



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

HÁIMYK ANDRESSA NÓBREGA DE SOUZA

**BIOCONVERSÃO SIMULTÂNEA DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA E
PLÁSTICO POR *Pleurotus ostreatus* (Jacq). P. Kumm**

AREIA
2024

HÁIMYK ANDRESSA NÓBREGA DE SOUZA

**BIOCONVERSÃO SIMULTÂNEA DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA E
PLÁSTICO POR *Pleurotus ostreatus* (Jacq). P. Kumm**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Programa de Graduação
em Agronomia da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção
do título de Eng. Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr.(a) Bruno de Oliveira
Dias.

AREIA

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729b Souza, Haimyk Andressa Nobrega.

Bioconversão simultânea de biomassa lignocelulósica e plástico por *Pleurotus ostreatus* (Jacq). P. Kumm / Haimyk Andressa Nobrega Souza. - Areia, 2024.
56 f. : il.

Orientação: Bruno de Oliveira Dias.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Shimeji-branco. 2. Biodegradação. 3. Poluição Ambiental. I. Dias, Bruno de Oliveira. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635 (02)

HÁIMYK ANDRESSA NÓBREGA DE SOUZA

BIOCONVERSÃO SIMULTÂNEA DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA E
PLÁSTICO POR *Pleurotus ostreatus* (Jacq). P. Kumm

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada ao Programa de Graduação
em Agronomia da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção
do título de Eng. Agrônomo.

Aprovado em: 11/ 12 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 BRUNO DE OLIVEIRA DIAS
Data: 13/12/2024 07:38:52-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. (a) Dr. Dr. Bruno de Oliveira Dias (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente
 ADNA CRISTINA BARBOSA DE SOUSA
Data: 11/12/2024 18:44:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dra. Adna Cristina Barbosa de Sousa
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente
 ROBSON EDUARDO PEREIRA MONTEIRO
Data: 12/12/2024 15:32:05-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. MSc. Robson Eduardo Pereira Monteiro
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me dar saúde, força e resiliência para superar os desafios e alcançar esse objetivo.

À minha mãe, Lucineia Nóbrega, ao meu Pai Milton Souza, à minha avó materna Maria do Carmo, aos meus tios Márcio Nóbrega e Janílson Nóbrega, que sempre acreditaram no meu potencial e me inspiram diariamente com sua dedicação e amor incondicional. Eu Sou grata pelos seus exemplos de perseverança e coragem, que sempre me motivaram a seguir em frente.

À minha irmã, Bruna H. Nóbrega de Souza, por sua parceria e por estar ao meu lado em todas as etapas dessa caminhada.

Aos meus avós paternos, Maria do Socorro e Milton Souza, que com seu carinho e sabedoria foram pilares fundamentais na minha formação como pessoa.

À minha companheira, Cilene P. Maximiano (Leben), pelo seu apoio incansável, compreensão e por ser minha fortaleza em momentos difíceis. Sua presença ao meu lado tornou tudo mais leve e celebrável.

Aos colegas de classe pelos momentos de amizade e apoio, em especial aos meus amigos(a)s Adrielly P. Maximiano, Matheus Henrique, Maria Augusta, Robson Monteiro, Gabriela Monteiro, Isabelly Vieira, Alexandre Júnior, Amanda Baltazar, a Alice Cruz, Lívia Fernandes e Germana Pontes, que compartilharam muitos cafés, risadas, desafios e conquistas, tornando esta caminhada ainda mais significativa.

Ao meu orientador, Professor Bruno de Oliveira Dias, pela paciência, dedicação e orientação que me guiaram no desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento e apoio foram essenciais para que eu pudesse concluir esta etapa com êxito.

Aos professores da Agronomia UFPB, em especial a Prof^a Vânia Fraga, Prof^a Ariadne, Prof^a Rejane Mendonça, Prof^a Silvana Melo e Prof^a Luciana Cordeiro que contribuíram ao longo desses semestres, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento intelectual e moral de seus alunos (as).

Agradeço a todos vocês por acreditarem em mim, por me apoiarem e por fazerem parte dessa história. Este trabalho é também uma conquista compartilhada com cada um de vocês.

“Não existem problemas ambientais,
existem apenas sintomas ambientais de
problemas humanos” - Robert Gilman

RESUMO

O descarte inadequado de resíduos plásticos e coprodutos orgânicos, como palha, bagaço e cascas, em aterros, solos expostos ou cursos d'água, propicia a liberação de gases de efeito estufa e a contaminação de fontes de água, afetando a saúde humana. Por outro lado, a Economia circular, ao priorizar a redução, a reutilização e a reciclagem, transforma esses resíduos em recursos valiosos, contribuindo para a melhoria ambiental e a redução das emissões. Nesse contexto, o uso de fungos como *Pleurotus ostreatus* destaca-se por sua habilidade de biodegradar resíduos orgânicos e plásticos simultaneamente, oferecendo soluções sustentáveis para a produção de cogumelos e a redução de impactos ambientais. Este estudo tem como objetivo investigar o crescimento, a produtividade e as características bromatológicas de *P. ostreatus* ao manejar resíduos vegetais e plásticos, além de avaliar a composição química do substrato residual como um possível condicionador de solo. O delineamento foi um DIC (2 x 2) utilizando palha de bananeira suplementada com dois tipos de plástico, com e sem a inoculação de *P. ostreatus*, durante de 60 dias. A palha foi umedecida a 70% com água alcalina, adicionada 2% de farinha de trigo e suplementada 10% com polipropileno (PP) e poliestireno (PS). A inoculação da palha com *P. ostreatus* foi feita com grãos de alpiste colonizados. Os dados passaram por uma ANAVA e submetidos ao Teste de tukey, ($P \leq 0,05$). Nos resultados, a massa fresca total de cogumelos usando PS foi de (130,8 g) em comparação ao PP (126,48 g). Em relação à precocidade, o tempo necessário para a colheita foi com PS (9,4 dias) e com PP (12,1 dias). O teor proteico dos cogumelos alcançou 14,32% no PP e 15,13% no PS, enquanto o teor de carboidratos foi de 65,1% no PP e 66,4% no PS. A eficiência biológica foi de 84,32% para o PP e 87,2% para o PS. A perda de matéria orgânica (PMO) nos substratos inoculados com *P. ostreatus* foi de 50,71% no PP e 46,39% no PS. Já nos tratamentos controle, sem a inoculação com *P. ostreatus*, os valores de PMO foram de 29,33% no PP e 33,79% no PS, estatisticamente os resultados não indicaram diferenças significativas entre os tratamentos. Contudo, observou-se um efeito significativo do fungo na composição do substrato residual. O tratamento com polipropileno (PP) associado a *P. ostreatus* apresentou o segundo maior teor de fósforo (318,45 mg/kg), sugerindo que a atividade do fungo pode favorecer a liberação ou a disponibilidade desse nutriente. Conclui-se que *P. ostreatus* possui potencial para promover a bioconversão de resíduos plásticos e vegetais, produzindo alimentos de qualidade enquanto contribui para a mitigação da poluição ambiental. Essa abordagem mostra-se com uma alternativa viável e sustentável para a gestão de resíduos, unindo o aproveitamento de nutrientes à produção de alimentos saudáveis.

Palavras-Chave: shimeji-branco; biodegradação; poluição ambiental.

ABSTRACT

Improper disposal of plastic waste and organic by-products, such as straw, bagasse and peels, in landfills, exposed soils or waterways can release greenhouse gases and contaminate drinking water sources, affecting human health. However, the circular economy, by prioritizing reduction, reuse and recycling, transforms this waste into valuable resources, contributing to environmental improvement and emissions reduction. In this context, the use of fungi such as *Pleurotus ostreatus* has stood out for its ability to biodegrade organic and plastic waste simultaneously, integrating sustainable solutions for mushroom production and mitigation of environmental impacts. This study aimed to evaluate the development, production and bromatological characteristics of *P. ostreatus* from the degradation of plant and plastic waste. In addition, the chemical composition of the residual substrate was evaluated as a potential soil conditioner. The design was a DIC (2 x 2) using banana straw supplemented with two types of plastic, with and without inoculation of *P. ostreatus*, for 60 days. The straw was moistened to 70% with alkaline water, added 2% of wheat flour and supplemented with polypropylene (PP) and polystyrene (PS). The inoculation of the straw with *P. ostreatus* was done with colonized canary seed grains. The data underwent an ANAVA and the Tukey test ($P \leq 0,05$). In the results, the total fresh mass of mushrooms using PS was (130.8 g) compared to PP (126.48 g). Regarding precocity, the time required for harvest was with PS (9.4 days) and with PP (12.1 days). The protein content of the mushrooms reached 14.32% in PP and 15.13% in PS, while the carbohydrate content was 65.1% in PP and 66.4% in PS. The biological efficiency was 84.32% for PP and 87.2% for PS. The loss of organic matter (PMO) in the substrates inoculated with *P. ostreatus* was 50.71% in PP and 46.39% in PS. In the control treatments, without inoculation with *P. ostreatus*, the PMO values were 29.33% in PP and 33.79% in PS; statistically, the results did not indicate significant differences between treatments. However, a significant effect of the fungus on the composition of the residual substrate was observed. The treatment with polypropylene (PP) associated with *P. ostreatus* presented the second highest phosphorus content (318.45 mg/kg), suggesting that the activity of the fungus may favor the release or availability of this nutrient. It is concluded that *P. ostreatus* has the potential to promote the bioconversion of plastic and vegetable waste, producing quality food while contributing to the mitigation of environmental pollution. This approach can be a viable and sustainable alternative for waste management, combining the use of nutrients with the production of healthy food.

Keywords: shimeji mushroom; biodegradation; environmental pollution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz lignocelulósica presente na parede celular vegetal	18
Figura 2 - <i>Pleurotus ostreatus</i> em substrato pós cultivo.....	23
Figura 3 - Cortes dos copos descartáveis de poliestireno e polipropileno.....	26
Figura 4 - Colonização de grãos de alpiste inoculados com <i>Pleurotus ostreatus</i> (a) sem colonização; (b) em crescimento e (c) grãos totalmente colonizados.	27
Figura 5 – A. Desinfestação do substrato em autoclave; B. Adição dos plásticos e inóculo em câmara de fluxo laminar	28
Figura 6 - (a) Dia 0 após inoculação e (b) Dia 25 após inoculação	29
Figura 7 - Unidades experimentais inoculadas com <i>Pleurotus ostreatus</i> durante a frutificação.	30
Figura 8 - Processo de separação dos plásticos da palha de bananeira após 60 dias.	32
Figura 9 - <i>Pleurotus ostreatus</i> em ponto de colheita.	34
Figura 10 - Eficiência Biológica nos tratamentos com adição de PP e PS.	37
Figura 11 - Perda de Matéria Orgânica nos tratamentos contendo palha de bananeira e dois tipos de plástico, com e sem <i>Pleurotus ostreatus</i>	38
Figura 12 - (A) Morfologia do cogumelo cultivado no estudo; (B) Micélio recobrimdo a superfície do plástico.....	40
Figura 13 – A. Micrografias da superfície do (A1) PP e (A2)PS; B. Imagens da superfície do PP destacando o micélio e um pedaço de tecido vegetal com aumento de (B1)10x e (B2)40x.	41
Figura 14 - Plásticos contendo esporos após incubação de 60 dias.....	42
Figura 15 - Micrografias da superfície dos plásticos, contendo hifas e esporos.	43
Figura 16- Teor de Fósforo (mg/Kg^{-1}) disponível após 60 dias.	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3 REVISÃO DE LITERATURA	12
3.1 HISTÓRICO DA POLUIÇÃO POR PLÁSTICOS	12
3.2 EFEITOS DA POLUIÇÃO PLÁSTICA NA QUALIDADE DO SOLO, ÁGUA, AR, SAÚDE HUMANA E ANIMAL	14
3.3 BIOMASSA VEGETAL	17
3.4 BIOCONVERSÃO POR FUNGOS	20
3.5 <i>Pleurotus ostreatus</i>	23
4 METODOLOGIA	25
4.1 LOCAL DO ESTUDO	25
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	25
4.3 DESINFECÇÃO DOS PLÁSTICOS.....	25
4.4 MATERIAL BIOLÓGICO	26
4.5 CULTIVO DE <i>Pleurotus ostreatus</i> EM PALHA DE BANANEIRA E PLÁSTICO ..	26
4.6 VARIÁVEIS DE PRODUTIVAS E BIOLÓGICAS	30
4.7 SELEÇÃO DOS MATERIAIS	32
4.8 ANÁLISES DO SUBSTRATO APÓS BIOCONVERSÃO POR <i>Pleurotus ostreatus</i>	32
4.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6 CONCLUSÕES	48

1 INTRODUÇÃO

A crescente dependência de materiais plásticos em diferentes setores da sociedade tem intensificado uma das maiores crises ambientais da atualidade. Segundo Besseling, (2013), produzidos em grande escala devido à sua durabilidade e características, os plásticos apresentam um ciclo de vida que frequentemente culmina em impactos negativos para o meio ambiente. Sua manipulação libera partículas que podem ser absorvidas pelas plantas, acumulando-se na cadeia alimentar e gerando sérios riscos à saúde humana. (Khalid, 2021). No setor agrícola, o uso extensivo de plásticos em embalagens de fertilizantes, sementes, pesticidas, sombrites e filmes de cobertura do solo (*mulching*), atribui a agricultura como uma das principais fontes de resíduos plásticos (Chen et al., 2020) .

Além disso, o descarte inadequado desses materiais contribui para a contaminação de solos, rios e oceanos, acarretando danos à fauna marinha, às aves e ao homem (Lebreton; Andrady, 2019). A presença desses resíduos interfere nos processos naturais do solo, como a aeração e a absorção de água, e compromete a produtividade agrícola e a segurança alimentar (Bhardwaj et al., 2024). Dessa forma, a poluição plástica interfere na produção agrícola, na biodiversidade e na viabilidade dos ecossistemas a longo prazo.

Paralelamente, o processamento agroindustrial gera volumes de resíduos orgânicos que resultam do processamento de matérias-primas como grãos, frutas, oleaginosas e cana-de-açúcar, embora frequentemente descartados como lixo, possuem elevado potencial de reaproveitamento. Esses resíduos, quando processados, são ricos em nutrientes, fibras, óleos e energia potencial, com alternativa de serem transformados em coprodutos com valor agregado para diferentes aplicações (Almaraz-Sánchez et al., 2022). Contudo, quando descartados de forma convencional, os resíduos orgânicos contribuem para a emissão de gases de efeito estufa, como metano, e a atração de vetores de doenças, causando danos ao meio ambiente e à saúde humana (Sharma; Arora, 2015).

