UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
***CAMPUS* ARAPIRACA**
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

LEONARDO DA SILVA SANTOS

PROSPECÇÃO DE CELULASE POR FUNGOS DA CAATINGA ATRAVÉS DE FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO UTILIZANDO RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

ARAPIRACA – AL
2025

LEONARDO DA SILVA SANTOS

PROSPECÇÃO DE CELULASE POR FUNGOS DA CAATINGA ATRAVÉS DE FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO UTILIZANDO RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de Alagoas, como requisito à obtenção do título de mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Alysson Wagner Fernandes Duarte.

ARAPIRACA - AL

2025

Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca Setorial *Campus* Arapiraca - BSCA

S237p Santos, Leonardo da Silva

Prospecção de celulase por fungos da caatinga através de fermentação em estado sólido utilizando resíduos lignocelulósicos/ Leonardo da Silva Santos. – Arapiraca, 2025.

107 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Alysson Wagner Fernandes Duarte.

Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, *Campus* Arapiraca, Arapiraca, 2025.

Disponível em: Universidade Digital (UD) – UFAL (*Campus* Arapiraca).

Referências: f. 75-107

1. Enzimas de fungos 2. Biotecnologia agrícola 3. Biotecnologia vegetal 4. Biodegradação I. Duarte, Alysson Wagner Fernandes II. Título.

CDU 37

Bibliotecário responsável: Gerlane Costa Silva de Farias
CRB - 4 / 1802

LEONARDO DA SILVA SANTOS

PROSPECÇÃO DE CELULASE POR FUNGOS DA CAATINGA ATRAVÉS DE FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO UTILIZANDO RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente da Universidade Federal de Alagoas, como requisito à obtenção do título de mestre em Agricultura e Ambiente. Aprovada em: 25 de junho de 2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
ALYSSON WAGNER FERNANDES DUARTE
Data: 15/07/2025 06:29:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Alysson Wagner Fernandes Duarte
Universidade Federal de Alagoas
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br
ANA PAULA DE ALMEIDA PORTELA DA SILVA
Data: 16/07/2025 13:58:28-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof Dra. Ana Paula de Almeida Portela da Silva
Universidade Federal de Alagoas
Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br
KELLY FERNANDA SEARA DA SILVA
Data: 16/07/2025 14:29:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Kelly Fernanda Seara da Silva
Universidade Federal de Alagoas
Examinadora

À minha avó, eterna Nila, cuja lembrança de sua luz de pura alegria, aquece meu coração. No brilho do seu amor, encontro forças para seguir adiante, guiado por sua ternura em cada conquista. Em sua memória, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos a quem tenho o orgulho de chamar de família e que estiveram ao meu lado em toda essa jornada, tornando o processo muito mais leve. Aos meus pais, Maria e Brandão, que, mesmo diante de tantos obstáculos em suas trajetórias, lutaram para garantir uma educação de qualidade, baseada em valores e conceitos que carregarei para a vida. Com muito orgulho, agradeço por toda dedicação, carinho e confiança, pois, sem seu apoio, nada seria possível. Ao meu irmão, Gabriel, por todo suporte e acolhimento, obrigado por acreditar. Ao Luan, por toda paciência e cuidado, obrigado por todo o carinho e otimismo. À minha avó, Petronila, que tão cedo partiu em meio a esta jornada e a quem, com carinho, confidenciei meus sonhos em quase todas as noites de conversas na minha infância e adolescência, agradeço por todo amor que pude partilhar em vida; sua alegria e esperança sempre aquecerão meu coração. Sem a presença, apoio e confiança de vocês em minha vida, eu nada seria.

Aos meus amigos do PPGAA, obrigado pela companhia e parceria. À Jéssia, Mari e Millena, por toda ajuda durante o processo de adaptação. À Giselle, um presente em forma de amiga que a graduação em Ciências Biológicas me concedeu e que esteve comigo dividindo angústias, anseios, metas, objetivos e sonhos, agradeço por todo carinho e fraternidade.

Aos amigos que o LABMIP me proporcionou, agradeço pela parceria e pelos momentos vivenciados ao longo de nossas pesquisas. Como Daiany, uma amiga incrível que possibilitou a existência de vários momentos leves, de conversas e desabafos em meio ao caos da rotina, e que esteve comigo em um dos piores momentos, fornecendo suporte e cuidado. À Kaline, Nicole, Manu, Averlani e Mayanne, assim como os demais membros, obrigado por todas as risadas, debates, trocas de perspectivas e auxílio. Sem vocês, essa caminhada teria sido muito mais difícil.

Aos profissionais que tive a honra de cruzar pelo caminho, obrigado por todo o conhecimento transmitido. À minha orientadora da graduação, professora Esmeralda, obrigado por me inserir no mundo da pesquisa e pelo incentivo para seguir adiante; ao meu atual orientador, professor Alysson, obrigado pela oportunidade, carinho e confiança. Vocês são profissionais sensacionais e pessoas em quem me inspiro fortemente. À Kelly, a quem tenho muito carinho, obrigado por todo suporte e conselhos. Ao Ithallo, Eloíza, Val e Adeildo, por todo suporte ao longo da execução das etapas metodológicas, obrigado pela parceria e cuidado.

Por fim, agradeço a todas as instituições de ensino e de fomento às quais tive o prazer de estar vinculado até aqui. À Universidade Estadual de Alagoas, que contribuiu com minha graduação e que me acolheu novamente durante o estágio docência, obrigado por cada

oportunidade concedida nessa caminhada. À UFAL, ao PPGAA e ao seu corpo docente, pela oportunidade de qualificação profissional, obrigado por contribuírem com minha formação. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas, por fomentar a pesquisa e estar comigo desde a graduação, incentivando a realização de projetos e eventos, obrigado por todo o seu empenho e comprometimento com a Ciência. O trabalho de todos vocês é fundamental para o desenvolvimento educacional, científico e social em nosso Estado e país, e sou grato pela oportunidade de retribuir em conjunto.

RESUMO

Os fungos são as principais fontes de enzimas hidrolíticas extracelulares e apresentam várias aplicações industriais, com destaque para a celulase. Isso porque esses microrganismos são capazes de produzir e secretar enzimas em quantidades significativas para a degradação do substrato de interesse. Fungos de ambientes como o da Caatinga são capazes de produzir enzimas mais estáveis, com caraterísticas importantes para tolerarem os processos industriais. Além disso, resíduos ligonocelulósicos podem ser utilizados como substratos indutores para a produção enzimática, contribuindo para a valorização de resíduos e barateamento dos processos de produção. Desse modo, esse estudo teve como objetivo avaliar a produção de celulase por fungos filamentosos da Caatinga a partir de resíduos lignocelulósicos. Fungos isolados da Caatinga foram prospectados quanto a capacidade de produção das enzimas celulase, amilase e pectinase, enquanto um teste de hidrólise em diferentes temperaturas foi realizado**.** Os melhores resultados seguiram para a produção da enzima por fermentação em estado sólido (FES) utilizando resíduos lignocelulósicos (bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho e farelo de trigo) como fonte de carbono, e os fungos selecionados seguiram para a otimização dos processos de produção. Os isolados apresentaram atividade apenas para celulase, embora os 3 selecionados para a produção por FES demostraram atividades de endoglucanase e amilase, principalmente ao utilizar bagaço de cana-de-açúcar como fonte de carbono. Esses três fungos foram identificados, de forma preliminar, como pertencentes ao gênero *Penicillium*. Na etapa de otimização, uma atividade ótima de endoglucanase de 11,77 UI/mL foi obtida em 60 ºC de incubação da enzima ao utilizar 7,83g de substrato, 60% de umidade, em uma suspenção de $0{,}68x10^7$ conídios/g e 27 ºC de cultivo, enquanto um teor de umidade acima de 70% apresentou influência negativa na produção enzimática. Embora novos ensaios sejam necessários, os resultados obtidos demostraram-se animadores e contribuem para o incentivo de modelos alternativos de produção enzimática utilizando matérias-primas alternativas e tecnologias de produção menos intensivas em energia e insumos.

Palavras-chave: Enzimas; biotecnologia; cana-de-açúcar.

ABSTRACT

Fungi are the main sources of extracellular hydrolytic enzymes and have several industrial applications, especially cellulase. This is because these microorganisms are capable of producing and secreting enzymes in significant quantities for the degradation of the substrate of interest. Fungi from environments such as the Caatinga are capable of producing more stable enzymes with important characteristics for tolerating industrial processes. In addition, lignocellulosic residues can be used as inducer substrates for enzyme production, contributing to the valorization of residues and reducing the cost of production processes. Thus, this study aimed to evaluate the production of cellulase by filamentous fungi from the Caatinga from lignocellulosic waste. Fungi isolated from the Caatinga were prospected for their ability to produce cellulase, amylase, and pectinase enzymes, while a hydrolysis test at different temperatures was performed. The best results were obtained for enzyme production by solid-state fermentation (SSF) using lignocellulosic waste (sugarcane bagasse, corn straw, and wheat bran) as a carbon source, and the selected fungi were used to optimize the production processes. The isolates showed activity only for cellulase, although the three selected for SSF production showed endoglucanase and amylase activities, mainly when using sugarcane bagasse as a carbon source. These three fungi were preliminarily identified as belonging to the genus Penicillium. In the optimization stage, an optimal endoglucanase activity of 11.77 IU/mL was obtained at 60 °C enzyme incubation using 7.83 g of substrate, 60% humidity, in a suspension of 0.68x107 conidia/g and 27 °C cultivation, while a moisture content above 70% had a negative influence on enzyme production. Although further testing is needed, the results obtained are encouraging and contribute to the promotion of alternative enzyme production models using alternative raw materials and production technologies that are less intensive in energy and inputs.

Keywords: Enzymes; biotechnology; sugarcane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição da biomassa lignocelulósica 18

Figura 2 - Composição estrutural da biomassa lignocelulósica 19

Figura 3 - Organização da lignocelulose presente na cana-de-açúcar 23

Figura 4 - Esquematização da relação de enzimas lignocelulolíticas com seus respectivos substratos e produtos a partir de sua ação catalítica 24

Figura 5 - Ação do complexo de enzimas celulolíticas na degradação da celulose 26

Figura 6 - Representação de uma associação liquênica entre micobionte e fotobionte 36

Figura 7 - Morfologia da estrutura reprodutiva característica de *Penicillium* 38

Figura 8 - Fermentação em estado sólido utilizando Erlenmeyer como biorreator. 40

Figura 9 - Reativação de fungos filamentosos da Caatinga previamente isolados e preservados 455

Figura 10 - Microcultivo dos fungos selecionados para análise micromorfológicas das estruturas reprodutivas 466

Figura 11 - Triagem enzimática de fungos filamentosos da Caatinga 488

Figura 12 - Aspecto granulométrico dos resíduos lignocelulósicos utilizados 499

Figura 13 - Processo de produção e recuperação enzimática por FES utilizando Erlenmeyers como biorreatores 51

Figura 14 - Método colorimétrico utilizando DNS para a quantificação de açúcares redutores e montagem da curva padrão de D-glicose 533

Figura 15 - Fungos filamentosos selecionados a partir da determinação do índice enzimático 566

Figura 16 - Hidrólise enzimática de celulase em meio indutor, por fungos filamentosos, sob diferentes temperaturas 58

Figura 17 - Características morfológicas das estruturas reprodutivas dos fungos identificados preliminarmente como pertencentes ao gênero *Penicillium,* cultivados em meio BDA à uma temperatura de 25 ºC, visualizadas com em um aumento de 1000X e coradas com Azul de Algodão Lactofenol 60

Figura 18 - Recuperação do extrato enzimático bruto de fungo filamentoso após fermentação em estado sólido utilizando palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar e farelo trigo em Erlenmeyers como biorretores 62

Figura 19 - Curvas de calibração para D-glicose e aspecto colorimétrico do ensaio 64

Figura 20 - Curva padrão de albumina bovina 64

Figura 21 - Superfícies de resposta (A) e de contorno (B) para a atividade de endoglucanase (CMCase) produzida pelo fungo 1LCL2 em FES contendo diferentes níveis de concentração de bagaço de cana-de-açúcar (g) e teor de umidade (%) 71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar de acordo com seu percentual de lignocelulose 22
Tabela 2 - Aplicações de enzimas hidrolíticas e coquetéis enzimáticos em diferentes indústrias e setores. 32
Tabela 3 - Produção de meios de cultura e de soluções reveladoras para a triagem enzimática de fungos filamentosos 47
Tabela 4 - Matriz do Delineamento Composto Central Rotacional da aplicação das variáveis 54
Tabela 5 - Amostras de isolamento e índice enzimático dos fungos reativados, positivos para celulase, avaliados após 48h de crescimento 55
Tabela 6 - Caracterização morfológica macroscópica dos fungos selecionados na triagem enzimática com atividade para celulase 57
Tabela 7 - Índice enzimático de celulase produzida em diferentes temperaturas por fungos isolados da Caatinga, avaliados após 7 dias de crescimento. 57
Tabela 8 - Caracterização dos substratos agroindustriais utilizados na Fermentação em Estado Sólido (FES) 60
Tabela 9 - Valor médio das variações de pH dos extratos enzimáticos brutos recuperados após fermentação por substrato utilizado 62
Tabela 10 - Concentrações médias de açúcar redutor total e de proteínas totais presentes nos extratos enzimáticos brutos produzidos com diferentes fontes de carbono e tempos de fermentação dos fungos utilizados 66
Tabela 11 - Atividade enzimática média dos extratos enzimáticos brutos produzidos com diferentes fontes de carbono e tempos de fermentação a partir dos fungos selecionados 68
Tabela 12 - Variáveis aplicadas ao DCCR para a produção de celulase pelo fungo 1LCL2 isolado de líquen da Caatinga utilizando bagaço da cana-de-açúcar como fonte exclusiva de carbono 70
Tabela 13 - Análise de variância dos parâmetros de produção de celulase em diferentes concentrações de substratos 72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Absorbância
ANOVA	Análise de Variância
AR	Açúcar redutor
ART	Açúcar redutor total
BDA	Batata Destrose Agar
BC	Bagaço de cana
BCA	Bagaço de cana-de-açúcar
BLC	Biomassa ligonocelulósica
BSA	Albumina de Soro Bolvino
CA	Cana-de-açúcar
CE	Carboidrato esterases
CMC	Carboximetilcelulose
CMCase	Carboximetilcelulase
CTAB	Brometo de Cetiltrimetilamônio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DNS	Ácido 3,5-dinitrossalicílico
DRBC	Dicloran Rose Bengal Chloramphenicol Agar
CAZymes	*Carbohydrate-Active Enzymes*
FES	Fermentação em Estado Sólido
FS	Fermentação Submersa
FT	Farelo de trigo
FTSS	Floresta Tropical Sazonalmente Seca
GABA	Ácido γ -aminobutírico
GH	Glicosil hidrolases
IE	Índice Enzimático
LABMIP	Laboratório de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia
NaOH	Hidróxido de sódio
pH	Potencial hidrogeniônico
PL	Polissacarídeo liases
PM	Palha de milho
UFAL	Universidade Federal de Alagoas

UNILA Universidade Federal da Integração Latino-Americana

YMA *Yeast Malt Agar*

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa
β	Beta
γ	Gama
ºC	Grau Celsius
ε	Epsilon
g	Grama (unidade de medida)
g/L	Grama por litro
L	Litro
®	Marca Registrada
M	Molar
mg	Miligrama
mg/mL	Miligrama por mililitro
mL	Mililitro
µg	Micrograma
µg/mL	Micrograma por mililitro
µL	Microlitro
nm	Nanômetro
%	Porcentagem
$	Dólar
T	Tempo
UI	Unidade internacional
Vr	Volume da reação
Ve	Volume do extrato
±	Mais ou menos
≤	Menor ou igual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
2 REVISÃO DE LITERATURA 17
2.1 Características gerais da biomassa lignocelulósica: uma alternativa abundante para obtenção de produtos de valor agregado 17
2.1.1 Celulose 18
2.1.2 Hemicelulose 19
2.1.3 Lignina 20
2.1.4 Pectina 20
2.1.5 Amido 20
2.1.6 Bagaço de cana-de-açúcar: um resíduo agroindustrial rico em BLC, economicamente acessível e versátil na produção de enzimas 21
2.2 Enzimas lignocelulósicas: biocatalizadores de grande importância econômica e industrial 23
2.2.1 *Enzimas hidrolíticas* 25
2.2.1.1 Celulases: características e aplicações 255
2.2.1.2 Hemicelulases 29
2.2.1.3 Pectinases 30
2.2.1.4 Amilases 30
2.2.1.5 Aplicações de hemicelulases, pectinases, amilases e de coquetéis enzimáticos 31
2.3 Fungos produtores de enzimas em ambientes semiáridos: o domínio Caatinga como berço de biodiversidade, manutenção ambiental e potencial biotecnológico ainda pouco conhecido 33
2.4 Fungos do gênero *Pinicillium* como produtores de enzimas 37
2.5 Fermentação em Estado Sólido (FES): uma tecnologia promissora para obtenção de produtos de valor agregado 39
2.6 Fatores que influenciam o processo de produção enzimática por FES 41
2.6.1 Pré-tratamentos 41
2.6.2 Umidade 42
2.6.3 Concentração de inóculo 42
2.6.4 Tempo de fermentação 42
2.6.5 Temperatura 42

3 OBJETIVOS....444
3.1 Geral....444
3.2 Específicos....444
4 MATERIAL E MÉTODOS....45
4.1 Fungos utilizados e local da pesquisa....45
4.1.1 Reativação e identificação dos fungos previamente isolados de coletas anteriores....45
4.1.2 Preparo do inóculo para fermentação....46
4.2 Avaliação da atividade enzimática....46
4.3 Resíduos lignocelulósicos....48
4.3.1 Determinação da umidade do substrato....49
4.3.2 Densidade aparente dos substratos....49
4.3.3 Determinação do pH dos substratos....50
4.3.4 Umidade inicial da amostra para a fermentação em estado sólido....50
4.4 Fermentação em Estado Sólido (FES) e obtenção do extrato enzimático bruto....50
4.5 Determinação da atividade enzimática....51
4.5.1 Quantificação de açúcares redutores totais....53
4.5.2 Determinação de proteínas totais....53
4.5.3 Análises estatísticas dos ensaios enzimáticos....54
4.6 Otimização do processo de produção da enzima....54
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO....55
5.1 Triagem enzimática de celulase, amilase e pectinase....55
5.2 Identificação preliminar dos fungos selecionados para a produção enzimática através da tecnologia de Fermentação em Estado Sólido....596
5.3 Caracterização dos resíduos ligocelulósicos utilizados para FES....60
5.4 Fermentação em estado sólido utilizando resíduos lignocelulósicos....61
5.5 Caracterização dos extratos enzimáticos brutos....63
5.6 Atividades enzimáticas dos extratos enzimáticos brutos....67
5.7 Otimização dos parâmetros de produção de endoglucanase....69
6 CONCLUSÃO....74
REFERÊNCIAS....72

1 INTRODUÇÃO

Os fungos estão entre as principais fontes de enzimas extracelulares em escala industrial, com altos rendimentos de produção e viabilidade de biomassa com facilidade, tornando o processo de produção mais limpo e sustentável (Kour *et al*., 2019; Hüttner *et al*., 2020). Isso porque durante o processo de aquisição de nutrientes, esses organismos produzem e secretam enzimas em quantidades significativas para a degradação dos substratos de interesse (Dhevagi *et al*., 2021; Climaco; Roder; Olivo, 2023). Essas enzimas atuam como biocatalizadores que agem acelerando a taxa de catálise e reduzem a energia de ativação, sendo o grupo das hidrolases fúngicas o principal foco comercial das indústrias (Hettiarachchy *et al*., 2018; Dhevagi *et al*., 2021).

Entre as enzimas hidrolíticas, a celulase representa 20% do uso global, exercendo um importante papel na gestão de resíduos (Singh *et al.,* 2021). Entretanto, o custo para a produção em larga escala é alto, principalmente devido ao tipo de substrato utilizado para a sua obtenção (Xie *et al.,* 2022). Em contrapartida, os setores industriais e agroindústrias geram toneladas de resíduos sólidos anualmente, principalmente ligonocelulósicos – como folhas, caules, sementes, cascas e bagaços, que quando descartados de forma incorreta podem gerar diversos problemas ambientais (Pandey; Soccol; Michell, 2000; Khorairi *et al*., 2023). Uma alternativa ao descarte desse material é a biotransformação, já que ele pode ser utilizado como diferentes substratos indutores naturais para a produção de enzimas, reduzindo o custo de produção, além de agregar valor e promover uma gestão mais apropriada (Dinil; Jacob, 2022; Kamande; Omwenga; Ngugi, 2024).

É nesse cenário que a tecnologia de fermentação em estado sólido (FES) surge como forma de baratear o processo de produção enzimática, já que essa técnica de cultivo utiliza poucos recursos, como um baixo consumo de água, energia, produtos químicos ou meios comerciais, além de utilizar a biomassa lignocelulósica (BLC) como principal fonte nutricional para desenvolvimento microbiano e para a obtenção de bioprodutos valiosos, contribuindo não só para a valorização de resíduos, mas também para o barateamento dos custos de produção (Sing et al., 2021; Li *et al*., 2021; Ma *et al*., 2024; Zhang *et al*., 2024). Durante o crescimento fúngico na FES, há a produção de enzimas lignocelulósicas que são capazes de degradar a matriz complexa e recalcitrante da BLC em seus monômeros constituintes, sendo possível obter não apenas enzimas, mas também açúcares fermentáveis e ácidos orgânicos que podem ser utilizados pela biorrefinaria (Baig, 2020; Zheng *et al*., 2022; Rani *et al*., 2024).

No que se refere a aplicação, as enzimas precisam tolerar altas concentrações de salinidade e de substrato, constantes variações de temperatura e pH, antes e após os processos industriais, o que torna os fungos de ambientes extremos uma alternativa ideal para a prospecção de enzimas mais estáveis (Kour *et al*., 2019; Teixeira; Milagre, 2020; Śliżewska; Struszczyk-Świta; Marchut-Mikołajczyk, 2022). Por apresentar condições limitantes, como escassez hídrica, elevados níveis de salinidade do solo, radiação e variações de temperaturas, a região do bioma Caatinga, por exemplo, também pode ser caracterizada como extrema, e que ainda possui uma diversidade ecológica pouco explorada (Queiroz *et al*., 2017; Souza, 2020; Parada-Pinilla *et al*., 2021).

Além disso, em uma estrutura econômica global das indústrias que utilizam da prática do "pegar, fazer e descartar" como algo comum na utilização de recursos naturais para a obtenção de produtos, os impactos econômicos e ambientais são consequências inevitáveis, sendo necessária à sua substituição pela prática do "reuso, recuperação e reciclagem", para que assim seja possível encontrar um equilíbrio entre economia, meio ambiente e sociedade (Awasthi *et al.,* 2022). Dessa maneira, o conceito de bioeconomia circular surge como uma forma de produção sustentável a partir da utilização de resíduos secundários para a obtenção de produtos, que contribui para a redução de resíduos e seus impactos ambientais, assim como do esgotamento de materiais virgens e na substituição de processos industriais intensivos em energia e emissões (Teigiserova; Bourgine; Thomsen, 2021).

Dessa forma, levando em consideração que os resíduos produzidos pela agroindústria podem ser utilizados como substratos indutores para a produção enzimática e como fungos de ambientes extremos podem produzir enzimas mais estáveis para aplicações industriais, este estudo teve como objetivo induzir a produção de celulase por fungos filamentosos da Caatinga a partir de resíduos lignocelulósicos pela tecnologia da fermentação em estado sólido.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características gerais da biomassa lignocelulósica: uma alternativa abundante para obtenção de produtos de valor agregado

A partir do processo fotossintético as plantas acumulam blocos de açúcares poliméricos que caracterizam 75% de biomassa vegetal ou lignocelulósica (Ashokkumar *et al*., 2022), uma estratégia evolutiva para proteção e contra hidrólise, já que a lignocelulose (LGC) é uma matriz complexa formada por polissacarídeos, polímeros fenólicos e proteínas que constituem as estruturas recalcitrantes da parede celular vegetal (Zheng *et al*., 2022). Esse material polimérico forma longas cadeias de carboidratos com ligações glicosídicas entre as unidades de monossacarídeos (Figura 1), e por ser rico em lignocelulose, tem sido alvo de interesse como alternativa econômica para a produção de diversos produtos de valor agregado pela biotransformação, já que esse é o material renovável mais abundante e disponível da Terra (Sharma; Xu; Qin 2019; Baig, 2020; Singh *et al*., 2024a). A partir dessa matéria-prima, podem ser produzidos produtos químicos, biocombustíveis, hidrogéis e vários produtos bioquímicos a partir de processos fermentativos e de refino (Baig, 2020; Zheng *et al*., 2022).

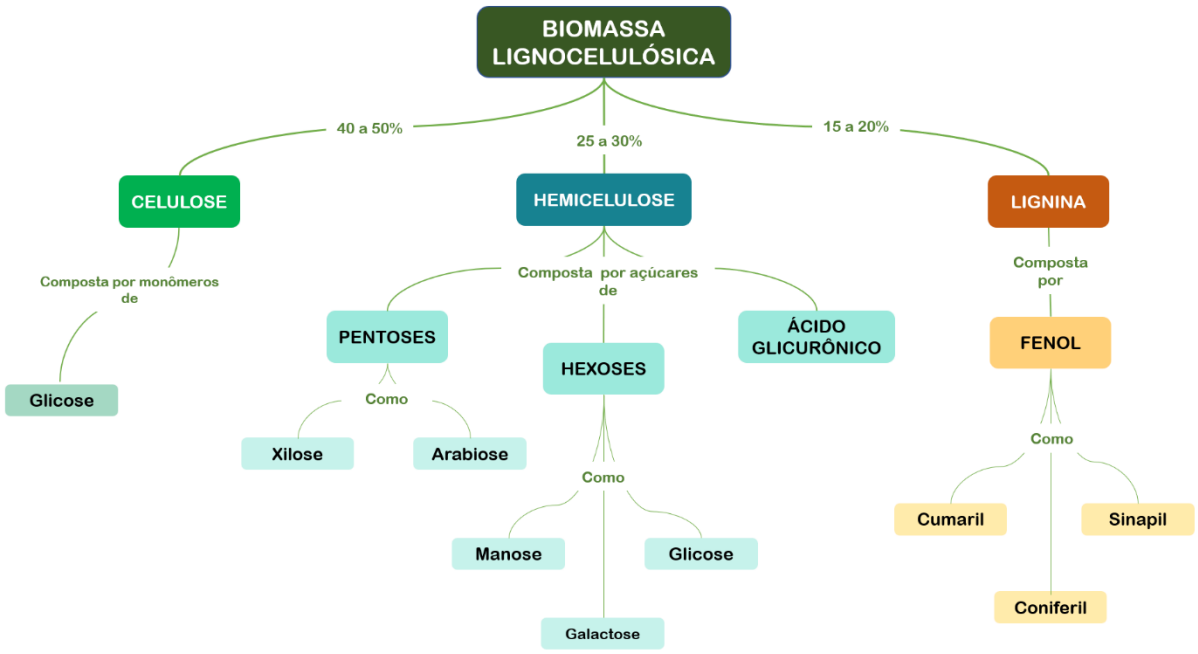
A biotransformação da BLC geralmente inclui processos como coleta e transporte do material, produção de enzimas para hidrólise enzimática dos constituintes da parede celular vegetal, que pode ser combinada com pré-tratamento desse material para facilitar sua degradação e assim obter açúcares monoméricos que podem ser utilizados em processos fermentativos (Zheng *et al*., 2022). Em parâmetros gerais, essa biomassa lignocelulósica é constituída principalmente por celulose (40-50%), hemicelulose (25-30%) e lignina (20-25%), além de outros componentes como pectina, compostos de nitrogênio, diversos compostos inorgânicos e, em muitos casos, polissacarídeos de reserva como o amido (Kumar et al., 2020; Prieto *et al*., 2021) que podem variar de espécie para espécie, além de condições ambientais das quais as plantas são submetidas (Sharma; Xu; Qin 2019).

Entre as fontes de BLC, estão os resíduos agrícolas, florestais, urbanos e industriais, além de estercos animais, lodo, culturas de bioenergia e produtos florestais, o que a torna uma fonte ideal para obtenção de bioenergia e bioprodutos (Sharma; Xu; Qin 2019). Entretanto, mesmo com o potencial de utilização, boa parte desses resíduos têm como destino a incineração ou deposição em aterros sanitários, que podem levar a problemas ambientais (Devi; Saravanamurugan; Aggarwal, 2020; Sharma *et al*., 2022).

Percebendo isso, pesquisas que visam sua utilização em processos de produção de

bioprodutos e bioenergia têm sido impulsionadas nas últimas décadas, gerando debates sobre mudanças nas práticas agrícolas e industriais que estimulam a necessidade de alcançar melhorias ambientais e sustentáveis (Crowther *et al*., 2024). Logo, sua utilização pela indústria contribui não somente em avanços tecnológicos sustentáveis, mas também para o barateamento nos processos de produção.

Figura 1 - Composição da biomassa lignocelulósica

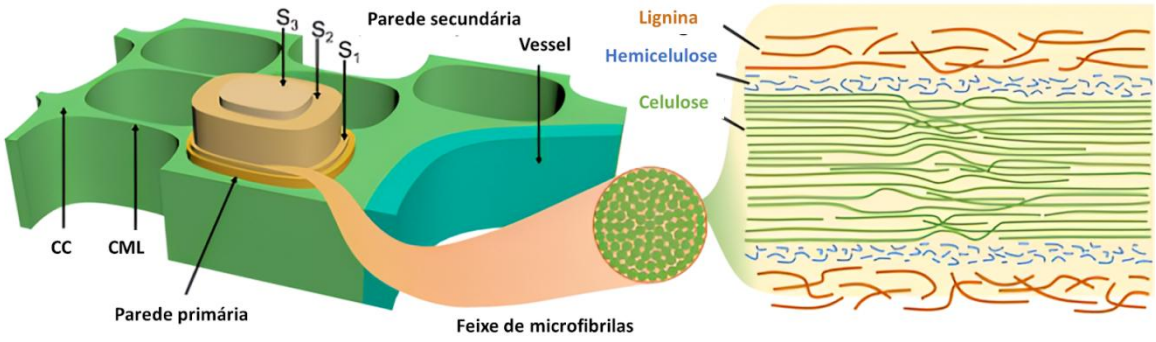


Fonte: Adaptado de Saldarriaga-Hernández *et al*. (2020).

1.1.1 Celulose

A celulose é um polissacarídeo linear constituída por moléculas de glicose ligadas entre si por ligações glicosídicas β– (1→4), elas formam cadeias cristalinas através de ligações de hidrogênio e por força de van der Waals, que fornecem uma estrutura fibrosa (microfibrilas), conferindo rigidez e estabilidade à parede celular vegetal (Ashokkumar et al., 2022; Zheng *et al*., 2022). Além disso, a celulose fornece base estrutural e permite que outros constituintes se liguem e deem origem ao complexo lignocelulósico (Figura 2), uma vez que suas microfibrilas também são fixadas umas às outras pela hemicelulose e/ou pectina junto a uma cobertura de lignina, que confere resistência a ataques químicos e biológicos (Kumar *et al*., 2020).

Figura 2 - Composição estrutural da biomassa lignocelulósica



S_n: Camadas da parede primária.
Fonte: Adaptado de Yu *et al*. (2024).

Embora esse biopolímero seja o mais abundante e disponível na natureza, sua resistência dificulta o processo de degradação pela biorrefinaria devido ao seu alto grau de cristalinidade (Ashokkumar *et al*., 2022), que também está relacionada com sua insolubilidade na maioria dos solventes e a sua falta de termoplasticidade (Baig, 2020). A natureza cristalina da celulose a torna difícil de ser rompida, mas a partir de ação enzimática ela pode ser quebrada em celobiose e posteriormente em glicose (Baig, 2020). Além disso, o mercado global de fibra de celulose atingiu a marca de 21,5 bilhões de dólares em 2017, com projeções para aumentar 9% do valor de mercado e atingir 41,5 bilhões em 2025, contribuindo para uma pegada mais sustentável e para uma bioeconomia circular em escala industrial (Banu *et al*. 2021).

