Quadro comparativo dos dados obtidos nos artigos analisados e na literatura

Propriedade	Artigos selecionados	Outros artigos	Referências
Diâmetro de fibrilas	10–100 nm	5–100 nm	Siro & Plackett (2010); Moon et al. (2011); Klemm et al. (2011)
Cristalinidade	40–80%	50–90%	Missoum et al. (2013); Habibi et al. (2010); Moon et al. (2011)
Potencial zeta	–20 a –60 mV	–25 a –70 mV	Naderi et al. (2015); Saito et al. (2007); Siró & Plackett (2010)
Tmáx (Análise Térmica)	200–350°C	220–370°C	Iwamoto et al. (2005); Rosa et al. (2010);

			George & Sabapathi (2015)
Resistência à tração	30–200 MPa	40–250 MPa	Nair et al. (2014); Sehaqui et al. (2011); Syverud & Stenius (2009)
Ângulo de contato (hidrofobicidade)	60°–110°	55°–120°	Hubbe et al. (2017); Ago et al. (2016); Missoum et al. (2013)

Fonte: Elaboração própria.

Figura 6.4 – Comparação das Propriedades da Nanocelulose: Artigos Selecionados vs Demais artigos da Literatura.



Fonte: Elaboração própria.

6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este panorama reflete o cenário descrito por Moon et al. (2011), que apontam a predominância dos métodos físicos na obtenção de nanocelulose, especialmente pela sua viabilidade técnica, maior grau de maturidade industrial e menor complexidade de implementação. Dentre esses, a fibrilação mecânica destaca-se como a abordagem mais consolidada, sendo amplamente explorada tanto em pesquisas acadêmicas quanto em aplicações industriais, devido à sua capacidade de produzir nanofibrilas de celulose (NFC) com propriedades reforçantes e alto rendimento, apesar do elevado consumo energético envolvido (SPENCE et al., 2011; LI et al., 2015).

Por outro lado, técnicas químicas como a oxidação mediada por TEMPO têm se mostrado promissoras por sua capacidade de individualizar as fibrilas com maior controle morfológico e funcionalização superficial, o que pode ampliar as aplicações da nanocelulose em áreas como biocompósitos, filtração e biomateriais (SABHARWAL et al., 2020; SIERRA et al., 2019). No entanto, essas rotas ainda enfrentam limitações quanto à escalabilidade, custo dos reagentes e impacto ambiental, exigindo o desenvolvimento de processos mais sustentáveis.

As rotas biotecnológicas, como a produção de nanocelulose bacteriana também têm ganhado notoriedade devido à alta pureza e cristalinidade do material obtido, além da possibilidade de utilização de resíduos orgânicos como substratos (JAYANI et al., 2021; UL-Islam et al., 2012). Apesar disso, o custo de produção e o tempo de cultivo ainda representam entraves à sua adoção em larga escala, tornando a pesquisa em otimização de fermentações e engenharia metabólica um campo em expansão.

Nesse contexto, a literatura contemporânea aponta uma tendência crescente à adoção de rotas híbridas, que combinam os benefícios de diferentes métodos para melhorar a eficiência, reduzir custos e minimizar impactos ambientais. Abordagens como o uso de pré-tratamentos enzimáticos — com celulases ou laccases — antes da fibrilação mecânica têm se mostrado eficazes na redução do consumo energético e no aumento da produtividade (ZHANG et al., 2022; HENRIKSSON et al., 2007). Além disso, a integração de processos químicos suaves com fermentações biotecnológicas vem sendo explorada como estratégia para viabilizar a produção de BNC a partir de biomassa lignocelulósica de baixo custo, promovendo um ciclo de produção mais sustentável (LAVOINE et al., 2012; GE et al., 2019).

Em síntese, os artigos analisados estão em consonância com a literatura científica quanto à diversidade de métodos empregados para a obtenção de nanocelulose, evidenciando uma preferência atual por rotas físicas em virtude de sua aplicabilidade imediata. Entretanto, observa-se um movimento progressivo em direção à incorporação de rotas químicas e biológicas, à medida que a busca por processos mais limpos, eficientes e ambientalmente sustentáveis se intensifica no campo da nanotecnologia de materiais renováveis.

7. CONCLUSÃO

A partir da análise dos artigos selecionados, foi possível atender aos objetivos propostos neste estudo, oferecendo uma visão crítica e atualizada sobre os métodos de obtenção de nanocelulose, com especial atenção ao potencial do eucalipto como matéria-prima para embalagens sustentáveis.

Em relação ao objetivo geral, a pesquisa permitiu mapear, descrever e comparar as principais rotas de extração da nanocelulose, confirmando a predominância das abordagens físicas devido à sua maturidade tecnológica e aplicabilidade imediata. No entanto, observou-se que, à medida que crescem as exigências por processos mais sustentáveis, estratégias químicas e biotecnológicas vêm sendo integradas com maior frequência, revelando um movimento de diversificação metodológica em consonância com os avanços da literatura científica.

No que diz respeito aos objetivos específicos, o trabalho destacou o papel promissor do eucalipto, cuja disponibilidade, composição química e estrutura celular se mostraram adequadas para a produção de diferentes tipos de nanocelulose, incluindo nanofibrilas (CNF) e nanocelulose bacteriana (BC). A análise evidenciou que esse recurso, especialmente no contexto brasileiro, alia viabilidade técnica, sustentabilidade e potencial econômico.

A identificação de rotas híbridas — que combinam etapas físicas, químicas e/ou biológicas — demonstrou-se particularmente relevante para o futuro da área, apontando soluções que visam equilibrar rendimento, qualidade do produto final e impactos ambientais. Além disso, os métodos de caracterização recorrentes nos artigos analisados reforçam a confiabilidade dos dados obtidos e evidenciam o avanço das pesquisas em direção a aplicações práticas, como embalagens biodegradáveis, com resistência mecânica e barreira aprimorada.