A gestão de resíduos e a Economia circular apresentam conceitos complementares, ambos voltados para a minimização de volumes acumulados e a

maximização da eficiência no uso de recursos. Nesse sentido, os resíduos manipulados com base na Economia Circular, com ênfase na redução, reutilização e reciclagem, têm o potencial de serem convertidos em coprodutos, contribuindo a redução das emissões de gases de efeito estufa (Paes et al., 2019). Dessa forma, a transição de uma Economia linear para uma Economia circular exige a reformulação de práticas de gestão de resíduos, promovendo a sustentabilidade e redução de riscos ambientais (Sharma et al., 2020).

Os fungos, como decompositores, desempenham um papel essencial na ciclagem de nutrientes, quebrando matéria orgânica complexa, como celulose e lignina, através da ação de enzimas. Essa função ecológica permite a regeneração do solo e o equilíbrio dos ecossistemas. Também são utilizados para transformar resíduos orgânicos em produtos de alto valor, como cogumelos, convertendo materiais de baixo valor em alimentos nutritivos. Além disso, o substrato gasto (SMS) gerado no cultivo de cogumelos pode ser reaproveitado como composto, ração animal ou matéria-prima para embalagens e materiais de construção. Essa abordagem contribui para a redução de resíduos a esmo e apoia os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em busca uma Economia circular e práticas ambientalmente responsáveis.

Estudos indicam que fungos do gênero *Pleurotus spp.*, reconhecidos por sua eficiência na manipulação da lignina, também são capazes de biodegradar polímeros derivados do petróleo. Exemplos incluem a manipulação de plástico oxo-biodegradável por *P. ostreatus* (Luz, 2013), a manipulação de polietileno verde pelo mesmo fungo (Luz et al., 2015), e a formulação de polietileno de alta densidade (PEHD) (Hock et al., 2020). Recentemente, também foi demonstrada a biodegradação do plástico PET em períodos de 30 a 60 dias por *P. ostreatus* e *P. pulmonarius* (Odigbo et al., 2023). Portanto, a presente pesquisa ao explorar a capacidade desses organismos em decompor materiais plásticos e biomassa vegetal visa contribuir com proposta para a transição de uma Economia linear para uma circular, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e oferecendo novas perspectivas para a gestão de resíduos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a capacidade de *Pleurotus ostreatus* em degradar simultaneamente palha de bananeira e dois tipos de plásticos, o poliestireno (PS) e polipropileno (PP).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar os aspectos biológicos (precocidade) e produtivos (Eficiência biológica, perda da matéria orgânica);
- b) Verificar o teor de umidade, cinzas lipídios, proteínas e carboidratos dos cogumelos cultivados em palha de bananeira suplementada com plástico;
- c) Avaliar a composição química dos substratos exauridos quanto aos teores de carbono, nitrogênio, fósforo, potássio e sódio.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 HISTÓRICO DA POLUIÇÃO POR PLÁSTICOS

O termo "poluição" tem origem no latim "*pollutio*", derivado do verbo "*polluere*", que significa "sujar", "manchar" ou "profanar". Esse verbo é formado pela junção de "por-" (forma variante de "*pro-*", indicando movimento para frente ou algo adiante) e "*luere*", que significa "lavar" ou "purificar". Assim, o termo carrega a ideia de "desviar algo de sua pureza ou limpeza original". Em sua evolução, o conceito foi ampliado para incluir não apenas a sujeira física, mas também a degradação moral ou ambiental, assumindo o sentido moderno de contaminação (Rome, 1996).

Acerca disso, a história do plástico, marcada por sua versatilidade e utilidade, está intrinsecamente ligada à problemática da poluição ambiental, aos desafios consideráveis relacionados ao descarte e impacto no meio ambiente (Kaza et al. 2018). O mesmo atributo – durabilidade - que proporcionou inovação e praticidade à sociedade também deu origem a uma das maiores preocupações ambientais no mundo contemporâneo (Pilapitiya e Ratnayake, 2024).

O termo popular “plástico” deriva da palavra grega “*plastikós*”, que significa “aquilo que pode ser moldado”, refletindo a capacidade desses materiais de serem transformados sob pressão, calor ou por reações químicas. O químico Jöns Jakob Berzelius introduziu o termo "polímero" em 1833, conceituando-o como uma substância química composta por unidades recorrentes, essas unidades se dispõem em redes tridimensionais, bidimensionais ou unidimensionais (Tewari et al. 2022). A característica foi explorada pela primeira vez de forma revolucionária em 1907, quando Leo Hendrick Baekeland, um químico belga, inventou a baquelita. Esse material foi o primeiro plástico totalmente sintético, marcando o início da era dos polímeros e inaugurando novas possibilidades na fabricação de bens duráveis, graças à sua maleabilidade e resistência (AMS, 1993). Embora exista a possibilidade de uso de materiais poliméricos naturais, como o âmbar desde a Antiguidade, a produção industrial de plásticos é um fenômeno do século XX com o desenvolvimento da química orgânica e dos processos de polimerização (Hage, 1998).

Os principais tipos de plásticos incluem Polietileno Tereftalato (PET), amplamente utilizado em garrafas de bebidas e embalagens alimentícias; o Polietileno de Alta Densidade (PEAD), comum em frascos de produtos de limpeza, caixas e

tubos; Policloreto de Vinila (PVC), aplicado em tubos, revestimentos de cabos e produtos médicos; Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), usado em sacolas plásticas, filmes e embalagens flexíveis; Polipropileno (PP), presente em tampas, potes de alimentos e fibras têxteis; e Poliestireno (PS), encontrado em embalagens descartáveis, copos e utensílios (Laskar e Kumar, 2019).

Os primeiros plásticos a serem produzidos em larga escala foram o Policloreto de Vinila (PVC) em 1928, nos EUA, o Poliestireno (PS) em 1930, na Alemanha, e o Polietileno (PE) em 1931, na Inglaterra. A partir de então, a indústria de plásticos cresceu rapidamente, impulsionada pela descoberta de novos polímeros, como o Tereftalato de Polietileno (PET) em 1941, e pela expansão da produção para diversos países, incluindo o Brasil, onde o PVC começou a ser fabricado em 1955 e o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) em 1958 (Ledo, 2015). Na década de 1970, o Brasil produzia em grande escala os principais tipos de plásticos utilizados atualmente (Pinceli, et al. 2021).

A produção de plásticos teve um crescimento maior a partir da década de 1970, ultrapassando, na época, a produção de aço. Esse avanço evidenciou a crescente dependência de recursos fósseis, especialmente durante a crise do petróleo em 1974. Nos anos seguintes, as preocupações com a poluição causada por plásticos se intensificaram globalmente, culminando na identificação de vastas áreas oceânicas com altas concentrações de resíduos plásticos, conhecidas como "ilhas de lixo" ou "continente de plástico" (Lebreton et al., 2018). Nesse contexto, aumentaram os esforços para diminuir a poluição causada por plásticos com o surgimento de opções como plásticos biodegradáveis, fotodegradáveis e bioplásticos, fabricados a partir de fontes renováveis, como a biomassa celulósica (Mathew, et al. 2024).

Outrossim, quando expostos a fatores como radiação solar, atrito e ação de organismos, os plásticos se fragmentam em pedaços menores, os microplásticos (MP), que são partículas menores que 5 mm (Rani, et al. 2024). Os MPs contaminam a cadeia alimentar e causam comorbidades na saúde humana, pois atuam como esponjas para poluentes persistentes como Dicloro-Difenil-Tricloroetano (DDTs), Bifenilos Policlorados (PCBs) e Éteres Difenil-Polibromados (PBDEs) (Brennecke et al. 2016). A pesquisa de Li et al. (2021) evidencia que a associação entre MPs e esses poluentes intensifica a intoxicação em organismos vivos, potencializando efeitos tóxicos, mutagênicos e endócrinos.

As soluções atuais, oriundas de Economia linear, apresentam limitações em sua gestão, pois apesar dos esforços para reciclar e incinerar, ainda é pouca a quantidade de plásticos corretamente tratados. Esse resultado é causado por diversos fatores, como, os altos custos de coleta e classificação, e as limitações tecnológicas e econômicas de processos de reciclagem mais avançados e a diversidade de composições de diferentes materiais como PVC, PET, PS, etc. A incineração, por sua vez, é empregada no tratamento de 15% dos resíduos plásticos, além de contribuir para o agravamento das mudanças climáticas, liberando efeitos tóxicos, prolongando sua persistência no ambiente, pois é quase três vezes mais toneladas de gases do efeito estufa na atmosfera para cada tonelada de resíduo plástico incinerado (Rudolph et al. 2017).

Contudo, o aumento exponencial no consumo de plásticos flexíveis nos últimos anos, principalmente no período da Pandemia do COVID-19, agravou a crise dos microplásticos. Esse cenário foi impulsionado pelo uso massivo de materiais descartáveis, como embalagens, máscaras e equipamentos de proteção, que intensificaram a propagação de fragmentos plásticos no ambiente. Segundo Lebreton & Andrade (2019), se os padrões de consumo atuais se mantiverem, a quantidade de resíduos plásticos que não seguem as práticas de gestão ambiental adequadas pode triplicar até 2060, atingindo entre 155 e 265 milhões de toneladas métricas (MTM) por ano.

Em suma, a crescente crise do acúmulo de plásticos no meio ambiente impõe novos desafios e demanda soluções urgentes que priorizem alternativas sustentáveis para promover a economia circular desses materiais (Adami e Schiavon, 2021). A transição para uma economia circular, centrada nos princípios de redução, reutilização e reciclagem, torna-se indispensável para mitigar os impactos. Nesse contexto, a biodegradação mediada por microrganismos surge como oportunidade, oferecendo uma estratégia sustentável e econômica para acelerar a decomposição desses materiais, enquanto contribui para a ciclagem de nutrientes no ambiente natural.

3.2 EFEITOS DA POLUIÇÃO PLÁSTICA NA QUALIDADE DO SOLO, ÁGUA, AR, SAÚDE HUMANA E ANIMAL

Segundo Lebreton et al. (2018), estima-se que um terço de todo o plástico descartado tenha sido inserido na natureza como poluição terrestre, aquática e atmosférica. De acordo com Kosior, e Crescenzi, (2020), a maioria dos resíduos

plásticos que entram nos oceanos origina-se de atividades terrestres, como resíduos domésticos, industriais e urbanos. Além dos sistemas de gerenciamento de resíduos precários que em muitos países, contribuem substancialmente para esse problema.

De acordo com Lebreton e Andrady (2019), a maioria dos resíduos plásticos mal geridos (91%) é transportado pelos rios, que são os principais caminhos para o lixo plástico chegar ao oceano. Portanto, é estimado que os rios transportem entre 70% - 80% dos plásticos que eventualmente chegam aos oceanos, com entradas primárias provenientes de detritos mal manuseados durante a fabricação e uso da agricultura, terra e efluentes de estação de tratamento de águas residuais (Horton et al. 2017). Para Geyer et al. (2017), essa realidade contribui para a projeção de haver mais plástico do que peixes nos oceanos até 2050.

As características específicas das partículas plásticas, como tamanho, densidade, forma, composição química, carga superficial e revestimento superficial, determinam sua dispersão e comportamento no meio ambiente. Por exemplo, partículas menores e mais leves podem ser transportadas mais facilmente por correntes e ventos, enquanto partículas maiores podem afundar ou ser retidas em áreas específicas. Devido a isso, tem sido comum observar relatos da presença de microplásticos no solo, no ar e nos ambientes aquáticos.

Pesquisas realizadas por Jambeck et al. (2015) e Ryberg et al. (2018) destacam que regiões com alta densidade populacional, intensa atividade pesqueira e turismo são causas da poluição plástica dos oceanos, evidenciando a forte relação entre as atividades humanas e esse problema ambiental. O Brasil ocupa a 4ª posição mundial com 11.355,220 toneladas de plástico, ficando atrás apenas dos EUA, China e Índia. Porém, segundo Grooten e Almond (2018), apenas 1,3% da produção nacional é reciclado. Dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2022) mostram que a geração de resíduos plásticos nas cidades brasileiras é equivalente a 64 kg de plástico ao ano por pessoa, totalizando 13,7 milhões de toneladas em 2022.

Jahandari (2023) aponta que a chuva e o vento atuam como vetores para a disseminação da poluição plástica em diversos ambientes. Somando-se com as recentes descobertas de microplásticos em placas de sal marinho, peixe enlatado, água da torneira, água engarrafada, açúcar e mel. Por conseguinte, essa

contaminação se acumula nos ecossistemas terrestres, urbanos e aquáticos, além de uma grande variedade de organismos. (Pannetier et al. 2019).

Assim como os oceanos e rios, os solos representam um reservatório de microplásticos, com fontes como lodo de esgoto aplicado como fertilizante (Corrandini et al. 2019) e precipitação atmosférica (Jahandari, 2023). Por conseguinte, há outras fontes potenciais de MPs em terras de cultivo de vegetais como: fibra sintética; rede verde; sacos plásticos; fertilizante orgânico e rede de sombra (Wang, et al. 2020).

A poluição por microplásticos e nanopartículas (MNP) no solo e na água causam danos às plantas, reduzindo a diversidade de espécies e alterando a composição das comunidades vegetais, com potencial de bioacumulação, desde os níveis tróficos mais baixos até o ser humano. Além disso, essa poluição plástica compromete o funcionamento dos ecossistemas agrícolas, e coloca em risco a segurança alimentar (Rillig et al. 2019).

Em sua pesquisa Gayathri et al. (2024), abordam que os microplásticos afetam distribuição, estabilidade dos agregados do solo, além de causarem efeito no direcionamento da mudança do micro/macrobioma do solo, o que é primordial para a retenção de água e a saúde geral do solo. Em outro estudo, Boots et al. (2019) descobriram que o aumento das concentrações de ácido polilático biodegradável e polietileno diminuiu consideravelmente o nível de minhoca no solo. Do mesmo modo, a presença de diferentes tipos de microplásticos, influenciam os efeitos do pH em diferentes tipos de solo e plantas, uma vez que as espumas de polietileno aumentam mais o pH do solo do que as películas de polietileno (Yu et al. 2020).

Lozano et al. (2021) estudaram os efeitos dos microplásticos em fibras, filmes, espumas e fragmentos e verificaram que todas as formas diminuíram a agregação do solo em 25%, pois os microplásticos introduzem pontos de fratura nos agregados e devido a potenciais efeitos negativos na biota do solo. Mostrando que as mudanças nas propriedades físico-químicas do solo colocando em risco o crescimento das plantas e a saúde do ecossistema (Gayatri, 2024).

Machado et al. (2019), ao investigarem os efeitos de seis tipos diferentes de microplásticos fibras de poliéster, esferas de poliamida e quatro tipos de fragmentos: polietileno, tereftalato de poliéster, polipropileno e poliestireno na saúde do solo e no desempenho da cebolinha (*Allium fistulosum*), observaram mudanças na biomassa

das plantas, na composição elementar dos tecidos, nas características das raízes e nas atividades microbianas do solo. Eles concluíram que a contaminação generalizada por microplásticos no solo causam sequelas no desempenho das plantas para os agroecossistemas e a biodiversidade terrestre.