1.1.2 Hemicelulose

Constituída por uma mistura de polissacarídeos, a hemicelulose apresenta aproximadamente 500 a 3.000 unidades de açúcares (xilose, glicose e galactose), estando intimamente ligada com a celulose e lignina, contribui para a estabilidade sólida estrutural da parede celular das plantas e é o segundo biopolímero mais recorrente (Zheng *et al*., 2022; Singh *et al*., 2024a). Seu principal componente é o xilano, molécula heterogênea que consiste em repetições de xilose, que apresentam ligações de hidrogênio, com pentoses (xilose e arabinose) de ligações β-(1 → 4), enquanto seus grupos laterais são geralmente substituídos por hexoses (galactose, glicose, manose e açúcares ácidos) (Zhang *et al*., 2011; Saldarriaga-Hernández *et al*., 2020; Sharma *et al*., 2024), o que garante uma vantagem ao se trabalhar quando comparado a celulose, já que as diferentes variabilidades de unidade de açúcar e comprimento de cadeia favorecem modificações químicas e enzimáticas em regiões específicas (Zheng *et al*., 2022).

1.1.3 Lignina

A lignina atua como um componente estrutural do tecido de suporte em células vegetais e é o terceiro biopolímero mais abundante, apresenta uma estrutura composta por monômeros fenólicos que formam estruturas complexas e atuam como barreira impermeável contra o estresse oxidativo e ações bióticas (Singh *et al*., 2024a). Ela fortalece as estruturas celulares pela união das estruturas polissacarídicas (Baig, 2020). Sua estrutura irregular tridimensional aromática e não cristalina é formada pela polimerização de radicais livres de precursores de álcool (Ashokkumar *et al*., 2022). Devido a sua complexidade, não apresenta uma forma definida, embora existam três monômeros mais distintos ou primários, como *álcool p*-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico, dos quais ambos contêm um grupo fenólico distinto que atuará como substrato para ação enzimática (Saldarriaga-Hernández *et al*., 2020).

1.1.4 Pectina

A pectina é um polissacarídeo complexo e heterogêneo que constitui até 30% da parede celular primária, sendo a principal macromolécula da lamela média (Cui *et al*., 2021). Seus polissacarídeos são covalentemente ligados e carreados em ácido galacturônico, enquanto sua forma estrutural consiste em: (i) uma região lisa – identificada como homogalacturonana (HG), que incluem sequências alongadas de unidades de α-d-galacturonato moderadamente esterificadas por metil (1 → 4), e (ii) outra região texturizada – formada por ramnogalacturonana dos tipos I e II (Rawat, Pavithra e Sunil, 2024).

Entretanto, apesar de fazer parte da parede celular, a pectina é menos abundante em monocotiledôneas quando comparado a eudicotiledôneas, podendo ainda ter um grande impacto na sua composição, estrutura e desempenho na constituição da parede celular ao longo do seu crescimento, desenvolvimento e interações com o meio ambiente (Gigli-Bisceglia, Engelsdorf e Hamann, 2019). Esse polissacarídeo é frequentemente utilizado pela indústria alimentícia como agente gelitificante, espessante, emulsificante ou estabilizante, mas também pode ser utilizada pelas indústrias farmacêutica e cosmética (Dwivedi *et al*., 2023; Roman-Benn *et al*., 2023).

1.1.5 Amido

O amido é polissacarídeo natural composto por uma série de ligações glicosídicas como:

amilose – polissacarídeo linear com ligações α-1,4-glicosídicas; e amilopectina – um polissacarídeo altamente ramificado com maiores ligações de α-1,4 e α-1,6 (Wang; Reddy; Xu, 2018; Garcia; Garcia; Franco, 2020; Yao *et al*., 2024). Enquanto a amilose está relacionada as regiões amorfas, a amilopectina se relaciona exclusivamente com as propriedades de cristalinidade, conferindo assim o aspecto semicristalino da natureza do amido (Zobel, 1988; Singh *et al*., 2003).

Por ser um polissacarídeo de reserva sintetizado pelos vegetais, está principalmente presente em tubérculos e raízes, mas também pode estar presente em sementes, frutas, colmos e em gramíneas (Talgliapietra *et al*., 2021; Xu *et al*., 2024). O amido é um dos principais biopolímeros utilizados pelas indústrias depois da celulose, principalmente a alimentícia, por ser uma fonte de carboidratos da alimentação humana. Ele ainda pode ser combinado com outras substâncias ou ser quimicamente modificado para sintetizar polímeros a base de amido, desempenhando papel importante para a produção de bioplásticos ou em processos de bioencapsulamento de substâncias, além da sua sacarificação para a produção de açúcares fermentáveis precursores de etanol (Escobar-Puentes *et al*., 2020; Naveen; Loganathan, 2024; Pei *et al*., 2024; Yao *et al*., 2024).

1.1.6 Bagaço de cana-de-açúcar: um resíduo agroindustrial rico em BLC, economicamente acessível e versátil na produção de enzimas

A cana-de açúcar (CA), *Saccharum officinarum*, é uma gramínea pertencente à família *Poaceae,* que é cultivada em quantidades consideráveis em países tropicais para a obtenção de seu caldo e produção de açúcar e etanol (Mahmud; Anannya, 2021; Reena *et al*., 2022; Roukas; Kotzekidou, 2022). No Brasil, sua cultura apresenta um rendimento médio de produção por ano em kg/ha (safra e produto) de 79.505, seguido de milho (11.466 - em duas safras) e arroz (6.939), com uma produção anual por safra e produto, até 2024 (em toneladas), de mais de 713 milhões para cana-de-açúcar, 131 milhões para milho e 10 milhões para arroz (IBGE, 2024). Entretanto, nem toda a matéria vegetal dessas culturas são utilizadas, pois após seu processamento, resíduos são gerados.

O bagaço da cana-de-açucar (BCA) é o produto residual da cana gerado após o processamento agroindustrial, sendo um recurso de BLC sustentável, rico em açúcar e fibras que apresenta forte potencial para a produção de açúcares fermentáveis (Nwajiaku *et al*., 2018; Huang; Wang; Liu, 2024; Moran-Aguiar *et al*., 2021). No Brasil, a CA e o BCA são as principais matérias-primas para a produção de etanol (Anu *et al*., 2024), e ainda é usada tradicionalmente

em usinas açucareiras como combustível na produção de vapor para a geração de eletricidade (Nwajiaku *et al*.,2018). Além disso, o Brasil é um dos maiores produtores de biomassa residual da América do Sul, representando 72% em comparação a outros países estudados, principalmente relacionado a suas extensas plantações de CA (Sampaolesi *et al*. 2023), o que torna o BCA uma fonte de BLC de fácil acesso e de baixo custo.

Em geral, o BCA é constituído por cerca de 42-46% de celulose, 23-30% de hemicelulose, enquanto o restante é composto por lignina (Tabela 1) e uma pequena quantidade de pectina, assim como extravios e cinzas que estão presentes em sua biomassa (Nasution; Lelinasari; Kelana, 2022; Reena *et al*., 2022; Zhang *et al*., 2024).

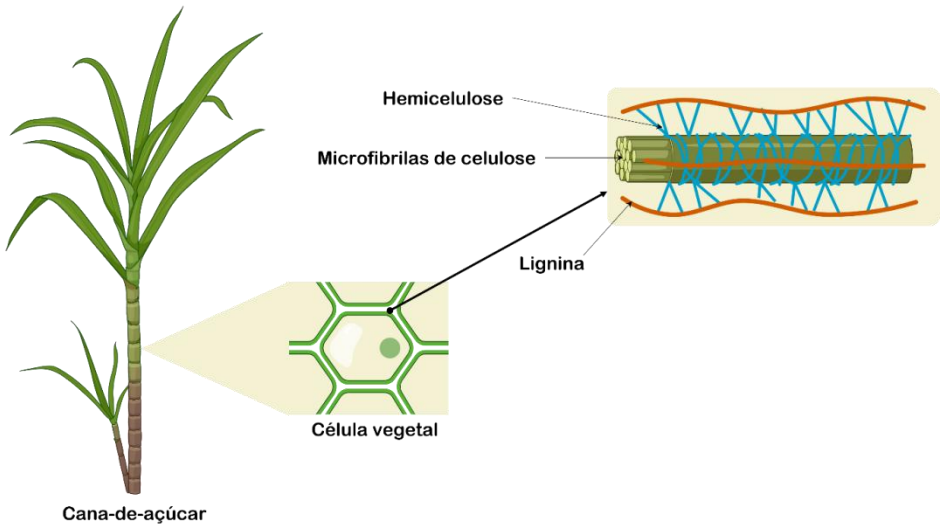
Tabela 1 - Caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar de acordo com seu percentual de lignocelulose

Celulose	Hemicelulose	Lignina	Referência
42 ± 2,5	34 ± 0,6	22 ± 0,3	Aguiar *et al*. (2020)
26 a 46	19 a 23	14 a 23	Mahmud e Anannya (2021)
29,88 ± 0,19	19,63 ± 0,81	38,6 ± 0,21	Silva *et al*. (2023)
52,92 ± 0,15	32,63 ± 0,08	10,24 ± 1,08	Silva *et al*. (2025)

Fonte: Autoria própria (2025).

A celulose se reúne em feixes de microfibrilas (Figura 3) contidos em uma matriz amorfa de hemicelulose e lignina reticulada adicional no BCA (Reena *et al*., 2022). Essas características tornam esse resíduo uma fonte de carbono promissora para a produção de enzimas hidrolíticas, como a celulase, a partir da ação de fungos filamentosos pela biotransformação, já que esses microrganismos são capazes de secretar grandes quantidades de enzimas livres que atuam na degradação da BLC e que permitem uma fácil recuperação enzimática quando obtidas a partir de processos fermentativos (Zhang *et al*., 2024).

Figura 3 - Organização da lignocelulose presente na cana-de-açúcar



Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, o BCA é uma matéria-prima abundante, renovável e econômica que pode ser utilizado de forma versátil não somente para a obtenção de enzimas e biocombustíveis, mas também de outros bioprodutos de valor agregado, incluindo ácidos orgânicos, xilooligossacarídeos e xitol – um adoçante utilizado pelas indústrias alimentícia e farmacêutica, além de biopolímeros a partir de processos fermentativos e de refino, de biocatálise ou quimiocatálise (Ajala *et al*., 2021; Reena *et al*., 2022).

A partir da fermentação em estado sólido utilizando BCA, enzimas lignocelulósicas já foram produzidas como forma de baratear o processo de produção, incluindo celulases, xilanases, pectinases e amilases (Escaramboni *et al*., 2022; Alzahrani *et al*., 2023; Martínez *et al*., 2024; Valle-Pérez *et al*., 2024; Al-bedak *et al*., 2025). Isso porque a escolha do substrato para utilização em FES depende principalmente de fatores como disponibilidade e custo do material (Kamande; Omwenga; Ngugi, 2024). Dessa forma, a valorização do BCA pode contribuir com tecnologias de produção e no barateamento de enzimas.

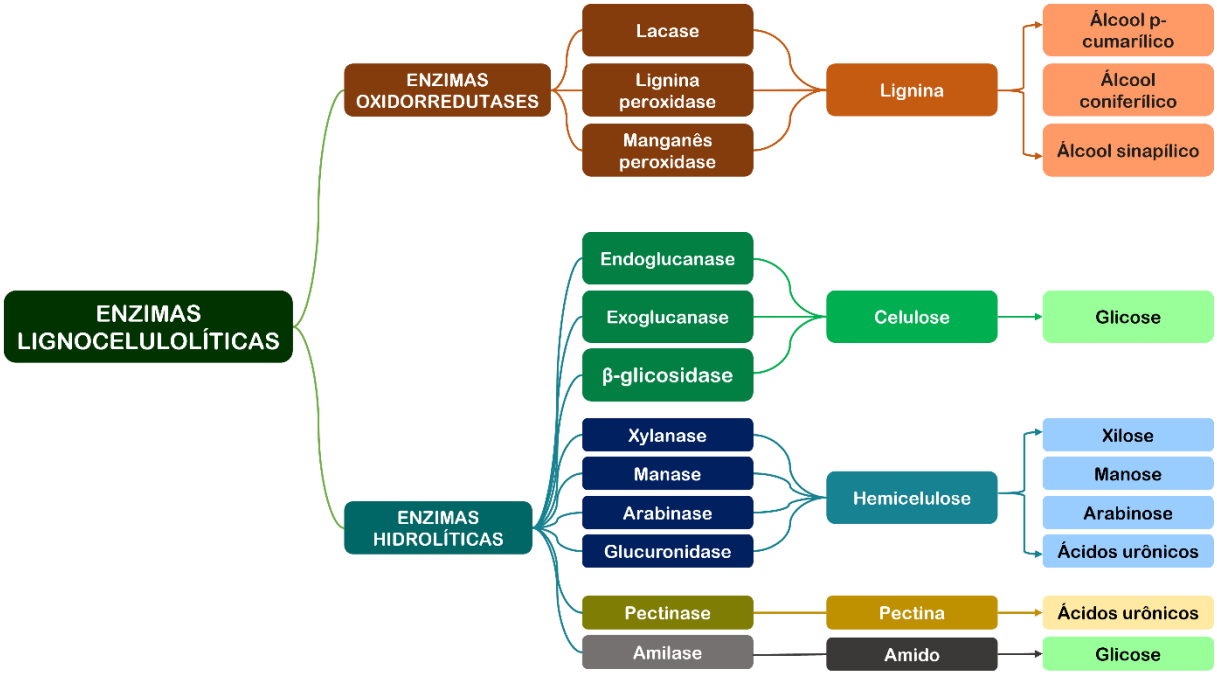
1.2 Enzimas lignocelulósicas: biocatalizadores de grande importância econômica e industrial

Enzimas são grupos de proteínas complexas que catalisam reações químicas. Por serem catalisadores biológicos, conferem vantagem sobre catalisadores químicos sintéticos, uma vez que sua utilização em processos necessários reduz a geração de subprodutos que podem levar a problemas ambientais (Souza *et al*., 2020). Por esse motivo, economicamente, o mercado

global de enzimas cresce a cada dia, com estimativa para um alcance de cerca de US$ 8,7 bilhões até 2026 (Dewan, 2021), enquanto espera-se que as enzimas lignocelulósicas cheguem a constituir mais de 20% das vendas totais (Leite *et al*., 2021).

Essas proteínas biocatalizadoras são capazes de decompor resíduos lignocelulósicos em suas unidades monoméricas básicas, facilitando sua bioconversão em diversos produtos de valor agregado pela indústria (Rani *et al*., 2024). Como atuam de forma específica ao substrato-alvo, as enzimas lignocelulósicas podem ser classificadas em dois tipos, de acordo com sua afinidade como o substrato e ação catalítica (Figura 4): enzimas oxidorredutases - que trabalham na degradação da lignina, ou enzimas hidrolíticas - que hidrolisam polímeros de carboidratos (Huang, Wang e Liu, 2024). Entre o primeiro grupo encontram-se as lacases, lignina peroxidade e maganês peroxidade, enquanto no segundo grupo, encontram-se a endoglucanase, exoglucanase e β-glicosidase, além das xilanases, amilases e pectinases, que pertecem ao grupo das glicosil hidrolases (Jayasekara; Ratnayake, 2019; Saldarriaga-Hernández *et al*., 2020).

Figura 4 - Esquematização da relação de enzimas lignocelulolíticas com seus respectivos substratos e produtos a partir de sua ação catalítica



Fonte: Adaptado de Huang, Wang e Liu (2024).

A especificidade das enzimas em relação aos substratos para obtenção de novos produtos é de grande importância, já que permite a possibilidade de condições moderadas de reação, além de altos rendimentos (Ravindran e Jaiswal, 2016). Por esse motivo, suas aplicações

são amplas em vários setores e indústrias, como têxteis, de celulose, papel e detergentes, de alimentos e bebidas, agricultura, produção de alimentos e de ração animal, além de biocombustíveis e produtos químicos de origem biológica (Ferreira, Axxoni e Freitas, 2020; Zhang *et al*., 2024b). Entretanto, o alto custo das enzimas é um fator negativo comercialmente, limitando sua utilização em algumas indústrias. Por esse motivo, formas de baratear sua produção são extremamente importantes e necessárias, podendo utilizar de BLC como fontes de substratos facilmente acessíveis.

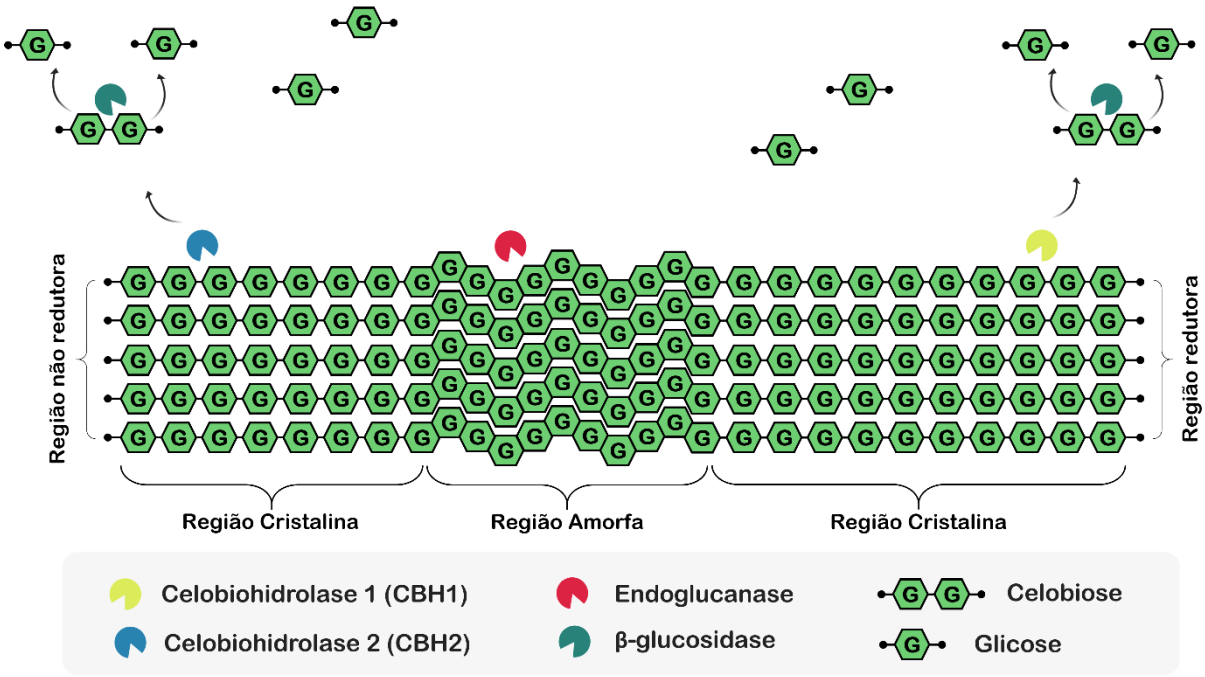
1.2.1 Enzimas hidrolíticas

1.2.1.1 Celulases: características e aplicações

Capazes de hidrolisar a celulose em açúcares solúveis, as celulases constituem um complexo enzimático que quebram as ligações β-1,4-glicosídicas das moléculas de carboidratos, dividindo-se em três grupos, de acordo com sua ação catalítica: endoglucanase (endo β-1,4-D glucan glucanohidrolase) ou CMCase (Carboximetilcelulase); exoglucanase ou celobiohidrolase (β-1,4-D-glucan celobiohidrolase); e β-glucosidase, também conhecida como celobiase (β-D-glucosídeo glucohidrolase), em que a atuação sinérgica dessa tríade permite uma hidrólise eficiente da celulose (Gupta; Bisaria, 2018; Mihajlovski; Milić, 2022; Ilić *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2024b).

A endoglucanase quebra as ligações β-1,4 dentro da cadeia de celulose em locais amorfos de forma aleatória, atuando na sua degradação e resultando na liberação de glicose, celobiose (dissacarídeo de glicose) e outros oligossacarídeos como produtos do processo de hidrólise, enquanto a exoglucanase age na degradação das partes cristalinas da celulose, atuando a partir do final da cadeia longa – dependendo da sua classificação (tipo I, age na porção redutora; ou tipo II, na porção não redutora), dividindo seus oligossacarídeos em celobiose (Lynd *et al*., 2002; Kurašin; Väljamäe, 2011; Chaudhari *et al*., 2023; Ilić *et al*., 2023). Já a β-glucosidase converte os oligossacarídeos de cadeia curta, mais especificamente a celobiose proveniente da ação da exoglucanase, em glicose (Ferreira; Azzoni; Freitas, 2020; Chaudhari *et al*., 2023), participando assim da etapa final da degradação da celulose (Figura 5).

Figura 5 - Ação do complexo de enzimas celulolíticas na degradação da celulose



Fonte: Adaptado de Chaudhari *et al*. (2023).

A aplicação de celulases pelas indústrias e outros setores para melhorias da qualidade dos produtos, obtenção de novos produtos de valor agregado e otimização de processos é bastante ampla, incluindo sua utilização na agricultura, na produção de alimentos e bebidas, no tratamento do papel e celulose, na biorrefinaria, na produção de detergentes e medicamentos, além do tratamento de poluentes residuais (Ranjan *et al*., 2023). Na agricultura, por exemplo, sua utilização como tratamento na germinação de grãos de arroz integral resultou na melhoria da qualidade do sabor e de seu cozimento devido a degradação da fibra do córtex que permitiu uma maior taxa de absorção de água, além do acúmulo de ácido γ -aminobutírico (GABA) dos grãos tratados (Zhang *et al*.,2019). Já em uma outra perspectiva, sua aplicação tem contribuído na melhoria da qualidade de solos, promovendo a redução da necessidade de utilização de fertilizantes agrícolas pela maior disponibilização de nutrientes através da quebra da celulose (Fontaine *et al*., 2004; Panneerselvam *et al*., 2024; Xiao *et al*., 2024).

Da mesma forma, na produção de alimentos, a utilização de celulases tem contribuído na melhoria da qualidade do sabor e aspectos nutricionais dos produtos alimentícios. No preparo de massas, como a de pães, sua utilização junto a outras enzimas (xilanase e glicose oxidase) contribuíram na estabilidade e extensibilidade a partir do maior aumento da disponibilidade de água para formar proteínas do glúten, tornando a massa mais macia, e elevando a qualidade final do produto (Yang *et al*., 2021). Já em massa de macarrão de arroz integral, a utilização da

celulase permitiu a diminuição do conteúdo de fibras alimentares insolúveis, melhorando sua textura, qualidade de cozimento e digestibilidade do amido (Geng *et al*., 2021). Enquanto no preparo de massas de biscoitos utilizando farelo de arroz desoleitificado, o tratamento do farelo com celulase resultou em um maior teor de fibras digestíveis solúveis, melhorando a qualidade nutricional do conteúdo de fibra alimentar (Cao *et al*., 2022).

Paralelamente, na produção de ração animal, a utilização de enzimas celulolíticas também permitem uma melhora nutricional e na palatabilidade pela degradação da celulose e outros polissacarídeos, uma vez que boa parte de seus constituintes acabam atuando como antinutrientes. Celulases e hemicelulases degradam a celulose e hemicelulose em açúcares de fácil digestão, além de facilitar a disponibilidade a outros nutrientes, levando ao ganho de peso do animal e ao aprimoramento da qualidade da carne (Simon *et al*., 2024; Walker *et al*., 2024). Elas ainda contribuem para uma maior abundância bacteriana benéfica relacionada ao processo de fermentação da silagem (Qiu *et al*., 2024).

Além disso, a utilização de celulase na produção comercial de bebidas é uma prática que também vem se tornando crescente, a exemplo da indústria de sucos de frutas, vinhos e cervejas, já que a eliminação de partículas suspensas ou degradação de estruturas específicas para melhoria dos aspectos sensoriais (visuais, olfativos e palatáveis) é um desafio para preparo de seus produtos. Isso porque, durante a maceração, os componentes da parede celular se rompem e geram a presença de diferentes polissacarídeos (como celulose, hemicelulose, pectina e amido) que ficam suspensos e dispersos no líquido, aumentando o nível de turbidez e viscosidade do produto extraído, à medida que reduz os parâmetros de qualidade que afetam a experiência do consumidor (Roman-Benn *et al*., 2023). Para a eliminação dessas partículas, a aplicação de enzimas hidrolíticas, como a celulase, se torna uma alternativa eficiente, já que atuam de forma seletiva ao substrato de interesse, hidrolisando as partículas suspensas e fornecendo um melhor rendimento, além de melhorar os parâmetros de qualidade quando comparado aos métodos convencionais (Sharma; Patel; Sugandha, 2017).

O tratamento enzimático utilizando celulase para clarificação de sucos, assim como na produção de vinhos, demonstra ótimos resultados, aumentando as propriedades antioxidantes, reduzindo a turbidez, aumentando a clareza, estabilidade e concentração de açúcares redutores, realçando o sabor e o aroma, além de um maior rendimento dos produtos (Ozyilmaz; Gunay, 2023; Sutaoney *et al*.,2024). Enquanto na produção de cervejas, sua utilização pode ser realizada desde a germinação da cevada para o processo de maltagem, junto a amilase, até o processo de filtragem para obter um melhor rendimento (Kuhad; Gupta; Singh, 2011; Li, Chang; Liu, 2018; Singh *et al*., 2021).

Na produção de tecidos e de papel, a utilização da celulase é amplamente conhecida, já que seus produtos são constituídos principalmente por fibras de celulose. Logo, o tratamento dessas fibras com a enzima permite um melhor acabamento, seja para remover as fibras que se projetam na superfície desses produtos causando um aspecto de penugem ou para melhorar a textura, maciez e brilho (Sankarraj; Nallathambi, 2018; Vajpayee et al., 2022; Ahmed *et al*., 2023; Ranjan *et al*., 2023). Na indústria de celulose e de papel, sua aplicação ainda pode ser utilizada como pré-tratamento da polpa antes de ser batida, para reduzir o consumo de energia e melhorar a qualidade do papel, podendo incluir outras enzimas hidrolíticas como xilanase e pectinase (Zhao; Li; Qu, 2006; Nagl *et al*., 2022; Xie *et al*., 2023). Enquanto em tecidos, sua aplicação ainda pode ser utilizada na fabricação de detergentes capazes de abrir as fibras do tecido e facilitar a remoção de sujeiras no interior, embora se restrinjam a condições alcalinas e termoestáveis (Juturu; Wu, 2014; Niyonzima, 2021; Ejaz; Sohail; Ghanemi 2021).

Para a extração de compostos terapêuticos, potencialização de propriedades medicinais e auxílio em processos digestivos, a utilização de celulase pode contribuir com boas aplicabilidades. A extração de compostos bioativos de plantas pode ser realizada pela degradação da celulose presente na parede da célula vegetal, contribuindo com melhores rendimentos (Hu *et al*., 2021; Petcharat *et al*., 2024), da mesma forma que sua degradação contribui com uma maior digestibilidade de fibras ingeridas e pode ser utilizada na formulação de comprimidos junto a outras enzimas, capazes de tratar problemas metabólicos ou auxiliar na absorção de nutrientes (Iwamuro *et al*. 2014; Jayasekara; Ratnayake 2019).

A biorrefinaria utiliza do tratamento enzimático com celulase e outras enzimas lignocelulósicas para a produção de subprodutos benéficos a partir da biomassa lignocelulósica, seja para a produção de bioenergia ou bioprodutos. Na produção de etanol, a celulase pode ser utilizada na hidrólise enzimática de materiais lignocelulósicos para obtenção de açúcares fermentáveis e sua conversão em etanol, contribuindo para a otimização do processo de produção e para obtenção de melhores rendimentos, podendo ainda ser recuperada e reutilizada para novos ciclos (Chatterjee; Mohan, 2021; Soni *et al*. 2023; Adsul, 2024; Klein *et al*., 2024; Xu *et al*., 2024;).

Entretanto, sua utilização não se limita apenas a aplicabilidades comerciais, mas também no tratamento de resíduos gerados por suas respectivas indústrias e setores, que podem levar a graves impactos quando descartados ou não tratados da forma correta. Nesse sentido, celulases já foram utilizadas no tratamento de resíduos têxteis e de papel, resultando em glicose que foi utilizada para gerar produtos de valor agregado como sorbitol, ácido lático, ácido tereftálico, bio-butanol e etilenoglicol (Vera *et al*., 2023; Cho *et al*., 2023). O tratamento de

resíduos municipais e agrícolas também pode ser realizado utilizando enzimas celulolíticas com o intuito de reduzir a quantidade de material celulósico e a partir dele obter produtos de valor agregado, como na biorrefinaria para a produção de etanol e reciclagem de papel (Dixit; Shukla, 2023; Varghese *et al*., 2023; Elnagdy *et al*., 2024; Sharma *et al*., 2025).

1.2.1.2 Hemicelulases

As hemicelulases atuam na degradação de polissacarídeos que constituem as hemiceluloses, sendo necessária a ação sinérgica de várias enzimas para uma hidrólise completa de seus constituintes, devido à complexidade e heterogeneidade de suas estruturas (Shallom e Shoham, 2003). Entre as principais enzimas desse grupo encontram-se a endoxilanase, xilosidase, β-mananase, α-L-arabinofuranosidase, α-D-glucuronidase e cumarial esterase. A endoxilanase age nas ligações glicosídicas da xilana as convertendo em pequenos oligossacarídeos, enquanto as xilosidases atuam nas suas ligações β-1,4 à medida que libera xilose da extremidade não redutora dos xiloolissacarídeos (Polizeli *et al*., 2005; Thomas *et al*., 2017; Lopes *et al*., 2018). Já a β-mananase pode clivar ligações aleatórias ou específicas entre D-manoses na estrutura do polímero, gerando novas extremidades, hidrolisando hemiceluloses compostas por mananas em manooligômetros curtos que podem ser degradados posteriormente em manose pela ação de β-manosidases (Shallom; Shoham, 2003; Méndez-Líter *et al*., 2021).

Por outro lado, as outras enzimas atuam como acessórias, como as α-L-arabinofuranosidases e exo-enzimas que hidrolisam ligações entre α-L-arabinofuranosil e uma xilose da estrutura principal, resultando unidades de arabinofuranose, enquanto α-D-glucuronidase hidrolisam ligações glicosídicas entre ácido glucurônico ou 4-O-metilglucurônico e unidade de xilopiranose da cadeia principal da xilana (Poria *et al*., 2020; Méndez-Líter *et al*., 2021). Já esterases de ácido fenólico como feruloil esterase e p-cumaril esterase atuam em resíduos de ácido ferúlico de ligações esterificadas entre arabinose e ácido ferúlico ou de arabinose e p-cumárico, respectivamente, sendo o grupo das feruloil esterases um grupo que incluem enzimas capazes de liberar outros tipos de ácidos fenólicos (Oliveira *et al*., 2019; Méndez-Líter *et al*., 2021; Souza; Kawaguti, 2021).

Dessa forma, a ação dessas enzimas permite a degradação da hemicelulose em açúcares monoméricos como xilose, manose e arabinose, ou em ácidos orgânicos como o acético, fórmico, láctico e o succínico, além de etanol, água e gás carbônico (Singh *et al*., 2024a), o que garante uma variedade de aplicações comerciais e industriais. É importante destacar que a hidrólise da hemicelulose é fundamental para se ter acesso a celulose presente na parede celular

vegetal, contribuindo para uma maior acessibilidade de enzimas celulolíticas, potencializando assim a ação enzimática (Souza; Kawaguti, 2021).

2.2.1.3 Pectinases

A degradação de substâncias pécticas ocorre pela ação das pectinases, um grupo de enzimas que possuem três classes distintas de acordo com sua interação com o substrato: protopectinases – que atuam na hidrólise de estruturas complexas da protopectina insolúvel em água, em pectina; as desopolimerases – que despolimerizam matérias pectináceas em compostos de cadeia inferior, podendo ainda ser classificadas como hidrolases e liases de acordo com o mecanismo de clivagem das ligações glicosídicas; e as esterases, que agem na unidade esterificada próxima à unidade de ácido galacturônico não esterificada na cadeia do polímero, para que procedam linearmente (Patel; Chatterjee; Dhoble, 2022).

Com isso, enzimas pectinolíticas ocupam vagas distintas nas famílias de enzimas glicosil hidrolases – GH, polissacarídeo liases – PL, e carboidrato esterases – CE (Drula *et al*., 2022). As pertencentes a GHs atuam na hidrólise de ligações glicosídicas entre os carboidratos, assim como em uma fração de não carboidratos, enquanto PLs clivam cadeias de polissacarídeos urônicos, e as CEs agem na catálise de acilação na extremidade do oxigêncio ou nitrogênio das estruturas do substrato, removendo esterificações mono-, oligo- e polissacarídeos (Dwivedi *et al*., 2023). No que se refere a aplicações, as pectinases podem ser utilizadas na agricultura na preparação viral a partir de tecidos vegetais e isolamento de protoplastos, além da indústria alimentícia e de bebidas para o processamento de seus produtos, assim como na indústria têxtil e de papel (Dwivedi *et al*., 2023; Singh *et al*., 2024b).

