



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE FARMÁCIA



THALITA SILVA CALIXTO

**BIODEGRADAÇÃO DE POLIÉSTER POLIURETANO (PUR) REALIZADA PELO
FUNGO *Pestalotiopsis microspora***

OURO PRETO, MG

2023

THALITA SILVA CALIXTO

**BIODEGRADAÇÃO DE POLIÉSTER POLIURETANO (PUR) REALIZADA PELO
FUNGO *Pestalotiopsis microspora***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Farmácia da Universidade Federal de Ouro Preto, pela disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC007), como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Farmácia.

Orientadora: Prof. Isabela Neves de Almeida, Dr.

OURO PRETO, MG

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C154b Calixto, Thalita Silva.

Biodegradação de poliéster poliuretano (PUR) realizada pelo fungo
Pestalotiopsis microspora. [manuscrito] / Thalita Silva Calixto. - 2023.
41 f.: il.: color., tab.. + Quadro.

Orientadora: Profa. Dra. Isabela Neves de Almeida.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Farmácia. Graduação em Farmácia .

1. Pestalotiopsis microspora. 2. Biodegradação. 3. Biorremediação. 4.
Poliésteres. I. Almeida, Isabela Neves de. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 602.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thalita Silva Calixto

Biodegradação de Poliéster Poliuretano (PUR) realizada pelo fungo *Pestalotiopsis microspora*

Monografia apresentada ao Curso de Farmácia da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Farmacêutico Generalista

Aprovada em 30 de março de 2023

Membros da banca

Membros da banca

Profª. Drª - Isabela Neves de Almeida - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Fábio Augusto Rodrigues e Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
Isadora Oliveira Ansaloni Pereira - Programa de Pós Graduação em Ciências Farmacêuticas

Isabela Neves de Almeida, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Isabela Neves de Almeida, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/03/2023, às 07:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0501980** e o código CRC **220101F8**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e aos seres de luz que sempre estiveram ao meu lado me dando forças e me guiando.

Agradeço também à minha mãe Eliane Pereira Silva Calixto e ao meu pai José Calixto Sobrinho pelo apoio e paciência durante todos os anos de graduação. Aos meus irmãos João Antônio e Thiago, pelo amor incondicional.

À Vanessa Amaral pelo companheirismo, amor e paciência.

À família Amaral pela acolhida e afeto.

Aos amigos e irmãos de alma, Pablo Boni, Natália Dias e Laís Kaori Fujii que sempre estiveram ao meu lado, até nos momentos mais difíceis.

À Lygia Soares pela amizade e mentoria.

Aos amigos conquistados ao longo da graduação e vida republicana, em especial ao Marlon Brasil, Gisele Santos, Bianca Curitiba, Marlon Prudente e Izamara Martins.

Aos meus filhos de coração Meg, Zeca, Macarena, Minerva, Salém e James por tornarem a vida mais leve e cheia de amor. Ao meu lar, República Tanto Faz, e às Tantofetes, em especial à Laura Alice, Francine, Marília, Beatriz, Paula, Marcela, Alice, Déborah, Pietra, Gabriela, Iara, Monique e Alícia, pelo amadurecimento adquirido ao longo desses anos, por todas as experiências vividas e pelos laços criados.

Ao CALF e às gestões Difusão, Catálise e Adrenalina pela convivência e aprendizados. Aos meus professores, à minha orientadora Dra. Isabela Neves de Almeida, aos técnicos e demais colaboradores da Escola de Farmácia por contribuírem na minha formação.

À Escola de Farmácia e à Universidade Federal de Ouro Preto pelo ensino gratuito e de qualidade.

“Viver é um rasgar-se e remendar-se.”

(Guimarães Rosa)

RESUMO

A produção e o consumo excessivo de plásticos em todo o mundo vem gerando grande acúmulo desses materiais nos ambientes terrestre e aquático. Estudos relatando a descoberta de microplásticos em organismos animais e humanos, inclusive em placenta humana, demonstram o quanto esses materiais estão presentes nos nossos ecossistemas. Tanto no Brasil quanto no mundo, o percentual de lixo plástico que é efetivamente reciclado é muito inferior à quantidade produzida e consumida anualmente, o restante é descartado em aterros sanitários ou de forma irregular em lixões a céu aberto. Fato que impulsionou a realização de estudos com a finalidade de encontrar meios viáveis para reverter a atual situação do planeta em relação aos resíduos plásticos que já estão contaminando solos, rios e mares. Já se sabe da existência de fungos e bactérias que biodegradam polímeros plásticos, trazendo a biorremediação como uma possível solução para este problema. Além disso, foi descoberto que o fungo *Pestalotiopsis microspora* biodegrada o polímero poliéster poliuretano (PUR) como fonte única de carbono, tanto em ambientes aeróbicos quanto anaeróbicos, de maneira mais rápida quando comparados à outros microrganismos que também degradam este material. O que corrobora para a sua utilização em aterros sanitários como solução mais sustentável para a gestão de resíduos plásticos. Entretanto, é necessário a realização de estudos com a finalidade de desenvolver metodologias para o uso deste fungo em aterros sanitários de forma segura e eficaz.

Palavras-chave: *Pestalotiopsis microspora*, biodegradação, biorremediação, poliéster poliuretano.

ABSTRACT

The production and excessive consumption of plastics around the world has generated a large accumulation of these materials in the terrestrial and aquatic environments. Studies reporting the discovery of microplastics in animal and human organisms, including human placenta, demonstrate how much these materials are present in our ecosystems. Both in Brazil and in the world, the percentage of plastic waste that is actually recycled is much lower than the amount produced and consumed annually, the rest is disposed of in landfills or irregularly in open-air dumps. A fact that spurred studies to find viable ways to reverse the current situation on the planet in relation to plastic waste that is already contaminating soils, rivers and seas. It is already known that there are fungi and bacteria that biodegrade plastic polymers, bringing bioremediation as a possible solution to this problem. Furthermore, it was discovered that the fungus *Pestalotiopsis microspora* biodegrades polyester polyurethane polymer (PUR) as the sole source of carbon, both in aerobic and anaerobic environments, faster when compared to other microorganisms that also degrade this material. This confirms its use in landfills as a more sustainable solution for the management of plastic waste. Nonetheless, it is necessary to carry out studies in order to develop methodologies for the use of this fungus in sanitary landfills in a safe and effective way.