Falsini et al. (2022) pesquisaram a poluição atmosférica e verificaram o efeito dos contaminantes do ar em *Tillandsia usneoides*, popularmente conhecida por barbas-de-velho, concluindo que a poluição atmosférica por micro e nanoplásticos transtorna o crescimento das plantas, interferindo no processo fotossintético, com efeitos variando conforme o tipo de plástico e seu estado (novo ou envelhecido). Por exemplo, folhas de *T. usneoides* tratadas com PVC mostram redução dos parâmetros fotossintéticos mostrando que o PVC é o mais tóxico, reduzindo quase pela metade o crescimento das plantas, enquanto outros plásticos (PE, PET e PC) apresentaram efeitos negativos apenas em estágios iniciais (Falsini et al. 2022).

Os seres humanos podem ingerir MPs através do consumo de frutos do mar, água potável e até mesmo pela inalação (Carbery et al, 2018). A consequente inalação de microplásticos por seres humanos pode levar a lesões respiratórias e outros problemas de saúde, pois os plásticos contêm aditivos químicos tóxicos, como ftalatos e bisfenol A, que podem ser liberados para o ambiente e entrar na cadeia alimentar. Essas substâncias são conhecidas por interferir no sistema endócrino, afetando o desenvolvimento de hormônios e aumentando o risco de doenças como câncer, obesidade e problemas reprodutivos (Kudzin, et al. 2023). Portanto, a poluição plástica nos ecossistemas é um problema multifacetado oriundo de setores primários, secundários e terciários, resultante da complexa interação entre as propriedades dos plásticos e as condições ambientais. Interfere nos ciclos biogeoquímicos essenciais, reduzindo a fertilidade do solo e comprometendo os habitats naturais. A presença de microplásticos nos ecossistemas ameaça a saúde de organismos vivos, incluindo seres humanos, ao introduzir toxinas na cadeia alimentar e dificultar os processos naturais de regeneração ambiental.

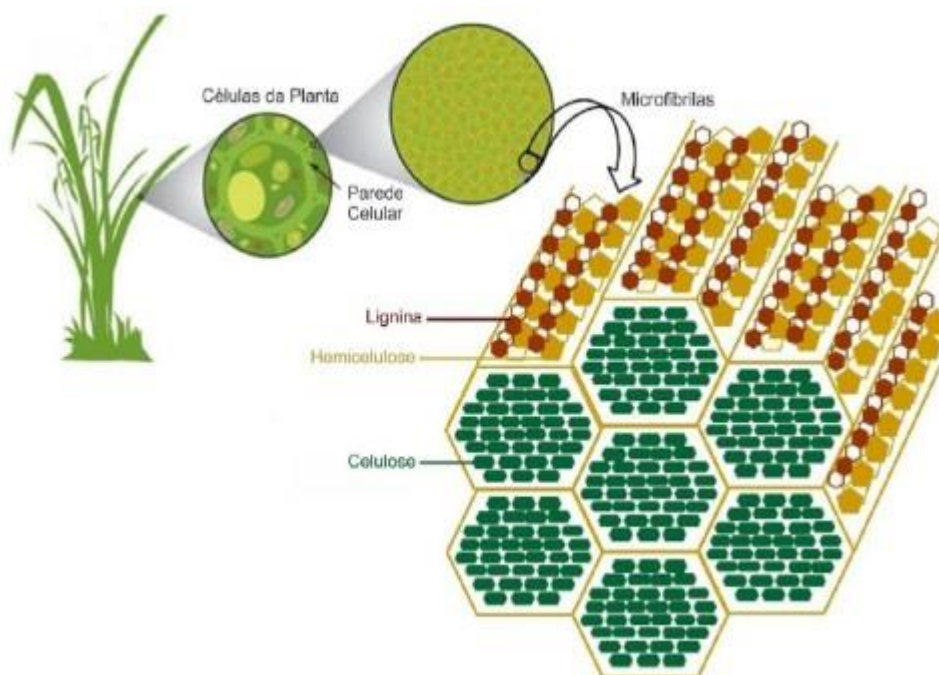
3.3 BIOMASSA VEGETAL

A biomassa vegetal refere-se a toda a matéria orgânica de origem vegetal. Inclui plantas, partes de plantas e resíduos vegetais provenientes de atividades agrícolas, florestais, ou até mesmo de processos de produção de alimentos e outros

produtos. Além de ser uma fonte renovável, pois pode ser constantemente reabastecida através do cultivo de plantas.

A biomassa vegetal ou lignocelulósica é um composto de celulose, hemicelulose e lignina. Esses três componentes estruturam a parede celular das plantas (Figura 1). Segundo Zhu (2017), é possível a conversão biológica da biomassa vegetal em diferentes aplicações industriais em compostos como o ácido benzóico, amplamente utilizado na indústria alimentícia e possui potencial antimicrobiano (Zhu, et al. 2017).

Figura 1 - Matriz lignocelulósica presente na parede celular vegetal



Fonte: Silva (2020)

A celulose na composição da madeira, é o componente predominante, representando de 40% a 50% do seu peso seco e o polissacarídeo mais abundante nas paredes celulares vegetais, composto por cadeias lineares de β -glicose ligadas por ligações glicosídicas $\beta(1-4)$. A formação da celulose ocorre por reações de condensação entre o grupo hidroxila do carbono 1 de uma β -D-glicose e o carbono 4 de outra β -D-glicose, resultando em uma ligação éter e na liberação de uma molécula de água (Solhi, et al. 2023).

A hemicelulose, por sua vez, constitui de 20% a 35% do peso seco da madeira. É composta por uma mistura de heteropolímeros ramificados, formados por diferentes pentoses (D-xilose e L-arabinose) e hexoses (D-manose, D-galactose, D-glucose), sendo a xilose o monossacarídeo mais abundante (Lu et al. 2017). Entre os diversos tipos de hemiceluloses, destacam-se as xilanas, mananas, arabinanas e galactanas, sendo as xilanas o segundo polissacarídeo renovável mais abundante na natureza, atrás apenas da celulose (Collins; Gerday; Feller, 2005). Nas plantas, as hemiceluloses estão presentes de forma fibrosa na parede celular, associadas às fibras de celulose.

A lignina está presente na parede celular vegetal, proporcionando rigidez à estrutura, é responsável por unir as fibras de celulose, conferindo maior rigidez à parede celular vegetal e o segundo maior componente da madeira, depois da celulose, sendo o biopolímero natural mais abundante na Terra. (Abdelaziz, et al, 2016).

Um problema associado ao acúmulo de biomassa vegetal é o potencial para a produção de metano, um gás de efeito estufa mais potente que o dióxido de carbono. De acordo com Leite et al. (2009), a decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos em ambientes inadequados libera Gases do Efeito Estufa (GEE) e gera lixiviados que podem vir a contaminar os recursos hídricos subterrâneos.

A produção global de biomassa vegetal residual da agricultura foi estimada em aproximadamente 140 gigatoneladas por ano (Alaydi, et al. 2024). Segundo Sharma e Arora (2015), a adição de resíduos lignocelulósicos aos solos agrícolas causam mudanças substanciais nos processos de ciclagem de nutrientes, alterando a disponibilidade de elementos essenciais para as plantas, influenciando a fertilidade do solo e modificando os fluxos de gases como o metano e o óxido nitroso entre o solo e a atmosfera, agravando as mudanças climáticas no mundo.

Os resíduos sólidos agroindustriais englobam todos os materiais descartados ao longo da cadeia produtiva agrícola, desde a produção em campo até a industrialização. Incluem resíduos de colheitas, como palhas, folhas, esterco, além de subprodutos gerados no processamento de alimentos, como fibras, cascas, sementes e madeira. Para Araújo et al. (2018), a vasta quantidade de coprodutos gerados pela indústria alimentícia brasileira representa um grande potencial inexplorado, com possibilidades de aplicação mais benéfica para a sociedade e o meio

ambiente. Coproduto - é um produto secundário que surge durante o processo de processamento da matéria prima e que pode ser vendido ou reutilizado de forma lucrativa.

Segundo Loon, Diener e Harris (2021), a Economia circular visa aumentar a sustentabilidade ambiental otimizando o uso de recursos por meio da redução, reciclagem e reutilização, contrastando com o modelo tradicional de economia linear de uso e descarte. Essa abordagem é projetada para agregar valor aos resíduos em coprodutos e diversificá-los de forma sustentável. Produtos com níveis mais elevados de material recirculado tendem a ter um menor impacto ambiental, indicando uma forte relação inversa entre circularidade e danos ambientais (Linder et al, 2020).

Trazendo destaque para o Nordeste, o município de Areia (PB), na região do Brejo Paraibano, a produção de biomassa vegetal da cultura da banana durante a colheita é de uma tonelada de frutas, que gera de 1,9 toneladas de folhas (Fernandes, 2013). O município atingiu uma produção de 13.500 toneladas de bananas, resultando em 54 toneladas de resíduos da bananicultura, gerando 26 toneladas provenientes das folhas (IBGE, 2022). Essa elevada quantidade de material tem potencial de ser aplicado em sistema de Economia circular para gerar mais uma opção sustentável e rentável, a partir do cultivo de cogumelos comestíveis (Silva, 2023).

Dessa forma, a fungicultura é uma atividade agrícola que vem sendo aplicada como uma alternativa na gestão de resíduos lignocelulósicos, como cascas, fibras e folhas (Monteiro, 2022; Silva, 2023) Como também a capacidade de desenvolvimento dos cogumelos em resíduos lignocelulósicos que visam promover biodegradação simultânea e de polímeros recalcitrantes, como a lignina, que possam também acelerar a degradação de polímeros sintético, como os plásticos, derivados do petróleo. (Moreno-Bayona et al. 2019; Castillo-Toro et al. 2021) Portanto, essas iniciativas se mostram promissoras para a gestão sustentável de resíduos dentro do viés da Economia circular.

3.4 BIOCONVERSÃO POR FUNGOS

Segundo Ratuchne et al. (2023) uma das descobertas mais recentes é a capacidade de alguns fungos degradarem plásticos, ou bioconverter. A bioconversão por fungos é um processo biotecnológico no qual microrganismos do grupo dos fungos

utilizam suas enzimas para transformar substâncias químicas em outras, geralmente com propriedades modificadas ou novas.

Os fungos destacam-se por seu papel biológico na ciclagem de nutrientes, possuindo enzimas capazes de promover a oxidação e a hidrólise de materiais orgânicos e inorgânicos, como a lignina e os plásticos, o que aumenta a hidrofilicidade e facilita a degradação desses materiais recalcitrantes (Lee et al. 2005). Características fúngicas, como bioatividade e capacidade de se desenvolver em condições adversas, tornam-nos decompositores eficientes. Ao degradar polímeros, os fungos convertem esses materiais em moléculas simples, como dióxido de carbono, água e biomassa, contribuindo para a manutenção dos ciclos biogeoquímicos (Srikanth et al. 2022).

Pesquisas recentes demonstram que diferentes espécies de fungos, como *Pleurotus ostreatus*, *Pycnoporus sanguineus*, *Penicillium italicum* e *Aspergillus flavus*, possuem a capacidade de degradar uma variedade de plásticos em curto período, revelando grande potencial para a bioconversão de resíduos plásticos em produtos com valor tecnológico agregado, como a extração de enzimas para uso industrial. (Cabrera et al. 2022).

A aplicação da bioconversão é uma técnica cada vez mais difundida na gestão de resíduos e apesar de exigir parâmetros específicos do ambiente, não requer condições ambientais complexas de serem encontradas na natureza ou reproduzidas em laboratório (Moreno-Bayona et al. 2019). A eficiência do processo de bioconversão é influenciada por fatores como a hidrofobicidade do plástico, a disponibilidade de nutrientes e as condições ambientais, como pH e temperatura. Entretanto, fatores como localização geográfica, propriedades do polímero, aditivos químicos, condições ambientais e interferência de outros materiais são fatores que podem alterar a velocidade ou viabilidade do processo (Da Luz et al. 2013).

Durante o processo de colonização fúngica, ocorrem simultaneamente processos químicos, como ações enzimáticas na superfície dos polímeros, que transformam compostos de alto peso molecular em substâncias mais simples, passíveis de serem absorvidas como fonte de carbono pelas células (Montazer et al. 2019). Além da ação química, o crescimento das hifas pode provocar danos mecânicos como inchaço e pequenas rupturas nos polímeros (Da Luz et al. 2015).

Segundo Srikanth et al. (2022), a biodegradação ocorre em etapas, começando com a hidrólise e sendo seguido pela oxidação. As enzimas utilizadas na bioconversão de polímeros orgânicos e sintéticos podem ser classificadas em quatro grandes grupos, são esses: 1. Oxidorredutases, 2. Hidrolases, 3. Transferases e 4. Isomerases. No grupo das Oxidorredutases estão as Lacases, Peroxidases e Oxigenases.

As famílias de enzimas ligninolíticas são as mais eficientes na degradação de polímeros sintéticos, devido a sua falta de especificidade como é o caso das fenol oxidase (lacase), outras enzimas desse grupo inclui Lignina Peroxidase (LiP), Manganês Peroxidase (MnP) e Peroxidase Versátil (VP). Nesse contexto, enzimas do grupo oxidativo, como a Lacase, Peroxidase versátil e Peroxidase dependente de manganês, são produzidas durante a fase de colonização do substrato.

A escolha da enzima ideal para a degradação depende tanto do tipo de polímero quanto do produto final desejado. Enzimas como lacases, peroxidases de lignina, peroxidases de manganês, polietilenases, cutinases, esterases e lipases iniciam a degradação de longas cadeias fenólicas, promovendo a conversão de polímeros em moléculas menos complexas (Kour et al. 2023).

Embora os plásticos apresentem diferenças significativas em relação à lignocelulose, uma vez que não possuem ligações C-C ou C-O hidrolisáveis, portanto, são mais recalcitrantes, porém existem semelhanças notáveis entre eles. Ambos os tipos de compostos são misturas de polímeros hidrofóbicos, contendo regiões tanto amorfas quanto cristalinas. Além disso, tanto os plásticos quanto a lignocelulose requerem a ação de Hidrolases e Oxidorredutases para sua degradação.

Portanto, a bioconversão por fungos é uma alternativa viável para reintegrar os resíduos produzidos, na natureza, contribuindo para os ciclos biogeoquímicos e reduzindo a quantidade de resíduos sólidos no planeta. Graças à sua notável capacidade de degradar materiais lignocelulósicos e outros compostos orgânicos complexos, os fungos desempenham um papel crucial nesse processo. Além de alinhar-se aos princípios da economia circular, a bioconversão amplia sua aplicabilidade em setores estratégicos como agricultura, indústria alimentícia e produção de energia renovável, conforme demonstrado por estudos recentes (Campos, 2004; Gonçalves, 2009).