A partir da integração de dados recentes da literatura, foi possível compreender as tendências, limitações e oportunidades que envolvem a produção de nanocelulose a partir do eucalipto, consolidando sua relevância como alternativa viável e sustentável para o desenvolvimento de materiais renováveis no setor de embalagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABITBOL, T.; KLEMM, D.; HENRIQUES, A. R. Nanocellulose: From nature to high-performance materials. Berlin: Springer, 2016.

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília, DF: ABRAF, 2013.

AGO, M. et al. Lignin content in wood microfibrillated cellulose: Influence on dispersion and film properties. Carbohydrate Polymers, v. 149, p. 83–91, 2016.

AGO, M. et al. One-step synthesis of cellulose nanofiber-reinforced polyvinyl alcohol nanocomposites using ionic liquids. Carbohydrate Polymers, v. 137, p. 266–273, 2016.

AHANKARI, S. S. et al. Recent advances in cellulose nanofibers and their applications in food packaging: A review. Carbohydrate Polymers, v. 255, p. 117479, 2021.

ALMEIDA, D. R.; VITAL, B. R.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, B. L. C. Histórico e evolução do uso do eucalipto no Brasil. Revista da Madeira, v. 21, n. 126, p. 20–25, 2010.

ALMEIDA, J.; COSTA, R. Propriedades das fibras animais na indústria têxtil. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

ALMEIDA, T. et al. Bacterial nanocellulose toward green cosmetics: Recent progresses and challenges. International Journal of Molecular Sciences, v. 22, 2836, 2021.

ALMEIDA, T. et al. Biobased ternary films of thermoplastic starch, bacterial nanocellulose and gallic acid for active food packaging. Food Hydrocolloids, v. 144, 2023.

ANDRADE, J. B.; et al. Produção de celulose e papel no Brasil: evolução e perspectivas. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2010.

AZIZI SAMIR, M. A. S.; ALLOIN, F.; DUFRESNE, A. Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. Biomacromolecules, v. 6, n. 2, p. 612–626, 2005.

BARROS, A. R.; MOURA, A. P. Impactos socioeconômicos da silvicultura em municípios do interior do Brasil. Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente, Curitiba, v. 52, p. 214–231, 2020.

BARROS, F. N.; SILVA, J. R.; VENTORIM, R. A. Eucalipto: história, importância e perspectivas para o setor florestal brasileiro. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 4, n. 7, p. 125–140, 2019.

BASTIDA, G. A. et al. Innovative system based on natural polyelectrolyte complex and cellulose micro/nanofibers to improve drainability and properties of recycled paper. Cellulose, v. 30, p. 5895–5910, 2023.

BBC GARDENERS' WORLD MAGAZINE. Cyperus papyrus. 2025. Disponível em: https://www.gardenersworld.com/plants/cyperus-papyrus/. Acesso em: 2 abr. 2025.

BENITO-GONZÁLEZ, Isaac; LÓPEZ-RUBIO, Amparo; MARTÍNEZ-SANZ, Marta. High-performance starch biocomposites with cellulose from waste biomass: film properties and retrogradation behaviour. Carbohydrate Polymers, v. 216, p. 110–118, 2019.

BHATNAGAR, R.; WANG, S.; BAI, X.; KOH, J.; WANG, Y. Properties and applications of nanocellulose. In: ELSEVIER. Cellulose and cellulose derivatives. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, p. 331-367, 2015.

BIAZUS, G. L.; et al. Produção e caracterização de filmes biodegradáveis a partir de amidos modificados e celulose. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 20, n. 5, p. 291-298, 2010.

BLOCH, R. Howard. A Study of Writing and Manuscript Culture. New York: Columbia University Press, 2001.

BLOOM, Jonathan M. Paper Before Print: The History and Impact of Paper in the Islamic World. New Haven: Yale University Press, 2001.

BONDANCIA, T. J. et al. Cellulose nanostructures obtained using enzymatic cocktails with different compositions. International Journal of Biological Macromolecules, v. 207, p. 299–307, 2022.

BOWER, D. I. An introduction to polymer physics. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.

CARASCHI, J. C. & LEÃO, A. L., Mechanical Properties of Curaua Fiber Reinforced Polypropylene Composites. In: Natural Polymers and Composites, São Pedro, SP, 2000.

CARRINGTON, Daisy. The Ancient Egyptian Economy: Trade and Industry. London: Routledge, 2005.

CARVALHO, A. M. M. L. et al. Biomassa lignocelulósica como matéria-prima para a produção de biocombustíveis e bioprodutos. Revista Virtual de Química, v. 12, n. 2, p. 415–437, 2020.

CARVALHO, M. Materiais minerais na indústria moderna. Rio de Janeiro: Ciência e Tecnologia, 2017.

CHOUDHARY, U.; BHINCHHAR, B. K.; PASWAN, V. K.; KHARKWAL, S.; YADAV, S. P.; SINGH, P. Utilization of agro-industrial wastes as edible coating and films for food packaging materials. In: A GLANCE AT FOOD PROCESSING APPLICATIONS. IntechOpen., p. 1–17, 2021.

CHUM, H. L. et al. Bioenergy. In: IPCC. Special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge: Cambridge University Press, p. 209–332, 2011.

COSTA, A. F. S. et al. Production of bacterial cellulose by Gluconacetobacter hansenii using corn steep liquor as nutrient source. Frontiers in Microbiology, v. 8, p. 2027, 2017.

COSTA, L. C. et al. Aplicações da nanocelulose em materiais sustentáveis: avanços e desafios. Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade, v. 8, n. 2, p. 45–60, 2019.

COSTA, S. M. et al. Effect of unbleached cellulose nanofibrils on paper properties: A sustainable option. Industrial Crops and Products, v. 129, p. 503–510, 2019.

CUNHA, Renato. Nanocelulose: um inovador material extraído de plantas que revolucionará a ciência e a tecnologia. StyloUrbano, 2017.