.

Keywords: *Pestalotiopsis microspora*, biodegradation, bioremediation, polyester polyurethane.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

BDA - Batata Dextrose Ágar

BPA - Bisfenol A

DDT - Diclorodifeniltricloroetano

MPs - Microplásticos

NP - Nonilfenol

PA - Nylon

PAH - Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos

PBDE - Ésteres Difenílicos Polibromados

PCB - Bifenilas Policloradas

PET - Polietileno Tereftalato

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PU - poliuretano

PUR - Polímero Poliéster Poliuretano

PVC - Policloreto de Vinila

UNEP - United Nations Environment Programme

UV- Ultravioleta

WWF - World Wildlife Fund

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Lista de Figuras

Figura 1 - Características conidiais para identificação de espécies de <i>Pestalotiopsis</i>	21
Figura 2 - Estrutura química do Taxol	25
Figura 3 - Colônias de <i>P. microspora</i>	26
Figura 4 - Estruturas morfológicas de <i>P. microspora</i>	27
Figura 5 - Reação de formação do monômero uretano	29

LISTA DE TABELA E QUADRO

Tabela 1 - Coleta de dados	14
Quadro 1 - Substâncias produzidas por espécies de <i>Pestalotiopsis</i> isoladas	23

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVO	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 METODOLOGIA	16
3.1 COLETA DE DADOS	16
4 REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1 <i>Pestalotiopsis microspora</i>	19
4.1.1 Taxonomia	20
4.1.1.1 Nome científico: <i>Pestalotiopsis microspora</i>	20
4.1.1.2 Reino: Fungi	20
4.1.1.3 Filo: Ascomycota	20
4.1.1.4 Classe: Sordariomycetes	20
4.1.1.5 Ordem: Xylariales / Amphisphaeriales	20
4.1.1.6 Família: Pestalotiopsidaceae	20
4.1.1.7 Gênero: <i>Pestalotiopsis</i>	20
4.1.1.8 Espécie: <i>Pestalotiopsis microspora</i>	20
4.1.2 Aspectos Morfológicos	21
4.1.3 Aspectos Bioquímicos	24
4.1.4 Aspectos Metabólicos	24
4.1.5 Condições de Cultivo <i>in vitro</i>	28
4.1.6 Ações de Degradação	29
5 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E APLICABILIDADE DO POLÍMERO SINTÉTICO POLIÉSTER POLIURETANO (PUR)	30
6 BIODEGRADAÇÃO DO POLÍMERO POLIÉSTER POLIURETANO (PUR)	31
8 UTILIZAÇÃO DO FUNGO <i>Pestalotiopsis microspora</i> EM ATERROS SANITÁRIOS	33
9 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A produção, o consumo e o acúmulo de plástico no ambiente terrestre e aquático têm aumentado exponencialmente nos últimos anos. De acordo com o *United Nations Environment Programme* (UNEP), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, a poluição plástica nos ecossistemas aquáticos cresceu consideravelmente nos últimos anos e deve dobrar até 2030, acarretando graves consequências não só para a saúde, mas também para a economia e principalmente para a biodiversidade e o clima do planeta (UNEP, 2021).

Em 2010 entre 4,8 a 12,7 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram destinados aos oceanos (TELES, 2020). Em 2018 foram produzidas 359 milhões de toneladas de plástico no mundo sendo que, destas, metade é de plástico descartável (de uso único). Estimativas da massa de plástico no oceano global variam de 7.000 a 300.000 toneladas, podendo ser encontradas distribuídas de forma não uniforme em todas as bacias oceânicas (BRYANT *et al.*, 2016)

De acordo com um estudo publicado pelo *World Wildlife Fund* (WWF), o Fundo Mundial para a Natureza, o Brasil ocupou o 4º lugar entre os países que mais geraram lixo plástico em 2018, sendo que apenas 1,28% foram efetivamente reciclados e 9% do resíduo produzido mundialmente foi reciclado ao longo do ano. Isso porque, mesmo passando por usinas de reciclagem, há perdas na separação de tipos de plásticos devido à contaminação, ou por serem multicamadas ou de baixo valor. No final o destino de 7,7 milhões de toneladas de plástico são os aterros sanitários, enquanto outros 2,4 milhões de toneladas de plástico são descartados de forma irregular, sem qualquer tipo de tratamento, em lixões a céu aberto (WWF, 2019).

É importante frisar que o plástico reciclado pode chegar a um ponto em que não é mais possível continuar o processo de reciclagem deste material. Existem vários fatores que podem limitar a reciclabilidade do plástico, como a qualidade do material reciclado, a presença de contaminantes ou a falta de tecnologias de reciclagem adequadas. À medida que o plástico é reciclado repetidamente, o material pode perder qualidade e resistência, o que pode torná-lo inadequado para uso em produtos de alta qualidade. Além disso, alguns tipos de plástico podem ser mais difíceis de reciclar do que outros, o que pode limitar ainda mais a eficácia do processo de reciclagem (MACARTHUR; HOLMES, 2017).