2.2.1.4 Amilases

Amilases atuam na degradação do amido, convertendo-o em açúcares mais simples como glicose ou maltose, e podem ser classificadas como exo- ou endoenzimas, de acordo com sua ação catalítica (Ali *et al*., 2024). Entre as exoenzimas, a β-amilase (1,4-α-D-glucano maltohidrolase, glicogenase ou sacarogênio amilase) e α-glicosidase são exemplos que agem em ligações α-1,4-glicosídicas da região não redutora do amido, resultando em monômeros de glicose ou maltose, enquanto a γ-amilase (glucano 1,4-α-glicosidase, glucoamilases ou Exo-1,4-α-glicosidase) atua principalmente nas ligações α-1,6-glicosídicas, mas também nas α-1,4-glicosídicas da região não redutora da amilopectina e na amilose; já α-amilase (1,4-α-D-

glucano hidrolase) é uma endoenzima que atua na hidrolise de ligações α-1,4-glicosídicas em substratos variados, entre amido e glicogênio (He *et al*., 2023; Liu *et al*., 2023; Ali *et al*., 2024).

Como atuam na hidrólise de substratos amiláceos, sua aplicação é utilizada com frequência na indústria do amido, seja para a produção de alimentos e bebidas ou de outros produtos à base de amido, como na produção de bioplásticos, além de desempenhar um papel importante no metabolismo de carboidratos em dietas humanas, podendo ainda ser utilizada para a obtenção de bioetanol (Liu *et al*., 2023; Wayllace *et al*., 2023). Somente na indústria de panificação, o mercado global de α-amilase foi avaliado em US$ 331,01 milhões em 2023, com projeções de crescimento de 3,6% até 2030 (Grand View Research, 2024).

2.2.1.5 Aplicações de hemicelulases, pectinases, amilases e de coquetéis enzimáticos

As enzimas apresentam uma grande possibilidade de aplicações nas mais variadas indústrias e setores comerciais. Elas podem ser utilizadas de forma individual para a degradação de componentes específicos ou na formulação de coquetéis enzimáticos com uma combinação de outras enzimas capazes de potencializar a ação catalítica em processos de produção em substratos mais complexos, como em biomassa lignocelulósica, agindo de forma sinérgica e eficiente, contribuindo com melhores resultados e rendimentos (Yang *et al*., 2023; Pereira *et al*., 2024; Shaikh-Ibrahim *et al*., 2025). A Viscozyme® é um exemplo comercial de um coquetel multienzimático que contém um complexo de enzimas carboidrases com atividades de arabanase, celulase, β-glucanase, hemicelulase e xilanase, sendo capaz de degradar polissacarídeos não amiláceos que estão ligados ao amido em materiais vegetais (Soto-Maldonado; Concha-Olmos; Zúñiga-Hansen, 2020).

Além disso, celulases, xilanases, pectinases e amilases são exemplos de combinações na formulação de coquetéis por serem conhecidas como enzimas maceradoras, capazes de facilitar o processo de degradação de polissacarídeos da parede celular vegetal (Singh *et al*., 2021; Maharramova *et al*., 2023; Puzovic *et al*., 2024; Viana *et al*., 2024). Essas enzimas são geralmente produzidas por microrganismos, purificadas e comercializadas para aplicação em diferentes indústrias (Kamande; Omwenga; Ngugi, 2024). Esse e outros exemplos estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicações de enzimas hidrolíticas e coquetéis enzimáticos em diferentes indústrias e setores.

Indústria/Setor	Aplicações	Enzimas utilizadas	Referência
Agricultura	Conversão de resíduos agrícolas em oligossacarídeos	Pectinase e Viscozyme®	Karabulut et al. (2023) e Cano-Gonzalez *et al*. (2024)
	Isolamento de protoplastos	Pectinase e celulase	Ahmed *et al*. (2021)
Alimentícia	Extração de antocianinas e flavonoides	Pectinase	Zhang *et al*. (2025), Kaur e Qadri (2025)
	Rendimento de fibras alimentares	Xilanase e celulase	Lin et al. (2025)
	Melhoria dos aspectos nutricionais e das propriedades antioxidantes em pólen e farinha de banana	Pectinase; pectinase e Viscozyme®	Soto-Maldonado, Concha-Olmos e Zúñiga-Hansen (2020); Sharma, Thakur e Nana (2025)
	Melhoria dos aspectos nutricionais de fibras alimentares, das propriedades antioxidantes, bioativas e prebióticas de casca de cacau	Celulase, xilanase e pectinase	Disca *et al*. (2024)
	Produção de xiloolissacarídeos com propriedades prebióticas	Xilanase	Fernandes *et al*. (2024)
	Melhoria da qualidade de massas e características de volume, redução de dureza e aumento da maciez de pães e biscoitos	Amilase; celulase, pectinase e amilase; xilanase	Trabelsi *et al*. (2019), Li *et al*. (2023), Yegin, Altinel e Tuluk (2024) e Qi *et al*. (2025)
	Inibição da formação de acrilamida em bata frita	Pectinase	Zhu *et al*. (2024)
	redução de fibras alimentares insolúveis	Celulase e hemicelulases	Deng *et al*. (2024)
Bebidas	Clarificação de sucos e melhoria das propriedades antioxidantes	Xilanase; pectinase; amilase, pectinase e celulase	lgan, Sürmeli, e Şanlı-Mohamed (2021), Ozyilmaz e Gunay (2023) e El-Shora *et al*. (2025)
	Melhoria da qualidade e aroma de chá	β-glucosidase, xilanase , feruloil esterase	Wang *et al*. (2024)
	Produção de cerveja, aumentando a concentração de açúcares redutores e compostos bioativos	Celulase e xilanase	Machado-Filho *et al*. (2024)
Alimentícia, Farmacêutica ou Cosméica	Extração de compostos bioativos de plantas	Celulase, xilanase, pectinase e amilase	Petcharat et al. (2024) e Brienza *et al*. (2025)
	Produção de ácido D-galacturônico a partir de cascas de pomelo	Celulase e pectinase	Siamphan *et al*. (2024)

Continua

Continuação

Indústria/Setor	Aplicações	Enzimas utilizadas	Referência
Têxtil	Lavagem/limpeza de malhas de algodão, contribuindo com branqueamento e tingimento	Pectinase	Ibrahim *et al*. (2019)
	Branqueamento de polpa de algodão	Xilanase	Dukare *et al*. (2025)
	Processamento de fibras não convencionais para utilização têxtil	Hemicelulae, amilase e pectnase	Mushtaq *et al*. (2024)
	Tratamento de tecidos e degomagem	Pectinase e xilanase alcalinas	Zhao *et al*. (2022)
Papel e Celulose	Tratamento fibras de celulose de resíduos de tomateiro para produção de papelão	Pectinase e hemicelulases	Covino *et al.* (2024)
	destintamento de polpa para reciclagem	Xilanase	Malhotra e Chapadgaonkar (2023)
	Biobranqueamento e colagem de superfície de papel	Amilase	Wang *et al*. (2022) e Pasin *et al*. (2024)
Biorrefinaria e Etanol	Produção de borracha natural a partir de biomassa vegetal	Pectinase e celulase	Zheng *et al*. (2025)
	Produção de biolátex	Amilase	Liu *et al*. (2020) e Rodrigues *et al*. (2020)
	Produção de etanol a partir de lignocelulose	Celulase e xilanase; Xilanase (endo-β-(1,4)-D- xilanase)	Álvarez *et al*. (2021) e Vaid *et al*. (2024)
	Produção de etanol a partir de resíduos amiláceos	Amilase (α- amilase e glucoamilase); Amilase (α- amilase)	Chen *et al*. (2025) e Vučurović *et al*. (2025)
Tratamento de resíduos ou Biorremediação	Bioconverção de cascas de frutas em biofloculantes para tratamento de águas contendo microcistinas	Celulase, hemicelulase, pectinase	Qi *et al*. (2020)
	Tratamento de papel e utilização da efluente residual para produção de biobutanol	Celulase, xilanase, pectinase e amilase)	Mondal *et al*. (2022b)

Conclusão

Fonte: Autoria própria (2025).

2.3 Fungos produtores de enzimas em ambientes semiáridos: o domínio Caatinga como berço de biodiversidade, manutenção ambiental e potencial biotecnológico ainda pouco conhecido

Vários microrganismos evoluíram para degradar a lignocelulose a partir da capacidade de produção de enzimas extracelulares, quebrando os polissacarídeos da parede celular vegetal

em componentes digeríveis para sua utilização como fonte de energia, carbono e nutrientes (Jayasekara; Ratnayake, 2019; Ejaz; Sohail; Ghanemi, 2021). Entre os microrganismos, os fungos despertam interesse pela sua facilidade de produção de fortes enzimas devido suas vias metabólicas avançadas (Saini e Sharma, 2021; Singh *et al*., 2024a), sobretudo, os de ambientes que apresentam fatores limitantes para a existência de vida, como altos níveis de radiação e temperaturas, disponibilidade de água e nutrientes, variações de pH e da concentração de sais, exigindo adaptações fisiológicas e morfológicas para resistirem de forma estável a essas condições estressantes e extremas (Dwivedi *et al*., 2023; Mousa *et al*., 2024; Rasool; Irfan, 2024).

O domínio fitogeográfico da Caatinga é um ambiente caracterizado por tais fatores limitantes, sendo descrito como um berço de espécies resistentes, com ampla biodiversidade e grau de endemismo ainda pouco conhecido, incluindo fungos com potencial biotecnológico (Silva *et al*., 2017; Fernandes; Cardoso; Queiroz, 2020; Cunha *et al*., 2020). A Caatinga é definida como uma floresta tropical sazonalmente seca (FTSS), sendo o maior e mais diversificado sistema ecológico dessa categoria, mas que tem sua importância local e global negligenciada pela falta de conhecimento e proteção de sua área e biodiversidade quando comparado a outras florestas tropicais e savanas adjacentes (Kiill; Porto, 2019). Ela é uma FTSS exclusivamente brasileira e a maior da América do Sul, que se estende pela região do semiárido dos estados do Nordeste, além do Norte de Minas Gerais (Silva; Leal; Tabarelli, 2018; Souza, 2020).

Seu nome, Caatinga, tem origem tupi-guarani e significa floresta branca, simbolizando o aspecto físico da vegetação característico dos períodos de seca – em que as folhas caem, restando apenas os troncos das árvores e arbustos na paisagem, isso porque em FTSS a escassez de chuvas e períodos de secas é algo frequente (Ricardo *et al*. 2018; Souza, 2020). Além da escassez hídrica, o ambiente de Caatinga apresenta altos índices de radiação solar que contribuem para a incidência de altas temperaturas e formação de ilhas de calor, em que juntas promovem a degradação da serrapilheira e resultam na baixa disponibilidade de matéria orgânica do solo (Souza, 2020). Somado a isso, o desmatamento elevado de seu ambiente tem promovido processos de desertificação em diversas áreas, alterando diretamente a biota, o microclima e os aspectos físico-químicos dos solos, com a presença de regiões salinas que representam ecossistemas pouco estudados, exigindo estudos que visem catalogar a biodiversidade local e explorar o potencial biotecnológico de suas espécies para proteção e preservação antes que ocorram alterações e perdas irreversíveis (Kiill; Porto, 2019; Parada-Pinilla *et al*., 2021).

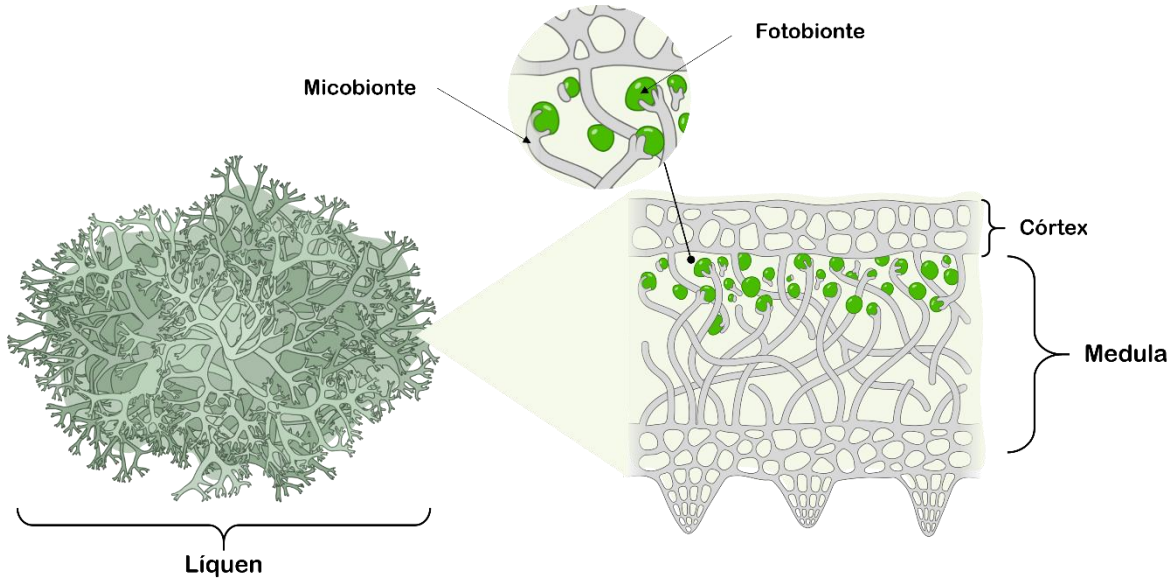
Para conseguir sobreviver sob fatores limitantes, a produção de enzimas mais estáveis pelos fungos, além de pigmentos e outros produtos bioativos, são formas de se manterem firmes no ambiente em que estão inseridos (Mousa *et al*., 2024), característica essa que é importante em processos industriais, já que as enzimas comerciais precisam tolerar variações dos fatores físicos, químicos e biológicos (Dutta; Bandopadhyay, 2022; Hmad; Gargouri, 2024). Além dessas adaptações, os fungos ainda podem se associar com outras espécies, além de plantas, algas, cianobactérias e animais como forma de sobrevivência, potencializando a produção de enzimas e de compostos bioativos de interesse biotecnológico (Dhayanithy; Subban; Chelliah, 2019; Barbosa-Silva *et al*., 2019; Shelomi; Chen, 2020; Vishwakarma *et al*., 2020; Resl *et al*. 2022; Asokan et al. 2025).

A associação simbiótica entre fungos e plantas em ambientes estressantes é extremamente importante para a sobrevivência de ambos, seja para o fornecimento de abrigo, proteção ou disponibilização de recursos essenciais que contribuem para a produção de biomoléculas e enzimas importantes. Os fungos podem se hospedar em diferentes órgãos e tecidos vegetais, e são caracterizados como: endofíticos – que vivem no interior de tecidos e que podem participar do metabolismo das plantas fornecendo biomoléculas importantes que protegem o hospedeiro vegetal contra fatores bióticos e abióticos, enquanto a planta fornece abrigo e nutrientes (Souza *et al*., 2023; Omomowo, 2023); rizosféricos – colonizam a região do solo próximo das raízes da planta, a rizosfera, e podem interagir de forma intra ou extracelular a partir da formação de micorrizas, fornecendo nutrientes importantes pela ciclagem de nutrientes e de matéria orgânica, e até mesmo contribuindo na tolerância dos estresses hídrico e salino (Smith; Read, 2010; Dighton, 2018; Silva *et al*., 2020); e epífitos, que colonizam as superfícies externas da planta, como a folhas, caules e raízes, e podem atuar na proteção contra fitopatógenos (Vishwakarma *et al*., 2020).

Como exemplo de associação de fungos com algas e/ou cianobactérias, pode-se citar os líquens (Figura 6), uma associação simbiôntica constituída obrigatoriamente por um micobionte (fungo) e um fotobionte (alga verde e/ou cianobactéria), caracterizada por resultar na produção de metabólitos secundários bioativos valiosos, além de enzimas, em maioria sintetizada pelo micobionte (Resl *et al*., 2022; Lindsay *et al*., 2024). Curiosamente, o conceito de líquen tem levado em consideração a formação de um ecossistema autossustentável formado pela relação mico-fotobionte, constituída por um fungo junto a um arranjo extracelular de um ou mais parceiros fotossintetizantes, podendo ainda contar com um número indeterminado de outros organismos microscópicos, como bactérias e microinvertebrados, formando um holobionte que tem o fungo como simbionte mutualístico primário (Hawksworth; Grube, 2020; Allen;

Lendemer, 2022; Lücking; Spribillie, 2024).

Figura 6 - Representação de uma associação liquênica entre micobionte e fotobionte



Fonte: O Autor (2025).

Além disso, comunidades complexas formadas por associações entre algas verdes, cianobactérias, musgos e outras bactérias ligadas a partículas de solo, formam biocrostas que são de grande importância na manutenção funcional de ecossistemas de ambientes áridos e semiáridos (Belnap; Weber; Büdel; 2016; Concostrina-Zubiri *et al*., 2021). As biocrostas atuam na ciclagem de nutrientes (C, N e P) e principalmente da matéria orgânica complexa rica em lignocelulose a partir da ação enzimática dos fungos, que contribuem para a restauração de ecossistemas durante a sucessão da vegetação em ambientes áridos (Tedersoo *et al*., 2014; Concostrina-Zubiri *et al*., 2021; Guang *et al*. 2025). Elas ainda estão relacionadas a teoria do ciclo fúngico, que sugere que os fungos absorvem água e nutrientes após chuvas leves e posteriormente transferem esses recursos a outros produtores, como plantas vasculares, após chuvas substanciais, interligando planta, biocrostas e solo (Guang *et al*. 2025).

Já em associações com animais, a relação de fungos com insetos é algo que desperta interesse, a partir de interações que são vitais. Em cupins, os fungos desempenham papel nutricional, influenciando na sua sobrevivência, crescendo em favo de fungos construídos pelas operárias a partir da BLC da serrapilheira, a qual os fungos são capazes de decompor quase completamente e serve de alimento para os cupins – tanto o favo, como os fungos (Ye *et al*., 2019). Essa relação ainda pode ser observada em fungos que mimetizam ovos de cupim e que podem ser incorporados em seu sistema digestivo para o fornecimento de celulases (Ye *et al*.,

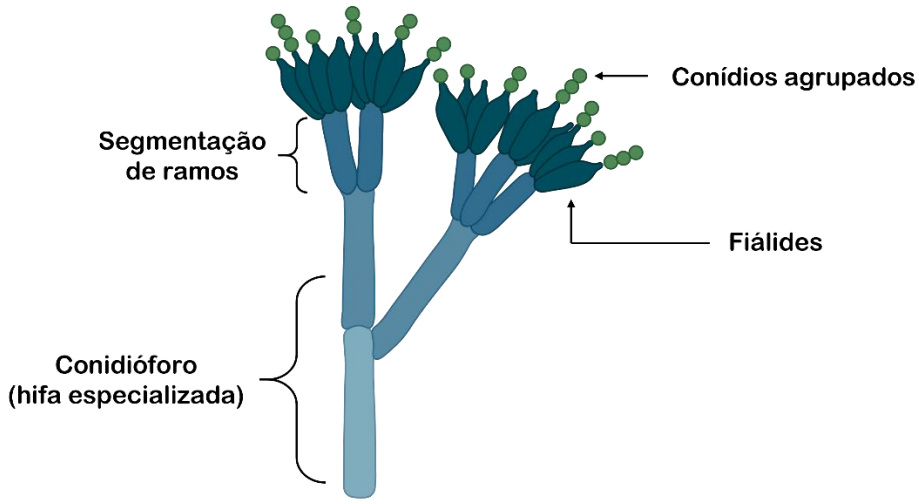
2019; Costa-Leonardo; Janei; Silva, 2022). Em cochonilhas relacionadas a cactáceas, fungos simbióticos também desempenham função na digestão de polissacarídeos vegetais (González-Román *et al*., 2024).

De maneira geral, os fungos exercem papeis ecológicos importantes, principalmente relacionados a quebra da lignocelulose derivados de material vegetal, além de atuar em ciclos de nutrientes que fortalecem a relação entre fungos e outros organismos a partir da ação enzimática, tornando-se ótimas fontes de biomoléculas e enzimas de interesse biotecnológico, principalmente quando obtidas a partir de microrganismos que habitam ambientes estressantes, como os observados na Caatinga, ou a partir da interação do fungo com outros organismos também submetidos a condições igualmente estressantes. Entre os gêneros fúngicos relatados nesse tipo de ambiente ou interações, *Penicillium* inclui representantes que são capazes de produzir enzimas como celulases e amilases, evidenciando sua versatilidade de interesse industrial (Miralles *et al*., 2021; Silva *et al*., 2022).

2.4 Fungos do gênero *Pinicillium* como produtores de enzimas

O gênero *Penicillium* é um dos mais prevalentes e ecologicamente diverso encontrado no reino Fungi, englobando mais de 483 espécies conhecidas capazes de se desenvolver nos mais variados ecossistemas e substratos, como terrestres, vegetais, em alimentos e no ar (Houbraken *et al*., 2020; Peterson *et al*., 2023; Visagie *et al*., 2024; Bhunjun *et al*., 2024). Pertencente à família Aspergillaceae e a ordem Eurotiales, a nomenclatura de seu gênero foi originalmente influenciada por suas características micromorfológicas (Figura 7) que se assemelhavam a um pincel de pintor (do latim, *penicillum*), com estruturas reprodutivas apresentando padrões de segmentação em conidióforos e fiálides, que produzem conídios agrupados em cadeia (Link, 1809; Visagie *et al*., 2014; Tsang *et al*. 2018).

Figura 7 - Morfologia da estrutura reprodutiva característica de *Penicillium*



Fonte: O Autor (2025).

Representantes relatados desse gênero possuem anotações funcionais proteicas que indicam a presença de genomas relacionados a capacidade de produção de enzimas ativas em carboidratos (*Carbohydrate-Active Enzymes* - CAZymes), como do grupo das GHs que são capazes de hidrolisar polissacarídeos vegetais presentes em BLC (Ning *et al*., 2024). A produção dessas enzimas, como a celulase e amilase, é rigorosamente regulada por estímulos ambientais relacionados a presença e disponibilidade do substrato, expressão gênica e secreção proteica a partir de uma rede complexa coordenada por receptores, transportadores, fatores de transcrição e outras proteínas regulatórias (Christopher *et al*., 2023; Guo *et al*., 2025). Mecanismos como esses são estudados pela engenharia integrada de enzimas para melhoraria em aplicações industriais (Liu; Qu, 2021).

Como o custo de enzimas em escala industrial é alto, fungos ambientais são frequentemente estudados para a prospecção de enzimas cada vez mais estáveis e potentes, para que possam seguir para processos de purificação e otimização dos processos de produção. O coquetel enzimático Rovabio1 Excel®, por exemplo, é derivado do fungo *Penicillium funiculosum* e é disponibilizado comercialmente apresentando atividades para celulase e xilanase (Ibrahim *et al*., 2024). De forma análoga, um coquetel enzimático já foi obtido por *Penicillium subrubescens* isolado de diferentes materiais em decomposição e apresentou atividades para celulase, xilanase, pectinase e lacase, com boas perspectivas de aplicações na indústria de celulose e tecidos (Ibrahim *et al*., 2024).

Penicillium camemberti, isolado de amostras de solo salino, apresentou atividade para amilase e celulase em diferentes condições de crescimento (Farouk *et al*., 2024), assim como

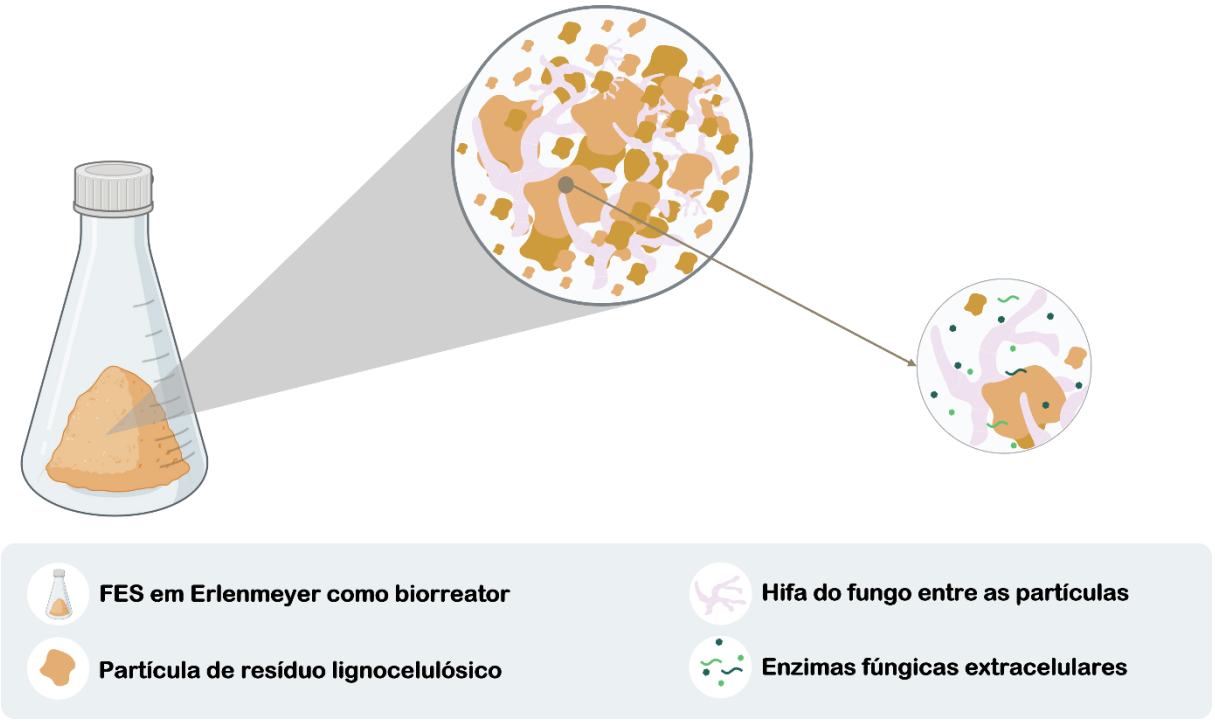
Penicillium oxalicum, isolado de solo florestal, que apresentou atividade para as mesmas enzimas, além do potencial para degradar filmes de amido/polivinilpirrolidona (Dixit *et al*., 2025). É importante destacar que fungos ambientais como forma de baratear o custo da obtenção, produção e aplicação de enzimas não são a única possibilidade, outras alternativas podem ser levadas em consideração, como técnicas de produção enzimáticas menos intensivas em energia e menos exigentes, além dos substratos de fácil acesso e disponibilidade, utilizados como fontes indutoras.

2.5 Fermentação em Estado Sólido (FES): uma tecnologia promissora para obtenção de produtos de valor agregado

O cultivo de microrganismos para obtenção de produtos de alto valor exige meios de cultura que forneçam os nutrientes necessários para seu desenvolvimento e produção. Logo, utilizar matérias-primas de baixo custo barateiam o seu processo de produção e obtenção de biomoléculas de grande importância comercial (Li *et al*., 2021). A produção de enzimas, por exemplo, pode ser obtida utilizando meios quimicamente definidos, através da fermentação submersa (FS) – que elevam o valor da matéria-prima para obtenção do produto, ou a partir de biomassa lignocelulósica, por fermentação em estado sólido (FES) – que é mais abundante, de fácil acesso e economicamente mais baixo (Kamande; Omwenga; Ngugi, 2024). Dessa forma, a FES surge como uma alternativa promissora no barateamento de processos, obtenção e produção de produtos valiosos.

Na FES, os resíduos sólidos, como a BLC, são utilizados como fonte de carbono para os microrganismos, que são cultivados em uma baixa quantidade de água livre (Zhang *et al*., 2024). Esses resíduos são geralmente levados para secagem, triturados e peneirados para padronização do tamanho das partículas (Valle-Pérez *et al*., 2024). Nesse tipo de cultivo, os fungos são especialmente favorecidos e crescem em forma de um tapete micelial na superfície sólida do substrato, desenvolvendo hifas nos espaços intrapartículas (Sing *et al*., 2021), secretando enzimas que atuam na degradação do substrato e o convertem em produtos digeríveis para utilizar em seu desenvolvimento (Figura 8). Em escala laboratorial, sua realização pode ocorrer em biorreatores dos tipos de bandeja, de leito fixo, de tambor rotativo ou de leito fluidizado (Ma *et al*., 2024).

Figura 8 - Fermentação em estado sólido utilizando Erlenmeyer como biorreator.



Fonte: Autoria própria (2025).

A utilização da FES para a produção de enzimas, como celulase, geralmente resulta em alto rendimento enzimático, já que esse método de cultivo apresenta condições naturais semelhantes de crescimento fúngico, o que contribui para uma boa adaptabilidade do microrganismo (Ma *et al*., 2024). Ela ainda confere uma menor chance de contaminação por bactérias, menos necessidade de água, enzimas mais concentradas, além de garantir formas de recuperação enzimática relativamente simples, contribuindo com o baixo custo de produção de enzimas em relação a FS – que apesar de também apresentar vantagens, possui um alto consumo de energia, de água e de custos de processo (Sing *et al*., 2021; Ma *et al*., 2024). Entretanto, o controle dos parâmetros do processo de fermentação pode ser mais complexo na FES do que na FS, já que fatores como temperatura e pH são difíceis de serem monitorados e controlados, além de dificuldades na medição da biomassa para crescimento e para estudos da cinética (Leite *et al*. 2021; Ma *et al*., 2024).

Por esse motivo, apesar da FS e FES terem potencial para atenderem demandas comerciais, a FS acaba sendo a preferida em nível industrial por apresentar sistemas facilmente controlados dos fatores que influenciam o crescimento, desenvolvimento e produção enzimática quando comparada a FES, mesmo com a FES apresentando melhores rendimentos e custo-benefício (Ranjan *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2024). Com isso, esforços contínuos são exigidos

para otimizar os processos de fermentação, sejam eles em estado sólido ou submersos, para aumentar a produtividade, reduzir custos e ampliar sua produção em escala industrial a partir de microrganismos de ambientes diversos com propriedades únicas (Pereira *et al*., 2024), contribuindo assim para processos mais limpos e economicamente atrativos.

2.6 Fatores que influenciam o processo de produção enzimática por FES

Assim como em outros tipos de cultivo de microrganismos, existem alguns fatores que influenciam o processo de crescimento, desenvolvimento e atividade metabólica em FES. Em processos de fermentação de forma geral, há a influência de algumas variáveis, a exemplo da escolha do substrato e do pré-tratamento, o tipo de microrganismo, o modo de fermentação e aos seus parâmetros, como: temperatura, pH, agitação e umidade (Rani *et al*., 2024). Alguns desses fatores podem ser controlados para otimizar o processo de produção enzimática na FES, como a escolha do pré-tratamento, umidade inicial, concentração de inóculo e tempo de fermentação. Apesar da temperatura e pH durante o processo não serem facilmente controlados, a escolha da temperatura do local em que a FES será instalada também pode influenciar no desenvolvimento do inóculo (Ma *et al*., 2024).

2.6.1 Pré-tratamentos

Como a BLC possui características recalcitrantes que dificultam sua degradação, relacionada principalmente pela natureza cristalina da celulose embutida na matriz de hemicelulose e lignina, a utilização de pré-tratamentos é uma forma eficiente para facilitar o processo de degradação desse substrato, além de reduzir o custo em processos de desenvolvimento (Kumar *et al*., 2020). Existem diferentes métodos de pré-tratamentos de biomassa lignocelulósica, como químicos, físicos e biológicos, mas é o pré-tratamento biológico que vem ganhando destaque por ser uma abordagem promissora e de baixo custo, já que há um baixo consumo de energia e da dependência de produtos químicos (Jayasekara; Ratnayake, 2019; Singh *et al*., 2021).

O pré-tratamento é necessário para tornar o substrato mais acessível para ação enzimática, e os fungos realizam esse papel de forma natural na BLC como pré-tratamento biológico (Srivastava *et al*., 2022; Sutaoney *et al*., 2024; Rani *et al*., 2024). Outros tipos de pré-tratamentos contribuem com problemas através da geração de águas residuais da lavagem do material pré-tratado, que é necessário para evitar a interferência nos processos de produção pelo

produto gerado da despolimerização da BLC ou dos resíduos do pré-tratamento utilizado (Rajan *et al*., 2023; Zhang *et al*., 2024).

2.6.2 Umidade

Na FES, a umidade desempenha papel de manter a energia de trabalho necessária para o crescimento e desenvolvimento dos microrganismos, mesmo com pouco teor de água livre no sistema, em que o teor de umidade adequado promove a germinação dos esporos e formação de hifas nos fungos (Singh *et al*. 2021; Zhang *et al*., 2024). Esse fator limita o crescimento pela baixa atividade da água no substrato, contribuindo para um maior tempo no desenvolvimento dos microrganismos (Leite *et al*., 2021).