DAMASIO, R. A. P. Caracterização e Aplicações de Celulose Nanofibrilada (CNF) e Nanocristalina (CNC). 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

DARSANA, P. et al. Development of coir-fibre cement composite roofing tiles. Procedia Technology, [S.l.], v. 24, p. 169-178, 2016.

DEVI, A. et al. Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: a circular bioeconomy approach. BioEnergy Research, v. 15, n. 4, p. 1820–1841, 2022

DIAS, M. C. et al. Mandacaru cactus as a source of nanofibrillated cellulose for nanopaper production. International Journal of Biological Macromolecules, v. 235, 2023.

DIRINGER, David. The Hand-Produced Book. London: Hutchinson's Scientific and Technical Publications, 1953.

DUARTE URUEÑA, G. et al. Extraction of cellulose nanocrystal from multilayer packaging residues composed of a mixture of eucalyptus and pine fibers. Waste and Biomass Valorization, v. 12, p. 5763–5777, 2021.

EICHHORN, S. J. et al. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. Journal of Materials Science, v. 45, n. 1, p. 1-33, 2010.

EISENSTEIN, Elizabeth L. The Printing Press as an Agent of Change: Communications and Cultural Transformations in Early-Modern Europe. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Avanços em tecnologias florestais no Brasil: perspectivas para a silvicultura do futuro. Brasília, DF: Embrapa Florestas, 2022.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: Walter de Gruyter, 1984.

FERREIRA, L. A seda e suas aplicações no setor têxtil. Belo Horizonte: Têxtil e Moda, 2020.

FERREIRA, M. A.; LIMA, T. R. Nanocelulose funcionalizada para embalagens inteligentes e aplicações têxteis. Revista de Materiais Avançados, v. 11, n. 1, p. 23–34, 2022.

FONSECA, C. R.; AMARAL, F. L. A inovação tecnológica na silvicultura brasileira: desafios e oportunidades. Revista Árvore, Viçosa, v. 45, n. 1, e450112, 2021.

FRANCHETTI, Sandra Mara Martins, MARCONATO, José Carlos. Polímeros biodegradáveis – uma solução parcial para diminuir a quantidade dos resíduos plásticos. Quim. Nova, v. 29, n. 4, p. 811-16, 2006.

GALILEU. Papiro de 16 metros com texto do “Livro dos Mortos” é encontrado no Egito. 2023. Disponível em: https://revistagalileu.globo.com/ciencia/arqueologia/noticia/2023/02/papiro-de-16-metros-com-texto-do-livro-dos-mortos-e-encontrado-no-egito.ghtml. Acesso em: 2 abr. 2025.

GARCIA-OLIVA, Felisa et al. Cellulose-Based Materials for Sustainable Development. New York: Springer, 2018.

GARCIA, M. M. et al. Sustentabilidade na indústria da celulose: desafios e perspectivas. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 37, p. 56-72, 2020.

GAVILLET, Laurent et al. Recycling of Paper: Processes and Quality Improvement. Pulp & Paper Journal, v. 78, n. 4, p. 112-125, 2005.

GE, L. et al. A review on cellulase–mannanase synergism and biotechnological applications. Bioresource Technology, v. 290, 121790, 2019.

GEA GROUP. Nanocelulose em ciências de biomateriais. 2025. Disponível em: https://www.gea.com/pt/stories/nanocellulose/. Acesso em: 13 abr. 2025.

GEORGE, J.; SABAPATHI, S. Cellulose nanocrystals: synthesis, functional properties, and applications. Nanotechnology, Science and Applications, v. 8, p. 45–54, 2015.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

GOMES, A. P.; MARTINS, M. A. Papel e celulose: panorama do setor no Brasil e no mundo. Revista de Economia e Sociologia Rural, Brasília, v. 57, n. 4, p. 633–650, 2019.

GONÇALVES, C.; et al. Propriedades estruturais e funcionais da nanocelulose extraída de fontes lignocelulósicas. Carbohydrate Polymers, v. 210, p. 123-135, 2019.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 301, p. 6–27, 2013.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Sustentabilidade e produtividade de plantações de eucalipto no Brasil. Revista Brasileira de Ciências Florestais, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 585–600, 2019.

GOYAL, M. R.; AHMAD, F. Quality control in fruit and vegetable processing: methods and strategies. 1. ed. Apple Academic Press, 2023.

GULER, C.; OZEN, E. Purification of cellulose by Kraft process. Cellulose Science Journal, v. 21, n. 3, p. 205-214, 2014.

HABIBI, Y.; LUCAS, M.; DUBÉ, M. A. Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. Chemical Society Reviews, v. 39, p. 1519-1542, 2010.

HABIBI, Y.; LUCIA, L. A.; RAMANANAVOJA, O. Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. Chemical Reviews, v. 110, n. 6, p. 3479–3500, 2010.

HABIBI, Y.; LUCIA, L. A.; ROJAS, O. J. Cellulose nanocrystals: chemistry, self-assembly, and applications. Chemical Reviews, v. 110, n. 6, p. 3479-3500, 2010.

HARRIS, William V. Ancient Literacy. Cambridge: Harvard University Press, 1995.

HENRIKSEN, O. et al. Nanocellulose: possibilities and limitations as a barrier material. TAPPI International Conference on Nanotechnology for the Forest Products Industry, 2008.

HENRIKSSON, M. et al. Cellulose nanopaper structures of high toughness. Biomacromolecules, v. 8, n. 6, p. 1934–1941, 2007.

HERRICK, F. W. et al. Microfibrillated cellulose: morphology and accessibility. Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium, v. 37, p. 797–813, 1983.

HONORATO, C. et al. Transparent nanocellulose-pigment composite films. Journal of Materials Science, v. 50, p. 7343–7352, 2015.