3.5 *Pleurotus ostreatus*

O gênero *Pleurotus*, pertencente ao filo Basidiomycota, inclui cerca de 50 espécies que foram taxonomicamente validadas. O nome do gênero deriva da palavra grega '*pleurē*', que significa 'lateral', referindo-se ao crescimento lateral dessas espécies em relação ao substrato (Vieira, 2016). A diferenciação morfológica entre as espécies do gênero *Pleurotus* é observada em características como o tamanho, a cor e o formato do himenóforo, (Figura 2) Adicionalmente, esse gênero possui uma distribuição cosmopolita, ou seja, pode ser encontrado desde florestas tropicais e subtropicais até regiões semiáridas (Mata, Salmones, Savoie, 2017).

Esse gênero é classificado como podridão branca, um processo que envolve a produção de uma variedade de enzimas, incluindo Lacase e Peroxidase dependente de Manganês. Essas enzimas atuam de forma sinérgica, oxidando e degradando a lignina, além de celulose e hemicelulose, transformando polímeros complexos em moléculas menores, que podem ser utilizadas como fonte de carbono e energia pelos fungos. Ao final do processo de degradação, o substrato pós cultivo de cogumelo (SPC), ou SMS – (*substrate mushroom spent*) apresenta uma aparência esbranquiçada, esponjosa e fibrosa, característica da atuação dessas enzimas (Leong, et al. 2022).

Figura 2 - *Pleurotus ostreatus* em substrato pós cultivo



Fonte: Silva (2020)

O *P. ostreatus* é um macrofungo categorizado como causador de podridão branca simultânea. Esse organismo realiza a degradação concomitante de lignina, celulose e hemicelulose, resultando na decomposição simultânea e proporcional dos constituintes da parede celular, conforme descrito por Mata et al. (2017). Essa abordagem multifacetada evidencia a eficiência de *P. ostreatus* na decomposição de substratos complexos de maneira coordenada e proporcional. Segundo Sanchez e Royse (2017), a quebra da lignina permite a liberação de celulose e hemicelulose nesta primeira fase do ciclo de vida fúngico, facilitando o acesso enzimático biodegradativo das celulasas e hemicelulasas.

Da Luz (2013) relatou alterações nas propriedades mecânicas de plásticos biodegradáveis, como a redução da carga de ruptura, após 45 dias de degradação mediada por *Pleurotus ostreatus*. Posteriormente, em 2015, o mesmo autor identificou uma alta atividade de enzimas como lacases, celulasas e xilanases durante o processo de degradação do polietileno verde pelo mesmo fungo, evidenciando seu potencial enzimático. Complementando esses estudos, Castillo-Toro (2021) investigou o crescimento de fissuras na superfície de poliestireno de baixa densidade, também por meio do cultivo de *P. ostreatus*, reforçando a capacidade desse organismo em degradar diferentes tipos de polímeros.

A utilização prática de *P. ostreatus* na gestão de resíduos, destaca a versatilidade desse fungo na promoção da sustentabilidade ambiental e na mitigação dos impactos negativos causados por resíduos orgânicos e sintéticos complexos. No entanto, a biodegradação apresenta uma significativa desvantagem relacionada às suas limitações mecânicas. Portanto, são necessários estudos que estabeleçam condições que ultrapassem as limitações para a bioconversão simultânea desses polímeros por meio do fungo *P. ostreatus*.

4 METODOLOGIA

4.1 LOCAL DO ESTUDO

O experimento foi realizado entre maio e outubro de 2024, sendo dividido em duas etapas: (1) o ensaio de biodegradação dos polímeros plásticos, conduzido no Módulo do Grupo de Pesquisa & Produção de Cogumelos Comestíveis (GPEC); e (2) a avaliação do substrato pós cultivo e dos polímeros, realizada no Laboratório de Matéria Orgânica do Departamento de Solos e Engenharia Rural da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) do Centro de Ciências Agrárias (CCA) Campus II, localizado na cidade de Areia- PB.

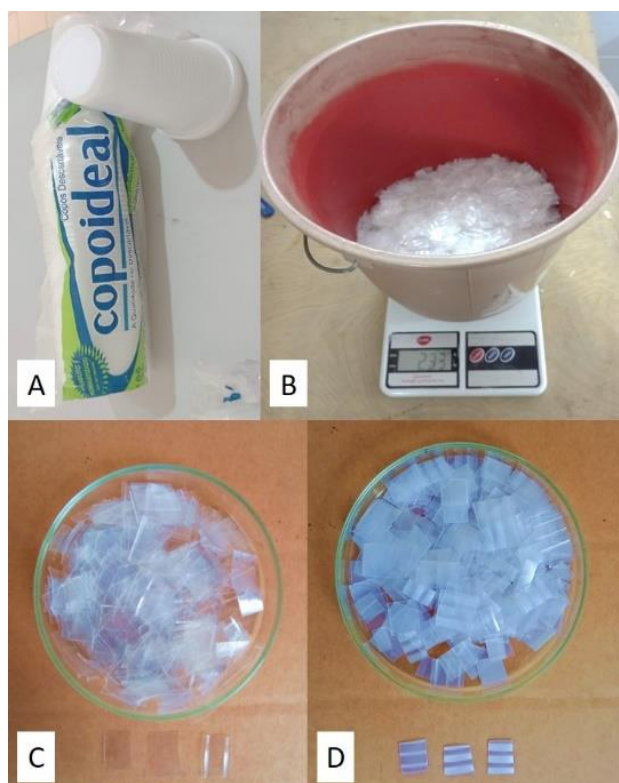
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido sob um DIC 2 x 2 com 5 repetições, totalizando 20 unidades experimentais, sendo dois tratamentos com os tipos de plásticos, o poliestireno (PS) e o polipropileno (PP), na forma de copos descartáveis, inoculadas ou não pelo fungo *P. ostreatus*, em um substrato composto por palha de bananeira, suplementadas com farinha de trigo (5%).

4.3 DESINFECÇÃO DOS PLÁSTICOS

Foram usados copos descartáveis do tipo polipropileno e poliestireno comprados no comércio local, esses foram cortados em dimensões de 1,5cm² (Figura 3), e pesados 15g para cada repetição, sendo depois separados em pequenos envelopes confeccionados com gaze. Para desinfecção os envelopes foram colocados em um béquer contendo 1 L de solução desinfetante universal (1L de água destilada; 14,0 mL de detergente e 20 mL de hipoclorito de sódio) e deixados à temperatura ambiente durante 60 minutos, agitando-se ocasionalmente com um bastão de vidro estéril. Em seguida, com o auxílio de uma pinça estéril, o material foi removido e transferido para um béquer com água destilada esterilizada onde permaneceu em temperatura ambiente por 60 minutos. Após, eles foram transferidos para outro béquer com solução etanol 70% por 30 minutos à temperatura ambiente, de acordo com o protocolo da *American Society for Testing Materials* (ASTM G22-76, 1990). Por fim, as amostras foram colocadas assepticamente num pote de vidro de 1500 ml, envoltos em algodão estéril para secagem por um período de 12 dias (Adaptado Silva, 2009).

Figura 3 - Cortes dos copos descartáveis de poliestireno e polipropileno.



A: Copos descartáveis adquiridos no mercado local; B: pesagem dos cortados; C: cortes de copos de polipropileno e D: cortes de copos de poliestireno.
Fonte: Souza (2024)

4.4 MATERIAL BIOLÓGICO

Foi utilizada uma linhagem de *P. ostreatus* PO/A02. A linhagem foi cedida pelo Grupo de Pesquisa e Produção de Cogumelos Comestíveis, vinculado ao Departamento de Solos e Engenharia Rural (GPEC).

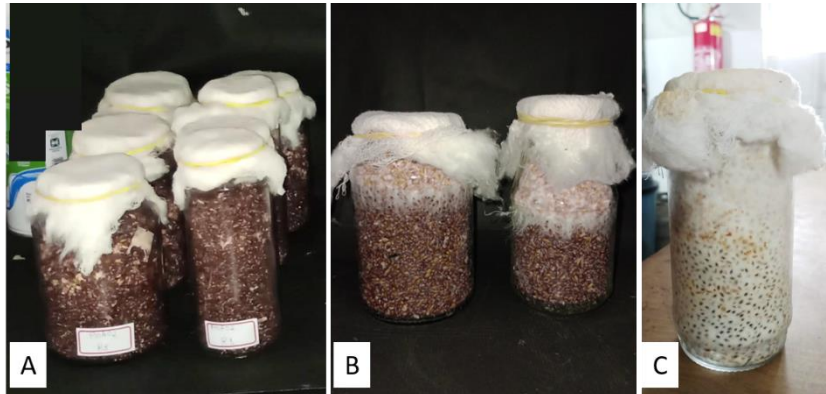
4.5 CULTIVO DE *Pleurotus ostreatus* EM PALHA DE BANANEIRA E PLÁSTICO

4.5.1 Preparo do Inóculo

Foram utilizados grãos de alpiste, usados para alimentação de aves, os quais foram cozidos por cerca de 25 minutos, até a maciez do grão sem exposição do amido. Após esfriarem sobre papel, em temperatura ambiente, foram adicionados 3 g de calcário (CaCO_3) e 13 g de gesso agrícola (CaSO_4) por quilograma de grão cozido. A mistura foi colocada em potes de vidro vedados com algodão e gaze, amarrados com elásticos e esterilizados em autoclave a 120 °C e 103 kPa por 30 minutos. Por fim, em câmara de fluxo laminar, realizou-se a inoculação dos grãos esterilizados. Os grãos

inoculados foram incubados, a uma temperatura de $25,43 \pm 5,79$ °C e umidade relativa $75,69 \pm 3\%$, sob escuridão total, no Módulo de Pesquisa e Produção de cogumelos, até completa colonização durante, aproximadamente, duas semanas (Figura 4).

Figura 4 - Colonização de grãos de alpiste inoculados com *Pleurotus ostreatus* (a) sem colonização; (b) em crescimento e (c) grãos totalmente colonizados.



Fonte: Souza (2024).

4.5.2 Preparo da Palha de Bananeira

Foram utilizadas palha de bananeira coletadas na zona rural do município de Areia-PB, e foram trituradas e umedecidas a 70% (Equação 1), com água destilada alcalina a 2% e suplementada com 5% de farinha de trigo sem fermento (Tabela 1), após a mistura, o material foi acomodado em um pote de vidro de (1500 mL) e esterilizadas em autoclave a uma temperatura de 121°C a 101,32 kPa por uma hora (Figura 5). As unidades experimentais (Ue's) foram identificadas e vedadas com algodão a fim de facilitar as trocas gasosas.

Equação 1.

$$\text{Umidade do substrato (\%)} = \frac{MU - MS}{MU} \times 100$$

Figura 5 – A. Desinfestação do substrato em autoclave; B. Adição dos plásticos e inóculo em câmara de fluxo laminar



Fonte: Souza (2024)

Tabela 1 - Descrição sobre os tratamentos utilizados.

Código	Palha de Bananeira (g)	Plásticos (g)	Farinha de Trigo (g)	Água alcalina (mL)	Umidade do substrato (%)	Inóculo (%)	Massa final do substrato
PP com <i>P. ostreatus</i>	150	15	17	370	70	15	573,3
PS com <i>P. ostreatus</i>	150	15	17	370	70	15	573,3
PP sem <i>P. ostreatus</i>	150	15	17	370	70	0	552

PS sem <i>P. ostreatus</i>	150	15	17	370	70	0	552
----------------------------	-----	----	----	-----	----	---	-----

PP: Polipropileno; PS: Poliestireno.

4.5.3 Inoculação

Após a esterilização das unidades de cultivo, contendo apenas a biomassa lignocelulósica, essas foram mantidas em câmara de fluxo laminar no Laboratório de Fitopatologia (LAFIT/DFCA/CCA/UFPB). Foram adicionados 15 (g) de cada tipo de plástico, em seguida, foi inoculada com 15% de inóculo de *P. ostreatus*. As unidades experimentais foram vedadas com algodão, gaze e elástico, devidamente identificadas.

4.5.4 Incubação

Após a inoculação, os pacotes de cultivo foram incubados e armazenados na Sala de Incubação do Módulo de Produção de Cogumelos Comestíveis do GPEC. Eles permaneceram no escuro até a colonização completa, sob condições de $25,43 \pm 5,79$ °C e $75,69 \pm 3\%$ de umidade relativa (UR) (Figura 6).

Figura 6 - (a) Dia 0 após inoculação e (b) Dia 25 após inoculação



Fonte: Souza (2024)

4.5.5 Indução-frutificação

Ao fim da incubação, a indução foi realizada a partir da troca de ambiente e remoção do algodão e gaze que vedava os potes, sendo feita a transferência das

unidades experimentais para a sala de frutificação, com condições de $23,41 \pm 1,72$ °C e $93,31 \pm 6,42$ % de umidade relativa (UR) (Figura 7).

Figura 7 - Unidades experimentais inoculadas com *Pleurotus ostreatus* durante a frutificação.



Fonte: Souza (2024)

4.5.6 Colheita

Com o crescimento dos primórdios e a formação do basidiocarpo, a colheita foi realizada girando os corpos de frutificação até desprendê-los do substrato (Figura 9). As massas (g) dos cogumelos foram pesadas e registradas, com fotografias para documentação. Durante os 60 dias do experimento, foram realizados dois fluxos de colheita.

4.6 VARIÁVEIS DE PRODUTIVAS E BIOLÓGICAS

Foram avaliadas variáveis como Eficiência Biológica (EB%), Perda de Matéria Orgânica (PMO%), Taxa de Produção (Pr % dia) e Precocidade (dias) (Martins, 2017; Monteiro, 2022) (Tabela 2). Em relação aos cogumelos, estes foram secos em estufa a 65°C e encaminhados para o laboratório de Bromatologia, da Universidade Federal da Paraíba (UFCG), no município Cuité (PB) para realização das análises de: umidade, cinzas, proteínas, gorduras e carboidrato dos cogumelos (Silva, 2023).