2.6.3 Concentração de inóculo

A quantidade de inóculo varia de acordo com a utilização e ajuda na padronização de células em volumes definidos a partir da contagem de esporos/conídios, obtendo-se resultados e atividades enzimáticas mais consistentes, em que geralmente utiliza-se uma concentração de 10^6 a 10^8 esporos por 100 mL ou por grama de substrato. Como não é possível utilizar um grande volume em escala industrial, a biomassa micelial geralmente é favorecida em relação ao número de esporos (Ranjan *et al*., 2023; Saldaña-Mendoza *et al*., 2024).

2.6.4 Tempo de fermentação

O tempo de fermentação pode influenciar no rendimento enzimático, já que a medida em que os microrganismos se desenvolvem, há um declínio na atividade enzimática que pode estar associado à escassez de nutrientes no sistema em relação ao número de células ativas ao longo do tempo (Karami *et al*., 2020).

2.6.5 Temperatura

A temperatura é um fator de grande importância na produção de enzimas, isso porque sua variação pode afetar o crescimento e metabolismo microbiano, além da formação e germinação de esporos (Zhang *et al*., 2024). Altas temperaturas podem levar a ruptura das estruturas de membranas, assim como desnaturação de enzimas e outras proteínas estruturais,

além de acelerar a evaporação do volume inicial de água, reduzindo a quantidade de água disponível no sistema. Enquanto baixas temperatura podem reduzir a reações metabólicas e a permeabilidade da membrana plasmática, que levam a uma redução no transporte de nutrientes (Saldaña-Mendoza *et al*., 2024; Zhang *et al*., 2024). Além disso, o aumento da temperatura pela atividade metabólica durante o processo de fermentação também deve ser considerado.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

- Avaliar a produção de celulase por fungos filamentosos da Caatinga a partir de resíduos lignocelulósicos.

3.2 Específicos

- Reativar fungos filamentosos da Caatinga previamente isolados de coletas anteriores;
- Realizar a triagem enzimática dos fungos cultivados para as enzimas celulase, amilase e pectinase;
- Coletar e preparar resíduos lignocelulósicos para utilização como substratos em fermentação em estado sólido (FES);
- Induzir a produção das enzimas pelos fungos selecionados a partir de resíduos lignocelulósicos por FES;
- Quantificar a atividade enzimática a partir dos extratos enzimáticos obtidos por FES;
- Quantificar a concentração de açúcares redutores totais e de proteínas totais dos extratos enzimáticos brutos;
- Selecionar fungos com melhor atividade enzimática para otimização do processo de produção da enzima;
- Caracterizar, identificar e depositar os fungos em micoteca certificada.

4 MATERIAL E MÉTODOS

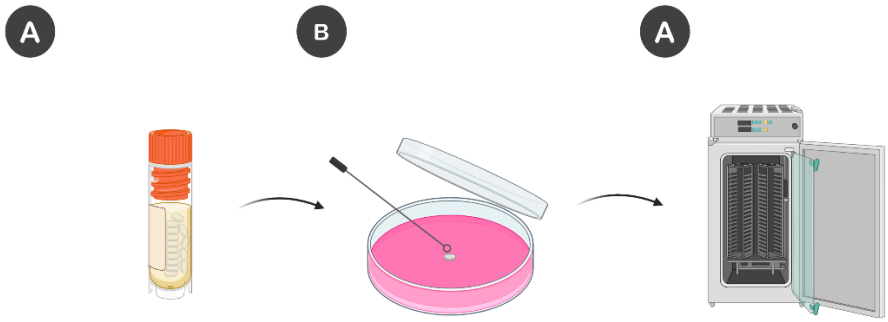
4.1 Fungos utilizados e local da pesquisa

Os fungos utilizados foram isolados de líquens de coletas anteriores em um ambiente de Caatinga – no agreste de Alagoas, realizadas no ano de 2019; preservados em criotubos com glicerol a 20% e mantidos em ultrafreezer a -80 ºC. Os procedimentos de reativação, triagem enzimática e extração de material genético para sequenciamento e identificação das espécies foram realizados no Laboratório de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia (LABMIP) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

4.1.1 Reativação e identificação dos fungos previamente isolados de coletas anteriores

Os fungos foram reativados a partir de discos de 5 mm do material anteriormente preservado, contendo fragmentos de micélio, que foram transferidos para crescimento em meio Dicloran Rose Bengal Chloramphenicol Agar (DRBC), a uma temperatura de 25 ºC, durante 7 dias (Figura 9).

Figura 9 - Reativação de fungos filamentosos da Caatinga previamente isolados e preservados

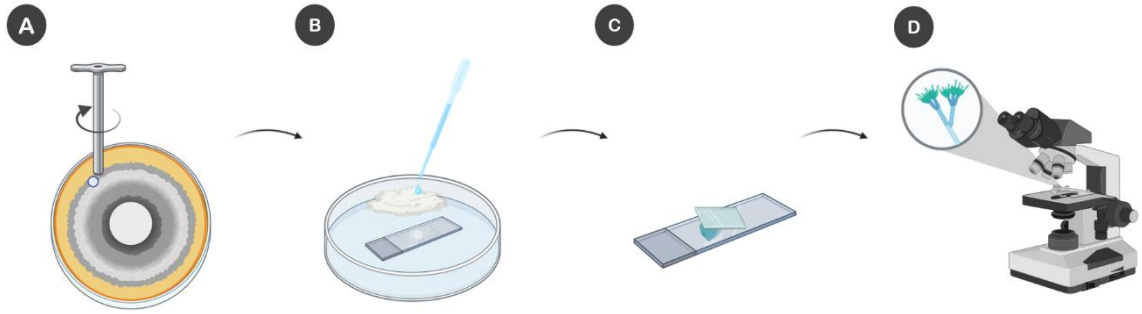


(A) Fungos preservados a -80 ºC; (B) Reativação em meio DRBC; (C) Incubação para crescimento.
Fonte: Autoria própria (2025).

Os fungos efetivamente reativados e selecionados para a produção da enzima seguiram para a identificação preliminar dos gêneros dos isolados selecionados, utilizando características macromorfológicas culturais (cor, textura, elevação, bordas) e micromorfológicas (estruturas reprodutivas como esporos, hifas e arranjo dos micélios). Na caracterização macroscópica, os fungos foram cultivados em meios diferentes (*Batata Dextrose Agar*, *Yeast Malt Agar* e *Agar Sabouraud*), enquanto na microscópica, foi utilizada a técnica de microcultivo (Figura 10). Por

outro lado, a confirmação dos gêneros e identificação taxonômica, a nível de espécie, ainda ocorrerá a partir da análise do perfil genético e molecular para inferir a filogenia dos isolados selecionados.

Figura 10 - Microcultivo dos fungos selecionados para análise micromorfológicas das estruturas reprodutivas



(A) Cultivo em meio de cultura por 7 dias; (B) Transferência de disco contendo micélio para incubação em câmera umedecida por 48 horas; (C) Coloração das estruturas reprodutivas com Azul de Algodão Lactofenol e (D) visualização com um aumento de 1000x.
Fonte: Autoria própria (2025).

4.1.2 Preparo do inóculo para fermentação

Em placas contendo os fungos com 7 dias de crescimento foi inoculada uma solução de Tween 80 a 0,1% para desagrupamento dos conídios. Em seguida, com o auxílio de uma alça de Drigalski, foi realizado uma raspagem e coleta para conseguir um maior número de propágulos. O produto da raspagem foi adicionado em um recipiente de 50 mL, onde ficou inerte por um período de 15 min para deposição dos fragmentos maiores, seguindo posteriormente para contagem e padronização em câmara de Neubauer até atingir uma concentração de 10^7 conídios/mL.

4.2 Avaliação da atividade enzimática

A triagem enzimática foi realizada de forma qualitativa para avaliar a atividade das enzimas celulase, amilase e pectinase. O meio utilizado foi o *Yeast Malt Agar* – YMA (0,3% extrato de levedura, 0,3% extrato de malte, 0,5% peptona, 1% glicose e 2% ágar) suplementado com os substratos indutores para cada enzima, substituindo a glicose como fonte de carbono (Tabela 3). Cada fungo foi testado em duplicata em placas pequenas (60x15 mm – com aproximadamente 10 mL de meio indutor).

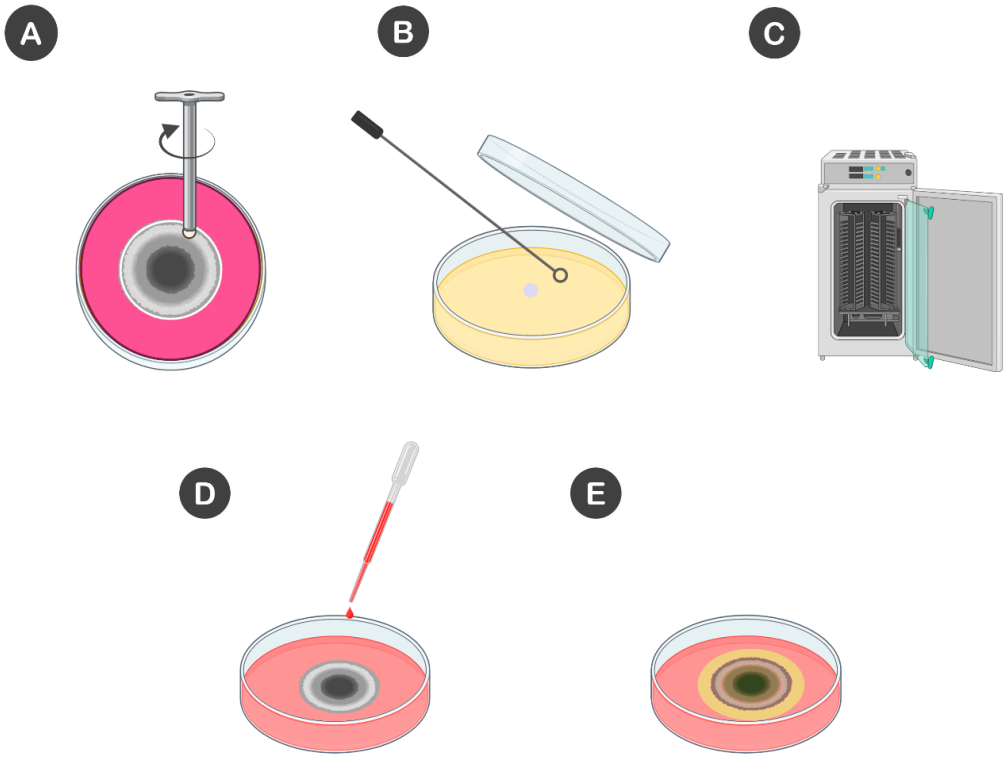
Tabela 3 - Produção de meios de cultura e de soluções reveladoras para a triagem enzimática de fungos filamentosos

Enzima	Suplemento	Solução reveladora
Celulase	YMA (1:10) com carboximetilcelulose (5 g/L^{-1}) substituindo a glicose como fonte de carbono (Martorell *et al.,* 2017).	Solução de Vermelho do Congo (2,5 g L^{-1} em tampão Tris HCl 0,1 M, pH 8). Imersão das amostras durante 15 min seguido de descarte do sobrenadante e adição de NaCl 1M por mesmo tempo. Quando positivo, presença halo de hidrólise com aspecto alaranjado e fundo da placa em tom de vermelho.
Amilase	YMA (sem glicose) suplementado com amido (10g/L) durante 4 dias até a revelação (Carrasco e*t al*., 2012; Silva *et al*., 2022).	Solução de iodo (1%) para a revelação do halo de hidrólise. Quando positivo, presença de halo de hidrólise com aspecto amarelado e com fundo em tom de roxo.
Pectinase	YMA (1:10), pH 7,0, contendo 10 g L^{-1} de pectina cítrica (Martorell *et al*., 2017; Poveda *et al.,* 2018).	Imersão do meio com solução de CTAB (brometo de cetiltrimetilamônio a 10 g L^{-1}). Quando positivo, presença de halo de hidrólise claro e com fundo da placa em tom branco.

Fonte: Autoria própria (2025).

Dessa maneira, discos de 5 mm contendo estruturas de micélio dos fungos selecionados, após 7 dias de crescimento, foram inoculados no centro de placas e mantidas em estufa incubadora durante 48 horas de incubação, a 25 ºC. A presença de halos de hidrólise ao redor das colônias nos meios indutores para cada enzima, após a imersão de soluções reveladoras, foi indicativa da presença da enzima triada (Figura 11). Enquanto os diâmetros do halo de hidrólise e da colônia foram medidos para a determinação do índice enzimático (IE), sendo este uma razão entre as duas medidas.

Figura 11 - Triagem enzimática de fungos filamentosos da Caatinga



(A) Perfuração de disco com biomassa fúngica em meio DRBC; (B) Inoculação de disco em placa com meio indutor para a enzima; (C) Incubação em estufa; (D) Tratamento com solução reveladora; (E) Halo de hidrólise. Fonte: Autoria própria (2025).

Os fungos com melhores IEs foram avaliados quanto a capacidade de hidrólise do substrato YMA + substrato indutor (composição em g/L: 3g extrato de levedura, 3g extrato de malte, 05g peptona, 5g de substrato indutor e 20g ágar) nas temperaturas de 25, 35 e 45 ºC, durante 7 dias de crescimento. O experimento foi realizado em triplicatas para cada temperatura e os fungos que apresentaram melhores IE's foram selecionados para prosseguir na produção da enzima por fermentação em estado sólido (FES).

4.3 Resíduos lignocelulósicos

Foram coletados bagaço de cana-de-açúcar e palha de milho descartados pela agroindústria da região urbana do município de Arapiraca, Alagoas, além de farelo de trigo comercial (Grings®) para serem utilizados como substrato de crescimento fúngico. O material vegetal coletado foi, individualmente, lavado em água destilada, seco em estufa de secagem a aproximadamente 55 ºC (4 a 7 dias) e moído em moinho laminar até atingir o tamanho ≤ 2 mm das partículas, sendo armazenados em seguida em recipientes plásticos e mantidos em

temperatura ambiente até a sua utilização (Figura 12).

Figura 12 - Aspecto granulométrico dos resíduos lignocelulósicos utilizados

(A) Bagaço de cana; (B) Palha de milho e (C) Farelo de trigo triturados.
Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.1 Determinação da umidade do substrato

A análise da umidade do substrato foi realizada a partir da pesagem de 5g previamente seco dos resíduos em cadinhos de alumínio antes e após serem submetidos a uma temperatura de 105 ºC por 6 horas (adaptado de Santos, 2007). A análise da umidade do material foi determinada pela Equação 1.

$$Umidade\ da\ amostra\ (\%) = \frac{(peso\ inicial - peso\ final\ da\ amostra)}{peso\ inicial\ da\ amostra} * 100 \qquad (1)$$

4.3.2 Densidade aparente dos substratos

Em uma proveta de 100 mL foram adicionados 5g de resíduo para avaliar a densidade que o material ocupa sem compactação. A determinação da densidade aparente foi realizada utilizando uma razão entre a massa (g) do resíduo utilizado sob o volume ocupado (mL), como ilustrado na Equação 2 (Correia, 2004).

$$Densidade\ aparente = \frac{massa\ (g)}{Volume\ ocupado\ (mL)} \qquad (2)$$

4.3.3 Determinação do pH dos substratos

O pH dos substratos foi avaliado utilizando 5g do resíduo em 50 mL de tampão acetato de sódio (100 mM, pH5), seguido pela agitação a 180 rpm durante 30 min, para simular as condições de recuperação dos extratos enzimáticos obtidos pela FES. A solução agitada foi filtrada em papel filtro para separação da fase sólida, enquanto a fase líquida foi avaliada utilizando pHmetro digital devidamente calibrado com as soluções padrões.

4.3.4 Umidade inicial da amostra para a fermentação em estado sólido

O teor de umidade inicial escolhido para a FES foi de 60%, acrescentado um volume total de 7,5 mL de água destilada – incluindo o volume da suspensão de conídios em solução de água destilada + Tween 80 a 0,1%, para 5g de substrato. O percentual foi calculado a partir da Equação 3 (Ambrozim, 2019).

$$V_{ss} = m_{ss} = \frac{U.M}{100-U} \quad (3)$$

Onde V_{ss} (mL) se refere ao volume de água a ser adicionado, considerando equivalência a sua massa em g (m_{ss}) necessária para atingir o teor de umidade U (%), utilizando uma massa em g (M) do material sólido. Logo, foi acrescentado 7,5 mL de águas destilada para 5g de resíduos.

4.4 Fermentação em Estado Sólido (FES) e obtenção do extrato enzimático bruto

Para a produção da enzima, Erlenmeyers de 125 mL foram utilizados como biorreatores (Figura 13), onde uma suspensão de $3{,}4x10^7$ conídios foi inoculada em 5g do resíduo escolhido – devidamente esterilizado em autoclave. A adição de água destilada foi realizada até atingir uma umidade de 60%, seguindo para incubação por 336h (14 dias) a 27 ºC, em estufa incubadora (adaptado de Silva *et al*., 2018).

A recuperação do extrato enzimático bruto foi realizada em intervalos de 48h, 168h e 336h, acrescentando 10 mL de tampão de acetato de sódio (100 mM, pH5) por grama de substrato nos biorreatores utilizados, e submetidos a 180 rpm de agitação por 30 min sob abrigo da luz. Em seguida, a mistura foi filtrada em papel filtro e centrifugada por 10 min (15.000g)

para a obtenção do extrato enzimático bruto. Os extratos foram armazenados em tubos Falcon de 15 mL a -20 ºC até a determinação enzimática.

Figura 13 - Processo de produção e recuperação enzimática por FES utilizando Erlenmeyers como biorreatores

Fonte: Autoria própria (2025).

4.5 Determinação da atividade enzimática

Para reduzir a concentração dos extratos enzimáticos brutos para as avaliações enzimáticas, cada amostra foi diluída para a concentração de 10% utilizando tampão acetato de sódio nas mesmas condições das amostras, enquanto a determinação enzimática foi realizada pelo método colorimérico de ácido 3,5-dinitrossalicílico (DNS). A atividade enzimática foi determinada de forma individual para celulase e amilase com seus respectivos substratos, a partir do meio reacional contendo: 50 µL do extrato enzimático bruto, 100 µL de solução a 1% com substrato indutor (carboximetilcelulose – CMC, para celulase, e amido solúvel para amilase) preparados em tampão de acetato de sódio (0,1 M, pH 5). Esse meio foi incubado a 50 ºC por 60 min, seguido posteriormente da adição de 150 µL reagente DNS (constituído por: solução A = 10g/L de DNS dissolvido em 200 mL de NaOH; + solução B = 300g/L de tartarato sódio e potássio dissolvido em 500 mL de água destilada, com volume final corrigido com água

destilada na proporção para 1L) para interromper a reação (Vasconcelos, Pinto e Aragão, 2013), e novamente submetido a incubação a uma temperatura de 100 ºC por 10 min e posterior adição de 700 µL de água destilada para diluição e resfriamento (adaptado de Filho *et al*., 1993; Silva *et al*., 2018).

A liberação de açúcares redutores foi determinada em espectrofotômetro a 540 nm (Miller, 1959), utilizando uma curva padrão para D-glicose preparada a partir da concentração final de $1g/L^{-1}$. Já a atividade enzimática para cada enzima (UI/mL^{-1}) foi definida como a quantidade necessária da enzima para a liberação de 1 µmol de açúcar redutor na unidade de tempo/mL (Equação 4), de acordo a curva padrão de glicose (Mallagutti, 2015).

$$UI = \frac{1}{\varepsilon} * \frac{Vr}{Ve} * \frac{1}{T} * 1000 * Abs \quad (4)$$

Em que:

UI = Unidade de atividade;

Ɛ = Valor obtido através da equação da curva de glicose;

$$\varepsilon = a * Massa \text{ da glicose}$$

a = a da reta da curva padrão de glicose

Vr = Volume da reação (tampão + extrato enzimático bruto), em mL;

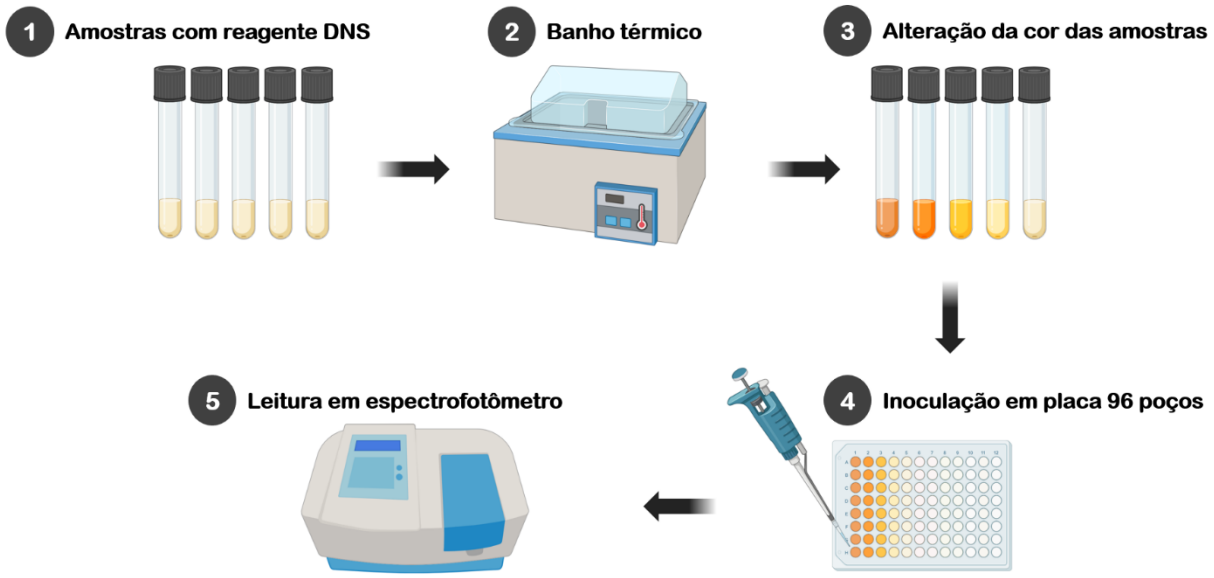
Ve = Volume do extrato enzimático bruto utilizado no ensaio, em µL;

T = Tempo de reação enzimática, em minutos;

Abs = Média da absorbância das triplicatas.

Para controle da concentração de açúcares redutores totais (ART) presentes nas amostras, ensaios contendo somente os extratos enzimáticos brutos diluídos utilizando acetato de sódio como substituto do substrato (Subseção 4.5.3). Enquanto o branco dos ensaios enzimáticos consistiu em 50 µL acetato de sódio, substituindo as amostras, em 100 µL do substrato. Todos os ensaios foram submetidos ao método colorimétrico do DNS para posterior leitura em espectrofotômetro, e um controle negativo foi aplicado utilizando um extrato de cada substrato sem ação do inóculo para remover a cor das amostras (Figura 14).

Figura 14 - Método colorimétrico utilizando DNS para a quantificação de açúcares redutores e montagem da curva padrão de D-glicose



Fonte: Autoria própria (2025).

4.5.1 Quantificação de açúcares redutores totais

Para avaliar a quantidade de açúcares redutores totais presentes nos extratos enzimáticos brutos, uma mistura de 50 µL dos extratos foram adicionados a 100 µL de acetato de sódio (0,1 M, pH 5), seguido de 150 µL de reagente DNS e levado em banho termostático em água fervente (100 ºC). A adição de 700 µL de água destilada foi adicionada a mistura reacional para resfriamento e posterior leitura em espectrofotômetro também à 540 nm, permitindo a determinação da concentração de açúcar redutor total (mg/mL^{-1}) através dos valores de absorbância e calibração do DNS para D-glicose.

4.5.2 Determinação de proteínas totais

A quantificação de proteínas totais presentes nos extratos enzimáticos brutos foi realizada através do *Pierce BCA Protein Assay kit* (*Thermo Scientific*®, 23227), seguindo as orientações do fabricante e utilizando diferentes concentrações de albumina de soro bovino (BSA) como padrão (2000 mg/L^{-1}). Os ensaios consistiram em 200 µL do reagente (A+B), somado a 25 µL das amostras, que seguiram para agitação por 30 segundos e incubadas a 37ºC por 30 minutos. Após o período de incubação, as amostras foram lidas a 562 nm em espectrofotômetro e o resultado foi expresso em mg/L utilizando a curva padrão de BSA.

4.5.3 Análises estatísticas dos ensaios enzimáticos

Os valores obtidos a partir das análises enzimáticas, na quantificação de açúcares redutores totais e de proteínas totais presentes nas amostras, assim como das atividades enzimáticas utilizando meios indutores para avaliação dos extratos enzimáticos, foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), utilizando o software estatístico SISVAR na versão 5.6, e os fatores significativos foram aplicados ao Teste de Tukey a 5% de probabilidade (Ferreira, 2019).

4.6 Otimização do processo de produção da enzima

Os fungos selecionados, assim como o substrato lignocelulósico que apresentou uma melhor atividade após a recuperação do complexo enzimático nos diferentes tempos de fermentação, foram selecionados para avaliação da produção da enzima a partir de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), fixando as variáveis de acordo com os resultados do experimento de fermentação anterior. A atividade enzimática foi utilizada como principal variável resposta, enquanto a concentração de açúcar redutor e proteína total das amostras também foram avaliadas.

Dessa forma, foram utilizadas diferentes concentrações do substrato escolhido (g/L) e percentuais de umidade inicial do processo de fermentação de acordo com o software estatístico *Protimiza Experimental Design*, enquanto a temperatura (28 ºC), concentração de inoculo ($0{,}68x10^7$/g) e tempo de fermentação (7 dias) foram determinados previamente ao planejamento experimental e fixados para a condução. As variáveis determinadas pelo DCCR foram avaliadas três níveis: baixo (-1), médio (0) e alto (+1), a partir de 11 ensaios (Tabela 4). Os resultados obtidos foram verificados pela análise de variância (ANOVA) e um modelo matemático foi obtido, representando os parâmetros ideais para a obtenção máxima da enzima.

Tabela 4 - Matriz do Delineamento Composto Central Rotacional da aplicação das variáveis

Variável	**Unidade**	**-1**	**0**	**+1**
Concentração de substrato	g	3	5	7
Umidade	%	50	60	70

Fonte: Autoria própria (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Triagem enzimática de celulase, amilase e pectinase

Ao todo, foram realizadas tentativas de reativação para 38 fungos, que apresentaram dificuldade para crescimento. Desses, 12 foram efetivamente reativados, crescidos e seguiram para a avaliação da atividade enzimática, dos quais 8 apresentaram atividade apenas para celulase, e 6 com os melhores índices enzimáticos (IEs), enquanto o restante não apresentou atividade para nenhuma das outras enzimas testadas (amilase e/ou pectinase). Após a determinação do índice enzimático (Tabela 5), somente os que apresentaram um IE superior a 1,50 (Belmont-Monefusco *et al*., 2020) foram selecionados (Figura 15). Estes prosseguiram para o teste de otimização para a produção da enzima em diferentes temperaturas (25, 35 e 45 ºC).

Tabela 5 - Amostras de isolamento e índice enzimático dos fungos reativados, positivos para celulase, avaliados após 48h de crescimento

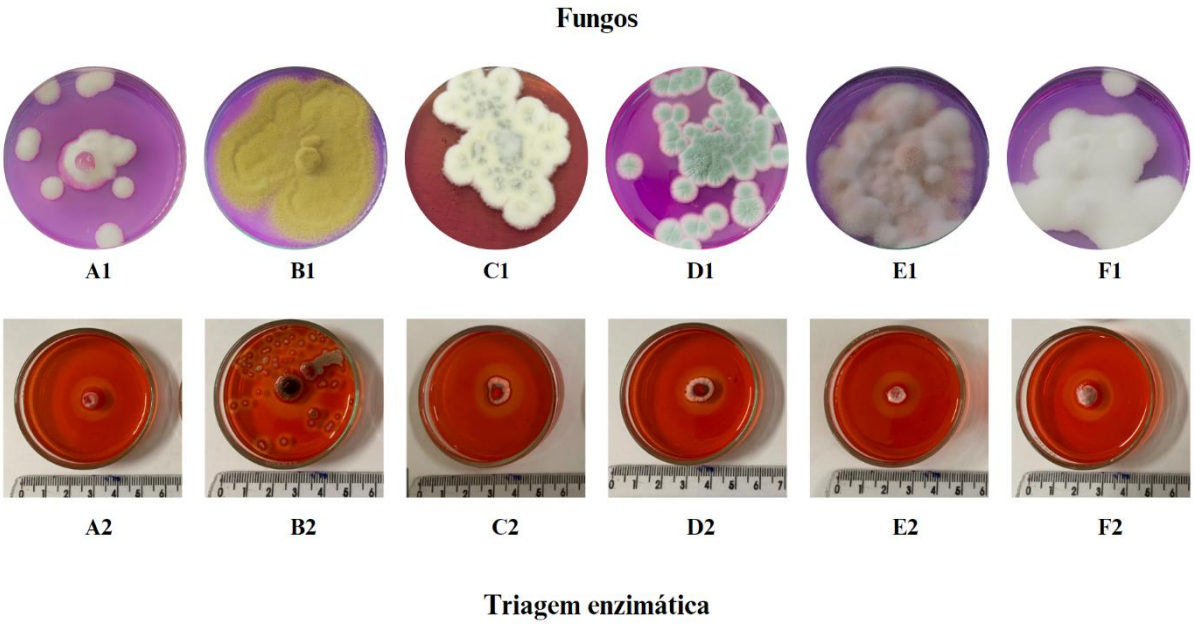
Fungo	Líquen de isolamento	Substrato de adesão	Local da coleta	Índice Enzimático (IE)
HLC2	*Xanthoparmelia plittii* (Gyeln.) Hale (crostoso)	Sedimento com rocha	Santana do Ipanema (Reserva Tocaia)	2,12 ± 0,01
3.LCL1	*Ramalina fastigiata* (fruticoso)	Córtex de árvore umbuzeiro	Santana do Ipanema (Serra do Gugi)	2,10
2.LCL2	*Xanthoparmelia plittii* (Gyeln.) Hale (crostoso)	Sedimento com rocha	Santana do Ipanema (Reserva Tocaia)	2,05 ± 0,07
ELC1	*Ramalina fastigiata* (fruticoso)	Córtex de árvore umbuzeiro	Santana do Ipanema (Serra do Gugi)	2,00
1LCL2	*Xanthoparmelia plittii* (Gyeln.) Hale (crostoso)	Sedimento com rocha	Santana do Ipanema (Reserva Tocaia)	1,95 ± 0,08
KLC2	*Xanthoparmelia plittii* (Gyeln.) Hale (crostoso)	Sedimento com rocha	Santana do Ipanema (Reserva Tocaia)	1,73

Fonte: Autoria própria (2025).

Resultados semelhantes a partir da predominância da atividade celulolítica de fungos do ambiente de Caatinga já foi observada entre isolados da rizosfera de cactáceas (Almeida, 2020).

Isso pode ser explicado, possivelmente, pelo fato de a celulose ser o polissacarídeo mais abundante do planeta, além de ser o componente principal em células e tecidos vegetais, podendo estar presente com maior disponibilidade em solos da Caatinga e ser utilizado como fonte de carbono para o desenvolvimento fúngico e síntese enzimática.

Figura 15 - Fungos filamentosos selecionados a partir da determinação do índice enzimático



Fungos selecionados crescidos em meio DRBC: (A1) HLC2; (B1) 3.LCL1; (C1) 2LCL1; (D1) ELC2; (E1) 1LCL2; (F1) KLC2. Triagem enzimática para celulase dos fungos selecionados em meio indutor (A2 a F2), na mesma ordem.
Fonte: Autoria própria (2025).

Em geral, os 6 fungos selecionados foram isolados de líquens de um ambiente de Caatinga e apresentaram características morfológicas semelhantes, com texturas algodonosas em maioria e com colorações entre branco, marrom e verde-acinzentado (Tabela 6). Esses fungos celulolíticos prosseguiram para o processo de hidrólise enzimática do substrato de cultivo em diferentes temperaturas.