HUANG, Kaixuan et al. Research progress on organic acid pretreatment of lignocellulose. International Journal of Biological Macromolecules, v. 307, p. 142325, 2025.

HUBBE, M. A. et al. Cellulosic nanocomposites: A review. BioResources, v. 3, n. 3, p. 929–980, 2008.

HUBBE, M. A. et al. Nanocellulose in papermaking – A review. BioResources, v. 12, n. 1, p. 2143–2233, 2017.

HUBBE, M. A.; et al. Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: A review. BioResources, v. 12, n. 1, p. 2143-2233, 2017.

HUBBE, Martin A.; FERRER, Armando; ROJAS, Orlando J. Recycling of Paper: A Review of Advances in Surface and Strength Properties. BioResources, v. 3, n. 2, p. 425-481, 2008.

HUNTER, Dard. Papermaking: The History and Technique of an Ancient Craft. New York: Dover Publications, 1943.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual 2021. São Paulo: IBÁ, 2021. Disponível em: https://iba.org. Acesso em: 5 abr. 2025.

IBARRA, D. et al. Production of microfibrillated cellulose from fast-growing poplar and olive tree pruning by physical pretreatment. Applied Sciences, v. 11, 6445, 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produção da extração vegetal e da silvicultura – PEVS 2021. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: https://www.ibge.gov.br. Acesso em: 5 abr. 2025.

IBGE. Valor de produção da silvicultura e da extração vegetal cresce 11,2% e soma R$ 37,9 bilhões. 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41404-valor-de-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-cresce-11-2-e-soma-r-37-9-bilhoes. Acesso em: 3 abr. 2025.

IGUCHI, M.; YAMANAKA, S.; BUDHIAWAN, B. Bacterial cellulose—a masterpiece of nature's arts. Journal of Materials Science, v. 35, n. 2, p. 261–270, 2000.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2024. Brasília, DF: IBÁ, 2024.

ISOGAI, A.; SATO, Y.; SUGINO, R. TEMPO-mediated oxidation of native cellulose: The effect of oxidation conditions on chemical and physical properties of the product. Biomacromolecules, v. 12, n. 3, p. 832–839, 2011.

ISOGAI, A.; SUGINO, R.; SATO, Y. TEMPO oxidation of wood pulp. Nanocelluloses: Their preparation, properties, and applications, v. 1, p. 23–50, 2011.

ISOGAI, A.; SUGINO, T.; SATO, H. TEMPO-mediated oxidation of native celluloses: preparation of water-soluble derivatives with high carboxylate content. Biomacromolecules, v. 12, n. 6, p. 1856-1861, 2011.

IWAMOTO, S.; KAJIYAMA, S.; ISOGAI, A. Transparent and high gas barrier films of cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation. Biomacromolecules, v. 6, n. 5, p. 3001–3003, 2005.

JACOB, M. & THOMAS, S. Biofibres and Biocomposites. Kottayam, Kerala, India [S.I.:s.n.], [200-].

JAFFAR, S. S.; SAALLAH, S.; MISSON, M.; SIDDIQUEE, S.; ROSLAN, J.; SAALAH, S.; LENGGORO, W. Recent development and environmental applications of nanocellulose-based membranes. Membranes, [S.l.], v. 12, n. 287, 2022.

JANG, W. D. et al. Bacterial cellulose as a biodegradable material for packaging applications. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 48, p. 1–12, 2017.

JAYANI, R. S.; SAINI, H. S.; GAUR, R. Bacterial cellulose: biosynthesis, production and applications. Bioresources and Bioprocessing, v. 8, 89, 2021.

JETTI, K.D.; KISHORE, N.S. Impact of alkali pretreatment methods of bagasse from different sweet Sorghum varieties for bioethanol production. Sugar Tech, v. 26, n. 2, p. 562-572, 2024.

JIANG, F. et al. Comparison of nano- and microfibrillated cellulose films. Cellulose, v. 21, p. 1103–1117, 2014.

JIANG, Y. et al. A review of characterization of nanocellulose: morphology, structure, and mechanical properties. Carbohydrate Polymers, v. 237, 116848, 2020.

JIN, P. Latest advances in preservation technology for fresh fruit and vegetables. Foods, v. 11, n. 20, p. 3236, 2022.

JIRAROTEPINYO, N.; VENDITTI, R. A. A statistically designed evaluation of nanocellulose, refining and cationic starch on the properties of linerboard from recycled old corrugated containers (OCC). BioResources, v. 17, n. 4, p. 6875–6899, 2022.

JONOUBI, M. et al. Production of cellulose nanofibers using an environmentally friendly method: A review. Cellulose, v. 22, p. 165–422, 2015.

JOZALA, A. F. et al. Bacterial cellulose production by Komagataeibacter xylinus using different carbon sources. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 100, p. 6407–6417, 2016.

KARGUPTA, W. et al. Preparation and benchmarking of novel cellulose nanopaper. Cellulose, v. 29, p. 4393–4411, 2022.

KASINATH, A. et al. Biomass in biogas production: pretreatment and codigestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 150, 2021.

KLEMM, D. et al. Nanocelluloses: a new family of nature-based materials. Angewandte Chemie International Edition, v. 50, n. 24, p. 5438-5466, 2011.

KLEMM, D.; et al. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. Angewandte Chemie International Edition, v. 44, p. 3358-3393, 2005.

KLEMM, D.; HEINRICH, M.; DOLLMAR, M. Cellulose and cellulose derivatives: A comprehensive overview. Heidelberg: Springer, 2011.

KUMAR, A.; BISWAS, B.; KAUR, R.; RANI, R.; KRISHNA, B. B.; BHASKAR, T. Structure elucidation of prot, alkali and dealkaline lignin(s) by NMR, FT-IR and Py-GC/MS: effect of solid acid and base catalysts. Sustainable Energy & Fuels, v. 7, n. 8, p. 1942–1954, 2023.

LACY, P.; RUTQVIST, J. Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage. Palgrave Macmillan, 2015.