Além da produção crescente e, conseqüentemente, o elevado consumo de plástico em suas diversas formas, outra circunstância gera um grande agravamento da situação do planeta Terra: os microplásticos. Os microplásticos que são pequenos pedaços de plástico geralmente definidos com tamanho inferior a 5 milímetros, advindos dos polímeros polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS), poliuretano (PU), policloreto de vinila (PVC) ou nylon (PA). Esses materiais formam particulados devido à ação de irradiação UV (ultravioleta) e intemperismo, aumentando sua área de superfície e sua mobilidade. À medida que o tamanho dos fragmentos plásticos diminui, eles podem ser ingeridos por uma gama maior de organismos, pois se incorporam facilmente à cadeia alimentar (BONHOMME *et al.* 2003, SEN; RAUT, 2015). São polímeros são provenientes de resíduos industriais, residenciais, transporte marítimo e de processos de degradação. Também são muito utilizados em cosméticos esfoliantes, sabonetes, cremes dentais e na perfumaria. É válido salientar que o glitter é um microplástico, logo o seu uso em esmaltes, maquiagens e adornos também gera poluição ambiental, pois são partículas muito pequenas que ultrapassam os filtros utilizados nos tratamentos de esgoto, indo parar em rios e mares e, conseqüentemente, afetando diretamente a vida aquática. Os MPs são encontrados no ar, em rios, mares e até mesmo em alimentos, causando graves problemas em todos os biomas, visto que medida que o tamanho dos fragmentos plásticos diminui, eles podem ser ingeridos por uma gama maior de organismos, pois se incorporam facilmente à cadeia alimentar de muitas espécies, levando-as à morte (GESAMP, 2016; BONHOMME *et al.* 2003, SEN; RAUT, 2015).

Essas pequenas partículas são classificadas em primárias ou secundárias de acordo com sua origem. MPs primários são aqueles produzidos com tamanho menor que 5 mm para serem usados como cosméticos ou em produtos de cuidados pessoais, como creme dental, carreadores de medicamentos e em aplicações industriais. (AMELIA *et al.*, 2021, YANG *et al.*, 2020). Já os microplásticos secundários são aqueles que derivam da fragmentação de grandes pedaços de plástico por meio de processos químicos (fotólise, hidrólise e termólise), mecânicos (abrasão e ondas) ou biológicos (bactérias e fungos) (AMELIA *et al.*, 2021, EKANAYAKA *et al.*, 2022).

As principais formas em que os MPs são encontrados nos ecossistemas aquáticos são fibras, fragmentos, filmes, grânulos, grânulos e espuma de poliestireno. Os MPs do tipo fibra PE ou PP são os mais comuns de se encontrar e as cores dominantes são o azul e o preto. As fibras podem ser encontradas emaranhadas ou desembaraçadas, bem como retas ou curvas (AMELIA *et al.*, 2021).

Devido à variabilidade do tamanho do resíduo e do seu longo período de degradação natural, a poluição plástica atinge as áreas mais remotas do planeta, incluindo as águas superficiais do oceano aberto. Altas concentrações de detritos plásticos flutuantes foram descritas em áreas centrais dos oceanos Atlântico Norte e Pacífico, mas modelos de circulação oceânica sugerem possíveis regiões de acumulação em todos os cinco giros oceânicos subtropicais. Os modelos preveem que esses vórtices de grande escala atuam como correias transportadoras, coletando os resíduos plásticos flutuantes liberados dos continentes e acumulando-os em zonas centrais de convergência (CÓZAR *et al.*, 2014).

Um estudo publicado em 2018 demonstrou a existência desse resíduo em intestinos humanos: foram encontrados 20 microplásticos de tamanhos entre 50 e 500 μm para cada 10 gramas de matéria fecal em pessoas de diferentes países da Europa e da Ásia, como o Reino Unido, Itália, Rússia e Japão. Desse material, os mais comuns eram o polipropileno (PP), constituinte básico de embalagens de leite e sucos, e o polietileno tereftalato (PET) do qual é feita a maioria das garrafas plásticas, como as de refrigerante, por exemplo. No entanto, não foi determinada a origem da fonte de ingestão dessas partículas, pois não se sabe se foram adquiridas a partir do consumo de alimentos processados ou naturais, como peixes e mariscos, ou até mesmo de bebidas e/ou do sal marinho (SCHWABL *et al.*, 2019).

Um estudo realizado pela *Vrije Universiteit Amsterdam*, na Holanda, demonstrou a presença de polímeros, como o polietileno tereftalato (PET), polietileno (PE) e polímeros de estireno no sangue de quase 80% das pessoas amostradas. A publicação reforça a necessidade de uma avaliação de risco à saúde humana em relação à poluição por partículas plásticas, apesar dessa avaliação ainda não ser possível, visto a falta de dados sobre o risco toxicológico e a exposição humana, além da falta de métodos validados sensíveis o suficiente para detectar traços de pequenas frações ($< 10 \mu\text{m}$) de partículas plásticas em tecidos biológicos (HEATHER *et al.*, 2022). Em um outro estudo foram encontrados microplásticos constituídos de polipropileno corado, em sua maioria, com tamanho em torno de 10 μm e inferiores a 5 μm , em todas as porções placentárias humana: membranas materna, fetal e amniocorial (RAGUSA *et al.*, 2021).

Além disso, o descarte de resíduos plásticos nos oceanos leva ao acúmulo de produtos químicos tóxicos como bifenilas policloradas (PCB), nonilfenol (NP), diclorodifeniltricloroetano (DDT), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH), ésteres difenílicos polibromados (PBDE) e bisfenol A (BPA) que podem causar sérios problemas de

indigestão, obstrução gastrointestinal e reprodutivos em organismos marinhos (SRIKANTH *et al.*, 2022).

Há uma tendência crescente de que governos e outras entidades reguladoras restrinjam o uso de plásticos descartáveis, visando reduzir a quantidade de resíduos plásticos que são gerados e a sua conseqüente poluição ambiental. No entanto, essa tendência ainda está em estágio inicial e, portanto, ainda é muito cedo para afirmar que a utilização de plásticos descartáveis diminuirá significativamente em um futuro próximo (UNEP, 2021).