Tabela 6 - Caracterização morfológica macroscópica dos fungos selecionados na triagem enzimática com atividade para celulase

Fungo	Cor da colônia	Borda/formato da colônia	Fundo da Colônia	Superfície da colônia	Textura da colônia	Elevação da colônia
HLCL2	Branca	Filamentosa e circular	Claro, sem sulcos	Filamentosa	Algodonosa	Elevada
3LCL1	Marrom	Filamentosa e irregular	Escuro, com sulco	Filamentosa	Aveludada	Elevada
2LCL2	Cinza-esverdeado no centro e branco nas bordas	Filamentosa e circular	Claro, sem sulcos	Filamentosa	Cotonosa	Pulvinada
ELC2	Cinza-esverdeado no centro e branco nas bordas	Filamentosa e circular	Claro, com sulcos	Filamentosa	Aveludada	Umbilicada
1LCL2	Branca-rosada	Filamentosa e circular	Claro, sem sulcos	Filamentosa	Algodonosa	Elevada
KLC2	Branca	Filamentosa e circular	Claro, sem sulcos	Filamentosa	Algodonosa	Elevada

Fonte: Autoria própria (2025).

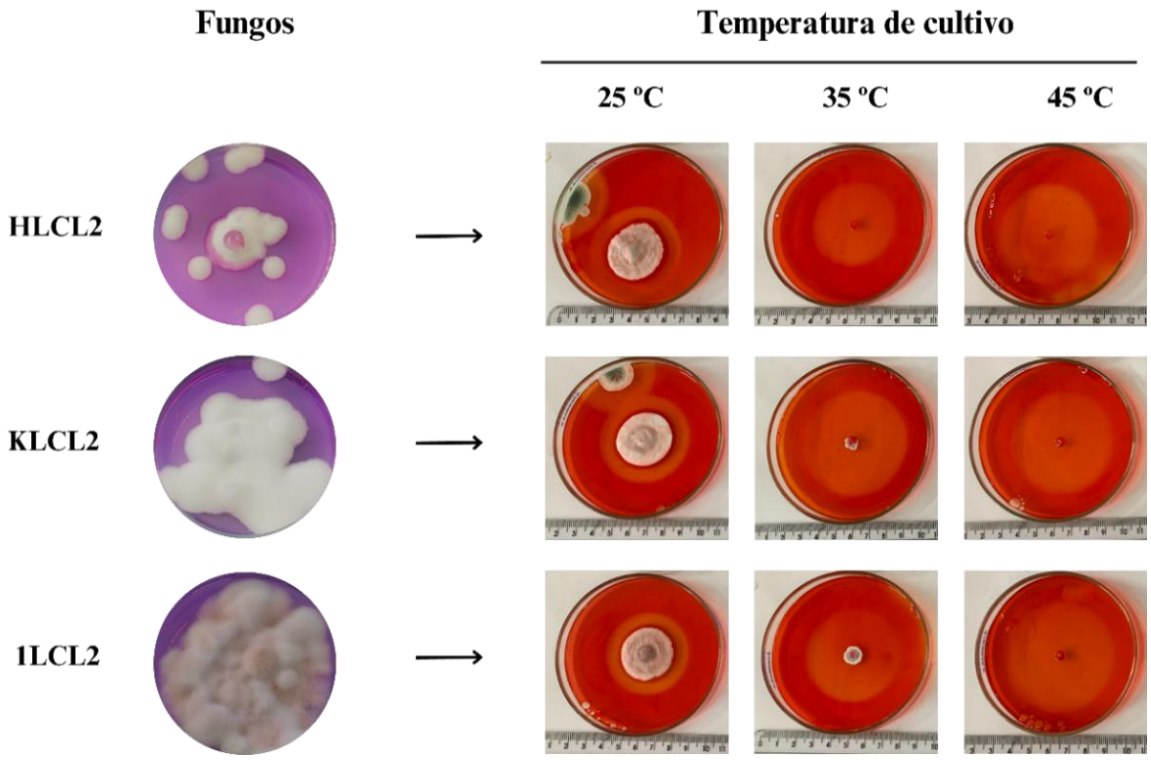
Com o teste de otimização, 3 fungos foram selecionados para prosseguir com a produção da enzima utilizando resíduos lignocelulósicos como fonte indutora, dos quais o maior IE foi obtido na temperatura de 45 ºC (Tabela 7). Nessa temperatura não houve o crescimento de biomassa fúngica ao redor do disco inoculado, somente a hidrólise do substrato (Figura 16), com IEs atingindo 11,67 para o fungo KLC2; 11,13 para HLC2; e 10,60 para 1LCL2. Isso porque próximo a faixa de 50 ºC os fungos apresentam dificuldade no crescimento de micélio e esporos, apesar da alta atividade metabólica (Lodha; Pawar; Rathd, 2020), o que pode indicar uma maior estabilidade da enzima mesmo em temperaturas mais altas.

Tabela 7 - Índice enzimático de celulase produzida em diferentes temperaturas por fungos isolados da Caatinga, avaliados após 7 dias de crescimento.

Fungo	Índice Enzimático por temperatura		
	25 ºC	35 ºC	45 ºC
KLC2	1,55 ± 0,05	7,38 ± 0,19	11,67 ± 0,19
HLC2	1,45 ± 0,01	9,00 ± 0,49	11,13 ± 0,34
1LCL2	1,66 ± 0,28	5,41 ± 0,91	10,60 ± 0,65

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 16 - Hidrólise enzimática de celulase em meio indutor, por fungos filamentosos, sob diferentes temperaturas



Fonte: Autoria própria (2025).

Características como essas são importantes na produção de enzimas em larga escala, podendo ser utilizadas em tecnologias de fermentação, como a de fermentação em estado sólido (FES), que é de baixo custo e utiliza resíduos lignocelulósicos como fonte de carbono para desenvolvimento fúngico e síntese de enzimas, o que contribui para a valorização de resíduos e barateamento nos processos de produção enzimática, além de bons rendimentos (Castro-Ochoa *et al*., 2023; Vale-Pérez *et al*., 2024).

Levando em consideração que a BLC é constituída por uma matriz de polissacarídeos complexos, ao entrar em contato com o substrato de cultivo os fungos podem ativar mecanismos de regulação de síntese enzimática para a produção de mais de uma enzima para facilitar o processo de degradação para obtenção de energia (Liu; Qu, 2021; Christopher *et al*., 2023; Guo *et al*., 2025). Por esse motivo, uma nova triagem para avaliar a atividade enzimática nos extratos enzimáticos obtidos a partir da FES de diferentes resíduos lignocelulósicos foi realizada. Nessa nova triagem, foram avaliadas somente as atividades de celulase e amilase.

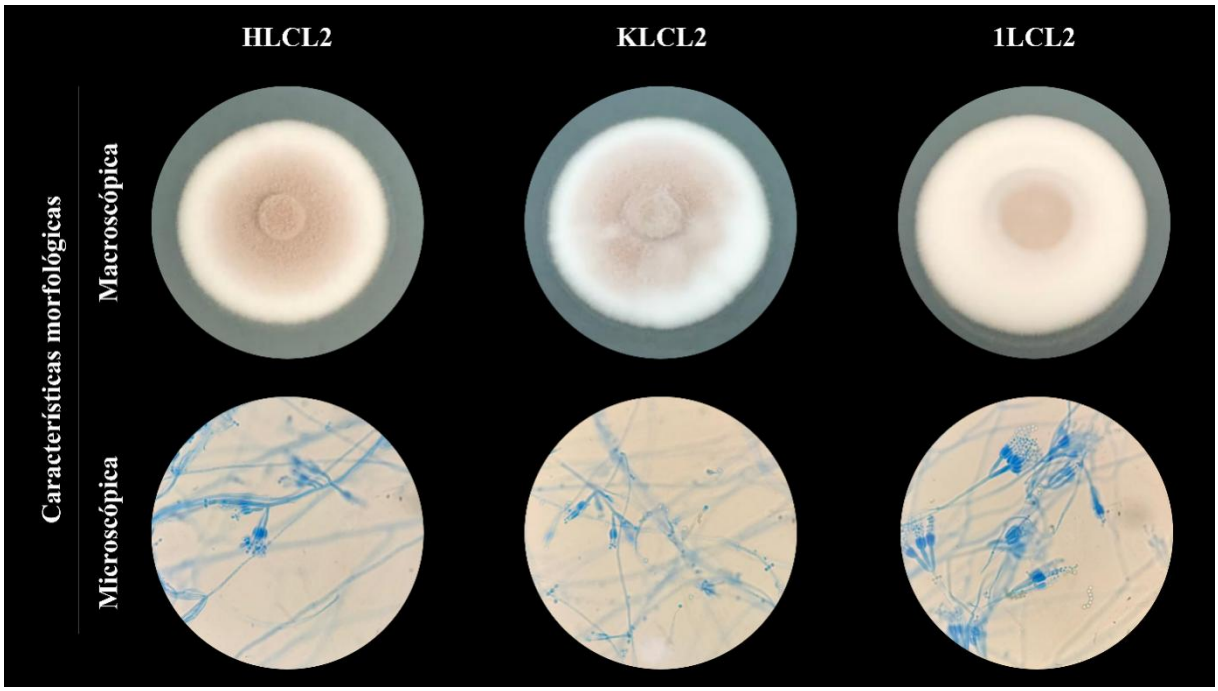
3.1 Identificação preliminar dos fungos selecionados para a produção enzimática através da tecnologia de Fermentação em Estado Sólido

Os isolados liquênicos HLCL2, KLCL2 e 1LCL2 apresentaram características morfológicas semelhantes, com coloração entre branco e bege e com textura algodonosa, sendo identificados preliminarmente como pertencentes ao gênero *Penicillium* (Figura 17), por apresentarem segmentação das estruturas reprodutivas e agrupamento enfileirado dos conídios bastante característico desse gênero (Visagie *et al*., 2014; Sciortino, 2017; Tsang *et al*. 2018; Liang *et al*., 2024). A biomassa dos isolados foi coletada e seu material genético foi extraído para análises moleculares. Entretanto, as amostras ainda seguirão para sequenciamento e identificação a nível de espécie para inferir a filogenia dos isolados. Além disso, os isolados serão depositados em micoteca certificada para viabilizar o acesso em novos estudos e ensaios.

Representantes desse gênero já foram relatados a partir de isolados do ambiente de Caatinga, capazes de produzir, inclusive, amilase (Silva *et al*., 2022; Silva *et al*., 2024). Enquanto associações com fotobiontes na formação de liquens já foram relatadas em ambientes diversos e apresentaram grande potencial biotecnológico (Rahardiyan; Moko, 2023; Devi; Tayung, 2024; Kawakami *et al*., 2024; Lindsay *et al*., 2024).

Quando representantes de *Penicillium* foram utilizados na produção de celulase através da FES de resíduos lignocelulósicos, enzimas com propriedades termoestáveis e tolerantes a variações de pH foram observadas. Ao utilizar *Penicillium roqueforti* na FES de resíduos agroindustriais sem qualquer tipo de pré-tratamento, uma maior atividade enzimática de celulase foi obtida a 50ºC e demostrou estabilidade entre 40 a 80 ºC, enquanto que com variações de pH, sua estabilidade foi observada na faixa de 4 a 5 (Gomes *et al*., 2024). Similarmente, ao aplicar *Penicillium crustosum* em FES de material lignocelulósico, uma maior termoestabilidade foi observada entre 40 e 50 ºC, com atividade máxima da enzima a 55 ºC, enquanto a estabilidade a variações de pH foi observada em torno de 5 ± 0,5 (Espinoza-Abundis *et al*., 2023).

Figura 17 - Características morfológicas das estruturas reprodutivas dos fungos identificados preliminarmente como pertencentes ao gênero *Penicillium,* cultivados em meio BDA à uma temperatura de 25 ºC, visualizadas com em um aumento de 1000X e coradas com Azul de Algodão Lactofenol



Fonte: Autoria própria (2025).

3.2 Caracterização dos resíduos ligocelulósicos utilizados para FES

Os substratos foram caracterizados quanto ao pH, teor de umidade e densidade aparente (Tabela 8). Em relação ao teor de umidade, o farelo de trigo apresentou um percentual maior (10,28%) quando comparado aos demais substratos. Já a palha de milho se apresentou como relativamente mais ácida (5,05) do que o bagaço de cana e farelo de trigo, que apresentaram valores semelhantes entre si (5,27 e 5,30, respectivamente). Já na densidade aparente, o bagaço de cana foi o que apresentou menor valor entre os três resíduos, levando esse substrato a ocupar um volume maior em um recipiente quando comparado a palha de milho e farelo de trigo.

Tabela 8 - Caracterização dos substratos agroindustriais utilizados na Fermentação em Estado Sólido (FES)

Parâmetros	Bagaço de cana	Palha de milho	Farelo de trigo
Umidade (%)	8,05	7,22	10,28
pH	5,27	5,05	5,30
Densidade aparente (g/mL)	0,14	0,38	0,29

Fonte: Autoria própria (2025).

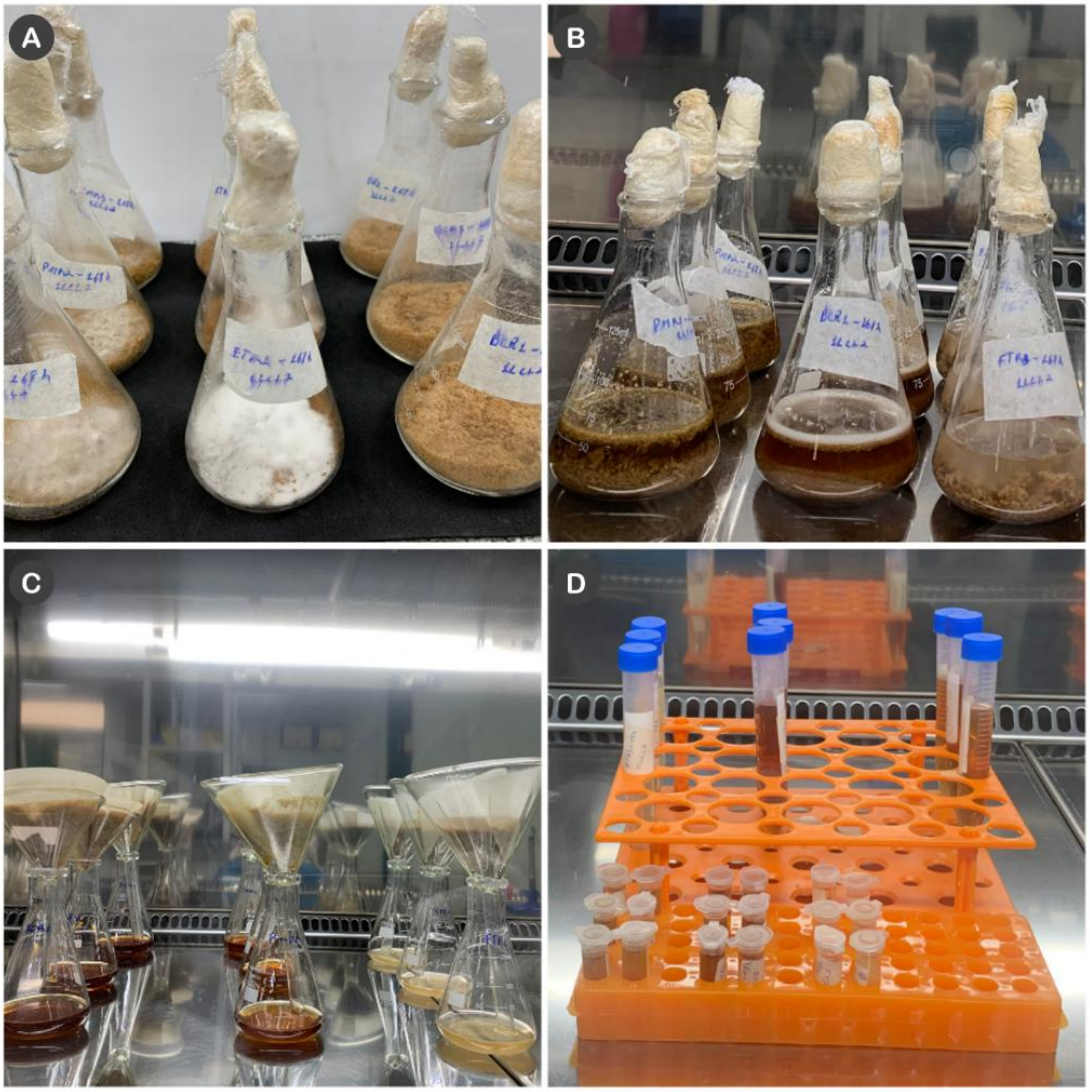
A baixa densidade aparente do substrato contribui para a presença de espaços vazios e permite a troca de gases no sistema de cultivo, o que é favorável ao desenvolvimento de microrganismos ao se trabalhar com a tecnologia de FES (Santos *et al*., 2021). Essa característica somada a um percentual maior de umidade presente no próprio substrato pode favorecer a adaptação do fungo.

3.3 Fermentação em estado sólido utilizando resíduos lignocelulósicos

Após o período de fermentação e recuperação dos extratos enzimáticos, os filtrados foram centrifugados, armazenados em tubos do tipo Falcon e mantidos a -20 ºC para as determinações posteriores da atividade enzimática (Figura 18). Esse material armazenado foi denominado de extrato enzimático bruto. Os extratos obtidos a partir do bagaço de cana apresentaram uma coloração mais escura (castanho escuro) quando comparado aos demais, seguido da palha de milho (castanho claro). Enquanto os extratos obtidos do farelo de trigo tinham um aspecto mais claro e amarelado.

Uma maior quantidade de biomassa fúngica visível em forma de tapete foi observada em todos os fungos testados nos biorreatores contendo farelo de trigo como fonte de carbono, seguido de palha de milho, ao longo da FES, sugerindo maiores atividades metabólicas e consumo de AR nesses substratos para crescimento dos fungos. Dessa forma, o potencial hidrogeniônico dos extratos recuperados foi avaliado após os períodos fermentativos de 48h, 168h e 336h, para verificar se o consumo ou liberação de produtos provenientes da atividade metabólica dos fungos alteraria o pH dos extratos produzidos com as diferentes fontes de carbono (Tabela 9).

Figura 18 - Recuperação do extrato enzimático bruto de fungo filamentoso após fermentação em estado sólido utilizando palha de milho, bagaço de cana-de-açúcar e farelo trigo em Erlenmeyers como biorretores



(A) Crescimento de biomassa fúngica em FES; (B) Recuperação do complexo enzimático; (C) Filtragem para obtenção do extrato enzimático bruto e (D) Armazenamento dos extratos centrifugados.
Fonte: Autoria própria (2024).

Tabela 9 - Valor médio das variações de pH dos extratos enzimáticos brutos recuperados após fermentação por substrato utilizado

Fungo	Palha de milho			Bagaço de Cana			Farelo de trigo		
	48h	168h	336h	48h	168h	336h	48h	168h	336h
HLCL2	4,96	5,20	4,66	4,54	4,67	4,29	5,67	5,22	4,97
KLCL2	5,04	5,04	5,07	4,67	4,63	4,66	5,31	5,35	5,54
1LCL2	5,07	4,93	5,05	4,67	4,54	4,60	5,28	5,20	5,40

Fonte: Autoria própria (2025).

Nos extratos enzimáticos obtidos a partir do BCA, o pH apresentou características mais

ácidas, com valores variando de 4,67 a 4,29 entre os fungos testados nos diferentes tempos de fermentação, indicando que a ação metabólica dos fungos ocasiona a acidificação do meio, enquanto FT apresentou valores menos ácidos, com valores mais próximos ao do próprio pH inicial do substrato, mas com maior variação ao longo do tempo, indo de 5,67 a 4,97. Já entre os fungos, KLCL2 apresentou maior estabilidade do pH ao longo da FES em todos os substratos, com tendência a ter valores maiores no último dia de fermentação, enquanto 1LCL2 tende a acidificar o meio com 168h e diminuir a acidez dos substratos com 336h.

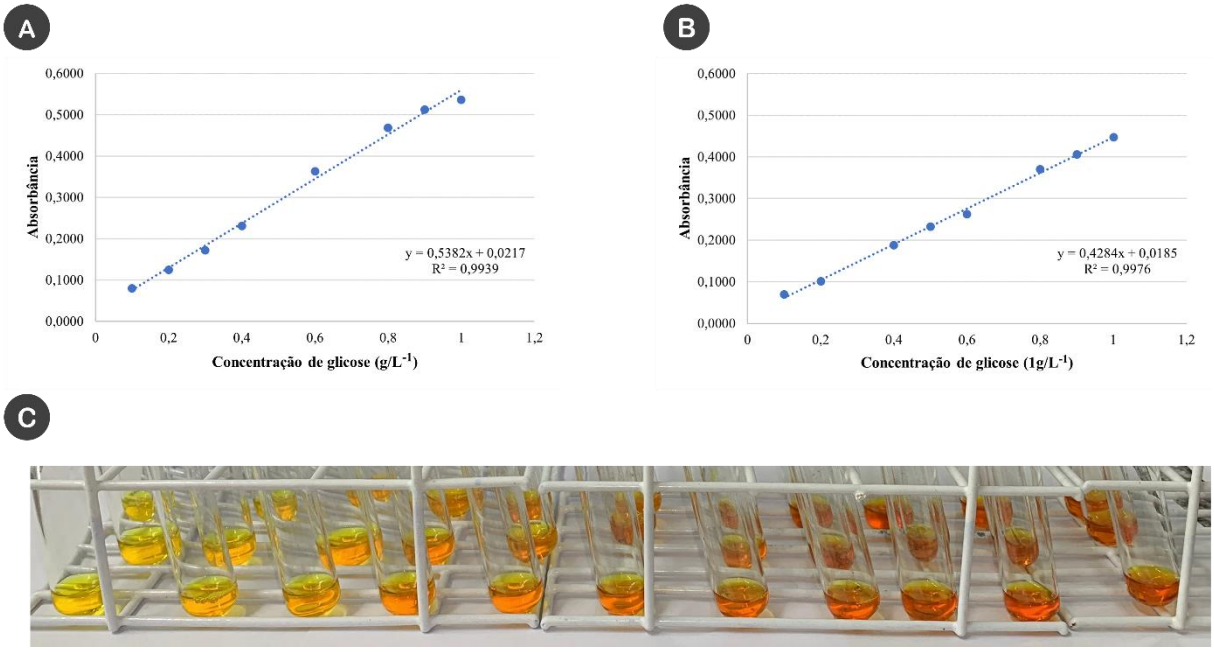
O pH é uma variável dificilmente controlável ao se trabalhar com FES, isso se deve principalmente a baixa quantidade de água livre no sistema, tornando a possibilidade de adição de reagentes ácidos/alcalinos para corrigi-lo pouco indicada, já que isso pode levar a problemas como alteração do percentual de umidade e dificuldades para homogeneização (Santos *et al*., 2021). Além disso, pH do meio de cultivo pode afetar o metabolismo e a produção de enzimas durante o crescimento microbiano, isso porque o crescimento de fungos é suscetível à concentração de íons de hidrogênio presente no meio, assim como seu efeito nas superfícies celulares e da disponibilidade de nutrientes, indiretamente (Lodha; Pawar; Rathd, 2020; Zhao *et al*., 2024). Por esse motivo, fungos capazes de se desenvolver em uma faixa ampla de pH podem ser capazes de se desenvolver melhor mesmo com variações.

No que se refere a uma faixa de pH para melhores atividades enzimáticas, um fungo isolado de solo e identificado como *Penicillium oxalicum* apresentou melhor atividade de celulase em condições mais ácidas, com pH entre 2 e 5 (Zhao *et al*., 2024). De forma semelhante, outro representante do gênero *Penicillium* isolado de material vegetal em decomposição apresentou atividades ótimas de diferentes celulases a uma faixa de pH de 4 a 6, enquanto variações para faixas mais alcalinas diminuíram a atividade enzimática (Silva-Mendoza *et al*., 2020).

3.4 Caracterização dos extratos enzimáticos brutos

As concentrações de açúcares redutores totais presentes nos extratos enzimáticos brutos provenientes do processo de hidrólise enzimática da BLC por FES (Tabela 10) foi obtida através da equação da curva padrão de D-glicose (g/L^{-1}), a partir do método colorimétrico de DNS (Figura 19). Como a concentração das amostras utilizadas nos ensaios enzimáticos foi a 10%, o valor obtido após aplicação da equação da curva padrão nas absorbâncias médias das amostras foi multiplicado por 10, como fator de correção da diluição.

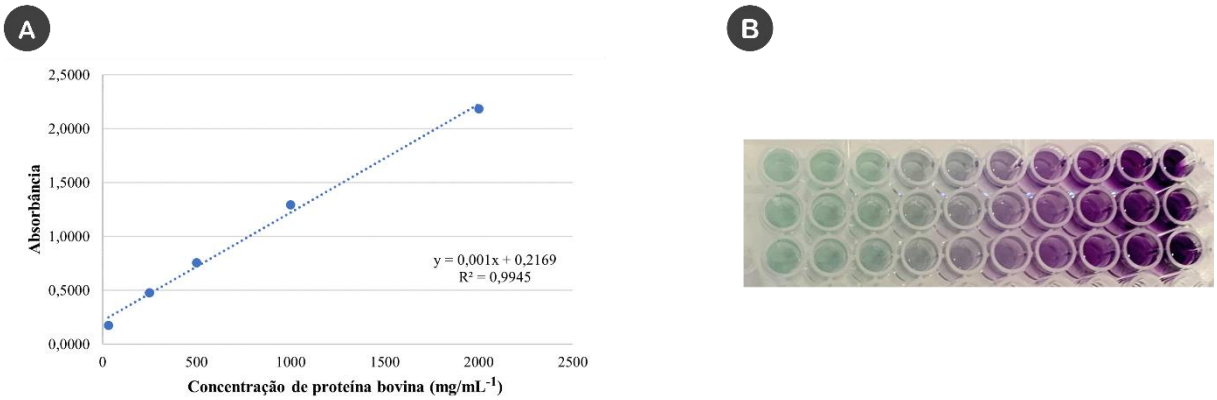
Figura 19 - Curvas de calibração para D-glicose e aspecto colorimétrico do ensaio



(A) Curva padrão de D-glicose utilizada nos ensaios enzimáticos para avaliar a atividade de CMCase e amilase; (B) Curva padrão de D-glicose utilizada na etapa de otimização de CMCase; (C) Aspecto colorimétrico do método DNS à medida que aumenta a concentração de glicose nas concentrações de 0 a 1g/L.
Fonte: Autoria própria (2025).

Já o teor de proteínas totais presentes nos extratos enzimáticos brutos (Tabela 10) foi obtido a partir da equação da curva padrão de proteína bovina (mg/mL^{-1}), utilizando o kit comercial (Figura 20). O resultado final também foi multiplicado por 10 como fator de correção da diluição das amostras.

Figura 20 - Curva padrão de albumina bovina



(A) Curva padrão de albumina bovina; (B) Aspecto colorimétrico do ensaio da curva padrão à medida que aumenta a concentração de albumina nas concentrações de 0 a 2000 mg/mL.
Fonte: Autoria própria (2025).

A concentração de ART presentes nos extratos enzimáticos brutos variou entre as

diferentes fontes de carbono e tempos de fermentação, com o bagaço de cana apresentando níveis mais estáveis de açúcares redutores ao longo do tempo, indo de 1,31 g/L para 1,56 g/L entre os fungos utilizados. A capacidade de produção de açúcares fermentáveis provenientes do processo de hidrólise enzimática de BLC é um ponto fundamental para sua utilização em processos de produção de etanol, o que contribui ainda mais para a valorização de resíduos lignocelulósicos (Chatterjee; Mohan, 2021; Elnagdy *et al*., 2024).

Por outro lado, a fermentação utilizando palha de milho como fonte de carbono teve um maior consumo de AR pelos microrganismos ao longo do tempo, indo de 1,22 g/L a 0,30 g/L, enquanto no farelo de trigo apresentou menores disponibilidades de AR com valor máximo de 0,48 g/L e mínimo de 0,25 g/L, sugerindo maior atividade metabólica, o que pode explicar a maior quantidade de biomassa fúngica visível nesses substratos. Resultados semelhantes em relação ao consumo de AR foram observados em uma FES utilizando 5g/L de glicose no cultivo de *Penicillium crustosum*, onde seu consumo seguiu até o quase esgotamento da concentração inicial (Espinoza-Abundis *et al*., 2023).

Já entre os fungos testados a variação não foi significativa, embora o declínio das concentrações de açúcares tenha sido observado em todos os fungos e em todos os substratos a medida em que o tempo de fermentação aumentava, um comportamento já relatado (El-Sheekh *et al*., 2023). Característica essa relacionada ao crescimento fúngico, já que alguns fungos capazes de decompor a BLC utilizam mais da biomassa para crescimento micelial do que para a liberação de açúcares, sendo os que contribuem para a liberação de açúcares livres em um menor tempo os preferidos em pesquisas e produções relacionadas a biocombustíveis (Awais *et al*., 2021).

Curiosamente, o número de proteínas totais presentes nas amostras após os diferentes tempos de FES não variou significativamente entre as diferentes fontes de carbono e fungos testados, permanecendo constante com valores entre 2,17 mg/mL a 2,19 mg/mL. Entretanto, os resultados se mostraram superiores aos observados em um estudo que utilizou *Penicillium funiculosum* na fermentação submersa de palha de milho, que apresentou um período de latência no segundo dia até atingir um valor máximo de 178 μg/mL, no sexto dia de fermentação (Castro-Ochoa *et al*., 2023). Enquanto ao utilizar *Aspergillus tubingensis* em FES de palha de trigo, um valor 254,65 μg/mL foi observada após 4 dias de fermentação (Awais *et al*., 2021).

Tabela 10 - Concentrações médias de açúcar redutor total e de proteínas totais presentes nos extratos enzimáticos brutos produzidos com diferentes fontes de carbono e tempos de fermentação dos fungos utilizados

Determinações	Fonte de carbono	Tempo de fermentação (h)	Extratos enzimáticos produzidos pelos fungos		
			HLCL2	KLCL2	1LCL2*
Açúcar redutor total (g/L)	Bagaço de cana*	48*	$1,52_a$	$1,44_a$	$1,57_a$
		168	$1,44_a$	$1,56_a$	$1,52_a$
		336	$1,46_a$	$1,44_a$	$1,56_a$
	Palha de milho	48*	$1,22_b$	$1,13_b$	$1,12_b$
		168	$0,51_b$	$0,63_b$	$0,91_b$
		336	$0,48_b$	$0,52_b$	$0,52_b$
	Farelo de trigo	48*	$0,46_c$	$0,48_c$	$0,47_c$
		168	$0,46_c$	$0,48_c$	$0,47_c$
		336	$0,47_c$	$0,47_c$	$0,47_c$
Proteínas totais (mg/mL)	Bagaço de cana	48	$2,19_a$	$2,18_a$	$2,19_a$
		168	$2,19_a$	$2,18_a$	$2,19_a$
		336	$2,18_a$	$2,18_a$	$2,19_a$
	Palha de milho	48	$2,18_a$	$2,18_a$	$2,18_a$
		168	$2,17_a$	$2,17_a$	$2,18_a$
		336	$2,17_a$	$2,17_a$	$2,18_a$
	Farelo de trigo	48	$2,17_a$	$2,17_a$	$2,17_a$
		168	$2,17_a$	$2,17_a$	$2,17_a$
		336	$2,17_a$	$2,17_a$	$2,17_a$

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a concentração de açúcar redutor total, as médias seguidas de letras se referem ao tipo de substrato de obtenção entre as linhas. Destaque com * para os fatores significativos.
Fonte: Autoria própria (2025)

5.6 Atividades enzimáticas dos extratos enzimáticos brutos

A fonte de carbono se mostrou uma variável importante para a obtenção de enzimas, com atividades celulolíticas e amilolíticas positivas nos extratos obtidos pelos três fungos avaliados (Tabela 11). Entre as fontes de carbono, o BCA apresentou maiores atividades de endoglucanase e amilase, mantendo uma maior estabilidade ao longo do processo de fermentação, principalmente das amostras obtidas do fungo 1LCL2, com atividades ótimas de 9,92 UI/mL e 9,53 UI/mL, com 168h de fermentação, respectivamente. Contudo, a tendência de redução da atividade foi observada nas amostras obtidas dos demais fungos e substratos a partir desse mesmo tempo.

Já as atividades das amostras utilizando PM como fonte de carbono para os fungos demostram uma maior redução da atividade enzimática ao longo do tempo de fermentação, com atividades ótimas em 48h, mas reduzindo os valores a quase 1/3 da atividade inicial até último dia, além de valores mais baixos para endoglucanase a partir de 168h. Enquanto as amostras obtidas a partir do FT, apesar de demostrarem maiores estabilidades ao longo da fermentação, apresentaram os valores mais baixos em relação as amostras obtidas a partir das demais fontes de carbono testadas, com atividades variando de 0,48 a 1,04 UI/mL para endoglucanase e 0,95 a 1,20 UI/mL para amilase.