LAVOINE, N. et al. Nanocellulose-based materials for food packaging: A review. Carbohydrate Polymers, v. 90, n. 4, p. 735–764, 2012.

LENGOWSKI, E. C. et al. Morphological, physical and thermal characterization of microfibrillated cellulose. Revista Árvore, v. 42, n. 1, p. e420113, 2018.

LENGOWSKI, E. C. et al. Nanocellulose coating on Kraft paper. Coatings, v. 13, 1705, 2023.

LENGOWSKI, E. C. et al. Unbleached nanofibrillated cellulose as additive and coating for Kraft paper. Coatings, v. 14, 962, 2024.

LESSA, S. S. et al. Removal of glyphosate with nanocellulose for decontamination purposes in aquatic systems. Water, v. 16, 1843, 2024.

LI, C. Z. et al. Catalytic transformation of lignin for the production of chemicals and fuels. Chemical Reviews, v. 115, n. 21, p. 11559–11624, 2015.

LI, C.; JU, B. Z.; ZHANG, S. F. Twin-screw extrusion molding of a cellulose-based vitrimer containing a crosslinkable macromolecular plasticizer. International Journal of Biological Macromolecules, v. 225, p. 1487–1493, 2023.

LI, M.-C. et al. Nanocellulose as a sustainable nanomaterial for biomedical applications. Biomacromolecules, v. 16, n. 3, p. 698–707, 2015.

LI, H. et al. A comparative study of lignin-containing microfibrillated cellulose fibers produced from softwood and hardwood pulps. Cellulose, v. 31, p. 907–926, 2024.

LIAO, J. J. et al. Current advancement on the isolation, characterization and application of lignin. International Journal of Biological Macromolecules, v. 162, p. 985–1024, 2020.

LIMA, C. F.; BARROS, D. S. O eucalipto no Brasil: evolução histórica, relevância econômica e perspectivas futuras. Cadernos de Ciências Agrárias, Belo Horizonte, v. 15, n. 2, p. 77–91, 2023.

LIMA, J. R.; et al. Sustentabilidade e inovação na indústria de embalagens biodegradáveis. Journal of Sustainable Materials, v. 8, n. 3, p. 100-115, 2019.

LIMA, R. A. et al. O fomento florestal como estratégia de desenvolvimento regional: o caso do setor de base florestal no Brasil. Cadernos de Ciência & Tecnologia, Brasília, v. 33, n. 1, p. 133–154, 2016.

LIN, D. et al. Preparation and characterization of a bacterial cellulose/chitosan wound dressing. Carbohydrate Polymers, v. 94, n. 1, p. 603–611, 2013.

LIU, D. et al. Cellulose nanofibrils reinforced polyvinyl alcohol–chitosan composite films for food packaging. Carbohydrate Polymers, v. 157, p. 1170–1177, 2017.

LOPES, T. A. et al. Eucalyptus wood nanofibrils as reinforcement of carrageenan and starch biopolymers for improvement of physical properties. Journal of Tropical Forest Science, v. 30, n. 3, p. 292–303, 2018.

MA, X. et al. Smart textiles based on nanocellulose: fabrication and responsive behavior. Journal of Functional Materials, v. 14, n. 4, p. 112–124, 2021.

MANKAR, A. R. et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass: a review on recent advances. Bioresource Technology, v. 334, 2021.

MARKSTEDT, K. et al. 3D Bioprinting Human Cartilage with Nanocellulose–Alginate Bioink. Biomacromolecules, v. 16, n. 5, p. 1489–1496, 2015.

MARSHALL, D.; AUSTIN, P. Advances in cellulose chemistry and its industrial applications. Journal of Polymer Science, v. 51, p. 162-175, 2013.

MARTINS, A. As fibras vegetais e suas características. Porto Alegre: Editora Ambiental, 2019.

MARTINS, P. R.; ALMEIDA, J. V. Curativos inteligentes à base de nanocelulose para aplicações biomédicas. Cadernos de Engenharia Biomédica, v. 17, n. 3, p. 78–86, 2021.

MARTINS, P.; FERREIRA, A. Sustentabilidade e inovação na produção de celulose reciclada. Revista de Tecnologia e Meio Ambiente, v. 29, n. 2, p. 112-128, 2021.

MICHELIN, M. et al. Nanocellulose production: Exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry. Molecules, v. 25, 3411, 2020.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS. Relatório anual de comércio exterior brasileiro de serviços: 2023. Brasília: MDIC, 2024.

MIRMEHDI, S. et al. Cellulose nanofibrils/nanoclay hybrid composite as a paper coating: Effects of spray time, nanoclay content and corona discharge on barrier and mechanical properties of the coated papers. Food Packaging and Shelf Life, v. 15, p. 87–94, 2018.

MISSOUM, K. et al. Recent progress in nanocellulose for biomedical applications. Nanoscale, v. 5, n. 24, p. 11339–11359, 2013.

MISSOUM, K.; BRUMMER, T.; DUMAS, C. Nanocellulose: a green nanomaterial for water purification. European Polymer Journal, v. 47, n. 1, p. 1–11, 2013.

MOHAN, T.; et al. Nanocellulose coatings for packaging applications. Advanced Materials Interfaces, v. 5, n. 12, p. 180-190, 2018.

MOHIT SHARMA et al. A review on cationic starch and nanocellulose as paper coating components. International Journal of Biological Macromolecules, v. 162, p. 578–598, 2020.

MOON, R. J. et al. Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. Chemical Society Reviews, v. 40, n. 7, p. 3941–3994, 2011.

MOON, R. J.; MARTIN, T.; SHALMAYEVA, N.; ZHANG, J.; PARK, S. Nanocellulose: A new type of renewable material for packaging applications. Green Materials Journal, v. 14, p. 145-159, 2011.