Além disso, é importante ressaltar que a redução do uso de plásticos descartáveis é apenas uma parte do desafio maior de reduzir a produção e o consumo excessivos de plásticos em geral. Embora haja cada vez mais iniciativas para promover a sustentabilidade e reduzir o impacto ambiental dos plásticos, ainda há um longo caminho a percorrer para alcançar um cenário ideal em que a produção e o consumo desses materiais estejam em harmonia com as necessidades ambientais e sociais da sociedade contemporânea (UNEP, 2021).

Existem muitos trabalhos sobre materiais plásticos sintetizados a partir de compostos orgânicos, como por exemplo o caroço de abacate e a mandioca, para a produção de sacolas, talheres e recipientes descartáveis. Esses materiais são de rápida decomposição, de maneira que não se acumule e não prejudique o meio ambiente (BRITO, 2019). Essa é uma parte da solução do problema, mas ainda é necessário resolver a questão do enorme acúmulo de plástico em nossos ecossistemas. Já se sabe da existência de espécimes, como o fungo *Aspergillus tubingensis* e o fungo *Pestalotiopsis microspora*, que degradam polímeros plásticos. Estas e outras espécies estão sendo cada vez mais estudadas para que possam ser utilizadas, se viáveis, como solução para o plástico já acumulado (YUAN *et al.*, 2020).

Neste trabalho será abordado como tema o *Pestalotiopsis microspora*, um fungo endofítico encontrado em florestas tropicais que possui atividades antifúngicas e antioxidantes. O sucesso obtido em estudos de degradação de diversos polímeros plásticos, inclusive em ambiente anaeróbico, o torna uma possível solução para o tratamento desse resíduo em solos, como nos aterros sanitários, por meio de processos que visam da aceleração da decomposição desse tipo de material (SRIKANTH *et al.*, 2022).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Elaborar uma revisão narrativa sobre a utilização do fungo *Pestalotiopsis microspora* na biodegradação do polímero sintético poliuretano poliéster (PUR).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a biodegradação do PUR realizada pelo microrganismo *Pestalotiopsis microspora*;
- Descrever o processo de biodegradação realizado pelo fungo *Pestalotiopsis microspora*;
- Apresentar informações contextualizando a biodegradação do PUR pela espécie *Pestalotiopsis microspora* em meios anaeróbicos.

3 METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangendo o problema da excessiva produção, consumo e acúmulo de plástico no ambiente terrestre, com foco principal na biodegradação do polímero sintético poliuretano poliéster (PUR) pelo fungo *Pestalotiopsis microspora*. Foi apresentada a taxonomia desta espécie, habitat natural, o mecanismo de biodegradação do polímero supracitado, e a viabilidade do seu uso em aterros sanitários como possível ferramenta para solucionar a presença de microplástico em rios e oceanos por meio da aceleração da decomposição desse resíduo. Forma de acelerar a decomposição de plásticos acumulados nestes locais, como possível ferramenta para solucionar o problema da presença de microplástico em rios e oceanos.

3.1 COLETA DE DADOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados periódicos científicos nacionais e internacionais indexados em bases de dados científicas, anais de conferências nacionais e internacionais, teses e dissertações. Os termos buscados foram: “*Pestalotiopsis microspora*”, “*Pestalotiopsis microspora* plástico”, “*Pestalotiopsis microspora* biodegradação”, “*Pestalotiopsis microspora* plastic”, “*Pestalotiopsis microspora* plastic polymers”, “*Pestalotiopsis microspora* plastic degradation”, “*Pestalotiopsis microspora* polyurethane”, “microplastic”, “microplastic in human”, “microplastic in human blood”, “microplastic in human stool” e “*Pestalotiopsis microspora* biodegradación”, “Poliuretano poliéster”, nos idiomas português, inglês e espanhol.

Após a busca supracitada, nos idiomas Português, Inglês e Espanhol, foi realizado um filtro no qual foi avaliado a correspondência ao interesse do que foi abordado neste trabalho, conforme tabela a seguir:

Tabela 1 - Coleta de dados

(continua)

Ano	Artigo Científico	Livro	Monografia	Tese de Mestrado	Tese de Doutorado
1949	01	-	-	-	-
1953	02	-	-	-	-
1955	01	-	-	-	-
1956	01	-	-	-	-
1961	01	-	-	-	-

Tabela 1 - Coleta de dados

(continua)

Ano	Artigo Científico	Livro	Monografia	Tese de Mestrado	Tese de Doutorado
1949	01	-	-	-	-
1953	02	-	-	-	-
1955	01	-	-	-	-
1956	01	-	-	-	-
1961	01	-	01	-	-
1974	02	-	-	-	-
1980	01	-	-	-	-
1995	01	-	-	-	-
1996	04	-	-	-	-
200	01	-	-	-	-
2001	02	-	-	-	-
2002	01	-	-	-	-
2003	04	-	-	-	-
2007	03	-	-	-	-
2009	02	-	-	-	-
2010	02	-	-	-	-
2011	03	-	-	-	-
2012	01	-	-	-	-
2013	01	-	-	-	-
2014	02	-	-	-	-
2015	01	-	-	-	-
2016	05	01	-	-	-
2017	01	-	-	-	-
2018	-	-	-	01	01
2019	04	-	-	-	-

Tabela 1 - Coleta de dados

(conclusão)

Ano	Artigo Científico	Livro	Monografia	Tese de Mestrado	Tese de Doutorado
2020	02	-	-	01	-
2021	03	01	-	-	-
2022	05	-	-	-	-

Por fim foi realizada uma leitura exploratória que analisou a eficiência da biodegradação do polímero sintético PUR pelo fungo *Pestalotiopsis microspora* e sua possível utilização em aterros sanitários.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 *Pestalotiopsis microspora*