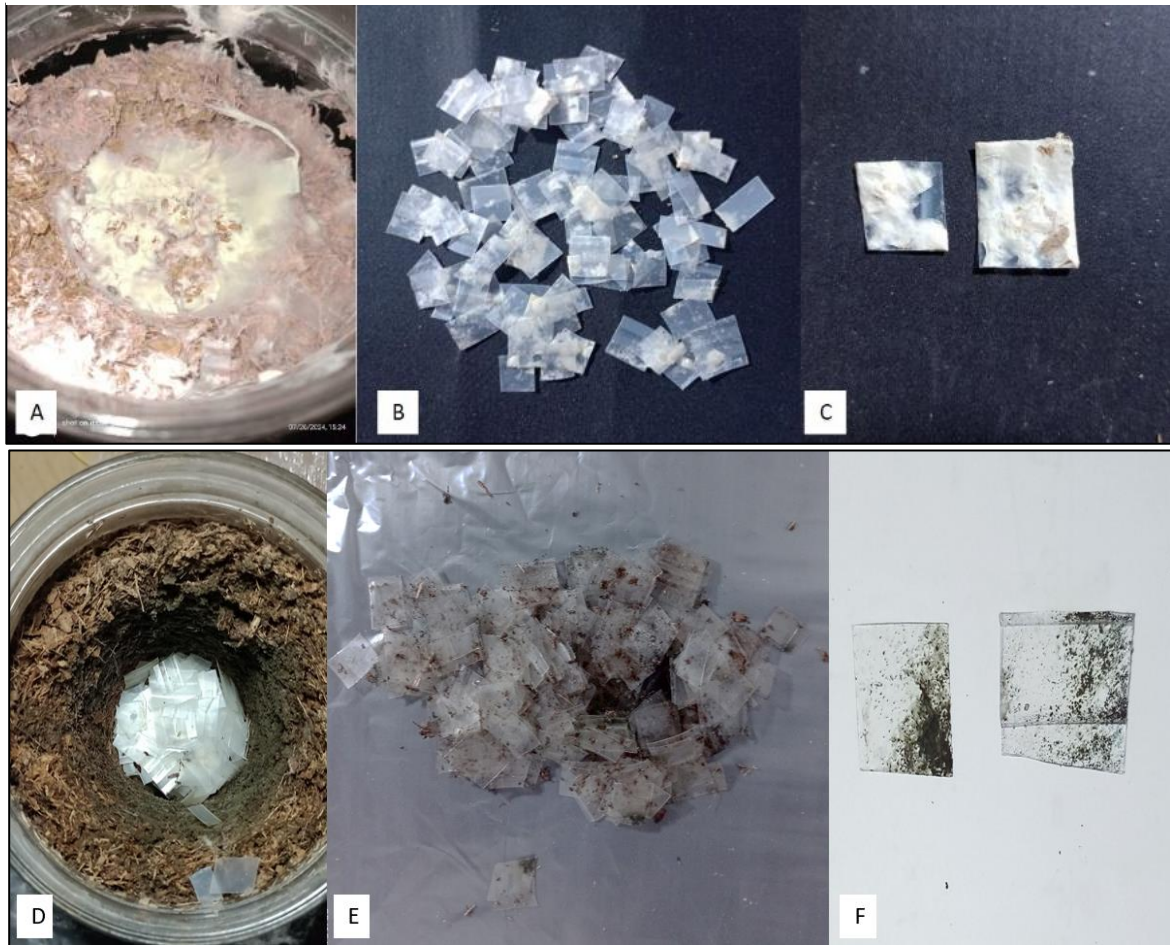
Tabela 2 - Variáveis produtivas analisadas no cultivo de *Pleurotus ostreatus*.

Variável	Definição	Fórmula	Referência
Eficiência biológica (%)	É a razão entre a massa fresca total dos cogumelos e a massa seca do substrato.	$EB (\%) = \frac{MFC}{MSS}$ MFC = massa fresca dos cogumelos (g) MSS = massa seca do substrato (g)	ESTRADA & PECCHIA (2017).
Perda de Matéria Orgânica (%)	Refere-se à degradação do substrato promovida pelo fungo.	$PMO\% = \frac{MSI - SPC}{MSI}$ MSI= Massa seca inicial (g); SPC= Substrato pós-cultivo de cogumelos (g).	CARVALHO et al. (2012).
Precocidade (dias)	Refere-se ao tempo médio que o fungo demora para formar os basidiocarpos depois de ser induzido.	$Pcd\% = \frac{T1 + T2}{NC}$ T= Período entre a indução e a colheita (dias); NC= Número de colheitas.	ZÁRATESALAZAR et al. (2020).
Taxa de produção (% dia ⁻¹)	É a razão entre eficiência biológica e período produtivo.	$Tp \% = \frac{EB}{PP}$ EB = Eficiência biológica; PP = Período produtivo.	KOUTROTSIOS et al. (2018).
Capacidade produtiva diária (g dia ⁻¹)	Relação entre massa de cogumelos frescos com a precocidade e o número de colheitas. Determinada para 100 unidades produtivas.	$Cpd (g \text{ dia}) = \frac{MF}{Pcd \times NC}$ MF = massa fresca de cogumelos (g); Pcd = precocidade em dias; NC = Número de colheitas.	ZÁRATÉ- SALAZAR et al. (2020).

4.7 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

Os plásticos foram separados da palha de bananeira (Figura 8) e encaminhados para visualização das estruturas fungicas em microscópio eletrônico e o substrato pós cultivo (SPC) formado pela palha de bananeira, foi encaminhado para análise química de nutrientes, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

Figura 8 - Processo de separação dos plásticos da palha de bananeira após 60 dias.



Fonte: Souza (2024)

4.8 ANÁLISES DO SUBSTRATO APÓS BIOCONVERSÃO POR *Pleurotus ostreatus*

Para a análise da biomassa lignocelulósica, foram realizadas análises Carbono Orgânico Total, nitrogênio, fósforo, potássio e sódio de acordo com a metodologia da Embrapa (2011).

4.9 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à ANOVA e interação pelo teste F ($P \leq 0,05$), em seguida foi observado a significância pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$), usando o software Sisvar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetros biológicos e produtivos de *Pleurotus ostreatus*

Durante o período do experimento, foi observado que os tratamentos contendo os dois tipos de plástico (PP e PS) e inoculados com *P. ostreatus*, resultaram na produção de cogumelos de grande porte, com características morfológicas semelhantes e sem deformidades (Figura 9). Em relação à produtividade, a massa fresca total de cogumelos não houve diferença no tratamento com PS (130,8 g) em comparação ao PP (126,48 g) (Tabela 3). Do mesmo modo, o período produtivo e a capacidade produtiva diária não foram diferentes no tratamento PP e PS (Tabela 4). A massa seca total de cogumelos também foi similar entre os dois tratamentos, com (14,55 g) para o PP e (14,94 g) para o PS. No que diz respeito à precocidade, que representa o tempo médio para o início da formação dos corpos frutíferos, os tratamentos com PS (9,4 dias) e PP (12,1 dias) não apresentaram diferença significativa.

Figura 9 - *Pleurotus ostreatus* em ponto de colheita.



Fonte: Souza (2024)

Tabela 3 - Variáveis produtivas e biológicas de *Pleurotus ostreatus* cultivado em palha de bananeira e dois tipos de plástico.

	<i>P. ostreatus</i> + (PP)	<i>P. ostreatus</i> + (PS)
Massa Fresca total de cogumelos(g)	126,48 ± 17,2 a	130,8 ± 14,15 a
Massa Seca Total de cogumelos(g)	14,55 ± 2,12 a	14,94 ± 3,4 a
Umidade (%)	88,05 ± 3,37 a	89,27 ± 0,97 a
Taxa de Produção (% dia ⁻¹)	4,22 ± 0,82 a	4,26 ± 0,65 a
Precocidade (dias)	12,13 ± 3,33 a	9,4 ± 3,13 a
Eficiência biológica (%)	84,32 ± 11,47 a	87,2 ± 9,43 a
Perda de Matéria Orgânica (%)	50,71 ± 9,15 a	46,39 ± 2,93 a

Tabela 4 - Informações sobre as colheitas, período produtivo e capacidade produtiva diária

	1º fluxo (g)	2º fluxo (g)	Período produtivo (dias)	Capacidade produtiva diária (g dia ⁻¹)
<i>P. ostreatus</i> + (PP)	112,48±10,17	56±10,41	21 ± 1,73 a	7,02 ± 0,45 a
<i>P. ostreatus</i> + (PS)	102,8±7,58	35±10,3	21,5±1,91 a	7,33 ± 0,98 a

Quando comparados aos resultados de Silva (2023), que utilizou apenas palha de bananeira como substrato e obteve (114,33 g) de Massa Fresca Total de cogumelos, (12,31 g) de Massa Seca Total de cogumelos e precocidade de (12,31 dias), observa-se que os substratos que combinam PP ou PS com palha de bananeira foram semelhantes estatisticamente, em termos de massa fresca e seca.

A análise dos teores de proteínas, carboidratos e gorduras nos cogumelos cultivados em palha de bananeira suplementada com polipropileno (PP) e poliestireno (PS) revelou valores próximos entre os tratamentos. A palha suplementada com PP resultou em teor proteico de 14,32% e teor de carboidratos de 65,1%, enquanto a suplementação com PS apresentou valores ligeiramente superiores, com 15,13% de

proteínas e 66,4% de carboidratos. No entanto, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os grupos analisados (Tabela 5).

Tabela 5 - Análise bromatológica de cogumelos *Pleurotus ostreatus* cultivado em palha bananeira e plástico.

	<i>P. ostreatus</i> + (PP)	<i>P. ostreatus</i> + (PS)
Umidade (%)	15,9±0,84 a	13,66±1,04 a
Cinzas (%)	4,6±0,15 a	4,71±0,06 a
Gordura (%)	0,08±0,07 a	0,1±0,06 a
Proteína (%)	14,32±0,87 a	15,13±0,76 a
Carboidratos (%)	65,1±0,39 a	66,4±1,68 a

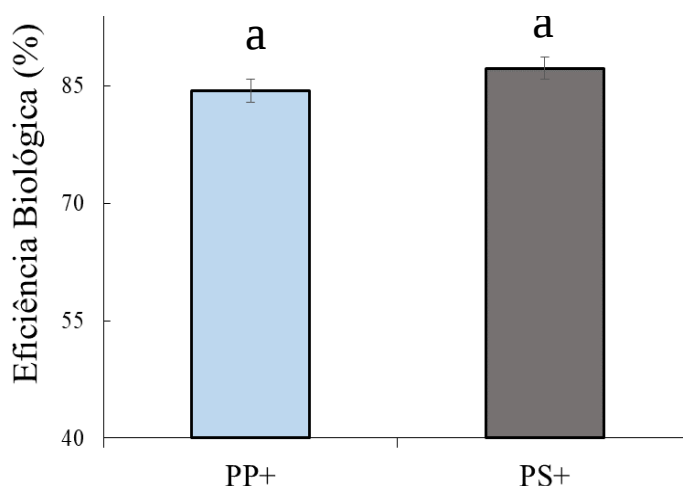
PP: Polipropileno; PS: Poliestireno.

Esses achados corroboram os resultados de Aguiar (2021), que investigaram a produtividade de *P. ostreatus* em substratos amazônicos como resíduos de açaí, castanha e pinus, reportando teores de proteínas variando entre 14% e 20%. De forma similar, Medeiros et al. (2023) descreveram elevados teores de proteínas (18,77% a 17,80%) e baixos níveis de lipídios (0,28% a 0,4%) em cultivos com diferentes proporções de palha de bananeira e bagaço de cana. De acordo com Furlani e Godoy (2005), dentre os muitos fatores que podem influenciar o valor proteico dos cogumelos talvez o mais importante seja o substrato. Contudo, a ausência de diferenças significativas reforça a ideia de que tanto o PP quanto o PS, quando misturados à palha de bananeira, mantêm as características nutricionais dos cogumelos *P. ostreatus*, sem comprometer sua qualidade alimentar.

Eficiência Biológica

Os tratamentos com adição de plásticos (PP e PS) à palha de bananeira apresentaram uma Eficiência Biológica (EB%) média expressiva de 85,76%, com valores de 84,32% para o PP e 87,2% para o PS (Figura 10), evidenciando a capacidade desses substratos modificados de fornecer condições favoráveis para o desenvolvimento do fungo *P. ostreatus*.

Figura 10 - Eficiência Biológica nos tratamentos com adição de PP e PS.



Fonte: Souza (2024)

Embora os resultados sejam ligeiramente inferiores aos reportados por Silva (2023), que obteve uma EB de 95,28% utilizando palha de bananeira sem aditivos plásticos, é importante destacar que, no presente estudo, foram realizados apenas dois fluxos de colheita. Em contraste, no estudo de Silva (2023), a produção foi distribuída em três fluxos, o que proporcionou maior tempo para degradação do substrato e formação de corpos frutíferos. Esse aspecto metodológico, ao limitar o tempo disponível para a decomposição completa do substrato, justifica a diferença observada na EB.

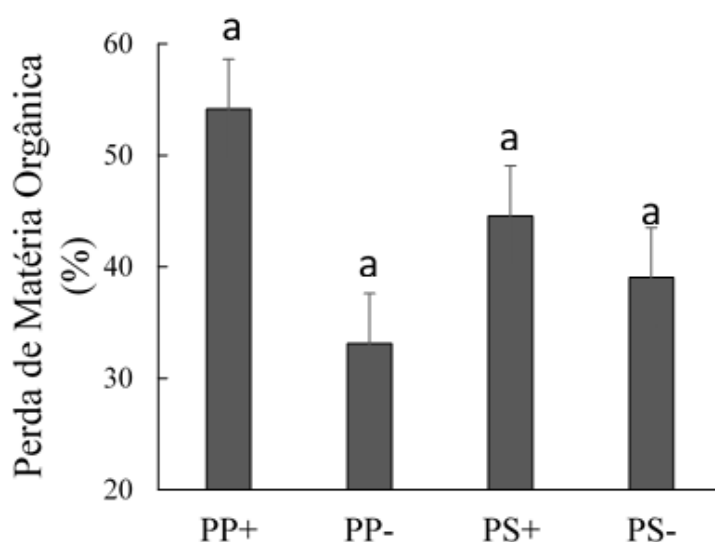
Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo demonstram que a adição de PP e PS à palha de bananeira não compromete a eficiência do cultivo de *P. ostreatus* e, quando otimizados, podem atingir ou até superar os valores relatados na literatura. O desempenho observado comprova a viabilidade do uso desses substratos alternativos para a produção de cogumelos, oferecendo uma estratégia sustentável para o aproveitamento de resíduos plásticos e agrícolas.

Perda de matéria orgânica

A perda de matéria orgânica é um indicador da degradação do substrato, impulsionada pelo metabolismo e pelas enzimas do fungo. Esse processo está vinculado à disponibilidade de substâncias, cuja degradação depende da facilidade com que os microrganismos as utilizam, acompanhada pela liberação de gás carbônico e água, subprodutos do metabolismo (Martins et al, 2018).

Em comparação com os demais tratamentos, não houve diferença na perda de matéria orgânica (%) da palha de bananeira nos substratos inoculados com *P. ostreatus*, com valores de (50,71%) para o tratamento com PP e (46,39%) com PS. Nos tratamentos controle, onde não houve inoculação com *P. ostreatus*, foi observada a presença de fungos espontâneos, provavelmente originados das condições naturais do substrato e que também causaram a perda de matéria orgânica, com valores de (29,33%) no PP e (33,79%) no PS (Figura 11).

Figura 11 - Perda de Matéria Orgânica nos tratamentos contendo palha de bananeira e dois tipos de plástico, com e sem *Pleurotus ostreatus*.