Embora o teor de proteínas totais presentes nos extratos brutos tenha se mostrado próximo em todas as amostras, independente do tempo de fermentação, fonte de carbono ou fungo utilizado, a atividade enzimática apresentou variações nessas mesmas circunstâncias, como visto, sugerindo que o teor de proteínas presentes nas amostras não refletiu na atividade enzimática. Isso porque, provavelmente, os fungos podem ter secretado outros metabólitos secundários em doses mais elevadas durante a hidrólise da BLC ao longo da FES, e por isso o teor de proteínas pode não ser consistente com a atividade enzimática observada nos ensaios (Awais *et al*., 2021).

Além disso, a diminuição da atividade enzimática ao logo da FES pode estar relacionada a baixa disponibilidade de nutrientes no meio e/ou do acúmulo de subprodutos da atividade metabólica, que contribuem para a degradação ou redução da vida-útil de proteínas (Boondaeng *et al*., 2024). Atividades maiores já foram observadas com 6 dias de FES ao utilizar uma concentração abaixo de 10^7 esporos, o que reduziu a quantidade de esporos por unidade de substrato, permitindo uma diminuição da fase de latência do crescimento do inóculo e assim o prolongamento da disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo (Lodha, Pawar e Rathd, 2020).

Tabela 11 - Atividade enzimática média dos extratos enzimáticos brutos produzidos com diferentes fontes de carbono e tempos de fermentação a partir dos fungos selecionados

Atividade Enzimática (UI/mL)	Fonte de carbono	Tempo de fermentação (h)	Extratos brutos enzimáticos produzidos pelos fungos		
			HLCL2	KLCL2	1LCL2*
CMCase* (Endoglucanase)	Bagaço de cana*	48*	$9{,}50_{aAB}$	$6{,}64_{aB}$	$9{,}75_{aA}$
		168	$8{,}55_{aAB}$	$7{,}20_{aB}$	$9{,}92_{aA}$
		336	$8{,}49_{aAB}$	$6{,}80_{aB}$	$9{,}62_{aA}$
	Palha de milho	48*	$6{,}63_{bAB}$	$4{,}71_{bB}$	$6{,}07_{bA}$
		168	$1{,}17_{bAB}$	$1{,}52_{bB}$	$3{,}65_{bA}$
		336	$0{,}62_{bAB}$	$0{,}58_{bB}$	$1{,}38_{bA}$
	Farelo de trigo	48*	$0{,}80_{cAB}$	$0{,}57_{cB}$	$0{,}81_{cA}$
		168	$0{,}70_{cAB}$	$0{,}52_{cB}$	$1{,}04_{cA}$
		336	$0{,}73_{cAB}$	$0{,}48_{cB}$	$0{,}96_{cA}$
Amilase	Bagaço de cana	48*	$7{,}84_{aB}$	$7{,}89_{aAB}$	$8{,}99_{aA}$
		168	$7{,}37_{aB}$	$7{,}59_{aAB}$	$9{,}53_{aA}$
		336	$6{,}36_{aB}$	$7{,}79_{aAB}$	$9{,}02_{aA}$
	Palha de milho	48*	$5{,}74_{bB}$	$6{,}35_{bAB}$	$6{,}04_{bA}$
		168	$1{,}52_{bB}$	$2{,}11_{bAB}$	$3{,}64_{bA}$
		336	$0{,}95_{bB}$	$1{,}09_{bAB}$	$1{,}51_{bA}$
	Farelo de trigo	48*	$1{,}00_{cB}$	$1{,}08_{cAB}$	$1{,}15_{cA}$
		168	$1{,}13_{cB}$	$1{,}05_{cAB}$	$1{,}20_{cA}$
		336	$0{,}95_{cB}$	$1{,}09_{cAB}$	$1{,}12_{cA}$

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. Letras minúsculas na mesma linha se referem a variação entre os substratos e, maiúsculas nas colunas se referem aos fungos testados. Destaque com * para os fatores significativos.
Fonte: Autoria própria (2025).

Apesar da redução da atividade enzimática observada ao longo do tempo nos extratos obtidos a partir da palha de milho quando utilizada como fonte de carbono, os resultados de 48h de FES demostraram-se significativos em todos os fungos avaliados nas diferentes fontes de carbono. Os valores máximos de CMCase de 6,63 e 6,07 UI/mL para os isolados HLCL2 e 1LCL2 obtidos desse substrato, respectivamente, se demostraram próximos aos obtidos por *Penicillium subrubescens* quando utilizado para a obtenção da enzima em FES a partir de sabugo de milho, com valor máximo 3,99 U/mL (Ibrahim *et al*., 2024).

Enquanto *Penicillium citrinum* e *Aspergillus clavatus,* isolados de solo, foram capazes de produzir celulase e amilase a partir da FES utilizando farelo de trigo, que seguiu para a otimização dos parâmetros de produção de ambas a enzimas (Shruthi, Achur e Boramuthi, 2020). Por outro lado, ao comparar a capacidade de produção de celulase por *Penicillium funiculosum,,* isolado de palha de moringa, nos sistemas de FS e FES com diferentes RLCs como fonte de carbono, a palha de milho apresentou melhores resultados com atividade para CMCase de 1,5 U/mL em ambos os sistemas (Castro-Ochoa *et al*., 2023).

Além disso, resultados semelhantes foram relatados ao utilizar o bagaço da cana-de-açúcar não tratado em FES como fonte de carbono para o cultivo de diferentes fungos e com um teor de umidade de 50%. Nesse cenário, *Trichoderma koningii* apresentou uma atividade ótima de endoglucanase de 8,20 UI/g a 28 ºC, enquanto um fungo pertencente ao gênero *Penicillium* teve atividade máxima de 1,22 UI/g de substrato (Salomão *et al*., 2019). Como os resultados observados na Tabela 11 também apresentaram melhores atividades de endoglucanase utilizando o BCA como substrato indutor para enzima, com destaque para as obtidas a partir do isolado 1LCL2, ambos foram escolhidos para otimização dos parâmetros de produção.

5.7 Otimização dos parâmetros de produção de endoglucanase

Ao todo, 11 ensaios foram realizados seguindo a matriz do delineamento DCCR, em que a atividade de CMCase foi utilizada como principal variável resposta. A concentração de açúcar redutor total e proteínas total dos extratos enzimáticos brutos também foram avaliados (Tabela 12).

Tabela 12 - Variáveis aplicadas ao DCCR para a produção de celulase pelo fungo 1LCL2 isolado de líquen da Caatinga utilizando bagaço da cana-de-açúcar como fonte exclusiva de carbono

Ensaio	Concentração de substrato (X_1, g)	Umidade (X_2, %)	CMCase (Y_1, UI)	Açúcar redutor total (Y_2, g/L)	Proteínas totais (Y_3, mg/mL)
1	3,00	50,00	10,53	1,22	2,19
2	7,00	50,00	10,25	1,17	2,18
3	3,00	70,00	10,14	1,10	2,18
4	7,00	70,00	10,08	1,10	2,18
5	2,17	60,00	11,07	1,26	2,18
6	7,83	60,00	11,77	1,22	2,19
7	5,00	45,86	10,88	1,27	2,18
8	5,00	74,14	8,60	1,03	2,18
9	5,00	60,00	9,72	1,18	2,18
10	5,00	60,00	10,09	1,16	2,18
11	5,00	60,00	10,14	1,25	2,18

A umidade teve uma influência negativa na produção de endoglucanase quando aplicada em um percentual acima de 60%, provavelmente devido a redução da porosidade do substrato e geração de aglomerações que podem ter reduzido o volume de gás e sua troca com o sistema a partir da diminuição da difusão de O_2 e da eliminação de CO_2 (Saldaña-Mendoza *et al*., 2024). Dessa forma, a menor atividade enzimática foi obtida utilizando um percentual de 74,14% de umidade em 5g de substrato, que resultou em uma atividade de mínima de 8,60 UI/mL. Um efeito negativo a partir do aumento do teor de umidade também foi observada em uma FES avaliando o BCA em diferentes tratamentos físico-químicos, incluído com a ausência de tratamento, para a produção de endoglucanse a partir de diferentes fungos filamentosos (Salomão *et al*., 2019).

A concentração de ART presentes nas amostras variou entre as diferentes concentrações de substrato, com valor máximo de 1,27 g/L ao utilizar 5g de substrato e um teor de umidade de 45,86%, e mínimo de 1,03 g/L com a mesma medida de substrato, mas com o teor máximo de umidade avaliado. Por outro lado, assim como no ensaio anterior, o teor de proteína total permaneceu constante em todos os ensaios.

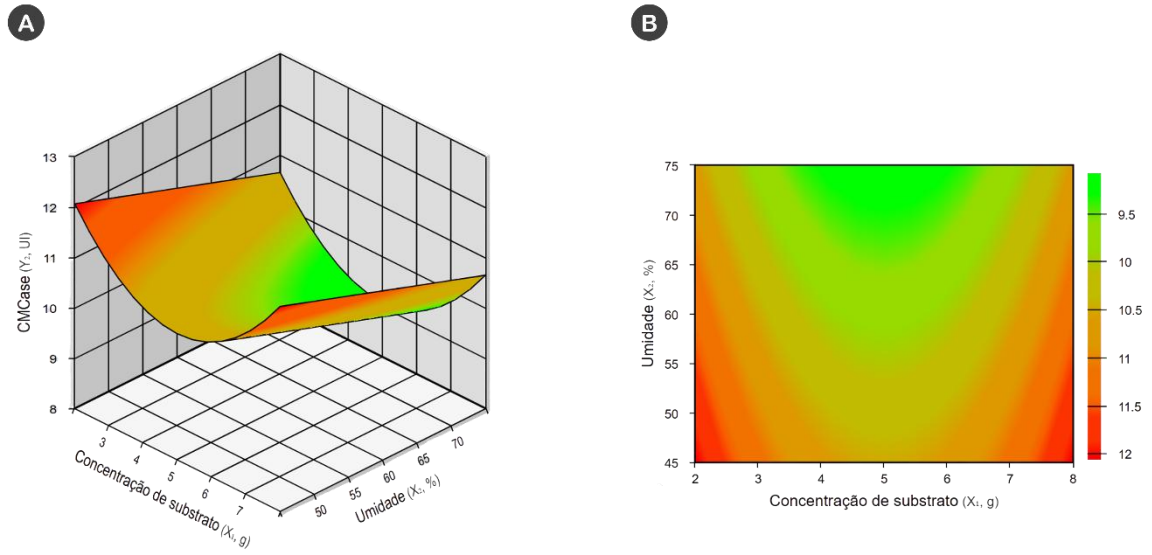
A presença de ART nos extratos representa a capacidade do fungo em hidrolisar a BLC do substrato utilizado em açúcares fermentáveis, o que pode indicar a eficiência da capacidade enzimática em degradar polissacarídeos complexos. Essa característica sugere boas perspectivas na obtenção de enzimas e sua aplicação em processos de sacarificação enzimática de biomassas celulósicas variadas para a produção de biocombustíveis a partir de outros microrganismos, processos esses que também podem ser otimizados (Mondal *et al*., 2022a;

Mondal *et al*., 2022b; Saini; Kuhad; Sharma, 2023; Panda; Maiti 2024). Um ponto importante, já que a produção de biocombustíveis a partir de matérias-primas alternativas tem sido priorizada em todo o mundo com o intuito de mitigar os impactos no meio ambiente pela dependência excessiva de combustíveis fósseis (Panda; Maiti 2024).

As condições ideais para a produção de CMCase foram observadas nos parâmetros aplicados no ensaio 6, contendo 7,83g de substrato e 60% de umidade, resultando em uma atividade de 11,77 UI/mL (Figura 21), que pode ser validada a partir do modelo matemático expresso na Equação 5:

$$Y_2 = 9{,}79 + 0{,}70\ x_1^2 - 0{,}47\ x_2 \qquad (5)$$

Figura 21 - Superfícies de resposta (A) e de contorno (B) para a atividade de endoglucanase (CMCase) produzida pelo fungo 1LCL2 em FES contendo diferentes níveis de concentração de bagaço de cana-de-açúcar (g) e teor de umidade (%)



Fonte: Autoria própria (2025).

Entretanto, o valor R < 90% obtido pela análise de variância (ANOVA) indica um baixo ajuste dos dados experimentais e sugere uma alta variabilidade em torno do valor médio (Tabela 13), provavelmente relacionada ao intervalo curto entre os parâmetros das variáveis utilizadas, sendo necessário um novo ensaio com intervalos maiores entre do teor de umidade inicial da FES, já que esta apresentou uma influência negativa quando em percentuais maiores que 60%.

Tabela 13 - Análise de variância dos parâmetros de produção de celulase em diferentes concentrações de substratos

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F_{Calc}	p-valor
Regressão	4,7	2	4,0	11,0	0,0050
Resíduos	1,7	8	0,2		
Falta de Ajuste	1,6	6	0,3	5,2	0,1714
Erro Puro	0,1	2	0,1		
Total	6,5	10			

R^2 = 73,42%
Fonte: Autoria própria (2025).

Além disso, outras variáveis podem ser acrescentadas para avaliar sua influência na produção enzimática, tais como concentração de inóculo e tempo de fermentação. Dessa maneira, como matriz de um próximo ensaio para avaliação dos parâmetros de produção e otimização de celulase em DCCR, são sugeridas as seguintes variáveis: diferentes concentrações de substrato (3, 5 e 7 g) e de inóculo (10^5, 10^6 e 10^7), dias de fermentação (3, 5 e 7) e teor de umidade (30, 45 e 60%), totalizando em 27 ensaios. Já que a concentração do inóculo também desempenha um papel fundamental na produção de celulase, uma vez que está diretamente relacionada a taxa de consumo de nutrientes do substrato ao longo do tempo (Zhao *et al*., 2024). Dessa forma, em novos ensaios essas variáveis também podem ser analisadas para padronização e melhor ajuste dos parâmetros de produção enzimática.

Nesse cenário, enzimas hidrolítticas já foram produzidas por FES e apresentaram boas atividades a partir de diferentes resíduos lignocelulósicos. Utilizando o fungo *Aspergillus niger,* isolado de diferentes amostras de resíduos agrícolas e de solo, em um sistema de FES utilizando palha de trigo como fonte de carbono, foi possível obter uma atividade de celulase de 3,254 U por grama de substrato a partir de uma suspensão de 10^6 conídios/mL/g, que seguiu para processos de otimização dos parâmetros de produção da enzima e alcançou melhores resultados com 3 dias de FES a 30 ºC, com uma atividade enzimática de 8907,2 U/g e uma concentração de açúcares redutores de 92,4 mg/g, provenientes do processo de hidrólise do substrato, sendo que ao todo foram testados inicialmente 16 diferentes substratos lignocelulósicos (El-Sheekh *et al*., 2023). Já na otimização da produção de celulase a partir de um *Aspergillus* sp. isolado de solo rico em húmus, ao ser utilizado em uma FES contendo resíduos de soja, foi possível obter melhores atividades de CMCase (3,32 U/g) e β-glicosidase (196,09 U/g) em 5 dias de incubação a 35 ºC (Boodaeng *et al*., 2024).

Processos de purificação e avaliação da influência de variações de temperatura, pH e concentração de sais na atividade da enzima são fundamentais para caracterização da atividade

enzimática, para que se possa compreender a potencial aplicação comercial da enzima obtida, além de ensaios utilizando uma endoglucanase comercial como padrão para comparação (Kamande; Omwenga; Ngugi, 2024). Entretanto, de modo geral, os resultados observados apresentam boas perspectivas para a valorização de resíduos e para o barateamento de processos de produção da endoglucanse por um isolado da Caatinga, incentivando uma economia circular a partir de insumos sustentáveis.

6 CONCLUSÃO

Os fungos filamentosos da Caatinga avaliados apresentaram atividade celulolitica de forma predominante nos ensaios qualitativos durante a triagem enzimática ao utilizar CMC como fonte de carbono, com destaque para os fungos HLCL2, KLCL2 e 1LCL2. Esses fungos foram identificados preliminarmente, a partir de análises micromorfológicas, como pertencentes ao gênero *Penicillium,* e obtiveram os melhores índices enzimáticos nas temperaturas de 35 e 45 ºC. Essa característica demostra boa atividade enzimática em temperaturas relativamente altas.

Apesar da atividade exclusiva para celulase, a avaliação quantitativa da atividade enzimática dos extratos enzimáticos brutos obtidos por FES apresentaram boas atividades tanto para endoglucanase como para amilase. Já os valores ótimos para a produção de endoglucanse e amilase foram obtidos entre 48h e 168h de fermentação em todos os fungos e resíduos avaliados, com a tendência de diminuir com 336h, assim como a concentração de açúcares redutores totais presentes nas amostras. Em todos os ensaios, as maiores atividades foram obtidas ao utilizar o bagaço de cana-de-açúcar como fonte exclusiva de carbono, enquanto o isolado 1LCL2 se destacou na produção de enzimas. Esses resultados se demostraram animadores e contribuem para o incentivo de modelos alternativos de produção enzimática utilizando matérias-primas alternativas e tecnologias de produção menos intensivas em energia e insumos.

Entretanto, novos ensaios devem ser realizados com intervalos maiores entre as variáveis com o intuito de melhorar o ajuste dos parâmetros de produção. Dessa forma, é sugerido acrescentar outras variáveis, como: diferentes concentrações de inóculo (10^5, 10^6 e 10^7) e tempo de fermentação (3, 5 e 7 dias), assim como uma redução do percentual de umidade inicial da fermentação (35, 45 e 60%), visto que esta teve influência negativa quando superior a 70%. Além disso, processos de purificação e avaliação da estabilidade enzimática em diferentes temperaturas de incubação, variações de pH e concentração de sais são importantes para avaliar a influência desses fatores na atividade da enzima produzida. Nesse cenário, a enzima produzia com atividade para endoglucanase e amilase pode apresentar boas perspectivas em aplicações industriais, como um coquetel enzimático obtido de um isolado da Caatinga.

REFERÊNCIAS

ADSUL, Mukund G. Cellulolytic enzymes recycling strategies for the economic conversion of lignocellulosic biomass to fuels. **Process Biochemistry**, v. 147, p. 62-74, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.08.009. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511324002721. Acesso em: 07 dez. 2024.

AGUIAR, Jéssica *et al*. Enzymatic deconstruction of sugarcane bagasse and straw to obtain cellulose nanomaterials. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 5, p. 2287-2299, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06806. Acesso em: 02 maio 2024.

AHMED, Jahed *et al*. Characterization of an endo-beta-1, 4 glucanase gene from paper-degrading and denim bio-stoning cellulase producing *Aspergillus* isolates. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 70, n. 3, p. 1057-1071, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/bab.2420. Disponível em: https://iubmb.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bab.2420. Acesso em: 15 jun. 2024.

AHMED, Mohamed A. A. *et al*. Protoplast Isolation, Fusion, Culture and Transformation in the Woody Plant *Jasminum* spp. **Agriculture**, v. 11, n. 8, p. 699, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture11080699. Disponível em: https://www.mdpi.com/2077-0472/11/8/699. Acesso em: 20 mar. 2024.

AJALA, E. O. *et al*. Sugarcane bagasse: a biomass sufficiently applied for improving global energy, environment and economic sustainability. **Bioresources and Bioprocessing**, v. 8, p. 1-25, 2021. DOI: https://doi.org/10.1186/s40643-021-00440-z. Disponível em: https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-021-00440-z. Acesso em: 15 jun. 2024.

AL-BEDAK, Osama A. M. *et al*. Optimizing parameters for production of cell wall hydrolyzing enzymes by *Aspergillus eucalypticola* AUMC 15402 under submerged and solid-state conditions. **Microbial Biosystems**, v. 10, n. 1, p. 135-151, 2025. DOI: https://dx.doi.org/10.21608/mb.2025.332229.1202. Disponível em: https://mb.journals.ekb.eg/article_414901.html. Acesso em: 15 jan. 2025.

ALGAN, Müge; SÜRMELI, Yusuf; ŞANLI-MOHAMED, Gülşah. A novel thermostable xylanase from *Geobacillus vulcani* GS90: Production, biochemical characterization, and its comparative application in fruit juice enrichment. **Journal of Food Biochemistry**, v. 45, n. 5, p. e13716, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/jfbc.13716. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfbc.13716. Acesso em: 23 jul. 2024.

ALI, Zain *et al*. Recent Trends in Production and potential applications of microbial amylases: A comprehensive review. **Protein Expression and Purification**, v. 227, p. 106640, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pep.2024.106640. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1046592824002122?via%3Dihub. Acesso em: 15 jan. 2025.

ALLEN, Jessica L.; LENDEMER, James C. A call to reconceptualize lichen symbioses. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 37, n. 7, p. 582-589, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.03.004. Disponível em: https://www.cell.com/trends/ecology-evolution/abstract/S0169-5347(22)00057-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS0169534722000057X%3Fshowall%3Dtrue. Acesso em: 03 mar. 2024.

ALMEIDA, A. C. P. S. *et al.* Atividade Celulolitica de Fungos Isolados da Rizofera de Cactáceas no Município de Ouro Branco, Semiárido Alagoano. **Revista Craibeiras de Agroecologia**, v. 5, n. 1, p. e9578-e9578, 2020. Disponível em: https://www.seer.ufal.br/index.php/era/article/view/9578. Acesso em: 21 mar. 2024.

ÁLVAREZ, Cristina *et al*. Production of xylooligosaccharides, bioethanol, and lignin from structural components of barley straw pretreated with a steam explosion. **Bioresource Technology**, v. 342, p. 125953, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125953. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421012955?via%3Dihub. Acesso em: 15 jun. 2024.

ALZAHRANI, Othman M. *et al*. Preparation of a Pectinase-Enriched Multienzyme under Solid State Fermentation of Sugarcane Bagasse. **Fermentation**, v. 9, n. 2, p. 141, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation9020141. Disponível em: https://www.mdpi.com/2311-5637/9/2/141. Acesso em: 15 jun. 2024.

AMBROZIM, F. M. **Estudo das Condições de Fermentação em Estado Sólido para Produção de Celulases Utilizando Biomassa de Cacau**. 2020. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória: 2019. Disponível em: https://dspace4.ufes.br/items/73787ffc-a1f2-4afd-988b-cb6837a5045d. Acesso em: 15 jan. 2024.

ANU *et al*. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass: An environment-benign and sustainable approach for conversion of solid waste into value-added products. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 54, n. 10, p. 771-796, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/10643389.2023.2277670. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10643389.2023.2277670. Acesso em: 15 dez. 2024.

ASHOKKUMAR, Veeramuthu *et al*. Recent advances in lignocellulosic biomass for biofuels and value-added bioproducts-A critical review. **Bioresource technology**, v. 344, p. 126195, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126195. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421015376?via%3Dihub. Acesso em: 24 jun. 2024.

ASOKAN, Aiswarya *et al*. Lichenomics: Exploring bioactive compounds with anti-tumor potential in colon cancer cell lines. **The Microbe**, v. 7, p. 100287, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microb.2025.100287. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S295019462500055X?via%3Dihub. Acesso em: 02 jan. 2024.

AWAIS, Muhammad *et al.* Enhanced biodegradation of organic waste treated by environmental fungal isolates with higher cellulolytic potential. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-16, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-021-01932-w. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-021-01932-w. Acesso em: 15 jun. 2024.

AWASTHI, Mukesh Kumar *et al*. Agricultural waste biorefinery development towards circular bioeconomy. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 158, p. 112122, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112122. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122000508?via%3Dihub. Acesso em: 28 jun. 2024.

BAIG, K. S. Interaction of enzymes with lignocellulosic materials: causes, mechanism and influencing factors. **Bioresources and bioprocessing**, v. 7, p. 1-19, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s40643-020-00310-0. Disponível em: https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-020-00310-0. Acesso em: 30 jun. 2024.

BANU, J. Rajesh *et al.* Lignocellulosic biomass based biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. **Fuel**, v. 302, p. 121086, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121086. Disponível em: Acesso em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121009650?via%3Dihub. 19 jun. 2024.

BARBOSA-SILVA, Ana Márcia *et al.* Richness of Lichens Consumed by *Constrictotermes cyphergaster* in the Semi-arid Region of Brazil. **Sociobiology**, v. 66, n. 1, p. 154-160, 2019. DOI: https://doi.org/10.13102/sociobiology.v66i1.3665. Disponível em: https://periodicos.uefs.br/index.php/sociobiology/article/view/3665. Acesso em: 15 jun. 2024.

BELMONT-MONTEFUSCO, Enide Luciana et al. Cultivable cellulolytic fungi isolated from the gut of Amazonian aquatic insects. **Acta amazonica**, v. 50, n. 4, p. 346-354, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4392202000902. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aa/a/F7fFXV8FMpMst9Gn6qPH8Lj/?lang=en. Acesso em: 29 mai. 2024.

BELNAP, Jayne; WEBER, Bettina; BÜDEL, Burkhard. Biological soil crusts as an organizing principle in drylands. In: **Biological soil crusts: an organizing principle in drylands**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 3-13. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_1. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-30214-0_1. Acesso em: 16 fev. 2025.

BHUNJUN, C. S. *et al.* What are the 100 most cited fungal genera?. **Studies in mycology**, v. 108, n. 1, p. 1-412, 2024. DOI: https://doi.org/10.3114/sim.2024.108.01. Disponível em: https://www.ingentaconnect.com/content/wfbi/sim/2024/00000108/00000001/art00001;jsessionid=1j3gent62m1ks.x-ic-live-03. Acesso em: 09 dez. 2024.

BOONDAENG, Antika *et al*. Cellulase production under solid-state fermentation by

Aspergillus sp. IN5: Parameter optimization and application. **Heliyon**, v. 10, n. 5, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26601. Disponível em: https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)02632-X. Acesso em: 27 jun. 2024.

BRIENZA, Filippo *et al*. Optimized Enzymatic Extraction of Phenolic Compounds from *Verbascum nigrum* L.: A Sustainable Approach for Enhanced Extraction of Bioactive Compounds. **Applied Sciences** (2076-3417), v. 15, n. 3, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/app15031405. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-3417/15/3/1405. Acesso em: 08 jun. 2025.

CANO-GONZALEZ, Carlos N. *et al*. Transformation of agricultural wastes into functional oligosaccharides using enzymes and emerging technologies. **Phytochemical Analysis**, v. 35, n. 8, p. 1771-1780, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/pca.3365. Disponível em: https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pca.3365. Acesso em: 21 dez. 2024.

CAO, Thi Chuyen *et al*. Cellulase-treated deoiled rice bran: effects of treatment conditions on dietary fiber content and utilization for formulation of cookies. **Journal of Food Measurement and Characterization**, p. 1-9, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11694-021-01209-w. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11694-021-01209-w. Acesso em: 30 maio 2024.

CARRASCO, Mario et al. Diversity and extracellular enzymatic activities of yeasts isolated from King George Island, the sub-Antarctic region. BMC microbiology, v. 12, p. 1-9, 2012. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-251. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/1471-2180-12-251. Acesso em: 30 jun. 2024.

CASTRO-OCHOA, Lelie Denise *et al*. Integration of agricultural residues as biomass source to saccharification bioprocess and for the production of cellulases from filamentous fungi. **3 Biotech**, v. 13, n. 2, p. 43, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s13205-022-03444-4. Acesso em: 26 jun. 2024.

CHATTERJEE, Sulogna; MOHAN, S. Venkata. Refining of vegetable waste to renewable sugars for ethanol production: Depolymerization and fermentation optimization. **Bioresource Technology**, v. 340, p. 125650, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125650. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13205-022-03444-4. Acesso em: 15 fev. 2024.

CHAUDHARI, Yogesh B. *et al*. Engineering cellulases for conversion of lignocellulosic biomass. **Protein Engineering, Design and Selection**, v. 36, p. gzad002, 2023. DOI: https://doi.org/10.1093/protein/gzad002. Disponível em: https://academic.oup.com/peds/article/doi/10.1093/protein/gzad002/7074159. Acesso em: 20 jan. 2024.

CHEN, Hao *et al*. Acetic acid production from corn straw via enzymatic degradation using putative acetyl esterase from the metagenome assembled genome. **Enzyme and**

Microbial Technology, v. 187, p. 110619, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2025.110619. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141022925000390?via%3Dihub. Acesso em: 09 jan. 2025.

CHO, Eun Jin *et al*. Converting textile waste into value-added chemicals: an integrated bio-refinery process. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 15, p. 100238, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100238. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498423000030?via%3Dihub. Acesso em: 12 jun. 2024.

CHRISTOPHER, Meera *et al*. Early cellular events and potential regulators of cellulase induction in **Penicillium janthinellum** NCIM 1366. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5057, 2023. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-023-32340-x. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-023-32340-x. Acesso em: 21 out. 2024.

CLIMACO, Leticia Rosa; RODER, Celise; OLIVO, José Eduardo. Produção de proteases por fungos do gênero *Aspergillus*: o impacto das condições de cultivo e suas implicações biotecnológicas. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 10, p. 17465-17481, 2023. DOI: https://doi.org/10.55905/oelv21n10-159. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/1623. Acesso em: 26 jun. 2024.

CONCOSTRINA-ZUBIRI, Laura *et al*. Species-specific effects of biocrust-forming lichens on soil properties under simulated climate change are driven by functional traits. **New Phytologist**, v. 230, n. 1, p. 101-115, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.17143. Disponível em: https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.17143. Acesso em: 21 ago. 2024.

CORREIA, R. T. P. **Estudo do cultivo semi-sólido em resíduo de abacaxi por *Saccharomyces cereviseae* e *Rhizopus oligosporus***. 2004. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN. Natal-RN, 2004. Acesso em: 30 set. 2024.

COSTA-LEONARDO, Ana Maria; JANEI, Vanelize; DA SILVA, Iago Bueno. First Neotropical record of the association between brown sclerotium-forming fungi and termite eggs in a nest of *Coptotermes gestroi* (Blattaria, Isoptera, Rhinotermitidae). **The Science of Nature**, v. 109, n. 5, p. 45, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s00114-022-01815-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00114-022-01815-8. Acesso em: 11 jun. 2024.

COVINO, Clelia *et al*. Lignocellulosic fibres from enzyme-treated tomato plants: characterisation and application in paperboard manufacturing. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 161, p. 787-796, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.077. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813020335194?via%3Dihub. Acesso em: 15 jan. 2024.

CROWTHER, Thomas W. *et al*. Scientists' call to action: Microbes, planetary health, and the Sustainable Development Goals. **Cell,** v. 187, n. 19, p. 5195-5216, 2024. DOI:

https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.07.051. Disponível em: https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)02632-X. Acesso em: 20 dez. 2024.

CUI, Jiefen *et al*. Pectins from fruits: Relationships between extraction methods, structural characteristics, and functional properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 110, p. 39-54, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.077. Dsiponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924224421000856?via%3Dihub. Acesso em: 09 ago. 2024.

CUNHA, Aline O. B. *et al*. Living in the dark: Bat caves as hotspots of fungal diversity. **PLoS One**, v. 15, n. 12, p. e0243494, 2020. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243494. Disponível em: https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0243494. Acesso em: 21 mar. 2025.

DENG, Lingzhu *et al*. Upcycling soybean meal through enzymatic conversion of insoluble fiber into soluble dietary fiber enhanced by ball milling. **Journal of food science**, v. 89, n. 8, p. 4871-4883, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/1750-3841.17185. Disponível em: https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1750-3841.17185. Acesso em: 26 mar. 2025.

DEVI, Dipanjali; TAYUNG, Kumanand. Diversity and bioactivity of endolichenic fungi isolated from three lichen species of Arunachal Pradesh, Indo-Burma belt. **Vegetos**, p. 1-14, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s42535-024-00902-7. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s42535-024-00902-7. Acesso em: 23 fev. 2025.

DEVI, Mayanglambam M.; AGGARWAL, Nidhi; SARAVANAMURUGAN, Shunmugavel. Rice straw: a major renewable lignocellulosic biomass for value-added carbonaceous materials. **Current Green Chemistry**, v. 7, n. 3, p. 290-303, 2020. DOI: https://doi.org/10.2174/2213346106666191127120259. Disponível em: https://www.eurekaselect.com/article/102635. Acesso em: 28 jun. 2024.

DEWAN, Shalini Shahani. Global markets for enzymes in industrial applications. **BCC Research, Wellesley**, 2021.Disponível em: https://www.bccresearch.com/market-research/biotechnology/global-markets-for-enzymes-in-industrial-applications.html. Acesso em: 20 jun 2024.

DHAYANITHY, Geethanjali; SUBBAN, Kamalraj; CHELLIAH, Jayabaskaran. Diversity and biological activities of endophytic fungi associated with *Catharanthus roseus*. **BMC microbiology**, v. 19, p. 1-14, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s12866-019-1386-x. Disponível em: https://bmcmicrobiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12866-019-1386-x. Acesso em: 20 jun. 2024.