A espécie *Pestalotiopsis microspora* é um fungo endofítico encontrado pela primeira vez numa floresta do Equador por um grupo de pesquisadores dirigidos por Scott Strobel, em uma expedição ao Parque Nacional Yasuní (RUSSELL *et al.*, 2011). Comumente presente em plantas tropicais e subtropicais, é um sapróbio generalizado de casca e material vegetal em decomposição (METZ *et al.*, 2000). Em estudos mais recentes, se define que são todos os microrganismos cultiváveis ou não e que habitam o interior dos tecidos vegetais, distribuídos por diferentes órgãos e tecidos das plantas, se associando a folhas, ramos, caules, raízes (FELBER *et al.*, 2016) e estruturas florais, como ovário, anteras e estames (PORRAS-ALFARO; BAYMAN, 2011), e que não causam danos aos seus hospedeiros. Podem ser divididos em dois grupos: os que não geram estruturas externas do hospedeiro (grupo I), e os que são capazes de desenvolver estruturas externas como os nódulos de bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico e fungos micorrízicos (grupo II) (AZEVEDO, 2014). Há estudos que demonstram que a relação endófito-patógeno do fungo *Pestalotiopsis microspora* e seu hospedeiro é assintomática. Entretanto, fatores fisiológicos ou ambientais fazem com que o fungo possa se tornar patogênico para o seu hospedeiro, variando de acordo com a produção de fitotoxinas, pestalopironas, hidroxipestalopironas e pestalosídeos (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011). Além disso, a atividade antifúngica da espécie em questão produz exsudatos de pestalosídeo, o que propicia competição com outros fungos (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011).

Nas últimas décadas os microrganismos endofíticos vêm sendo cada vez mais estudados devido às descobertas de substâncias biologicamente ativas isoladas desses microrganismos (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011). Além de proteção à planta hospedeira, os endófitos também podem aumentar a resistência das plantas contra estresses bióticos e abióticos, produzir hormônios de crescimento vegetal, antibióticos, enzimas e muitos outros compostos de interesse biotecnológico. Isolados desta espécie tem variabilidade genética, provavelmente compreendendo um complexo de espécies diversas e, portanto, cada isolado é geralmente único nas substâncias que produz (HARPER *et al.*, 2003).

Um estudo desenvolvido por Netala *et al.* (2016) mostra a biossíntese de nanopartículas de prata utilizando extrato extracelular do fungo *Pestalotiopsis microspora* isolado dos tecidos

de folhas saudáveis de *Gymnema sylvestre*, uma importante planta medicinal. As nanopartículas sintetizadas exibem atividades biológicas multifuncionais incluindo atividade antimicrobiana contra bactérias e patógenos fúngicos e atividade anticancerígena contra diferentes linhas celulares de câncer - B16F10 (melanoma de rato) SKOV3 (carcinoma de ovário humano), PC3 (carcinoma de próstata humana) e A549 (adenocarcinoma de pulmão humano) (GARCIA, 2018).

Por essas características, os microrganismos endofíticos têm sido usados para o controle biológico de pragas de insetos, doenças de plantas e produção de vitaminas, enzimas, antibióticos e medicamentos anticancerígenos (AZEVEDO, 2014).

4.1.1 Taxonomia

4.1.1.1 Nome científico: *Pestalotiopsis microspora*

4.1.1.2 Reino: Fungi

4.1.1.3 Filo: Ascomycota

4.1.1.4 Classe: Sordariomycetes

4.1.1.5 Ordem: Xylariales / Amphisphaeriales

4.1.1.6 Família: Pestalotiopsidaceae

4.1.1.7 Gênero: *Pestalotiopsis*

4.1.1.8 Espécie: *Pestalotiopsis microspora*

A taxonomia do gênero *Pestalotiopsis* é marcadamente complexa. Até que as espécies importantes tenham sido epitipificadas com cepas vivas que foram sequenciadas e depositadas em bancos de dados públicos, os pesquisadores devem abster-se de fornecer o nome exato das espécies (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011).

Ferramentas da biologia molecular têm sido utilizadas com o objetivo de obter informações mais detalhadas acerca da variabilidade genética desse gênero. Estas, por sua vez, podem auxiliar na seleção de indivíduos e, por conseguinte, na seleção de linhagens promissoras para a biotecnologia (HYDE *et al.*, 2007). Portanto, há a necessidade de uma

caracterização molecular mais acurada para uma classificação taxonômica mais segura (BANHOS, 2016; PRAKASH *et al.*, 2007).

Entretanto, os dados moleculares para diferenciação em nível de espécie depositados na base de dados do GenBank ainda são questionados e, de acordo com Hyde *et al.* (2011), muitos precisam ser revistos ou até refeitos para torná-los confiáveis. Tendo em vista todas as dúvidas e questionamentos relacionados à identificação de fungos do gênero *Pestalotiopsis*, uma estratégia polifásica talvez possa contribuir de maneira decisiva a essa área da pesquisa microbiológica. A utilização da quimiotaxonomia em conjunto com a biologia molecular e a morfologia pode ser uma ferramenta útil e eficiente para a etapa de identificação de uma linhagem a nível de espécie (BANHOS, 2016).

4.1.2 Aspectos Morfológicos

O gênero *Pestalotiopsis* apresenta variadas espécies anamórficas, ou seja, que realizam apenas reprodução assexuada, embora também já tenham sido identificadas espécies teleomorfas, ou de reprodução sexuada, chamadas de *Pestalosphaeria* e *Neobroomella*. Existem evidências da presença dos dois tipos de reprodução de *Pestalotiopsis* em uma mesma planta, sendo necessário, no entanto, mais estudos para avaliar se os resultados encontrados se referem à mesma espécie (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011, MORAES; PAES; HOLANDA, 2009).