Por outro lado, os estudos de Monteiro (2022), utilizando a mesma linhagem empregada nesta pesquisa, observou-se uma eficiência biológica (EB) de 60,02% e uma perda de matéria orgânica (PMO) de 27,11% em substrato composto por borra de café, enquanto no substrato de bagaço de cana foram obtidos valores de EB de

40,3% e PMO de 33,8%. Esses resultados demonstram que a alta eficiência biológica e a perda de matéria orgânica estão diretamente relacionadas às características do substrato utilizado como matéria-prima no cultivo.

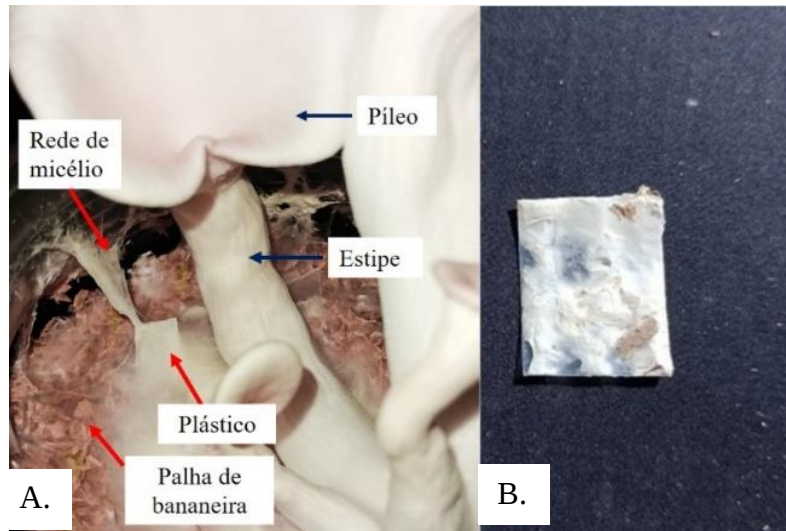
Com relação aos tratamentos controle, embora a presença de fungos espontâneos também tenha causado a perda de matéria orgânica, o processo foi consideravelmente mais lento e menos eficiente. A diferença entre os tratamentos inoculados e os controles pode ser atribuída à especificidade e eficiência de *P. ostreatus* na decomposição dos compostos orgânicos, como a lignina, celulose e também de ser cultivado de forma eficiente em diferentes polímeros plásticos como sacolas e fraldas infantis. Enquanto os fungos espontâneos, por serem menos especializados ou adaptados ao substrato, causam uma degradação mais limitada (Sanchez e Royse, 2017; Castillo Toro et al. 2021; Silva, 2023).

À medida que a inoculação com *P. ostreatus* acelera o processo de degradação da matéria orgânica, revela-se como alternativa para o tratamento de resíduos orgânicos, especialmente quando se deseja maximizar a decomposição em um curto de período. Por outro lado, os controles destacam que, embora a degradação ocorra naturalmente, ela é significativamente mais lenta, o que poderia ser inadequado em situações onde a eficiência é um fator crítico, além de serem foco para proliferação de fungos fitopatogênicos, como *Fusarium* sp. e *Penicillium* sp..

Biodegradação dos Plásticos

No tratamento com *P. ostreatus* associado ao polipropileno e poliestireno, foi verificado a formação biofilme composto de hifas brancas (Figura 12), indicando que houve a colonização e atividade metabólica do fungo. Essa atividade envolveu a excreção de enzimas e ácidos, que podem danificar a rigidez e a rugosidade do material. Esses resultados corroboram os achados de Castillo Toro et al. (2021), que relataram a formação de fissuras e buracos em lâminas de polietileno de baixa densidade (PEBD) após a colonização de *P. ostreatus* na superfície do material.

Figura 12 - (A) Morfologia do cogumelo cultivado no estudo; (B) Micélio recobrindo a superfície do plástico.

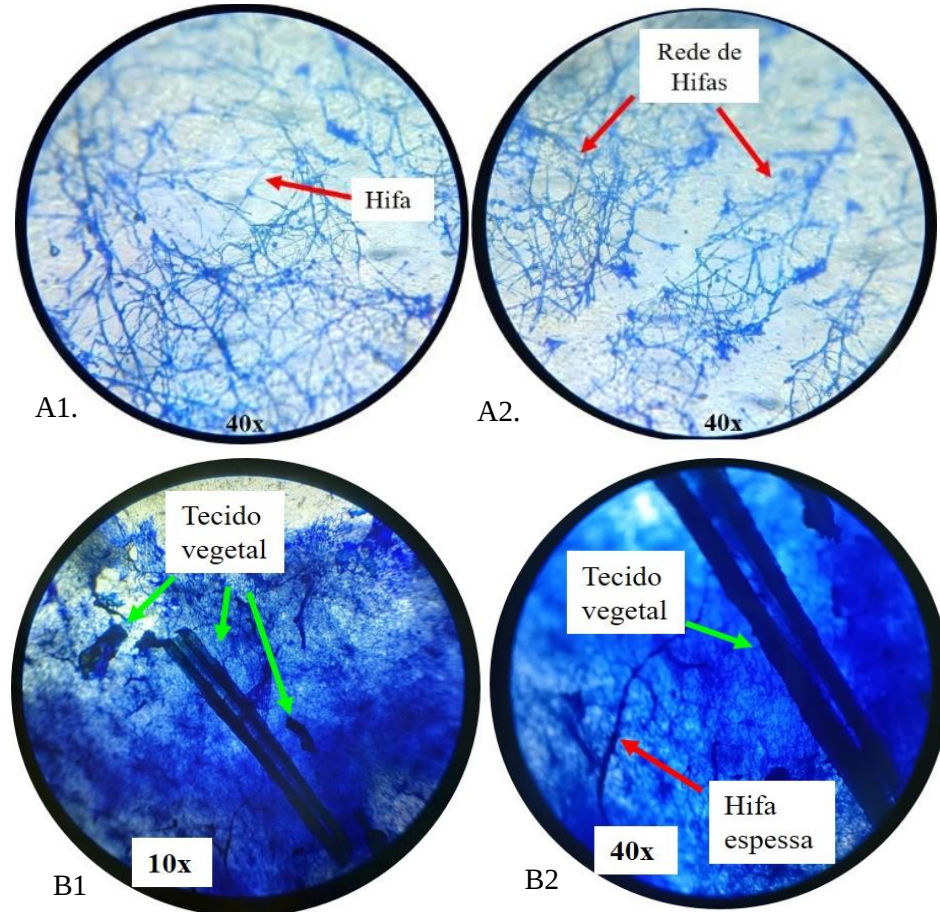


Fonte: Souza (2024)

Segundo Campos (2004), durante a biodegradação, microrganismos colonizam superfícies, formam esses biofilmes e promovem alterações na estrutura. Os biofilmes microbianos, ao interagirem com polímeros, promovem modificações nas propriedades superficiais, causam degradação do polímero por enzimas, acumulam água na superfície e permitem a penetração de estruturas filamentosas, além de excretarem pigmentos lipofílicos que alteram a coloração do material.

Ao observar as imagens feitas no presente estudo, em microscópio ótico (Figura 13), foi possível identificar um emaranhado de hifas sobrepostas, na superfície dos plásticos. Na micrigrafia é possível observar fragmentos de tecido vegetal intrinsecamente ligadas ao micélio.

Figura 13 – A. Micrografias da superfície do (A1) PP e (A2)PS; B. Imagens da superfície do PP destacando o micélio e um pedaço de tecido vegetal com aumento de (B1)10x e (B2)40x.



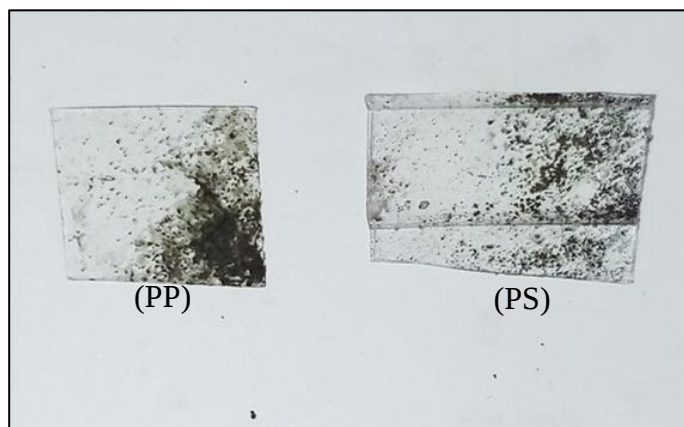
Fonte: Souza (2024)

Em seu estudo Cabrera et al. (2022), aplicou fungos coletados de folhas, solos e frutos para observar a degradação *in vitro* de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), durante 120 dias. Os resultados mostraram fungos como *P. ostreatus*, *Fusarium* sp, *Picnoporus sanguíneos* colonizando a superfície do material, causando formação das estrias e rachaduras. No presente trabalho o tempo usado foi 60 dias. Alinhado a propósitos elencados por esse trabalho, Espinosa-Valdemar et al. 2011, testaram *Pleurotus ostreatus* quanto à sua capacidade de degradar fraldas descartáveis, que contêm uma mistura de polietileno, polipropileno e polímeros superabsorventes. O fungo foi capaz de reduzir a massa e o volume das fraldas em até 90%, com reduções no conteúdo de celulose e lignina. Portanto, o *P. ostreatus*, como mencionado na

revisão de literatura, é conhecido por sua capacidade de biodegradar vários materiais, incluindo substâncias lignocelulósicas e certos polímeros sintéticos.

Nos tratamentos controle, sem a presença de *P. ostreatus*, contendo apenas os plásticos (PP) e (PS) misturados a palha de bananeira, foi observado o crescimento espontâneo de microrganismos na superfície dos polímeros (Figura 14). Ambos os tipos de plásticos apresentaram de modo similar o crescimento de fungos.

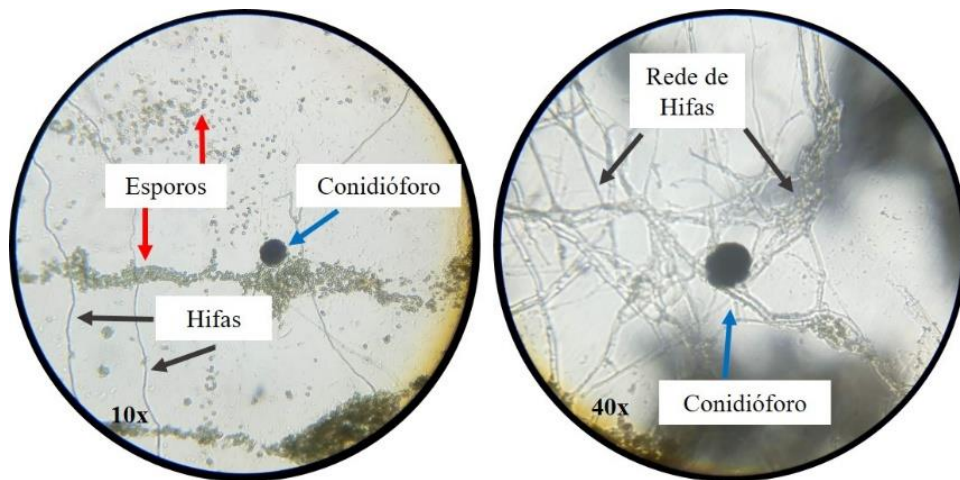
Figura 14 - Plásticos contendo esporos após incubação de 60 dias.



Fonte: Souza (2024)

Conforme as imagens feitas em microscópio ótico, foi identificado estruturas vegetativas e reprodutivas, como hifas e esporos (Imagem 15). Na imagem 15, é possível identificar esporos semelhantes aos do fungo *Aspergillus* sp. Essa é uma das espécies citadas na literatura como organismos com capacidade de degradar diferentes tipos plásticos como *Aspergillus* sp e *Fusarium* sp (Kour et al. 2022).

Figura 15 - Micrografias da superfície dos plásticos, contendo hifas e esporos.



Fonte: Souza (2024)

Segundo Kour et al. (2022), a degradação de plástico por fungos ocorre em dois processos, (1) Biodeterioração e (2) Biofragmentação. No primeiro processo, durante o metabolismo dos microrganismos, as enzimas causam fissuras e rachaduras, levando a uma deterioração física, alterando as microestruturas da matriz do polímero plástico. No segundo, ocorre a liberação de oligômeros da estrutura do plástico. Essas moléculas em seguida são degradadas e convertidas em monômeros. Como consequência, o fungo libera metabólitos como H_2O , CO_2 , resultando na mineralização dos plásticos. A combinação de processos enzimáticos e físico-químicos contribui para a redução da poluição plástica no meio ambiente (Li et al 2021).

Segundo Espinosa-Valdemar et al. (2011), Da Luz et al. (2015), o processo de degradação ocorre com a produção de enzimas lignocelulolíticas, como lacase, peroxidase de manganês e peroxidase de lignina, que apresentam baixa especificidade. Essas enzimas promovem a quebra das estruturas poliméricas complexas dos plásticos, facilitando sua degradação posterior. A presença de íons pró-oxidantes, polímeros vegetais e microrganismos fixadores de nitrogênio endomicóticos também acelera esse processo.

O PLA poli(ácido láctico), é um polímero biodegradável com diversas aplicações como embalagens, utensílios domésticos e peças biomédicas. Conforme pesquisa realizada por Momeni et al. (2023), a adição de fibras vegetais a compósitos de PLA por ser biodegradável, potencializa o transporte de água e a hidrólise, resultando em uma degradação mais eficaz que ocorre devido ao aumento da área superficial e à promoção da atividade microbiana pelas fibras.

Biodegradação da palha de bananeira

Os resultados das análises químicas da palha de bananeira, nas diferentes condições, estão apresentados na Tabela 6. Serão discutidas as propriedades químicas dos substratos, destacando o seu potencial de uso.

Tabela 6 - Informações sobre a composição da palha de bananeira suplementada com plástico após 60 de incubação.