MOON, R. J.; MARTINI, A.; NANCOZ, J.; MEYER, J. D. Cellulose nanomaterials review: Structure, properties, and nanocomposites. Chemical Society Reviews, v. 40, p. 3941-3994, 2011.

MORAES, F. G. et al. Influência do processo Kraft na resistência mecânica do papel. Revista Brasileira de Papel e Celulose, v. 28, n. 3, p. 45-58, 2013.

MORAIS, F. P. et al. Computational simulation tools to support the tissue paper furnish management: Case studies for the optimization of micro/nano cellulose fibers and polymer-based additives. Polymers, v. 13, 3982, 2021.

MORRIS, D. et al. High-performance nanocellulose-reinforced biocomposites from agricultural waste. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 123, p. 105430, 2019.

MOSIER, N. et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, v. 96, p. 673–686, 2005.

NADERI, A. et al. Carboxymethylated nanofibrillated cellulose as a potential nanofiller for reinforced polyvinyl alcohol films. Carbohydrate Polymers, v. 126, p. 163–172, 2015.

NAGHIZADEH, Z. et al. Nanocellulose-phenol formaldehyde adhesive system for engineered wood products: Review. Forest Products Journal, v. 74, p. 1–10, 2024.

NAIR, S. S. et al. High performance green barriers based on nanocellulose. Polymer, v. 55, n. 4, p. 1004–1010, 2014.

NAIR, S. S. et al. High performance green barriers based on nanocellulose. Sustainable Chemical Processes, v. 2, n. 1, p. 1–12, 2014.

NASCIMENTO, DIEGO MAGALHÃES DO. Hidrogéis verdes reforçados com nanocristais e nanofibrilas de celulose. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2018.

NEEDHAM, Joseph. Science and Civilisation in China: Paper and Printing. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

NEO MONDO. Nanocelulose vegetal é usada no tratamento de queimaduras. 2018. Disponível em: https://neomondo.org.br/2018/06/27/nanocelulose-vegetal-e-usada-no-tratamento-de-queimaduras/. Acesso em: 13 abr. 2025.

NOREMYLIA, M. B.; HASSAN, M. Z.; ISMAIL, Z. Recent advancement in isolation, processing, characterization and applications of emerging nanocellulose: a review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 206, p. 954–976, 2022.

O'SULLIVAN, A. C. Cellulose: The structure slowly unravels. Cellulose, v. 4, p. 173-207, 1997.

OCEANA. Fragmentos da Destruição: Impactos do Plástico na Biodiversidade Marinha Brasileira. Brasil, 2024.

OKOLIE, J. A.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; KOZINSKI, J. A. Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. Waste and Biomass Valorization, v. 12, n. 5, p. 2145–2169, 2021.

OLIVEIRA, D. F.; SANTOS, G. H. Potencial da nanocelulose na indústria de embalagens e papel. Revista Ciência em Foco, v. 5, n. 1, p. 12–25, 2021.

OLIVEIRA, M. A.; SANTOS, R. T. O papel do Brasil no cenário global da silvicultura: avanços, desafios e oportunidades. Revista Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 27, n. 4, e20180236, 2020.

OLIVEIRA, M. L. C. de et al. Effect of overlapping cellulose nanofibrils and nanoclay layers on mechanical and barrier properties of spray-coated papers. Cellulose, v. 29, p. 1097–1113, 2022.

PÄÄKKÖ, M. et al. Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils. Biomacromolecules, v. 8, n. 6, p. 1934–1941, 2007.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, [S. l.], v. 372, n. 71, 2021.

PARKER, Richard A. Ancient Egyptian Literature: A Survey. Chicago: University of Chicago Press, 1972.

PATTERSON, G. D. et al. Garbage to nanocellulose: Quantitative isolation and characterization of steam-treated carboxymethyl holocellulose nanofibrils from municipal solid waste. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 11, n. 7, p. 2727–2736, 2023.

PEGO, M. F. F.; BIANCHI, M. L.; YASUMURA, P. K. Nanocellulose reinforcement in paper produced from fiber blending. Wood Science and Technology, v. 54, p. 1587–1603, 2020.

PELISSARI, C. A. et al. Características da celulose de fibra curta de eucalipto e suas aplicações em papéis sanitários. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 50, n. 135, e4069, 2022.

PENG, F.; PENG, P.; XU, F.; SUN, R. C. Fractional purification and bioconversion of hemicelluloses. Biotechnology Advances, v. 30, n. 4, p. 879–903, 2012.

PERIYASAMY, S. et al. Recent advances in consolidated bioprocessing for conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol: a review. Chemical Engineering Journal, v. 453, 2023.

PERREARD, Sarah et al. Plastic Overshoot Day – Report 2024. Lausanne: EA – Earth Action, 2024.

RAO, S. A. et al. Recent advancements in nanocellulose-based packaging: A review. Environmental Chemistry Letters, v. 19, p. 2565–2587, 2021.

REIS, J. M. Classificação das fibras celulósicas: uma abordagem sustentável. Ciência e Tecnologia dos Materiais, v. 23, p. 98-114, 2021.

RESHMY, R. et al. Nanocellulose-based products for sustainable applications: recent trends and possibilities. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, p. 1–28, 2020.

REVOL, J. F. et al. Helicoidal self-ordering of cellulose microfibrils in aqueous suspension. International Journal of Biological Macromolecules, v. 14, n. 3, p. 170–172, 1992.

REZENDE, M. C. et al. Potencial terapêutico dos óleos essenciais de espécies de Eucalyptus. Revista Fitos, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 148–157, 2020.

RIBEIRO, R. S. A.; POHLMANN, B. C.; CALADO, V.; BOJORGE, N.; PEREIRA, N. Production of nanocellulose by enzymatic hydrolysis: trends and challenges. Engineering in Life Sciences, v. 19, n. 4, p. 279–291, 2019.

RODRIGUES, D. M. et al. Sustainable synthesis pathways: Bacterial nanocellulose from lignocellulosic biomass for circular economy initiatives. Food Research International, v. 192, 2024.