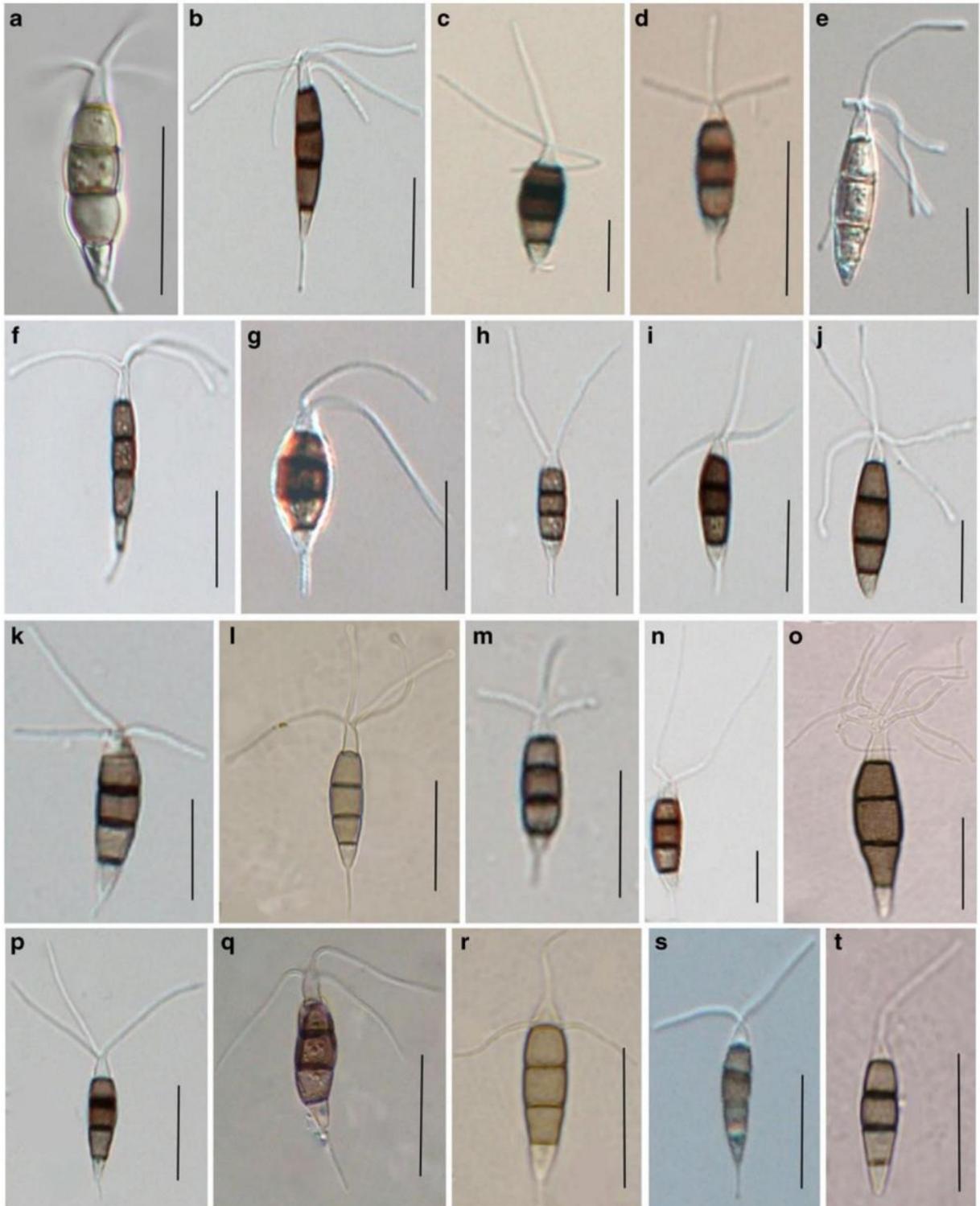
Os caracteres morfológicos usados para diferenciar espécies de *Pestalotiopsis* e gêneros semelhantes são limitados (HU *et al.*, 2007). Além disso, a formação das estruturas reprodutivas é inconstante e os marcadores morfológicos variam de acordo com o hospedeiro e o ambiente, dificultando sua identificação (EGGER, 1995). Em seus estudos, Guba (1961), Steyaert (1949, 1953a, 1953b, 1955, 1961), Steyaert e Singer (1956), além de outros pesquisadores, utilizaram principalmente material obtido a partir de vegetais secos. Sutton (1980) apontou que, quando as espécies foram cultivadas em cultura artificial, elas mostraram mais variabilidade e sobreposição de limites de espécies. Portanto, a identificação de espécies a partir da cultura e a aplicação de nomes baseados na taxonomia do herbário apresentam uma situação complexa. Hu *et al.* (2007) mostraram que a morfologia da colônia (cor, taxa de crescimento e textura) é altamente variável em isolados únicos de *Pestalotiopsis*, sendo que este fenômeno pôde ser observado a partir de repetidas subculturas. Também dentro de uma única espécie, a morfologia

conidial (forma e cor das células medianas), taxa de crescimento e estrutura de frutificação podem variar (JEEWON *et al.*, 2003, MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011).

Jeewon *et al.* (2003) e Tejesvi *et al.* (2009) compararam a morfologia com dados de sequência e mostraram que as espécies de *Pestalotiopsis* exibem considerável diversidade morfológica e que os isolados se agrupam com base em semelhanças na morfologia conidial. Hu *et al.* (2007) descobriram que aspectos morfológicos conidiais como comprimento conidial, comprimento das células medianas, largura conidial e cor das células medianas eram características estáveis dentro de *Pestalotiopsis*, enquanto que o comprimento dos apêndices apicais e basais variou. Jeewon *et al.* (2003) avaliaram os marcadores morfológicos que poderiam ser usados para diferenciar espécies de *Pestalotiopsis*. Os autores sugeriram que a deposição de grânulos de melanina dentro da matriz celular fornecendo pigmentação para as células medianas tem valor taxonômico, o que corrobora as descobertas de Griffiths e Swart (1974a, 1974b).