DHEVAGI, Periyasamy *et al*. Industrially important fungal enzymes: productions and applications. **Recent Trends in Mycological Research: Volume 2: Environmental and Industrial Perspective**, p. 263-309, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-

68260-6_11. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-68260-6_11. Acesso em: 31 jun. 2024.

DIGHTON, John. **Fungi in ecosystem processes**. CRC press, 2018. DOI: https://doi.org/10.1201/9781315371528. Disponível em: https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315371528/fungi-ecosystem-processes-john-dighton. Acesso em: 13 fev. 2025.

DINIL, Aparna; JACOB, Anu. Valorization of agro-industrial discards in fermentation for the production of cellulase enzyme. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, v. 16, n. 1, p. 347-354, 2022. DOI: https://doi.org/10.22207/JPAM.16.1.25. Disponível em: https://microbiologyjournal.org/valorization-of-agro-industrial-discards-in-fermentation-for-the-production-of-cellulase-enzyme/. Acesso em: 21 set. 2024.

DISCA, Vincenzo *et al*. Effect of Carbohydrase Treatment on the Dietary Fibers and Bioactive Compounds of Cocoa Bean Shells (CBSs). **Foods**, v. 13, n. 16, p. 2545, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13162545. Disponível em: https://www.mdpi.com/2304-8158/13/16/2545. Acesso em: 15 dez. 2024.

DIXIT, Mandeep; SHUKLA, Pratyoosh. Multi-efficient endoglucanase from Aspergillus niger MPS25 and its potential applications in saccharification of wheat straw and waste paper deinking. **Chemosphere**, v. 313, p. 137298, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137298. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653522037912?via%3Dihub. Acesso em: 22 nov. 2024.

DIXIT, Yatika *et al*. *Penicillium oxalicum* for enzymatic degradation of starch/polyvinylpyrrolidone plastic film. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-24, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-025-06547-z. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-025-06547-z. Acesso em: 10 jan. 2025.

DRULA, Elodie *et al*. The carbohydrate-active enzyme database: functions and literature. **Nucleic acids research**, v. 50, n. D1, p. D571-D577, 2022. DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gkab1045. Disponível em: https://academic.oup.com/nar/article/50/D1/D571/6445960. Acesso em: 24 jun. 2024.

DUKARE, Ajinath *et al*. Optimization of xylanase production by *Bacillus* sp. in submerged fermentation using cotton biomass as cost-effective feedstock and its potential application for bio-bleaching of cotton stalk pulp. **Biomass Conversion and Biorefinery,** p. 1-15, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-025-06522-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-025-06522-8. Acesso em: 20 maio 2025.

DUTTA, Bhramar; BANDOPADHYAY, Rajib. Biotechnological potentials of halophilic microorganisms and their impact on mankind. **Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 75, 2022. DOI. https://doi.org/10.1186/s43088-022-00252-w. Disponível em: https://bjbas.springeropen.com/articles/10.1186/s43088-022-00252-w. Acesso em: 22 jun. 2024.

DWIVEDI, Shruti *et al*. Fungal pectinases: an insight into production, innovations and

applications. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 11, p. 305, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-023-03741-x. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-023-03741-x. Acesso em: 29 jun. 2024.

EJAZ, Uroosa; SOHAIL, Muhammad; GHANEMI, Abdelaziz. Cellulases: from bioactivity to a variety of industrial applications. **Biomimetics**, v. 6, n. 3, p. 44, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/biomimetics6030044. Disponível em: https://www.mdpi.com/2313-7673/6/3/44. Acesso em: 01 out. 2024.

ELNAGDY, Naglaa A. *et al*. Bioethanol production from characterized pre-treated sugarcane trash and Jatropha agrowastes. **Journal of Biotechnology**, v. 386, p. 28-41, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.02.015. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168165624000622?via%3Dihub. Acesso em: 06 dez. 2024.

EL-SHEEKH, Mostafa M. *et al*. Saccharification of pre-treated wheat straw via optimized enzymatic production using *Aspergillus niger*: Chemical analysis of lignocellulosic matrix. **Biocatalysis and Biotransformation**, v. 41, n. 4, p. 309-321, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/10242422.2022.2087511. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10242422.2022.2087511. Acesso em: 04 maio. 2025.

EL-SHORA, Hamed M. *et al.* Immobilization of purified pectinase from *Aspergillus nidulans* on chitosan and alginate beads for biotechnological applications. **Microbial Cell Factories**, v. 24, n. 1, p. 5, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s12934-024-02603-x. Disponível em: https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-024-02603-x. Acesso em: 20 jan. 2025.

ESCARAMBONI, Bruna *et al*. Food waste as a feedstock for fungal biosynthesis of amylases and proteases. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-14, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-021-01511-0. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-021-01511-0. Acesso em: 31 maio 2025.

ESCOBAR-PUENTES, Alberto A. *et al*. Effect of amylose/amylopectin content and succinylation on properties of corn starch nanoparticles as encapsulants of anthocyanins. **Carbohydrate polymers**, v. 250, p. 116972, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116972. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861720311450?via%3Dihub. Acesso em: 15 maio 2025.

ESPINOZA-ABUNDIS, César *et al*. Cellulase and xylanase production by a newly isolated *Penicillium crustosum* strain under solid-state fermentation, using water hyacinth biomass as support, substrate, and inducer. **Fermentation**, v. 9, n. 7, p. 660, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation9070660. Disponível em: https://www.mdpi.com/2311-5637/9/7/660. Acesso em: 07 set. 2024.

FAROUK, Noura I. *et al.* Isolation and Characterization of Some Haloalkaliphilic Fungi from Egypt. **Egyptian Journal of Chemistry**, v. 67, n. 7, p. 251-262, 2024. DOI:

https://dx.doi.org/10.21608/ejchem.2023.245259.8795. Disponível em: https://ejchem.journals.ekb.eg/article_333146.html. Acesso em: 05 dez. 2024.

FERNANDES, Letícia Persilva *et al*. Xylooligosaccharides from Pretreated Rice Bran Produced by Immobilized Xylanase. **BioEnergy Research**, p. 1-10, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12155-024-10770-3. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-024-10770-3. Acesso em: 28 fev. 2025.

FERNANDES, Moabe F.; CARDOSO, Domingos; DE QUEIROZ, Luciano P. An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. **Journal of Arid environments**, v. 174, p. 104079, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104079. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196319301491?via%3Dihub. Acesso em: 15 jun. 2024.

FERREIRA, Daniel Furtado. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450. Disponível em: https://biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/450. Acesso em: 31 abr. 2024.

FERREIRA, Rafael G.; AZZONI, Adriano R.; FREITAS, Sindelia. On the production cost of lignocellulose-degrading enzymes. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 1, p. 85-99, 2021. DOI: https://doi.org/10.1002/bbb.2142. Disponível em: https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bbb.2142. Acesso em: 29 ago. 2024.

FILHO, Edivaldo XF; PULS, Jürgen; COUGHLAN, Michael P. Biochemical characteristics of two endo-β-1, 4-xylanases produced by *Penicillium capsulatum*. **Journal of industrial microbiology and biotechnology**, v. 11, n. 3, p. 171-180, 1993. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01583719. Disponível em: https://academic.oup.com/jimb/article/11/3/171/5987722. Acesso em: 21 maio 2024.

FONTAINE, Sébastien *et al*. Mechanisms of the priming effect in a savannah soil amended with cellulose. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 1, p. 125-131, 2004. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1250. Disponível em: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj2004.1250. Acesso em: 21 nov. 2024.

GARCIA, M. A. V. T.; GARCIA, C. F.; FARACO, A. A G. Pharmaceutical and biomedical applications of native and modified starch: a review. **Starch-Stärke**, v. 72, n. 7-8, p. 1900270, 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/star.201900270. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/star.201900270. Acesso em: 11 maio 2024.

GENG, Dong-Hui *et al*. Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and in vitro starch digestibility of brown rice noodles. **LWT**, v. 146, p. 111543, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111543. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643821006964?via%3Dihub. Acesso em: 25 jun. 2024.

GIGLI-BISCEGLIA, Nora; ENGELSDORF, Timo; HAMANN, Thorsten. Plant cell wall integrity maintenance in model plants and crop species-relevant cell wall components and underlying guiding principles. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v. 77, n. 11, p. 2049-2077, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s00018-019-03388-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00018-019-03388-8. Acesso em: 22 jan. 2025.

GONZÁLEZ-ROMÁN, Pilar *et al*. On the Origins of Symbiotic Fungi in Carmine Cochineals and Their Function in the Digestion of Plant Polysaccharides. **Insects**, v. 15, n. 10, p. 783, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/insects15100783. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-4450/15/10/783. Acesso em: 22 jan. 2025.

GRAND VIEW RESEARCH. Alpha-Amylase Baking Enzyme Market Size, Share & Trends Analysis Report By Source (Fungi, Plant-based), By Application (Bread, Cookies & Biscuits), By Region (North America, Europe), And Segment Forecasts, 2024 - 2030. Disponível em: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/alpha-amylase-baking-enzyme-market. Acesso em: 12 abr. 2025.

GUANG, Song *et al*. Fungi in biocrusts facilitate ecosystem restoration during long-term vegetation succession in arid environments. **CATENA**, v. 252, p. 108893, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108893. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S034181622500195X?via%3Dihub. Acesso em: 09 jan. 2025.

GUO, Demin *et al*. Heterochromatin Protein Activates the Amylase Expression Pathway and Its Application to Recombinant Protein Expression in *Penicillium oxalicum*. **Current Microbiology**, v. 82, n. 2, p. 75, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00284-024-04058-0. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00284-024-04058-0. Acesso em: 09 jan. 2025.

GUPTA, Munishwar N.; BISARIA, Virendra S. Stable cellulolytic enzymes and their application in hydrolysis of lignocellulosic biomass. **Biotechnology Journal**, v. 13, n. 6, p. 1700633, 2018. DOI: https://doi.org/10.1002/biot.201700633. Disponível em: https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/biot.201700633. Acesso em: 23 abr. 2025.

HAWKSWORTH, David L.; GRUBE, Martin. Lichens redefined as complex ecosystems. **The New Phytologist**, v. 227, n. 5, p. 1281, 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.16630. Disponível em: https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.16630. Acesso em: 09 maio 2025.

HE, Meng *et al*. Engineering starch by enzymatic structure design for versatile applications in food industries: A critical review. **Systems Microbiology and Biomanufacturing**, v. 3, n. 1, p. 12-27, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s43393-022-00139-y. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s43393-022-00139-y. Acesso em: 30 jan. 2024.

HETTIARACHCHY, N. S. *et al*. The use of immobilized enzymes to improve functionality. In: **Proteins in food processing**. Woodhead Publishing, 2018. p. 569-597. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100722-8.00022-X. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978008100722800022X?via%3Dihub. Acesso em: 17 ago. 2024.

HMAD, Ines Ben; GARGOURI, Ali. Halophilic filamentous fungi and their enzymes: potential biotechnological applications. **Journal of Biotechnology**, v. 381, p. 11-18, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2023.12.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168165623002195?via%3Dihub. Acesso em: 22 abr. 2025.

HOUBRAKEN, J. *et al*. Classification of *Aspergillus, Penicillium, Talaromyces* and related genera (Eurotiales): An overview of families, genera, subgenera, sections, series and species. **Studies in mycology**, v. 95, p. 5-169, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.simyco.2020.05.002. Disponível em: https://www.ingentaconnect.com/content/wfbi/sim/2020/00000095/00000001/art00003. Acesso em: 09 jun. 2024.

HU, Yawei *et al*. Current status of mining, modification, and application of cellulases in bioactive substance extraction. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 43, n. 2, p. 687-703, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/cimb43020050. Disponível em: https://www.mdpi.com/1467-3045/43/2/50. Acesso em: 13 set. 2024.

HUANG, Jiaqi; WANG, Jianfei; LIU, Shijie. Advances in the production of fungi-derived lignocellulolytic enzymes using agricultural wastes. **Mycology**, v. 15, n. 4, p. 523-537, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/21501203.2023.2253827. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21501203.2023.2253827. Acesso em: 05 set. 2024.

HÜTTNER, Silvia *et al*. Recent advances in the intellectual property landscape of filamentous fungi. **Fungal Biology and Biotechnology**, v. 7, n. 1, p. 16, 2020. DOI: https://doi.org/10.1186/s40694-020-00106-z. Disponível em: https://fungalbiolbiotech.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40694-020-00106-z. Acesso em: 19 mar. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html. Acesso em: 18 jan. 2025.

IBRAHIM, Nabil A. *et al*. Biosynthesis and potential application of sustainable lignocellulolytic enzymes cocktail for the development of eco-friendly multifunctional cellulosic products. **Clean Technologies and Environmental Policy**, p. 1-16, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10098-024-03021-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-024-03021-8. Acesso em: 24 jan. 2025.

IBRAHIM, Nabil A. *et al*. Environmentally benign scouring of cotton knits using locally produced acid pectinase enzyme**. Fibers and Polymers**, v. 20, p. 787-793, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s12221-019-1207-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-019-1207-8. Acesso em: 11 jun. 2024.

ILIĆ, Nevena *et al*. Cellulases: from lignocellulosic biomass to improved production.

Energies, v. 16, n. 8, p. 3598, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/en16083598. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3598. Acesso em: 03 nov. 2024.

IWAMURO, Masaya *et al*. *In vitro* analysis of gastric phytobezoar dissolubility by Coca-Cola, Coca-Cola Zero, cellulase, and papain. Journal of clinical gastroenterology, v. 48, n. 2, p. 190-191, 2014. DOI: https://doi.org/10.1097/MCG.0B013E3182A39116. Disponível em: https://journals.lww.com/jcge/citation/2014/02000/in_vitro_analysis_of_gastric_phytobezoar.19.aspx. Acesso em: 09 jan. 2025.

JAYASEKARA, Sandhya; RATNAYAKE, Renuka. Microbial cellulases: an overview and applications. **Cellulose**, v. 22, n. 92, p. 10-5772, 2019. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.84531. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/66517. Acesso em: 22 fev. 2025.

JUTURU, Veeresh; WU, Jin Chuan. Microbial cellulases: Engineering, production and applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 33, p. 188-203, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.077. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114000999?via%3Dihub. Acesso em: 11 abr. 2025.

KAMANDE, Stephen M.; OMWENGA, George I.; NGUGI, Mathew P. Production of cellulases by Xylaria sp. and *Nemania* sp. using lignocellulose substrates for bioethanol production from maize cobs. **Heliyon**, v. 10, n. 17, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36802. Disponível em: https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)12833-2?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844024128332%3Fshowall%3Dtrue. Acesso em: 18 jan. 2025.

KARABULUT, Gulsah *et al*. Ultrasound and enzyme-pretreated extraction for the valorization of pea pod proteins. **Journal of Food Process Engineering**, v. 46, n. 12, p. e14452, 2023. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpe.14452. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.14452. Acesso em: 30 jan. 2025.

KAUR, Darshanjot; QADRI, Ovais Shafiq. Anthocyanin and phenolic landscape of *Syzygium cumini* extracts via green extraction. **Food Chemistry**, v. 472, p. 142916, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.142916. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814625001669?via%3Dihub. Acesso em: 30 jan. 2025.

KAWAKAMI, Hiroko *et al*. Antioxidant compounds produced by endolichenic fungus *Penicillium* sp.-strain 1322P isolated from *Pyxine subcinerea*. **Archives of Microbiology**, v. 206, n. 4, p. 187, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00203-024-03898-5. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00203-024-03898-5. Acesso em: 25 jan. 2025.

KHORAIRI, Ain Nadiah Sofiah Ahmad *et al*. A review on agro-industrial waste as cellulose and nanocellulose source and their potentials in food applications. **Food Reviews International**, v. 39, n. 2, p. 663-688, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1926478. Disponível em:

https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/87559129.2021.1926478. Acesso em: 09 jan. 2025.

KIILL, L. H. P.; PORTO, D. D. Bioma Caatinga: oportunidades e desafios de pesquisa para o desenvolvimento sustentável. 2019. In: VILELA, E. F.; CALLEGARO, G. M.; FERNANDES, G. W. (Org.). **Biomas e agricultura: oportunidades e desafios**. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciência: FAPEMIG, 2019. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1108577. Acesso em: 05 jun 2024.

KLEIN, Gabriel Henrique *et al*. Utilization of banana peel waste for the production of bioethanol and other high-value-added compounds. **Food and Humanity**, v. 3, p. 100376, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100376. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2949824424001514?via%3Dihub. Acesso em: 05 dez. 2024.

KOUR, Divjot *et al*. Extremophiles for hydrolytic enzymes productions: biodiversity and potential biotechnological applications. **Bioprocessing for biomolecules production**, p. 321-372, 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119434436.ch16. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119434436.ch16. Acesso em: 21 jan. 2025.

KUHAD, Ramesh Chander; GUPTA, Rishi; SINGH, Ajay. Microbial cellulases and their industrial applications. **Enzyme research**, v. 2011, n. 1, p. 280696, 2011. DOI: https://doi.org/10.4061/2011/280696. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.4061/2011/280696. Acesso em: 21 jun. 2024.

KUMAR, Anil *et al*. Multifarious pretreatment strategies for the lignocellulosic substrates for the generation of renewable and sustainable biofuels: A review. **Renewable Energy**, v. 160, p. 1228-1252, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.031. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120311071?via%3Dihub. Acesso em: 09 jan. 2025.

KURAŠIN, Mihhail; VÄLJAMÄE, Priit. Processivity of cellobiohydrolases is limited by the substrate. **Journal of Biological Chemistry**, v. 286, n. 1, p. 169-177, 2011. DOI: https://doi.org/10.1074/jbc.M110.161059. Disponível em: https://www.jbc.org/article/S0021-9258(20)54207-5/fulltext. Acesso em: 11 jan. 2024.

LEITE, Paulina *et al*. Recent advances in production of lignocellulolytic enzymes by solid-state fermentation of agro-industrial wastes. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 27, p. 100407, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100407. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452223620301048?via%3Dihub. Acesso em: 09 abr. 2025.

LI, Xiao-Han *et al*. The effect of enzyme-hydrolyzed pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) pulp supplementation on dough and bread quality. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 2, p. 1783-1793, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11694-022-01757-9. Disponível em:

https://link.springer.com/article/10.1007/s11694-022-01757-9. Acesso em: 15 abr. 2025.

LI, Xinliang; CHANG, Sandra H.; LIU, Rui. Industrial applications of cellulases and hemicellulases. **Fungal cellulolytic enzymes: Microbial production and application**, p. 267-282, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-0749-2_15. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-0749-2_15. Acesso em: 09 jan. 2025.

LI, Yalin *et al*. Sustainable lactic acid production from lignocellulosic biomass. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 1341-1351, 2021. DOI: https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08055. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssuschemeng.0c08055. Acesso em: 05 maio 2024.

LIANG, Ruina *et al*. Morphological and phylogenetic analyses reveal two new *Penicillium* species isolated from the ancient Great Wall loess in Beijing, China. **Frontiers in Microbiology**, v. 15, p. 1329299, 2024. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1329299. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2024.1329299/full. Acesso em: 17 jan. 2025.

LIN, Yanting *et al*. Enhancing Rice Bran Soluble Dietary Fiber Yield Through Sequential Ultrasound–Xylanase Treatment. **Foods**, v. 14, n. 3, p. 388, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/foods14030388. Disponível em: https://www.mdpi.com/2304-8158/14/3/388. Acesso em: 19 jan. 2025.

LINDSAY, Charmaine A. *et al*. Steroids and Epicoccarines from *Penicillium aurantiancobrunneum*. **Phytochemistry Letters**, v. 63, p. 79-86, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.phytol.2024.08.008. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1874390024001253?via%3Dihub. Acesso em: 28 jan. 2025.

LINK, H. F. Observationes in ordines plantarum naturales. Dissertatio I. **Mag Ges Naturf Freunde Berlin**, v. 3, p. 3-42, 1809.

LIU, Guodong; QU, Yinbo. Integrated engineering of enzymes and microorganisms for improving the efficiency of industrial lignocellulose deconstruction. **Engineering Microbiology**, v. 1, p. 100005, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engmic.2021.100005. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667370321000059?via%3Dihub. Acesso em: 08 out. 2024.

LIU, Liqin *et al*. Ball milling pretreatment facilitating α-amylase hydrolysis for production of starch-based bio-latex with high performance. **Carbohydrate Polymers**, v. 242, p. 116384, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116384. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861720305580?via%3Dihub. Acesso em: 20 set. 2024.

LIU, Pengfei *et al*. Maltogenic amylase: Its structure, molecular modification, and effects on starch and starch-based products. **Carbohydrate Polymers**, v. 319, p.

121183, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121183. Dsiponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861723006483?via%3Dihub. Acesso em: 15 ago. 2024.

LODHA, Ankit; PAWAR, Shweta; RATHOD, Virendra. Optimised cellulase production from fungal co-culture of Trichoderma reesei NCIM 1186 and *Penicillium citrinum* NCIM 768 under solid state fermentation. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 103958, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103958. Disponível em: Acesso em: 09 jan. 2025.

LOPES, A. de M.; FERREIRA FILHO, E. X.; MOREIRA, L. R. S. An update on enzymatic cocktails for lignocellulose breakdown. **Journal of Applied Microbiology**, v. 125, n. 3, p. 632-645, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/jam.13923. Disponível em: https://academic.oup.com/jambio/article-abstract/125/3/632/6714514?redirectedFrom=fulltext. Acesso em: 21 jan. 2025.

LÜCKING, Robert; SPRIBILLE, Toby. **The Lives of Lichens: A Natural History**. Princeton University Press, 2024.

LYND, Lee R. *et al*. Microbial cellulose utilization: fundamentals and biotechnology. **Microbiology and molecular biology reviews**, v. 66, n. 3, p. 506-577, 2002. DOI: https://doi.org/10.1128/mmbr.66.3.506-577.2002. Disponível em: https://journals.asm.org/doi/10.1128/mmbr.66.3.506-577.2002. Acesso em: 23 jan. 2025.

MA, Xiaoyu *et al*. An overview on the current status and future prospects in *Aspergillus* cellulase production. **Environmental research**, v. 244, p. 117866, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117866. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935123026701?via%3Dihub. Acesso em: 09 jan. 2025.

MACHADO-FILHO, Evandro Ribeiro *et al*. Potential of barley straw pretreated with a lignin inhibitor as an adjunct during beer production. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 59, n. 5, p. 3142-3150, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/ijfs.17058. Disponível em: https://academic.oup.com/ijfst/article/59/5/3142/7807907. Acesso em: 26 jan. 2025.

MAHARRAMOVA, Sevinj. Changes in the chemical composition of extracts of wild berries growing in the Republic of Azerbaijan due to enzimatic pretreatment of their pulp. **Ukrainian Food Journal**, v. 12, n. 4, p. 542-555, 2023. Disponível em: https://nuft.edu.ua/doi/doc/ufj/2023/4/5.pdf. Acesso em: 30 ago. 2024.

MAHMUD, Md Arif; ANANNYA, Ferdausee Rahman. Sugarcane bagasse-A source of cellulosic fiber for diverse applications. **Heliyon**, v. 7, n. 8, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771. Disponível em: https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(21)01874-0?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2405844021018740%3Fshowall%3Dtrue. Acesso em: 29 jan. 2024.

MALHOTRA, Girisha; CHAPADGAONKAR, Shilpa S. Thermo-alkali stable bacterial

xylanase for deinking of copier paper. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 21, n. 1, p. 107, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s43141-023-00563-0. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1687157X23010156?via%3Dihub. Acesso em: 11 mar. 2024.

MALLAGUTTI, Vitor Hugo. **Produção de celulases por fungos filamentosos da Antártica: busca por novo recurso genético para obtenção de bioetanol**. 2015. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Instituto de Biociências de Rio Claro, Rio Claro.

MARTÍNEZ, Anny Daniela *et al*. Xylanase production by *Penicillium* sp. Pn004 and its application for grass hydrolysis: high value subproduct from non-centrifugal sugarcane bagasse and wheat bran. **Scientia Agropecuaria**, v. 15, n. 2, p. 201-212, 2024. DOI: https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.015. Disponível em: https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/5526. Acesso em: 21 jan. 2025.

MARTORELL, María Martha *et al*. Bioprospection of cold-adapted yeasts with biotechnological potential from Antarctica. **Journal of basic microbiology**, v. 57, n. 6, p. 504-516, 2017. DOI: https://doi.org/10.1002/jobm.201700021. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jobm.201700021. Acesso em: 20 jan. 2024.

MÉNDEZ-LÍTER, Juan A. *et al*. Hemicellulases from *Penicillium* and *Talaromyces* for lignocellulosic biomass valorization: A review. **Bioresource Technology**, v. 324, p. 124623, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124623. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420318976?via%3Dihub. Acesso em: 09 jan. 2025.

MIHAJLOVSKI, Katarina R.; MILIĆ, Marija D. The role of plant cell wall degrading enzymes in biorefinery development. **Lignocellulose bioconversion through white biotechnology**, p. 99-135, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119735984.ch5. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119735984.ch5. Acesso em: 27 jan. 2025.

MIRALLES, Isabel *et al*. Environmental and ecological factors influencing soil functionality of biologically crusted soils by different lichen species in drylands. **Science of the Total Environment**, v. 794, p. 148491, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148491. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721035634?via%3Dihub. Acesso em: 18 jan. 2025.

MONDAL, Subhadeep *et al*. Biodeinking of waste papers using combinatorial fungal enzymes and subsequent production of butanol from effluent. **Bioresource Technology**, v. 353, p. 127078, 2022b. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127078. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852422004072?via%3Dihub. Acesso em: 31 jan. 2025.

MONDAL, Subhadeep *et al*. Saccharification of lignocellulosic biomass using an enzymatic cocktail of fungal origin and successive production of butanol by *Clostridium acetobutylicum*. **Bioresource technology**, v. 343, p. 126093, 2022a. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126093. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421014358?via%3Dihub. Acesso em: 28 jan. 2025.

MORAN-AGUILAR, M. G. *et al*. Production of cellulases and xylanases in solid-state fermentation by different strains of *Aspergillus niger* using sugarcane bagasse and brewery spent grain. **Biochemical Engineering Journal**, v. 172, p. 108060, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108060. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X21001364?via%3Dihub. Acesso em: 13 nov. 2024.

MOUSA, Walaa *et al*. Revealing culturable fungal microbiome communities from the Arabian Peninsula desert representing a unique source of biochemicals for drug discovery and biotechnology. **F1000Research**, v. 13, p. 1527, 2024. DOI: https://doi.org/10.12688/f1000research.158130.1. Disponível em: https://f1000research.com/articles/13-1527/v1. Acesso em: 27 fev. 2025.

MUSHTAQ, Bushra *et al*. An eco-friendly enzymatic treatment to prepare spinnable banana fibers as an alternative to cotton for textile applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 134630, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134630. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813024054357?via%3Dihub. Acesso em: 14 dez. 2024.

NAGL, Martin *et al*. Mechanistic investigation of the effect of endoglucanases related to pulp refining. **Cellulose**, v. 29, n. 4, p. 2579-2598, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10570-021-04386-5. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-021-04386-5. Acesso em: 28 set. 2024.

NASUTION, M. H.; LELINASARI, S.; KELANA, M. G. S. A review of sugarcane bagasse pretreatment for bioethanol production. In: **IOP conference series: Earth and environmental science**. IOP Publishing, 2022. p. 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/963/1/012014. Disponível em: Acesso em: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/963/1/012014/meta. Acesso em: 10 dez. 2024.

NAVEEN, Rajshri; LOGANATHAN, Manickam. Role of varieties of starch in the development of edible films—A review. **Starch-Stärke**, v. 76, n. 11-12, p. 2300138, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/star.202300138. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-023-12892-8. Acesso em: 17 dez. 2024.

NING, Yuan-Ni *et al*. Regulation of genes encoding polysaccharide-degrading enzymes in *Penicillium*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 108, n. 1, p. 16, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-023-12892-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-023-12892-8. Acesso em: 20 dez. 2024.

NIYONZIMA, Francois N. Detergent-compatible fungal cellulases. **Folia Microbiologica**, v. 66, n. 1, p. 25-40, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12223-020-00838-w. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12223-020-00838-w. Acesso em: 22 dez. 2023.

NWAJIAKU, Ifeoma Monica *et al*. Change in nutrient composition of biochar from rice husk and sugarcane bagasse at varying pyrolytic temperatures. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 7, p. 269-276, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s40093-018-0213-y. Disponível em: https://oiccpress.com/ijrowa/article/view/3251. Acesso em: 14 dez. 2023.

OLIVEIRA, Dyoni M. *et al*. Feruloyl esterases: biocatalysts to overcome biomass recalcitrance and for the production of bioactive compounds. **Bioresource Technology**, v. 278, p. 408-423, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.064. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241930077X?via%3Dihub. Acesso em: 09 ago. 2024.

OMOMOWO, Iyabo Olunike et al. A review on the trends of endophytic fungi bioactivities. **Scientific African**, v. 20, p. e01594, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01594. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227623000522?via%3Dihub. Acesso em: 16 fev. 2024.

OZYILMAZ, Gul; GUNAY, Ecenur. Clarification of apple, grape and pear juices by co-immobilized amylase, pectinase and cellulase. **Food Chemistry**, v. 398, p. 133900, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133900. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814622018623?via%3Dihub. Acesso em: 11 maio 2024.

PANDA, Suraj K.; MAITI, Soumen K. Fungus-Yeast Tri-culture System for In Situ Cellulase Production, Biodetoxification, and Bioethanol Production Using Rice Straw with Cyclic Shifting of Temperature Strategy. **BioEnergy Research**, v. 18, n. 1, p. 3, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12155-024-10806-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-024-10806-8. Acesso em: 06 fev. 2025.

PANDEY, Ashok; SOCCOL, Carlos R.; MITCHELL, David. New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. **Process biochemistry**, v. 35, n. 10, p. 1153-1169, 2000. DOI: https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00152-7. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959200001527?via%3Dihub. Acesso em: 14 dez. 2024.

PANNEERSELVAM, Periyasamy *et al*. Enhancing soil quality and yield through microbial assisted in-situ residue management in rice-rice cropping system in Odisha, Eastern India. **Journal of Environmental Management**, v. 358, p. 120916, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120916. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479724009022?via%3Dihub. Acesso em: 30 maio 2025.

PARADA-PINILLA, Maria Paula *et al*. Biopolymer production by halotolerant bacteria isolated from Caatinga biome. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 52, n. 2, p. 547-559, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s42770-021-00426-1. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s42770-021-00426-1. Acesso em: 14 out. 2024.

PASIN, Thiago Machado *et al*. Biochemical characterization of an acid-thermostable glucoamylase from *Aspergillus japonicus* with potential application in the paper bio-deinking. **Biotechnology Progress**, v. 40, n. 1, p. e3384, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/btpr.3384. Disponível em: https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/btpr.3384. Acesso em: 20 mar. 2025.

PATEL, Vashishtha B.; CHATTERJEE, Somak; DHOBLE, Abhishek S. A review on pectinase properties, application in juice clarification, and membranes as immobilization support. **Journal of Food Science**, v. 87, n. 8, p. 3338-3354, 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/1750-3841.16233. Disponível em: https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1750-3841.16233. Acesso em: 20 dez. 2024.

PEI, JinJin *et al*. A comprehensive review on starch-based sustainable edible films loaded with bioactive components for food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 133332, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133332. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813024041370?via%3Dihub. Acesso em: 18 abr. 2025.

PEREIRA, Adejanildo *et al*. From Agri-food Wastes to Enzyme Production: A Systematic Review with Methodi Ordinatio. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-28, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-024-02565-6. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-024-02565-6. Acesso em: 25 fev. 2025.

PEREIRA, Débora Tomazi *et al*. Optimizing the Extraction of Bioactive Compounds from *Porphyra linearis* (Rhodophyta): Evaluating Alkaline and Enzymatic Hydrolysis for Nutraceutical Applications. **Marine Drugs**, v. 22, n. 6, p. 284, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/md22060284. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-3397/22/6/284. Acesso em: 14 dez. 2024.

PETCHARAT, Tanyamon *et al*. Extraction of Kratom (*Mitragyna speciosa*) leaf compounds by enzymatic hydrolysis-assisted process: Yield, characteristics and its in vitro cytotoxicity in cell lines. **Process Biochemistry**, v. 142, p. 212-222, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.04.033. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359511324001272?via%3Dihub. Acesso em: 23 dez. 2024.