RODRIGUES, F. L. et al. Nanocelulose como suporte para liberação controlada de fármacos. Revista Brasileira de Nanotecnologia, v. 9, n. 2, p. 55–70, 2020.

ROSA, M. F. et al. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior. Carbohydrate Polymers, v. 81, n. 1, p. 83–92, 2010.

ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. CRC Press, 2005.

SABHARWAL, H. S. et al. Nanocellulose-based composites as functional materials: A review. ACS Applied Polymer Materials, v. 2, n. 9, p. 3676–3698, 2020.

SAITO, T. et al. Individualization of cellulose fibers by TEMPO-mediated oxidation. Biomacromolecules, v. 7, n. 6, p. 1687–1691, 2006.

SAITO, T.; HIROTA, M.; TAMADA, T.; ISOGAI, A. Oxidation of bleached and unbleached pulps by TEMPO/NaClO/NaClO2 system: Effect of lignin on oxidation. Holzforschung, v. 60, n. 4, p. 399–405, 2006.

SAITO, T.; ISOGAI, A. Introduction of aldehyde groups on surfaces of native cellulose fibers by TEMPO-mediated oxidation. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 289, n. 1–3, p. 219–225, 2006.

SAITO, T.; KIMURA, S.; NAKAGAWA, A.; NEMOTO, T.; ISOGAI, A. Cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation of native cellulose. Biomacromolecules, v. 8, n. 8, p. 2485–2491, 2007.

SANTOS, A. R.; NASCIMENTO, F. S. Mel de eucalipto: propriedades físico-químicas e potencial terapêutico. Revista Brasileira de Produtos Naturais, Belo Horizonte, v. 9, n. 1, p. 45–53, 2017.

SAVIGNON, L. T.; GONÇALVES, V. L. Estudo de viabilidade técnica e econômica da produção de nanocelulose. 2016. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química e de Petróleo) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

SEHAQUI, H. et al. Strong and tough cellulose nanopaper with high specific surface area and porosity. Biomacromolecules, v. 12, n. 10, p. 3640–3646, 2011.

SEHAQUI, H.; ZOPPE, J. O.; BERGLUND, L. A. Reinforcement of renewable cellulose nanofiber thin films with nanocrystalline cellulose. Nanoscale, v. 3, n. 1, p. 383–388, 2011.

SHAH, D. U. et al. Modulating optical and mechanical properties of nanocellulose composites via controlled orientation. Advanced Materials, v. 27, n. 14, p. 2161–2166, 2015.

SHARMA, Chhavi; BHARDWAJ, Nishi K. Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives. Materials Science and Engineering: C, v. 104, p. 109963, 2019.

SHARMA, P. R.; et al. Nanocellulose-based composites for sustainable packaging applications. Journal of Renewable Materials, v. 8, n. 10, p. 1135-1152, 2020.

SHENG, Y. Q. et al. Enzymatic conversion of pretreated lignocellulosic biomass: a review on influence of structural changes of lignin. Bioresource Technology, v. 324, 2021.

SHINE. Cai Lun (circa AD 61–121): Paper trail leads to eunuch Cai. 2025. Disponível em: https://archive.shine.cn/sunday/now-and-then/-Cai-Lun-circa-AD-61121-Paper-trail-leads-to-eunuch-Cai/shdaily.shtml. Acesso em: 2 abr. 2025.

SHODA, M.; SUGANO, Y. Recent advances in bacterial cellulose production. Biotechnology and Bioprocess Engineering, v. 10, n. 1, p. 1–8, 2005.

SI, M. et al. Phase separation of co-solvent promotes multiple bio-nanomaterials conversion from natural lignocellulose. Industrial Crops and Products, v. 152, p. 112469, 2020.

SIERRA, D. S. et al. Applications of oxidized nanocellulose: Recent progress and challenges. Carbohydrate Polymers, v. 224, 115154, 2019.

SILVA, J. M. Expansão das florestas plantadas no Brasil: análise regional e perspectivas futuras. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2018.

SILVA, L. A.; MELO, C. J. Aplicações industriais do eucalipto: uma abordagem multidisciplinar. Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 112–120, 2020.

SILVA, P. et al. Celulose e suas aplicações na produção têxtil. Curitiba: Ciência dos Materiais, 2018.

SILVA, R. F. et al. Uso da celulose de eucalipto na indústria de papel e tecidos. Revista de Ciência Florestal, v. 47, p. 215-230, 2017.

SILVA, R. T. et al. Propriedades e aplicações emergentes da nanocelulose. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais, v. 7, n. 3, p. 31–40, 2020.

SILVA, R.; HARAGUCHI, S. K.; MUNIZ, E. C.; RUBIRA, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. Química Nova, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SIRÓ, I.; PLACKETT, D. Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: a review. Cellulose, v. 17, n. 3, p. 459–494, 2010.

SMOOK, Gary A. Handbook for Pulp & Paper Technologists. 3. ed. Vancouver: Angus Wilde Publications, 2002.

SOUZA, A. L. et al. Reciclagem de papel e sustentabilidade. Ambiente e Sociedade, v. 22, p. 35-49, 2019.

SOUZA, A. M. et al. Compósitos automotivos à base de nanocelulose: desempenho e sustentabilidade. Revista Brasileira de Engenharia Automotiva, v. 12, n. 1, p. 41–53, 2023.

SOUZA, C. Sustentabilidade e aplicações das fibras naturais. Florianópolis: Editora Verde, 2020.

SOUZA, L. O. et al. Procurement and characterization of biodegradable films made from blends of eucalyptus, pine and cocoa bean shell nanocelluloses. Waste and Biomass Valorization, v. 14, p. 3169–3181, 2023.

SPENCE, K. L. et al. A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods. Cellulose, v. 18, n. 4, p. 1097–1111, 2010.