A morfologia dos conídios (**Figura 1**) é o caráter taxonômico mais utilizado para o gênero *Pestalotiopsis*. A maioria das espécies é dividida em diferentes grupos com base no tamanho dos conídios. O comprimento e a largura são bons marcadores taxonômicos para o gênero e estáveis dentro dos diferentes meios e gerações na maioria dos casos (HU *et al.* 2007). A cor das células medianas ainda é um caráter amplamente utilizado e todas as espécies se dividem em três grupos: concolor, versicolor oliváceo e versicolor oliváceo fuliginoso, no entanto, evidências moleculares indicam que o agrupamento das espécies com base apenas em concolores e versicolores seja mais preciso (JEEWON *et al.* 2003). O comprimento e o número dos apêndices apicais também são características amplamente utilizadas para identificação de espécies. Os apêndices apicais podem ser divididos em ramos e podem também surgir do topo, meio, fundo ou posições diferentes nas células hialinas apicais. presença ou ausência dos apêndices basais é outro caráter para o diagnóstico da espécie (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011).

Figura 1 - Características conidiais para identificação de espécies de *Pestalotiopsis*



(1) Cor das células medianas (a) concolor claro (b) concolor escuro (c) versicolor (2) Tamanho dos conídios (d) pequenos (e) grandes (f) relativamente longos (g) relativamente largos (3) número de apêndices apicais (h) dois apêndices apicais (i) três apêndices apicais (j) cinco apêndices apicais (4) presença ou ausência de apêndices apicais retorcido (k) ausência de apêndices apicais retorcido, (l) presença de apêndices apicais retorcido (5) comprimento dos apêndices apicais (m) relativamente curtos (n) relativamente grandes (6) apêndices apicais ramificados ou não ramificados (o) ramificados (7) posição dos apêndices apicais anexados à célula apical (p)

anexado ao topo (q) anexado ao meio (r) alguns anexados ao fundo (8) presença ou ausência de apêndices basais (s) presença (t) ausência. Barras de escala: a–b=20 µm.

Fonte: MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011.

4.1.3 Aspectos Bioquímicos

Espécies de *Pestalotiopsis* têm sido bem estudadas por causa da diversidade de novos compostos que têm mostrado produzir. Como tal, são consideradas uma rica fonte de bioprospecção quando comparadas com outros gêneros fúngicos (ALY *et al.* 2010, XU; EBADA; PROKSCH, 2010). *Pestalotiopsis* tem distribuição geográfica cosmopolita e presença em quase todos os lugares faz com que suas espécies possam ter um papel importante em florestas e ecossistemas (TEJESVI *et al.*, 2007a). Além disso, estudos mostraram que espécies de *Pestalotiopsis* produzem variados metabólitos secundários que podem ter propriedades medicinais, agrícolas e aplicações industriais. A maioria dos compostos foi descoberta a partir de cepas endofíticas de *Pestalotiopsis* (LEE *et al.* 1996, STROBEL *et al.*, 1996a, 1996b, LI; STROBEL, 2001) além de algumas cepas patogênicas (KWON *et al.*, 1996). Xu, Ebada e Proksch (2010) revisaram 130 substâncias diferentes isoladas de espécies de *Pestalotiopsis*, que demonstraram produzir alcaloides bioativos, terpenoides, derivados de isocumarinas, cumarinas, cromonas, quinonas e semiquinonas, peptídeos, xantonas e seus derivados, fenóis, ácidos fenólicos, e lactonas com uma gama de atividades antifúngicas, antimicrobianas e antitumorais (XU; EBADA; PROKSCH, 2010).

4.1.4 Aspectos Metabólicos

As espécies de *Pestalotiopsis* produzem um enorme número de metabólitos secundários que podem ter aplicações medicinais, agrícolas e industriais (MAHARACHCHIKUMBURA *et al.*, 2011).

São mais de 196 compostos diferentes isolados a partir de espécies de *Pestalotiopsis* até o momento (YANG; ZHANG; LUO, 2012). Destes, 41 estão representados na **Tabela 1**, com as espécies fúngica e vegetal (hospedeiro de onde foi isolado) a que se referem e sua atividade biológica, quando presente (BANHOS, 2016).

Quadro 1 - Substâncias produzidas por espécies de *Pestalotiopsis* isoladas

(continua)

Espécie	Hospedeiro	Substância	Atividade Biológica
<i>P. fici</i>	<i>C. sinensis</i> (<i>Theaceae</i>)	Pestaloficiol Q	anticâncer
<i>P. microspora</i>	<i>T. morobensis</i>	Isopestacina	antifúngico
<i>P. zonata</i>	<i>C. lakka</i>	Bifenil	antimicrobiano
<i>P. fici</i>	<i>C. cinensis</i> (<i>Theaceae</i>)	Pestalofona E	-
<i>P. fici</i>	-	Pestaloficiol A	anti-HIV
<i>P. breviseta</i>	<i>E. divaricata</i>	Taxol	anticâncer
<i>P. jesteri</i>	<i>F. bodenii</i>	Jesterona	antifúngico
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	<i>R. mucronata</i>	Pestalotiopirona B	-
<i>P. fici</i>	-	chloropupekeanolide A	anticâncer
<i>P. acaciae</i>	<i>T. andreanae</i>	20-hydroxy-60- hydroxymethyl-40- methylphenyl-2,6-dihydroxy3-(2- isopentenyl)benzoate	-
<i>Pestalotiopsis</i> spp.	<i>T. brevifolia</i>	Pestalotiopsina C	-
<i>Pestalotiopsis</i> spp.	<i>T. brevifolia</i>	Pestalotiopsol A	-
<i>P. virgatula</i>	<i>S. caseolaris</i>	α -pyrone	-
<i>P. virgatula</i>	<i>S. caseolaris</i>	Pestalatiopirona J	-
<i>P. fici</i>	-	Chloropestolide A	anticâncer
<i>P. virgatula</i>	-	Virgatolide A	-
<i>P. pauciseta</i>	<i>T. pentaphylla</i>	Taxol	anticâncer
<i>P. heterocornis</i>	<i>B. gymnorrhiza</i>	7-hydroxy-5-methoxy-4,6- dimethyl-7- O-a-Lrhamnosyl-phthalid	-
<i>P. heterocornis</i>	<i>B. gymnorrhiza</i>	7-hydroxy-5-methoxy-4,6- dimethyl-7- O-b-Dglucopyranosyl- phthalide	-
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	<i>R. mucronata</i>	Pestalotiopsoide A	antimicrobiano