	<i>P. ostreatus</i> + PP	PP-	<i>P. ostreatus</i> + PS	PS-
N	8,26±0,13 d	9,26±0,19 b	9,08±2,21 c	9,42±3,2 a
P	318,45±141,94 b	271,21±56,16 d	273,13±79,67 c	322,92±88,52 a
K	2,27±1,45 c	3,59±0,21 b	2,19±0,82 d	4,55±1,4 a
Na	0,7±0,03 c	0,65±0,04 d	0,73±0,05 b	0,76±0,06 a
C	12,95±0,9 c	15,11±1,46 b	12,64±1,1 d	17,5±0,88 a

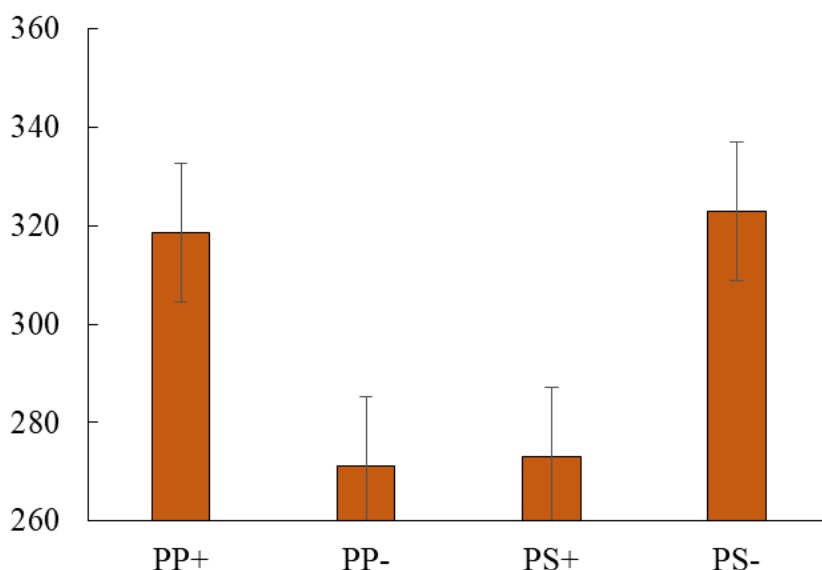
Os resultados sobre o teor de nitrogênio e carbono da palha de bananeira mostram uma interação entre os plásticos (polipropileno e poliestireno), a adição de *P. ostreatus* e os processos de decomposição. O (PP) com *P. ostreatus* (8,26 d) apresenta o menor teor de nitrogênio, indicando que a presença do fungo acelera a decomposição da biomassa e a liberação de nitrogênio. Isso é consistente com os resultados de carbono, onde esse tratamento também apresentou um baixo teor de carbono (12,95 c), sugerindo uma decomposição mais rápida e maior utilização de nitrogênio e carbono pelo fungo. Já o PP sem *P. ostreatus* (9,26 b) tem um teor de nitrogênio mais alto, refletindo uma decomposição menos intensiva, e o teor de carbono também foi mais elevado (15,11 b), indicando uma maior retenção de carbono na biomassa sem o fungo.

O poliestireno com *P. ostreatus* (12,64 d) apresentou o menor teor de carbono entre os tratamentos com fungo, indicando que o fungo ajudou a decompor a biomassa. Mas o teor de nitrogênio foi similar ao do tratamento com polipropileno e fungo, sugerindo que o efeito da decomposição do fungo não foi tão eficaz no poliestireno quanto no polipropileno. O PS sem *P. ostreatus* (17,5 a) teve o maior teor de carbono, o que é consistente com o maior teor de nitrogênio (9,42 a). Isso indica que a combinação de PS sem o fungo favorece a retenção tanto de carbono quanto de nitrogênio na palha de bananeira, possivelmente devido a uma interação estável entre o plástico e a biomassa, que reduz a taxa de decomposição.

A presente pesquisa mostra que a adição de *P. ostreatus* tende a acelerar a decomposição da palha de bananeira, reduzindo a retenção de carbono e nitrogênio, independentemente do tipo de plástico. Por outro lado, o PS, especialmente sem o fungo, favorece a retenção de ambos os elementos, sugerindo que ele interage de forma mais estável com a biomassa, reduzindo a decomposição e permitindo maior retenção de carbono e nitrogênio no solo.

Quanto ao teor de fósforo na palha de bananeira, o tratamento polipropileno com *P. ostreatus* (318,45 b) apresenta o segundo maior teor de fósforo, sendo significativamente maior que o PP sem o fungo, mas, menor do que o PP sem o fungo. Isso sugere que a adição de *P. ostreatus* no PP favorece a liberação ou a disponibilização de fósforo, possivelmente devido à decomposição promovida pelo fungo. Já PS com *Pleurotus ostreatus* (273,13 c) tem um teor de fósforo intermediário, sendo significativamente diferente do tratamento com PP sem o fungo (Figura 16).

Figura 16- Teor de Fósforo (mg/Kg^{-1}) disponível após 60 dias.



De acordo com esses resultados, a presença do *P. ostreatus* na palha de bananeira, com adição do Poliestireno, assim como do Polipropileno, melhora a liberação de fósforo. Isso ocorre porque o fungo facilita a decomposição da biomassa e a liberação de nutrientes, como o fósforo, mas o efeito é menos pronunciado no Poliestireno, indicando que a decomposição é mais lenta ou menos eficiente nesse tipo de plástico.

A valorização da matéria orgânica, por meio do cultivo de cogumelos e do uso de seus resíduos no solo, representa uma abordagem sustentável que alia produção de alimentos e melhorias agrícolas. Conforme Grimm e Wösten (2018), a biomassa residual após a colheita de cogumelos, conhecida como substrato de cogumelo usado (SMS), pode ser reaproveitada em diversas aplicações, como compostagem, ração animal, biocombustíveis e materiais de construção, promovendo uma Economia circular.

Nesse contexto, Huang et al. (2023) destacam os efeitos positivos do SMS, especialmente quando produzido a partir de resíduos como a palha de bananeira. Sua aplicação na agricultura tem demonstrado benefícios, como a dissipação de poluentes, aumento da produtividade agrícola e melhoria das propriedades do solo. Paredes et al. (2016) corroboram esses achados, observando que cultivos, como o de

alface, apresentam rendimentos similares aos obtidos com fertilizantes minerais quando o SMS é utilizado, além de promover melhorias na fertilidade do solo.

Além disso, estudos de Wei et al. (2019) e Kwiatkowska e Joniec (2022) destacam que o SMS aumenta a atividade de importantes enzimas do solo, como desidrogenase, fosfatase e catalase, essenciais para a saúde do solo e a ciclagem de nutrientes. Essa característica também o torna uma ferramenta eficiente em biorremediação. Segundo Zhou et al. (2020), o SMS de *Pleurotus sp.* acelera a dissipação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs) em solos contaminados, ao favorecer o crescimento de bactérias degradadoras e estimular a atividade de enzimas como lacase e peroxidase de manganês.

Adicionalmente, Marín-Benito et al. (2016) demonstraram que o SMS desempenha um papel importante na degradação de pesticidas como cimoxanil e tebuconazol, reduzindo sua concentração no solo e prevenindo a contaminação do solo e da água.

Portanto, a integração da fungicultura no processo de biodegradação simultânea de matéria vegetal e plástico é uma forma para enfrentar a crescente questão da poluição. O uso de fungos na decomposição de resíduos orgânicos e plásticos não só contribui para a diminuição do impacto ambiental, mas também promove o reaproveitamento de coprodutos, o que é essencial para a economia circular. No entanto, mais pesquisas são necessárias para otimizar os processos de biodegradação, garantir a segurança ambiental e desenvolver protocolos de teste padronizados para realizar totalmente o potencial dos plásticos biodegradáveis.

6 CONCLUSÕES

Com essa pesquisa é possível concluir que o *Pleurotus ostreatus* tem capacidade de bioconversão simultânea, aliado a elevada eficiência biológica e à significativa perda de matéria orgânica durante os processos metabólicos. Além da interação com polímeros como polipropileno e poliestireno, o fungo demonstra aptidão para formar biofilmes em suas superfícies, um indicativo para a degradação inicial da estrutura desses materiais.

Além disso, a adição dos plásticos à palha de bananeira não compromete a produção de cogumelos, que mantêm características bromatológicas dentro dos padrões normais de consumo. Contudo, o substrato residual pós-cultivo SMS mostra-se como recurso, podendo ser usado como fonte de nutrientes, como fósforo.

Por fim, o vasto potencial biotecnológico de *P. ostreatus* amplia as fronteiras de sua aplicação industrial, abrangendo desde a produção de enzimas específicas e fibras até contribuições nos setores farmacêutico e alimentício, especialmente na produção de cogumelos de alto valor nutricional. Sua atuação como agente de valorização de resíduos, reforça sua relevância como uma alternativa que promove a sustentabilidade, alinhada aos princípios da Economia circular.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, O. Y. **Biological valorization of low molecular weight lignin.** *Biotechnology advances*, v. 34, n. 8, p. 1318–1346, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.10.001>-
- ADAMI, L.; SCHIAVON, M. **From Circular Economy to Circular Ecology: A Review on the Solution of Environmental Problems through Circular Waste Management Approaches.** *Sustainability*, v.13, p. 925, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020925>
- AGUIAR, L. V. B. **Substrate disinfection methods on the production and nutritional composition of a wild oyster mushroom from the Amazon.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 45, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145010321>
- ALAYDI, H. **Cascading approach for the extraction of high-value compounds from agricultural biomass integrating pyrolysis technology.** *Process safety and environmental protection : transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B*, v. 192, p. 580–587, 2024 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.10.087>.
- ALMARAZ-SÁNCHEZ, I. **Processing Agroindustry By-Products for Obtaining Value-Added Products and Reducing Environmental Impact.** *Journal of Chemistry*, v. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3656932>.
- ARAÚJO, W. F.; ROCHA, L.; ARAÚJO I.; PAULA, G. Sustainability in agroindustries: alternatives to avoid waste of agro-industrial residue peduncle cashew - a literature review. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 4, n. 7, Edição Especial, p. 4546-4569, nov. 2018. ISSN 2525-8761
- BESSELING, E.; WEGNER A. Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the lugworm *Arenicola marina* (L.). **Environmental science & technology**, v. 47, n. 1, p. 593–600, 2013. DOI: 10.1021/es302763x
- BHARDWAJ, L.K., RATH, P., YADAV, P. et al. **Microplastic contamination, an emerging threat to the freshwater environment: a systematic review.** *Environ Syst Res* v. 13, n. 8, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00338-7>.
- BOOTS, B.; WILLIAM, R. C.; SENG, G. D. Efeitos de microplásticos em ecossistemas do solo: acima e abaixo do solo. **Environ Sci Technol.** v. 53:11496–11506, 2019. DOI: 10.1021/acs.est.9b03304.
- BOUWMEESTER, H.; HOLLMAN, P. C. H; PETERS, R. J. B. Potential Health Impact of Environmentally Released Micro- and Nanoplastics in the Human Food Production Chain: Experiences from Nanotoxicology. **Environmental Science & Technology** v. 49, n. 15. p. 8932-8947, 2015. DOI: 10.1021/acs.est.5b01090.
- BRENNECKE, D.; DUARTE, B; PAIVA, P; CAÇADOR, I.; CANNING-CLODE, J.; XANTHOS, D.; WALKER, T. W. International policies to reduce plastic marine pollution from single-use plastics (plastic bags and microbeads): **A review, Marine Pollution Bulletin**, Volume 118, Issues 1–2, Pages 17-26, 2017, ISSN 0025-326X, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.048>.

CAMPOS, A. **Blendas de PVC/PCL foto/termo e biotratadas com fungos de solo (*Phanerochaete chrysosporium* e *Aspergillus fumigatus*)**. 2004. 126 f. **Dissertação (Mestre em Ciências Biológicas)** – Instituto de Biociências, Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

CARBERY, M.; O'CONNOR, W.; PALANISAMI, T. Trophic transfer of microplastics and mixed contaminants in the marine food web and implications for human health. **Environment international**, v. 115, p. 400–409, 2018. DOI: 10.1016/j.envint.2018.03.007

CARVALHO, C. S. M. D.; AGUIAR, L.V.B.; SALES-CAMPOS, C.; MINHONI, M.T.A.; ANDRADE, M.C.N. Applicability of the use of waste from different banana cultivars for the cultivation of the oyster mushroom. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 43, n. 2, p. 819826, 2012.

CASTILLO, T.A ; MATEUS, J.F.; CÉSPEDES, D.N; PEÑA, L.; PÁEZ-M.; POUTOU P, SALCEDO, J. C.; DÍAZ- A.; CASTILLO C.; PEDROZA R.; GÓMEZ M. Evaluation of two microcosm systems for co-treatment of LDPEoxo and lignocellulosic biomass for biochar production. **Biomaterials research**, v. 25, n. 1, p. 21, 2021. DOI: 10.1186/s40824-021-00222-w

CHEN, F., XIONG, S.; SUNDELIN, J.; MARTÍN, C.; HULTBERG, M. Potential for combined production of food and biofuel: Cultivation of *Pleurotus pulmonarius* on soft- and hardwood sawdusts,

COLLINS T, GERDAY C, FELLER G. Xylanases, xylanase families and extremophilic xylanases. **FEMS Microbiol Rev.** Jan;29(1):3-23, 2005 DOI: 10.1016/j.femsre.2004.06.005

CORRADINI, F.; MEZA, P.; EGUILUZ, R.; CASADO, F. HUERTA-LWANGA, E.; GEISSEN, V. Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. **The Science of the total environment**, v. 671, p. 411–420, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.368>

DA LUZ J. M. R; PAES S. A.; RIBEIRO K. V. G.; MENDES I. R.; KASUYA M. C. M. Degradation of Green Polyethylene by *Pleurotus ostreatus*. **PLoS ONE** 10(6): e0126047, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126047>

DA LUZ, J. M. R.; PAES, S. A.; NUNES, M. D.; SILVA, M. C. S.; KASUYA, M. C. M. Degradation of oxo-biodegradable plastic by *Pleurotus ostreatus*. **PloS one**, v. 8, n. 8, p. e69386, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069386>

ESPINOSA. R, R. M. Disposable diapers biodegradation by the fungus *Pleurotus ostreatus*. **Waste Management**, vol 31, p. 1683-1688, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.007>

ESTRADA, A. E.; PECCHIA, J. Cultivation of *Pleurotus ostreatus*. **Edible and medicinal mushrooms: technology and applications**, 339-360, 2017.

FALSINI, S.; COLZI I.; CHELAZZI, D.; DAINELLI, M.; SCHIFF, S.; PAPINI A.; COPPI A.; GONNELLI, C.; RISTORI, S. Plastic is in the air: Impact of micro-nanoplastics from airborne pollution on *Tillandsia usneoides* (L.) L. (Bromeliaceae) as a possible green sensor. **Journal of hazardous materials**, v. 437, n. 129314, p. 129314, 2022. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129314.

FERNANDES, E. R. K.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy conversion and management**, v. 75, p. 603-608, 2013. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.08.008

FURLANI, R. P. Z.; GODOY, H. T. Nutritional value of edible mushrooms: a revision. **Rev Inst Adolfo Lutz**, 64(2):149-154, 2005.

GAYATHRI, N. P.; PRASAD, G.; PRABHAKARAN, V.; PRIYA, V. Understanding the impact of microplastic contamination on soil quality and eco-toxicological risks in horticulture: A comprehensive review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 9, n. 100633, p. 100633, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100633>

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017. DOI: 10.1126/sciadv.1700782

GRIMM, D.; WÖSTEN, H.; Mushroom cultivation in the circular economy. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 102, p. 7795-7803, 2018.

GROOTEN, M.; ALMOND, R. E. A. Living planet report 2018: Aiming higher. WWF, Gland, Switzerland, 2018. ISBN 978-2-940529-90-2.