SPENCE, K. L. et al. The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: Mechanical processing vs chemical treatment. Cellulose, v. 18, p. 1097–1111, 2011.

SPENCE, K. L.; et al. The barrier properties of microfibrillated cellulose films. Carbohydrate Polymers, v. 84, n. 1, p. 229-235, 2011.

SQUINCA, P. et al. Nanocellulose production in future biorefineries: An integrated approach using tailor-made enzymes. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 8, n. 5, p. 2277–2286, 2020.

SROUR, R. H. et al. Nanocellulose for sustainable packaging and materials: Processing, properties and applications—A review. Environmental Chemistry Letters, v. 18, p. 2069–2094, 2020.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. Forest Ecology and Management, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010.

STARKEY, H. et al. Lignin-containing micro/nanofibrillated cellulose to strengthen recycled fibers for lightweight sustainable packaging solutions. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, v. 2, 2021.

SU, Z. P.; HU, Y. M.; YANG, X. Y.; LONG, R.; JIN, Y. H.; WANG, X. H.; ZHANG, W. Production and closed-loop recycling of biomass-based malleable materials. Science China Materials, v. 63, n. 10, p. 2071–2078, 2020.

SUN, Y.; CHENG, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresource Technology, v. 83, n. 1, p. 1–11, 2002.

SURYADI, H. et al. Biodelignification of lignocellulose using ligninolytic enzymes from white-rot fungi. Heliyon, v. 8, n. 2, 2022.

SYLVESTRE, A. et al. Development of antimicrobial packaging using nanocellulose and natural extracts. Food Packaging and Shelf Life, v. 22, p. 100392, 2019.

SYVERUD, K.; STENIUS, P. Strength and barrier properties of MFC films. Cellulose, v. 16, n. 1, p. 75–85, 2009.

SYVERUD, K.; STENSTAD, P.; GRAFF, A. The potential use of nanocellulose as reinforcing filler in middle layer of paperboard. Nordic Pulp & Paper Research Journal, v. 26, n. 2, p. 182-189, 2011.

TAKADA, R. et al. Nanocellulose-based substrates for eco-friendly electronics. Journal of Green Electronics, v. 3, n. 2, p. 95–106, 2020.

THAKUR, V. K. et al. Progress in nanocellulose-based composite materials for environmental and biomedical applications. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 8, n. 10, p. 4170–4196, 2020.

TORABRÁS. O eucalipto. 2025. Disponível em: https://torabras.com.br/o-eucalipto. Acesso em: 3 abr. 2025.

TSCHUDI, Susan. The Spread of Paper and the Impact on Medieval Knowledge. Oxford: Oxford University Press, 2011.

TSIEN, Tsuen-Hsuin. Paper and Printing. In: NEEDHAM, Joseph (Ed.). Science and Civilisation in China, v. 5. Cambridge: Cambridge University Press, 1985.

TURNBULL, J. W. Eucalypt plantations. New Forests, v. 17, n. 1–3, p. 37–52, 1999.

UL-ISLAM, M. et al. Bacterial cellulose composites with polymers and bioactive agents: A review. Carbohydrate Polymers, v. 93, n. 2, p. 631–643, 2012.

UL-ISLAM, M. et al. Bacterial cellulose composites: synthetic strategies and multiple applications in bio-medical and electro-conductive fields. Biotechnology Journal, v. 7, n. 3, p. 368–379, 2012.

UL-ISLAM, M. et al. Bacterial cellulose nanocomposites: Fundamentals, novel materials, and applications. Materials Science and Engineering: R: Reports, v. 82, p. 1–17, 2014.

URUEÑA, G. D. et al. Extraction of cellulose nanocrystal from multilayer packaging residues composed of a mixture of eucalyptus and pine fibers. Waste and Biomass Valorization, v. 12, p. 5763–5777, 2021.

VAN DYK, J. S.; PLETSCHKE, B. I. A review of lignocellulose bioconversion using enzymatic hydrolysis and synergistic cooperation between enzymes. Biotechnology Advances, v. 30, n. 6, p. 1458–1480, 2012.

WANG, M. et al. Preparation and barrier properties of nanocellulose / layered double hydroxide composite film. BioResources, v. 13, n. 1, p. 1055–1064, 2018.

XU, H. et al. Optimization of reagent consumption in TEMPO-mediated oxidation of eucalyptus cellulose to obtain cellulose nanofibers. Cellulose, v. 29, p. 6611–6627, 2022.

YANG, Q. et al. Flexible and transparent nanocellulose–graphene composite film with high gas barrier properties. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v. 7, n. 3, p. 2885–2893, 2019.

ZANINI, M. et al. Obtaining hydrophobic aerogels of unbleached cellulose nanofibers of the species Eucalyptus sp. and Pinus elliottii. Journal of Nanomaterials, 2018.

ZHANG, K. et al. Flexible transparent cellulose-based conductive composite films with improved water stability for smart packaging. ACS Applied Materials & Interfaces, v. 11, n. 15, p. 14637–14645, 2019.

ZHANG, Y. et al. Enzymatic pre-treatment to assist mechanical nanofibrillation of cellulose: A review. Carbohydrate Polymers, v. 291, 119590, 2022.

ZHAO, X. et al. Effects of organic acids on the preparation of cellulose nanocrystals from cotton fibers by ultrasonic-assisted hydrolysis. Cellulose, v. 20, p. 1185–1194, 2013.

ZHEN, Cheng; SUN, Hongnan; MA, Mengmei; MU, Taihua; GARCIA-VAQUERO, Marco. Applications of modified lignocellulose and its composites prepared by different pretreatments in biomedicine: A review. International Journal of Biological Macromolecules, v. 301, 2025.

ZHU, J. Y.; PAN, X. J.; WANG, G. S. Pretreatment of woody biomass for biofuel production: energy efficiency, technologies, and challenges. Bioresource Technology, v. 100, p. 5383–5390, 2009.