PETERSEN, Celine *et al*. Comparative genomic study of the *Penicillium genus* elucidates a diverse pangenome and 15 lateral gene transfer events. **IMA fungus**, v. 14, n. 1, p. 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.1186/s43008-023-00108-7. Disponível em: https://imafungus.biomedcentral.com/articles/10.1186/s43008-023-00108-7. Acesso em: 21 nov. 2024.

POLIZELI, Maria de Lourdes Teixeira de Moraes *et al.* Xylanases from fungi:

properties and industrial applications. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 67, p. 577-591, 2005. DOI: https://doi.org/10.1007/s00253-005-1904-7. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00253-005-1904-7. Acesso em: 30 jan. 2024.

PORIA, Vikram *et al.* Arabinofuranosidases: characteristics, microbial production, and potential in waste valorization and industrial applications. **Bioresource technology**, v. 304, p. 123019, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852420302881?via%3Dihub. Acesso em: 21 fev. 2024.

POVEDA, Gabriela *et al*. Cold-active pectinolytic activity produced by filamentous fungi associated with Antarctic marine sponges. **Biological Research**, v. 51, p. 1-6, 2018. DOI: https://doi.org/10.1186/s40659-018-0177-4. Disponível em: https://biolres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40659-018-0177-4. Acesso em: 02 fev. 2024.

PRIETO, Alicia *et al*. Fungal glycosyl hydrolases for sustainable plant biomass valorization: *Talaromyces amestolkiae* as a model fungus. **International Microbiology**, v. 24, n. 4, p. 545-558, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10123-021-00202-z. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10123-021-00202-z. Acesso em: 22 mar. 2024.

PUZOVIC, Alema *et al*. Effect of Heat Pasteurization and Enzymatic Maceration on Yield, Color, Sugars, Organic Acids, and Phenolic Content in the 'Merlot Kanthus' Grape Juice. **Beverages**, v. 10, n. 3, p. 66, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/beverages10030066. Disponível em: https://www.mdpi.com/2306-5710/10/3/66. Acesso em: 18 jan. 2025.

QI, Xiaoli *et al*. Bioconversion of citrus peel wastes into bioflocculants and their application in the removal of microcystins. **Science of the Total Environment**, v. 715, p. 136885, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136885. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720303958?via%3Dihub. Acesso em: 03 mar. 2024.

QI, Xiaoya *et al*. A novel wheat arabino-xylanase from *Trichoderma gamsii*: study on biochemical characterization, substrate recognition mechanism and its application in wheat flour dough and Chinese bread. **LWT**, p. 117550, 2025. DOI https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117550. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643825002348. Acesso em: 14 jan. 2024.

QIU, Chenchen *et al*. Effects of cellulase and xylanase on fermentation characteristics, chemical composition and bacterial community of the mixed silage of king grass and rice straw. **Microorganisms**, v. 12, n. 3, p. 561, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms12030561. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-2607/12/3/561. Acesso em: 20 mar. 2025.

QUEIROZ, Luciano Paganucci *et al*. Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**,

p. 23-63, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3_2. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-68339-3_2. Acesso em: 14 dez. 2024.

RAHARDIYAN, Dino; MOKO, Emma Mauren. Isolation and Molecular Screening of Fungus as Agents in Cellulolytic Transformation Materials from Symbiotic Lichen. Biosaintifika: **Journal of Biology & Biology Education**, v. 15, n. 3, p. 412-422, 2023. DOI: https://doi.org/10.15294/biosaintifika.v15i3.44969. Disponível em: https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/biosaintifika/article/view/44969. Acesso em: 18 set. 2024.

RANI, Neha *et al*. Harnessing agricultural waste: A sustainable approach to lignocellulolytic enzymes production. **Bioresource Technology Reports**, p. 101912, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101912. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X24001531?via%3Dihub. Acesso em: 27 fev. 2024.

RANJAN, Rahul *et al*. Technological road map of cellulase: a comprehensive outlook to structural, computational, and industrial applications. **Biochemical Engineering Journal**, p. 109020, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.109020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369703X23002152?via%3Dihub. Acesso em: 26 jan. 2024.

RASOOL, Ghulam; IRFAN, Muhammad. The role of microbial diversity in lignocellulosic biomass degradation: a biotechnological perspective. **ChemBioEng Reviews**, v. 11, n. 3, p. 613-635, 2024. DOI: https://doi.org/10.1002/cben.202300073. Disponível em: https://doi.org/10.1002/cben.202300073. Acesso em: 22 abr. 2025.

RAVINDRAN, Rajeev; JAISWAL, Amit K. Microbial enzyme production using lignocellulosic food industry wastes as feedstock: a review. **Bioengineering**, v. 3, n. 4, p. 30, 2016. DOI: https://doi.org/10.3390/bioengineering3040030. Dsiponível em: https://www.mdpi.com/2306-5354/3/4/30. Acesso em: 20 jan. 2024.

RAWAT, Santoshi; PAVITHRA, T.; SUNIL, C. K. Citrus byproduct valorization: pectin extraction, characterization, and research advances in biomaterial derivation for applications in active film packaging. **Discover Food**, v. 4, n. 1, p. 149, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s44187-024-00238-w. Disponível em: Acesso em: https://link.springer.com/article/10.1007/s44187-024-00238-w. 21 fev. 2025.

REENA, Rooben *et al*. Sustainable valorization of sugarcane residues: Efficient deconstruction strategies for fuels and chemicals production. **Bioresource Technology**, v. 361, p. 127759, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127759. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852422010884?via%3Dihub. Acesso em: 18 out. 2024.

RESL, Philipp *et al*. Large differences in carbohydrate degradation and transport potential among lichen fungal symbionts. **Nature communications**, v. 13, n. 1, p. 2634, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-022-30218-6. Disponível em:

https://www.nature.com/articles/s41467-022-30218-6. Acesso em: 14 dez. 2024.

RICARDO, Sarah Domingues Fricks *et al*. Reference collection of plant phytoliths from the Caatinga biome, Northeast Brazil. **Flora**, v. 249, p. 1-8, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.flora.2018.09.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0367253018302834?via%3Dihub. Acesso em: 24 dez. 2023.

RODRIGUES, Lina DA *et al*. Colloidal properties and cytotoxicity of enzymatically hydrolyzed cationic starch-graft-poly (butyl acrylate-co-methyl methacrylate) latex by surfactant-free emulsion polymerization for paper coating application. **Progress in Organic Coatings**, v. 145, p. 105693, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105693. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300944019317084?via%3Dihub. Acesso em: 21 jan. 2024.

ROMAN-BENN, Analese *et al*. Pectin: An overview of sources, extraction and applications in food products, biomedical, pharmaceutical and environmental issues. **Food Chemistry Advances**, v. 2, p. 100192, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100192. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772753X23000126?via%3Dihub. Acesso em: 29 fev. 2024.

ROUKAS, Triantafyllos; KOTZEKIDOU, Parthena. From food industry wastes to second generation bioethanol: a review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, n. 1, p. 299-329, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11157-021-09606-9. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-021-09606-9. Acesso em: 24 mar. 2024.

SAINI, Sonu; KUHAD, Ramesh Chander; SHARMA, Krishna Kant. Valorization of rice straw biomass for co-production of bioethanol, biopesticide and biofertilizer following an eco-friendly biorefinery process. P**rocess Safety and Environmental Protection**, v. 173, p. 823-836, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.044. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582023002458?via%3Dihub. Acesso em: 05 dez. 2024.

SAINI, Sonu; SHARMA, Krishna Kant. Fungal lignocellulolytic enzymes and lignocellulose: a critical review on their contribution to multiproduct biorefinery and global biofuel research. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 193, p. 2304-2319, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.063. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813021024612?via%3Dihub. Acesso em: 20 maio 2024.

SALDAÑA-MENDOZA, Salvador A. *et al*. Revalorization of green tea waste through the production of cellulases by solid-state fermentation using a *Aspergillus niger* 28A. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 14, p. 16711-16724, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-023-03919-1. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-023-03919-1. Acesso em: 08 jan. 2025.

SALDARRIAGA-HERNÁNDEZ, Sara *et al*. Biotransformation of lignocellulosic biomass into industrially relevant products with the aid of fungi-derived lignocellulolytic enzymes. **International journal of biological macromolecules**, v. 161, p. 1099-1116, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.047. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813020334863?via%3Dihub. Acesso em: 14 maio 2024.

SALOMÃO, Gabriella Soares Borges *et al*. Production of cellulases by solid state fermentation using natural and pretreated sugarcane bagasse with different fungi. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 17, p. 1-6, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.10.019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S187881811830361X?via%3Dihub. Acesso em: 22 dez. 2023.

SAMPAOLESI, Sofía *et al*. Potentials of biomass waste valorization: case of South America. **Sustainability**, v. 15, n. 10, p. 8343, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/su15108343. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/10/8343. Acesso em: 20 jan. 2024.

SANKARRAJ, Nisha; NALLATHAMBI, Gobi. Enzymatic biopolishing of cotton fabric with free/immobilized cellulase. **Carbohydrate Polymers**, v. 191, p. 95-102, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.067. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014486171830225X?via%3Dihub. Acesso em: 28 dez. 2023.

SANTOS, Felipe Augusto *et al*. Evaluation of the production of cellulases by Penicillium sp. FSDE15 using corncob and wheat bran as substrates. **Bioresource Technology Reports**, v. 14, p. 100648, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100648. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21000256?via%3Dihub. Acesso em: 14 out. 2024.

SCIORTINO J. R., Carmen V. **Atlas of clinically important fungi**. John Wiley & Sons, 2017.

SHAIKH-IBRAHIM, Ali *et al*. Carbohydrate conversion in spent coffee grounds: pretreatment strategies and novel enzymatic cocktail to produce value-added saccharides and prebiotic mannooligosaccharides. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v. 18, n. 1, p. 2, 2025. DOI: https://doi.org/10.1186/s13068-024-02601-6. Disponível em: https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-024-02601-6. Acesso em: 29 jan. 2024.

SHALLOM, Dalia; SHOHAM, Yuval. Microbial hemicellulases. **Current opinion in microbiology**, v. 6, n. 3, p. 219-228, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S1369-5274(03)00056-0. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1369527403000560?via%3Dihub. Acesso em: 01 dez. 2023.

SHARMA, Anamika; THAKUR, Avinash; NANDA, Vikas. Impact of bee pollen cell-wall disrupting techniques on the structural integrity, functional attributes, and nutritional quality of bee pollen protein isolates for food application. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 305, p. 141179, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141179. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813025017283?via%3Dihub. Acesso em: 25 jan. 2025.

SHARMA, H. P.; PATEL, H.; SUGANDHA. Enzymatic added extraction and clarification of fruit juices–A review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 57, n. 6, p. 1215-1227, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2014.977434. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2014.977434. Acesso em: 18 dez. 2023.

SHARMA, Hem Kanta; XU, Chunbao; QIN, Wensheng. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass for biofuels and bioproducts: an overview. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, p. 235-251, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-017-0059-y. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-017-0059-y. Acesso em: 08 set. 2024.

SHARMA, Shaina *et al.* Bioethanol Production from Green Coconut Residue Using Xylanases and Cellulases in Simultaneous Saccharification and Fermentation. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1-11, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-024-02864-y. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-024-02864-y. Acesso em: 20 jan. 2025.

SHARMA, Vishal *et al*. Deep eutectic solvents as promising pretreatment agents for sustainable lignocellulosic biorefineries: A review. **Bioresource Technology**, v. 360, p. 127631, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127631. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852422009609?via%3Dihub. Acesso em: 28 dez. 2024.

SHELOMI, Matan; CHEN, Ming-Ju. Culturing-enriched metabarcoding analysis of the *Oryctes rhinoceros* gut microbiome. **Insects**, v. 11, n. 11, p. 782, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/insects11110782. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-4450/11/11/782. Acesso em: 27 dez. 2024.

SHRUTHI, Balakrishna Rao; ACHUR, Rajeshwara Nagappa Hegde; BORAMUTHI, Thippeswamy Nayaka. Optimized solid-state fermentation medium enhances the multienzymes production from *Penicillium citrinum* and *Aspergillus clavatus*. **Current Microbiology**, v. 77, n. 9, p. 2192-2206, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s00284-020-02036-w. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00284-020-02036-w. Acesso em: 11 fev. 2025.

SIAMPHAN, Chatuphon *et al*. Production of D-galacturonic acid from pomelo peel using the crude enzyme from recombinant *Trichoderma reesei* expressing a heterologous exopolygalacturonase gene. **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129958, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129958. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621041275?via%3Dihub. Acesso em: 18 mar. 2024.

SILVA, C.M. da *et al.* Micorrizas arbusculares e mamoneira (*Ricinus communis* L.): 2. cultivo de sequeiro no semiárido. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, p. 98964-98976, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.34117/bjdv6n12-403. Acesso em: 21 dez. 2023.

SILVA, José Maria Cardoso; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (Ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Springer, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3. Disponível em: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-68339-3. Acesso em: 05 dez. 2023.

SILVA, Liliane Tamires Alves *et al*. Isolation of high amylase-producing filamentous fungi from the caatinga: standardization of the culture conditions and amylase activity from Penicillium sp. L1. **Asian J. Res. Biochem**., v. 10, p. 1-15, 2022. DOI: https://doi.org/10.9734/ajrb/2022/v10i130211. Disponível em: https://journalajrb.com/index.php/AJRB/article/view/186. Acesso em: 01 out. 2024.

SILVA, Mayanne Karla *et al*. Extracellular hydrolytic enzymes produced by yeasts from Antarctic lichens. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, p. e20210540, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210540. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aabc/a/bT5QhhnW9Dxyvt3fVx7Lbyx/?lang=en. Acesso em: 28 fev. 2024.

SILVA, Monizy da Costa *et al*. Purification and Functional Characterization of a New Endoglucanase from *Pleurotus djamor* PLO13 Produced by Solid-State Fermentation of Agro-Industrial Waste. **Fermentation**, v. 11, n. 4, p. 182, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation11040182. Disponível em: https://www.mdpi.com/2311-5637/11/4/182. Acesso em: 13 jan. 2025.

SILVA, Paulo Ferreira *et al*. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196317301672?via%3Dihub. Acesso em: 03 dez. 2023.

SILVA, Tatielle P. *et al*. Production, purification, characterization and application of a new halotolerant and thermostable endoglucanase of *Botrytis ricini* URM 5627. **Bioresource technology**, v. 270, p. 263-269, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852418312744?via%3Dihub. Acesso em: 09 dez. 2023.

SILVA, Tatielle Pereira *et al*. Dilute acid pretreatment for enhancing the enzymatic saccharification of agroresidues using a *Botrytis ricini* endoglucanase. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 70, n. 1, p. 184-192, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/bab.2341. Disponível em: https://iubmb.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bab.2341. Acesso em: 20 nov. 2024.

SILVA-MENDOZA, Julio *et al*. Agave leaves as a substrate for the production of cellulases by *Penicillium* sp. and the obtainment of reducing sugars. **Journal of**

Chemistry, v. 2020, n. 1, p. 6092165, 2020. DOI: https://doi.org/10.1155/2020/6092165. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6092165. Acesso em: 03 dez. 2023.

SIMON, Alexandre L. *et al*. Inclusion of exogenous enzymes in feedlot cattle diets: Impacts on physiology, rumen fermentation, digestibility and fatty acid profile in rumen and meat. **Biotechnology Reports**, v. 41, p. e00824, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.btre.2023.e00824. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215017X23000449?via%3Dihub. Acesso em: 19 fev. 2025.

SINGH, Anita *et al*. An overview on the recent developments in fungal cellulase production and their industrial applications. **Bioresource Technology Reports**, v. 14, p. 100652, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100652. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21000293?via%3Dihub. Acesso em: 14 dez. 2024.

SINGH, Balvindra *et al*. Microbial multienzyme viz., pectinase, cellulase and amylase production using fruit and vegetable waste as substrate—a review. **Applied Microbiology**, v. 4, n. 3, p. 1232-1246, 2024b. DOI: https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4030084. Disponível em: https://www.mdpi.com/2673-8007/4/3/84. Acesso em: 21 jan. 2025.

SINGH, Harjeet *et al*. Engineering cellulolytic fungi for efficient lignocellulosic biomass hydrolysis: advances in mutagenesis, gene editing, and nanotechnology with CRISPR-Cas innovations. **Discover Applied Sciences**, v. 6, n. 12, p. 1-34, 2024a. DOI: https://doi.org/10.1007/s42452-024-06405-z. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-06405-z. Acesso em: 18 jan. 2025.

SINGH, Narpinder *et al*. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources**. Food chemistry**, v. 81, n. 2, p. 219-231, 2003. DOI: https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00416-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814602004168?via%3Dihub. Acesso em: 18 nov. 2023.

SINGH, Pardeep *et al*. Improved production of thermo-alkali-tolerant fungal cellulolytic cocktail following Co-fermentation of sugarcane bagasse and secondary sewage sludge. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 5, p. 6849-6854, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13399-022-02694-97. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-022-02694-9. Acesso em: 29 jan. 2025.

ŚLIŻEWSKA, Weronika; STRUSZCZYK-ŚWITA, Katarzyna; MARCHUT-MIKOŁAJCZYK, Olga. Metabolic potential of halophilic filamentous fungi—current perspective. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, n. 8, p. 4189, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms23084189. Disponível em: https://www.mdpi.com/1422-0067/23/8/4189. Acesso em: 13 mar. 2025.

SMITH, Sally E.; READ, David J. **Mycorrhizal symbiosis**. Academic press, 2010.

SONI, Sanjeev K. *et al*. Fungal enzymes in the production of biofuels. In: Fungi and Fungal Products in Human Welfare and Biotechnology. **Springer Nature Singapore**, 2023. p. 399-434. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-8853-0_14. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-8853-0_14. Acesso em: 18 jan. 2025.

SOTO-MALDONADO, Carmen; CONCHA-OLMOS, Jacqueline; ZÚÑIGA-HANSEN, María Elvira. The effect of enzymatically treated ripe banana flour on the sensory quality and glycemic response of banana-wheat flour composite muffins. **Journal of Food Science and Technology**, v. 57, n. 10, p. 3621-3627, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/s13197-020-04394-6. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-8853-0_14. Acesso em: 30 maio 2024.

SOUZA, Jeferson de Menezes *et al*. Cactus Endophytic Fungi and Bioprospecting for their Enzymes and Bioactive Molecules: A Systematic Review. **Chemistry & Biodiversity**, v. 20, n. 12, p. e202301413, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/cbdv.202301413. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.202301413. Acesso em: 31 maio 2025.

SOUZA, Danilo Diego. Adaptações de plantas da Caatinga. Oficina de Textos, 2020.

SOUZA, Jaqueline B. et al. Sunflower stalk as a carbon source inductive for fungal xylanase production. Industrial crops and products, v. 153, p. 112368, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112368. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669020302843?via%3Dihub. Acesso em: 30 dez. 2023.

SOUZA, Thaiza SP; KAWAGUTI, Haroldo Yukio. Cellulases, hemicellulases, and pectinases: Applications in the food and beverage industry. Food and Bioprocess Technology, v. 14, n. 8, p. 1446-1477, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11947-021-02678-z. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-021-02678-z. Acesso em: 22 set. 2024.

SRIVASTAVA, Neha *et al*. Impact of mixed lignocellulosic substrate and fungal consortia to enhance cellulase production and its application in NiFe2O4 nanoparticles mediated enzymatic hydrolysis of wheat straw. **Bioresource Technology**, v. 345, p. 126560, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126560. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852421019027?via%3Dihub. Acesso em: 19 jan. 2025.

SUTAONEY, Priya *et al*. Current perspective in research and industrial applications of microbial cellulases. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 130639, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130639. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813024014429?via%3Dihub. Acesso em: 21 fev. 2025.

TAGLIAPIETRA, Bruna Lago *et al*. Non-conventional starch sources. **Current Opinion in Food Science**, v. 39, p. 93-102, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.11.011. Disponível em:

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214799320301326?via%3Dihub. Acesso em: 05 ago. 2024.

TEDERSOO, Leho *et al*. Global diversity and geography of soil fungi. **science**, v. 346, n. 6213, p. 1256688, 2014. Disponível em:: https://doi.org/10.1126/science.1256688. Acesso em: 20 maio 2024.

TEIGISEROVA, Dominika Alexa; BOURGINE, Joseph; THOMSEN, Marianne. Closing the loop of cereal waste and residues with sustainable technologies: An overview of enzyme production via fungal solid-state fermentation. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 845-857, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550921000488?via%3Dihub. Acesso em: 15 jun. 2024.

TEIXEIRA, Iris S.; MILAGRE, Cintia DF. Evolução dirigida de enzimas: pequenas modificações, melhores biocatalisadores. Química Nova, v. 43, n. 6, p. 773-786, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170538. Acesso em: 18 jan. 2025.

THOMAS, L. *et al*. Industrial enzymes: xylanases. In: **Current developments in biotechnology and bioengineering**. Elsevier, 2017. p. 127-148. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00006-3. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444636621000063?via%3Dihub. Acesso em: 22 fev. 2025.

TRABELSI, Sahar *et al*. The optimized production, purification, characterization, and application in the bread making industry of three acid-stable alpha-amylases isoforms from a new isolated *Bacillus subtilis* strain US586. **Journal of food biochemistry**, v. 43, n. 5, p. e12826, 2019. DOI: https://doi.org/10.1111/jfbc.12826. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfbc.12826. Acesso em: 30 jan. 2025.

TRONCOSO, Evelin *et al*. Identification and characterization of yeasts isolated from the South Shetland Islands and the Antarctic Peninsula. **Polar Biology**, v. 40, p. 649-658, 2017. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s00300-016-1988-9. Acesso em: 28 maio 2024.

VAID, Surbhi *et al*. One pot consolidated bioprocess for conversion of *Saccharum spontaneum* biomass to ethanol-biofuel. **Energy Conversion and Management**, v. 250, p. 114880, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114880. Acesso em: 18 jan. 2025.

VAJPAYEE, Mona *et al*. Cellulase enzyme based wet-pretreatment of lotus fabric to improve antimicrobial finishing with A. indica extract and enhance natural dyeing: sustainable approach for textile finishing. **ChemistrySelect**, v. 7, n. 25, p. e202200382, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/slct.202200382. Disponível em: https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/slct.202200382. Acesso em: 25 jan. 2025.

VALLE-PÉREZ, Alexander U. *et al*. Interaction of fungal strains, biomass, and pH to produce lignocellulosic enzymes in solid-state fermentation for sustainable

biotransformation of sugarcane and agave bagasse. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 2, p. 1015-1028, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12155-023-10695-3. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-023-10695-3. Acesso em: 18 jan. 2025.

VARGHESE, Saju *et al*. Process optimization for saccharification and fermentation of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) to maximize ethanol production performance. **Bioresource Technology Reports**, v. 24, p. 101681, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101681. Acesso em: 11 mar. 2024.

VASCONCELOS, N. M.; PINTO, G. A. S.; ARAGÃO, F. A. S. **Determinação de açúcares redutores pelo ácido 3,5-dinitrosalicílico: histórico do desenvolvimento do método e estabelecimento de um protocolo para o laboratório de bioprocessos**. 1. ed. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2013. 29 p. Disponível em: http://www.cnpat.embrapa.br6. Acesso em: 21 dez. 2023.

VERA, Ramon E. *et al*. Upcycling cotton textile waste into bio-based building blocks through an environmentally friendly and high-yield conversion process. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 189, p. 106715, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106715. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344922005481?via%3Dihub. Acesso em: 18 jan. 2025.

VIANA, José Diogo da Rocha *et al*. Process optimization in the obtention of microfiltered banana (*Musa cavendish*) juice by response surface methodology. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 45, n. 12, p. e15987, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpp.15987. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpp.15987. Acesso em: 30 jun. 2024.

VISAGIE, C. M. *et al*. A review of recently introduced *Aspergillus*, *Penicillium*, *Talaromyces* and other Eurotiales species. **Studies in Mycology**, v. 107, n. 1, p. 1-66, 2024. DOI: https://doi.org/10.3114/sim.2024.107.01. Disponível em: https://www.ingentaconnect.com/content/wfbi/sim/2024/00000107/00000001/art00002. Acesso em: 20 jan. 2025.

VISAGIE, C. M. *et al*. Identification and nomenclature of the genus *Penicillium*. **Studies in mycology**, v. 78, n. 1, p. 343-371, 2014. Acesso em: 20 jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.simyco.2014.09.001. Disponível em: https://www.ingentaconnect.com/content/wfbi/sim/2014/00000078/00000001/art00006. Acesso em: 25 maio 2024.

VISHWAKARMA, Kanchan *et al*. Revisiting plant–microbe interactions and microbial consortia application for enhancing sustainable agriculture: a review. **Frontiers in Microbiology**, v. 11, p. 560406, 2020. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.560406. Disponível em: https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2020.560406/full. Acesso em: 16 fev. 2024.

VUČUROVIĆ, Vesna *et al*. Simultaneous Saccharification and Fermentation of Wheat Starch for Bioethanol Production. **Fermentation**, v. 11, n. 2, p. 80, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/fermentation11020080. Disponível em:

https://www.mdpi.com/2311-5637/11/2/80. Acesso em: 18 jan. 2025.

WALKER, Harriet *et al*. The effect of including a mixed-enzyme product in broiler diets on performance, metabolizable energy, phosphorus and calcium retention. **Animals**, v. 14, n. 2, p. 328, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ani14020328. Disponível em: https://www.mdpi.com/2076-2615/14/2/328. Acesso em: 18 jan. 2025.

WANG, Hongling *et al*. Characterization of a novel multifunctional β-glucosidase/xylanase/feruloyl esterase and its effects on improving the quality of Longjing tea. **Food Chemistry**, v. 453, p. 139637, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139637. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814624012871?via%3Dihub. Acesso em: 21 jan. 2025.

WANG, Tong *et al*. Enzymatically modified starch for paper surface sizing: Enzymes with different action modes and sites. **Carbohydrate Polymers**, v. 291, p. 119636, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119636. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861722005410?via%3Dihub. Acesso em: 30 abr. 2024.

WANG, Xiaoxuan; REDDY, Chagam Koteswara; XU, Baojun. A systematic comparative study on morphological, crystallinity, pasting, thermal and functional characteristics of starches resources utilized in China. **Food Chemistry**, v. 259, p. 81-88, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.121. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814618305636?via%3Dihub. Acesso em: 28 dez. 2023.

WAYLLACE, Natael M. *et al*. Microbial glucoamylases: structural and functional properties and biotechnological uses. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 39, n. 11, p. 293, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11274-023-03731-z. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-023-03731-z. Acesso em: 21 jan. 2025.

XIAO, Lulu et al. High-Quality Litter and Exogenous Cellulase Enhance Soil Nutrient Cycling and Enzymatic Activities. **Agriculture**; Basel, v. 14, n. 12, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14122162. Disponível em: https://www.mdpi.com/2077-0472/14/12/2162. Acesso em: 23 fev. 2025.

XIE, Zhaoyong *et al*. A compound enzyme with synergistic interaction to treat cotton stalk chemi-mechanical pulp to improve the properties of wastepaper pulp. **Cellulose**, v. 30, n. 14, p. 9013-9026, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10570-023-05298-2. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-023-05298-2. Acesso em: 17 ago. 2024.

XU, Jiaxin *et al*. Unlocking the potential of β-limit dextrin: Preparation, structure, properties, and promising applications**. Carbohydrate Polymers**, p. 123135, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.123135. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861724013614?via%3Dihub. Acesso em: 30 jan. 2025.

XU, Luyao *et al*. A sustainable bio-circular way for biorefinery of rice straw into bioproducts based on energy-efficient pretreatment. **Industrial Crops and Products**, v. 215, p. 118677, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118677. Acesso em: 31 jan. 2025.

YANG, Jianlei; CHING, Yern Chee; CHUAH, Cheng Hock. Applications of lignocellulosic fibers and lignin in bioplastics: A review. **Polymers**, v. 11, n. 5, p. 751, 2019. Disponivel em: https://doi.org/10.3390/polym11050751. Acesso em: 20 dez. 2024.

YANG, Manli *et al*. Status and trends of enzyme cocktails for efficient and ecological production in the pulp and paper industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, p. 138196, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138196. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623023545?via%3Dihub. Acesso em: 19 abr. 2024.

YANG, Mei *et al*. Evaluation of rheological properties, microstructure and water mobility in buns dough enriched in aleurone flour modified by enzyme combinations. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 11, p. 5913-5922, 2021. DOI: https://doi.org/10.1111/ijfs.15170. Disponível em: https://academic.oup.com/ijfst/article/56/11/5913/7806994. Acesso em: 23 mar. 2024.

YAO, Xiao *et al*. Review of the Synthesis and Degradation Mechanisms of Some Biodegradable Polymers in Natural Environments. **Polymers**, v. 17, n. 1, p. 66, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/polym17010066. Acesso em: 18 jan. 2025.

YE, Chenxu *et al*. The nest fungus of the lower termite *Reticulitermes labralis*. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 3384, 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-40229-x. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-019-40229-x. Acesso em: 18 jan. 2025.

YEGIN, Sirma; ALTINEL, Burak; TULUK, Kubra. Exploitation of *Aureobasidium pullulans* NRRL Y-2311-1 xylanase in mulberry and rice flours–based gluten-free cookie formulation: Effects on dough properties and cookie characteristics. **Journal of Food Science**, v. 89, n. 5, p. 2645-2658, 2024. DOI: https://doi.org/10.1111/1750-3841.17054. Disponível em: https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1750-3841.17054. Acesso em: 30 fev. 2025.

YU, Shixu *et al*. Lignin/polysaccharide composite: A nature-made match toward multifunctional bio-based materials. **Progress in Materials Science**, p. 101383, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101383. Disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S007964252400152X?via%3Dihub. Acesso em: 20 jan. 2025.

ZHANG, Chunzi *et al*. Optimization of enzyme-ultrasound assisted extraction from mulberries anthocyanins based on response surface methodology and deep neural networks and analysis of in vitro antioxidant activities. **Food Chemistry**, p. 143597, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143597. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814625008489?via%3Dihub. Acesso em: 18 jan. 2025.

ZHANG, Qiang *et al*. Effects of cyclic cellulase conditioning and germination treatment on the γ-aminobutyric acid content and the cooking and taste qualities of germinated brown rice. **Food Chemistry**, v. 289, p. 232-239, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.034. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814619305114?via%3Dihub. Acesso em: 09 dez. 2023.

ZHANG, Xiaolei *et al*. Formation mechanism of levoglucosan and formaldehyde during cellulose pyrolysis. **Energy & Fuels**, v. 25, n. 8, p. 3739-3746, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1021/ef2005139. Acesso em: 25 nov. 2023.

ZHANG, Zheng *et al*. Review of research progress on the production of cellulase from filamentous fungi. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 134539, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134539. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813024053443?via%3Dihub. Acesso em: 21 jan. 2025.

ZHAO, Jian; LI, Xuezhi; QU, Yinbo. Application of enzymes in producing bleached pulp from wheat straw. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 13, p. 1470-1476, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.012. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852405003433?via%3Dihub. Acesso em: 30 nov. 2023.

ZHAO, Longmei *et al*. Screening, characterization, and optimization of the fermentation conditions of a novel cellulase-producing microorganism from soil of Qinghai–Tibet Plateau. **Biotechnology and Applied Biochemistry**, v. 71, n. 6, p. 1211-1225, 2024. https://doi.org/10.1002/bab.2622. Acesso em: 25 jan. 2025.

ZHAO, Shuyuan *et al*. The physical and chemical properties of hemp fiber prepared by alkaline pectinase–xylanase system. **Cellulose**, v. 29, n. 18, p. 9569-9581, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10570-022-04858-2. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-022-04858-2. Acesso em: 18 fev. 2025.

ZHENG, Bo *et al*. A consolidated review of commercial-scale high-value products from lignocellulosic biomass. **Frontiers in Microbiology**, v. 13, p. 933882, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.933882. Acesso em: 08 abr. 2024.

ZHENG, Jiagang *et al*. Green and Efficient Extraction of *Taraxacum kok-saghyz* Natural Rubber and Its Structural Analysis. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 26, n. 3, p. 920, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/ijms26030920. Acesso em: 21 jan. 2025.

ZHU, Ru-gang *et al*. Comparative effects of pectin and hydrolyzed pectin coating as pre-frying treatments on acrylamide formation in potato chips. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 269, p. 132015, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132015. Disponível em https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813024028204?via%3Dihub. Acesso em: 18 fev. 2025.

ZOBEL, H. F. Molecules to granules: a comprehensive starch review. **Starch-Stärke**, v.

40, n. 2, p. 44-50, 1988. Disponível em: https://doi.org/10.1002/star.19880400203. Acesso em: 01 jun. 2025.