GUERRERO, C. J. P. **Application of fungal microorganisms for the degradation “in vitro” of synthetic polymers**. Proceedings of the 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology: “Education, Research and Leadership in Post-pandemic Engineering: Resilient, Inclusive and Sustainable Actions”. **Anais...Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions**, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.155>.

HAGE, E., JR. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998.

HOCK, OG; DE QIN, D; LUM, HW; HEE, CW; SHING, WL. Evaluation of the plastic degradation ability of edible mushroom species based on their growth and manganese peroxidase activity. **Current Topics in Toxicology**, v. 16, p 65-72, 2020. ISSN: 0972-8228

HORTON, A.; WALTON, A.; SPURGEON, D. J.; LAHIVE, E.; SVENDSEN, C. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. **Sci Total Environ.** v. 586:127-141. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.190.

HUANG, C.; HAN, X; LUO Q.; NIE, Y.; KANG, M.; CHEN, Y.; TANG, M.; FU, Y.; LI, X.; CHEN, Y. Agro-Based Spent Mushroom Compost Substrates Improve Soil Properties and Microbial Diversity in Greenhouse Tomatoes. **Agronomy (Basel, Switzerland)**, v. 13, n. 9, p. 2291, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13092291.4>

JAHANDARI, A. Microplastics in the urban atmosphere: Sources, occurrences, distribution, and potential health implications. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 12, n. 100346, p. 100346, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100346>

JAMBECK, J. R; GEYER, R.;WHILCOX, C.; SIEGLER, T.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A.; NARAYAN, R.; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, p. 768-771, 2015. DOI:10.1126/science.1260352

KHALID, N.; AGEEL, M.; NOMAN, A.; HASHEM, M.; MOSTAFA, Y. S; ALHAITHLOUL, S; SULIMAN, M. LINKING effects of microplastics to ecological impacts in marine environments. **Chemosphere**, v. 264, n. Pt 2, p. 128541, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.128541

KOSIOR, E.; CRESCENZI, I. Solutions to the plastic waste problem on land and in the oceans. **Waste and Recycling**. . p. 415–446, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-817880-5.00016-5

KOUR, H. Microbes mediated plastic degradation: A sustainable approach for environmental sustainability. **Journal of applied biology & biotechnology**, 2022. DOI: 10.7324/JABB.2023.110515

KOUTROTSIOS, G.; KALOGEROPOULOS, N.; KALIORA, A.; ZERVAKIS, G. I.; Toward an increased functionality in oyster (*Pleurotus*) mushrooms produced on grape marc or olive mill wastes serving as sources of bioactive compounds. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 66, n. 24, p. 5971-5983, 2018.

KUDZIN, M. H.; PIWOWARSKA, D.; FESTINGER, N.; CHRUSCIEL, J. J. Risks associated with the presence of polyvinyl chloride in the environment and methods for its disposal and utilization. **Materials**, v. 17, n. 1, p. 173, 2023. DOI: 10.3390/ma17010173.

KWIATKOWSKA, E., & JONIEC, J. Effects of Agricultural Management of Spent Mushroom Waste on Phytotoxicity and Microbiological Transformations of C, P, and S in Soil and Their Consequences for the Greenhouse Effect. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 19, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph191912915>.

LASKAR, N., & KUMAR, U. Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environmental Technology & Innovation*, v. 14, n. 100352, p. 100352, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2019.100352>.LEBRETON, L., ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Commun**, v, 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0212-7>.

LEBRETON, L., SLAT, B., FERRARI, F. Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w>

LÊDO, S. A História do Plástico. Disponível em: <<https://revistadasustentabilidade.wordpress.com/2015/01/14/249/>>. Acesso em: 20 dez. 2024.

LEE, S. M. Degradation of bisphenol A by white rot fungi, *Stereum hirsutum* and *Heterobasidium insulare*, and reduction of its estrogenic activity. *Biological & pharmaceutical bulletin*, v. 28, n. 2, p. 201–207, 2005.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A.; Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos com Alta e Baixa Concentração de Sólidos. **Rev. Bras. de Eng. Agr. e Amb.** Vol.13, n. 2, p. 190-196, 2009.

LEONG, Y. K. ET AL. Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review. **Bioresource technology**, v. 344, n. Pt A, p. 126157, 2022.

LI, C. C.; GAN, Y.; ZHANG, C.; HE, H.; GANG, J.H.; ET AL.; "Microplastic communities" in different environments: Differences, links, and role of diversity index in source analysis. **Water Research**, v. 188, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116574>

LINDER, M., BOYER, R., DAHLÖF, L., VANACORE, E., & HUNKA, A. Circularidade inerente ao nível do produto e sua relação com o impacto ambiental. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, 121096, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121096>.

LOON, V.; DIENER, P.; HARRIS, S. Circular products and business models and environmental impact reductions: Current knowledge and knowledge gaps. *Journal of Cleaner Production*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125627>.

LOZANO YM, LEHNERT T, LINCK LT, LEHMANN A, RILLIG MC. Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass. **Front Plant Sci.** v. 12:616645, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.616645.

MACHADO, A. A. S.; LAU, C. W.; KLOAS, W.; BERGMANN, J.; BACHELIER, J. B.; FALTIN, E.; BECKER, R.; GORLICH, A. S, RILLING, M. C. Microplastics can change soil properties and affect plant performance. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 10, p. 6044–6052, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>

MARÍN-BENITO, J. M.; SÁNCHEZ-MARTÍN, M. J.; RODRÍGUEZ-CRUZ, M. S. Impact of spent mushroom substrates on the fate of pesticides in soil, and their use for preventing and/or controlling soil and water contamination: A review. **Toxics**, v. 4, n. 3, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics4030017>

MARTINS, O.G.; ABILIO, D.P.; SIQUEIRA, O. A. P. A.; RONCHESEL, M; ANDRADE, M.C.N. Sobra de alimentos como alternativa para a formulação de novos substratos para o cultivo de *Pleurotus ostreatus* (Basidiomycota, Fungi). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 2, p. 505-518, 2018.

MAS. L. **Baekeland and the Invention of Bakelite**. American Chemistry Society, 1993.

MATA, G.; SALMONES, D.; SAVOIE, J. M. Lignocellulolytic enzymes of *Pleurotus* spp. In: Sánchez, J.R.; Royse, D. **La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas *Pleurotus* spp.** Chiapas, México D. F.: ECOSUR, 2017.

MATHEW, J. T.; INOBEME, A.; ADETUYI, B. O.; ADETUNJI, C. O. General introduction of microplastic: Uses, types, and generation. **Microplastic Pollution**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. p. 3–21. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-8357-5_1

MEDEIROS, R. L. Nutritional and antioxidant potential of *Pleurotus djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn produced on agronomic wastes banana leaves and sugarcane bagasse

substrates. *Brazilian journal of microbiology*, v. 55, n. 2, p. 1117–1129, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42770-024-01336-8>

MEDINA, E.; PAREDES, C.; BUSTAMANTE, M.; MORAL, R.; MORENO-CASELLES, J. relationships between soil physico-chemical, chemical and biological properties in a soil amended with spent mushroom substrate. *Geoderma*, **173**, 152-161, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2011.12.011>.

MOMENI, S. Accelerating the biodegradation of poly(lactic acid) through the inclusion of plant fibers: A review of recent advances. *ACS sustainable chemistry & engineering*, v. 11, n. 42, p. 15146–15170, 2023.

MONTEIRO, R. E.P. **Fermentação em estado sólido da borra de café para o cultivo de shimeji-preto (*Pleurotus ostreatus* Jacq.)**. Trabalho de conclusão de curso- Universidade Federal da Paraíba, Bacharelado em Agronomia. 2022.

MORENO-BAYONA, D.A; GÓMEZ-MÉNDEZ L.D.; BLANCO-VARGAS A.; CASTILLO-TORO A.; HERRERA-CARLOSAMA L.; POUTOU-PIÑALES RA.; Simultaneous bioconversion of lignocellulosic residues and oxodegradable polyethylene by *Pleurotus ostreatus* for biochar production, enriched with phosphate solubilizing bacteria for agricultural use. *PloS one*, v. 14, n. 5, p. e0217100, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217100>

ODIGBO, C.; ADENIPEKUN, C.; OLADOSU, I.; OGUNJOBI, A. Polyethylene terephthalate (PET) biodegradation by *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius*. *Environmental monitoring and assessment*, v. 195, n. 5, p. 585, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11153-5>

PAES, L.; BEZERRA, B.; DEUS, R.; JUGEND, D.; BATTISTELLE, R. Organic solid waste management in a circular economy perspective – A systematic review and SWOT analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 239, 118086, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.118086>.

PANNETIER, P.; CACHOT, J.; CLÉRANDÉAU, C.; FAURE, F.; ARKEL, K. V.; ALENCASTRO, L. F.; LEVASSEUR, C.; SCIACCA, F.; BOURGEOIS, J. P.; MORIN, B. Toxicity assessment of pollutants sorbed on environmental sample microplastics collected on beaches: Part I-adverse effects on fish cell line. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987), v. 248, p. 1088–1097, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.12.091>

PAREDES, C.; MEDINA, E.; BUSTAMANTE, M.; MORAL, R. Effects of spent mushroom substrates and inorganic fertilizer on the characteristics of a calcareous clayey-loam soil and lettuce production. *Soil Use and Management*, 32, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12304>.

PILAPITIYA, P. G. C N. T.; RATNAYAKE, A. S. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, v. 11, n. 100220, p. 100220, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>

PINCELLI, I.; DE CASTILHOS JÚNIOR, A.; MATIAS, M.; RUTKOWSKI, E. Post-consumer plastic packaging waste flow analysis for Brazil: The challenges moving towards a circular economy.. *Waste management*, v. 126, p. 781-790, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.005> .

RANI, L.; KAUR, G.; SOOD, P.; KAUSHAUL, J.; SRIVASTAV, A. L. Remediation strategies for the removal of microplastics from the water. **Role of Green Chemistry in Ecosystem Restoration to Achieve Environmental Sustainability**. p. 191–200.

RATUCHNE, . *Pleurotus ostreatus* and a novel fungal composite: Development and bioremediation of plastic wastes. **Resources, conservation & recycling advances**, v. 19, n. 200167, p. 200167, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200167>

RILLIG, M. C.; LEHMANN, A.; MACHADO, A. S.; YANG, G. Microplastic effects on plants. **The new phytologist**, v. 223, n. 3, p. 1066–1070, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15794>

ROME, A. Coming to Terms with Pollution: The Language of Environmental Reform, 1865–1915. **Environmental History**, v. 1, 6 – 28, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2307/3985154>.

RUDOLPH, N.; AUMNATE, N. R.; KIESEL, R.; Understanding Plastics Recycling Economic, Ecological, and Technical Aspects of Plastic Waste Handling Book. 2017.

RYBERG, M.; LAURENT, A.; HAUSCHILD, M. **Mapping of global plastics value chain and plastics losses to the environment: with a particular focus on marine environment**. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya, 2018. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26745>

SANCHEZ E. R. **La biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas *Pleurotus* spp** / José E. Sánchez y Daniel J. Royse, editores.- San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México: El Colegio de la Frontera Sur, 2017.352 p. ISBN: 978-607-8429-479

SHARMA, N., GOVINDAN, K., LAI, K., CHEN, W., & KUMAR, V. The transition from linear economy to circular economy for sustainability among SMEs: A study on prospects, impediments, and prerequisites. **Business Strategy and the Environment**. 2020. <https://doi.org/10.1002/bse.2717>.

SHARMA, R. K.; ARORA, D. S. Fungal degradation of lignocellulosic residues: an aspect of improved nutritive quality. *Critical Reviews in Microbiology*, 41: 52-60, 2015. DOI: 10.3109/1040841X.2013.791247.

SHARMA, R.; ARORA, D.S. Fungal degradation of lignocellulosic residues: An aspect of improved nutritive quality. **Critical Reviews in Microbiology**, v. 41, p.52 – 60, 2015. DOI: <https://doi.org/10.3109/1040841X.2013.791247>.

SILPA, K.; YAO, L. C. **What A waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050**. Washington, DC, USA: World Bank Publications, 2018. DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0

SILVA, S. A. **Capacidade produtiva e biodegradativa de cogumelos do gênero *Pleurotus* cultivados em resíduos lignocelulósicos**. Trabalho de conclusão de curso- Universidade Federal da Paraíba, Bacharelado em Agronomia, Areia, UFPB/CCA, 2023. 71 f.

SOLHI, L. Understanding nanocellulose-water interactions: Turning a detriment into an asset. *Chemical reviews*, v. 123, n. 5, p. 1925–2015, 2023. DOI: 10.1021/acs.chemrev.2c00611

SRIKANTH, M.; SANDEEP, T.S.R.S.; SUCHARITHA, K. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources and bioprocessing*, v. 9, n. 1, p. 42, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>

TEWARI A. K.; UPADHYAY, S. C.; KUMAR, M.; PATHAK, K.; KAUSHIK, D.; VERMA, R.; BHATT, S.; MASSOUD E.S; RAHMAN M. H.; CAVALU, S. Insights on development aspects of polymeric nanocarriers: The translation from bench to clinic. **Polymers**, v. 14, n. 17, p. 3545, 2022.

VIEIRA, F. R. **Substrato de cultivo para os cogumelos *Pleurotus ostreatus* e *Agaricus bisporus*: composição físico-química e metagenômica microbiana**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2016.

WANG, T.; WANG, L., CHEN, Q.; KALOGERAKIS, N.; JI, R.; MA, Y. Interactions between microplastics and organic pollutants: effects on toxicity, bioaccumulation, degradation, and transport. **Science of the Total Environment**, v. 748, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142427>

WEI, Y.; JIN, Z.; ZHANG, M.; LI, Y.; HUANG, S.; LIU, X.; JIN, Y.; WANG, H. Impact of spent mushroom substrate on Cd immobilization and soil property. **Environmental Science and Pollution Research**, 27, 3007-3022, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07138-y>

YU H.; FAN P.; HOU J.; DANG Q.. Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzyme activities via alteration of soil properties and direct adsorption: an investigation at the aggregate fraction level. *Environ Pollut.* 2020;267:11554. doi: 10.1016/j.envpol.2020.115544.

ZÁRATE-SALAZAR, J. R.; SANTOS, M. N.; CABALLERO, E. N. M.; MARTINS, O. G.; HERRERA, Á. A. P. Use of lignocellulosic corn and rice wastes as substrates for oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus* Jacq.) cultivation. **SN Applied Sciences**, 2(11), 1-10, 2020.

ZHOU, J. Effects of spent mushroom substrate on the dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soil. **Chemosphere**, v. 259, n. 127462, p. 127462, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127462>

ZHU, D., ZHANG, P., XIE, C. Biodegradation of alkaline lignin by *Bacillus ligninophilus* L1. **Biotechnology for biofuels**, v. 10, n. 1, p. 44, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0735-y>