Fonte: BANHOS, 2016

Quadro 1 - Substâncias produzidas por espécies de *Pestalotiopsis* isoladas

(conclusão)

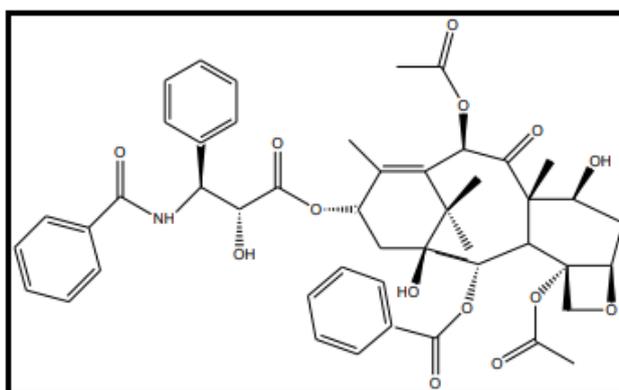
Espécie	Hospedeiro	Substância	Atividade Biológica
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	-	Pestalotiopsol A	antimicrobiano, anticâncer
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	-	4-Hidroxifeniletanol	-
<i>P. photinia</i>	<i>Roystonea regia</i>	Photipyronone B	-
<i>P. photinia</i>	<i>R. regia</i>	Photipyronone C	-
<i>P. fici</i>	<i>Camellia sinensis</i>	Pestalofone F	anticâncer
<i>P. fici</i>	<i>C. sinensis</i>	Pestalofone G	anticâncer
<i>P. fici</i>	<i>C. sinensis</i>	Pestalofone H	anticâncer
<i>P. vaccinii</i>	<i>Kandelia candel</i>	Pestalamine A	anticâncer
<i>P. virgatula</i>	<i>Terminalia chebula</i> Retz	9-Hydroxybenzo[c]oxepin3[1H]-one	-
<i>P. theae</i>	<i>Turraeanthus longipes</i>	Cytosporin F	-
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	<i>Pinus taeda</i>	Pestalotiopsina A	-
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	<i>P. taeda</i>	Taedolidol	-
<i>Pestalotiopsis</i> sp.	<i>P. taeda</i>	6-Epitaedolidol	-
<i>P. foedan</i>	-	Pestafolide A	<i>C. albicans</i>
<i>P. foedan</i>	-	Pestaphthalide A	<i>C. albicans</i>
<i>P. disseminata</i>	-	6-Hydroxypunctaporonina E	antimicrobiana
<i>P. disseminata</i>	-	6-Hydroxypunctaporonina B	antimicrobiana
<i>P. theae</i>	<i>C. sinensis</i>	Pestalazina A	-
<i>P. theae</i>	<i>C. sinensis</i>	Pestalamida B	antifúngico
<i>P. photinia</i>	<i>R. regia</i>	Photinide A	anticâncer
<i>P. photinia</i>	<i>R. regia</i>	Photinide F	anticâncer

Fonte: BANHOS, 2016

Outro aspecto relevante é a descoberta de espécies isoladas em ambientes extremos que, ainda assim, possuem a capacidade de produzir metabólitos bioativos de grande interesse para as indústrias farmacêuticas e agrícolas (TEJESVI *et al.*, 2007b). Dentre eles se destacam:

- A espécie *P. microspora* isolada de *Taxus* sp. do sopé do Himalaia produziu taxol, um importante antineoplásico, apresentado na **Figura 2** (STROBEL *et al.*, 1996a);
- A espécie *P. microspora* isolada do sistema de drenagem do rio Sepik, em Papua Nova Guiné produziu isopestacina, um antifúngico de uso agrícola (STROBEL *et al.*, 2002);
- Outros compostos bioativos: jesterona, ácido ambuico, ácido torreiânico, pestalosídeo, pestalotiopsinas e 2- α -hidroxidimeniol (STROBEL *et al.*, 2002);
- A metabolização de vários monossacarídeos e consequente síntese de heteropolissacarídeos, dependendo do tipo de monossacarídeo presente no meio (KAI *et al.*, 2003).

Figura 2 - Estrutura química do Taxol.



Fonte: BANHOS, 2016.

Até então, o maior destaque do fungo *Pestalotiopsis microspora* no meio científico em relação à produção de metabólitos secundários se dá pela produção do taxol, um importante quimioterápico utilizado no tratamento de câncer de mama e de ovário (METZ *et al.*, 2000).

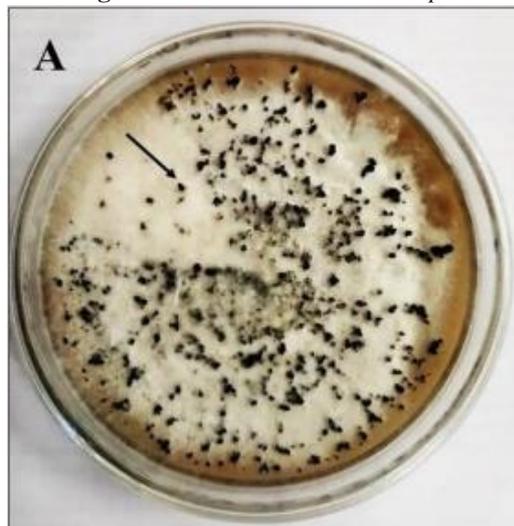
Entretanto, Russell *et al.* (2011) avaliaram a efetividade de dois isolados amazônicos de *Pestalotiopsis microspora* (E2712A e E3317B) na metabolização de poliéster poliuretano (PUR) quando cultivados anaerobiamente, com o mesmo nível de atividade sob condições aeróbias. Esta observação levanta a possibilidade da utilização do fungo em sistemas de fermentação anaeróbica para degradar PUR. Devido a essa capacidade, *P. microspora* já vem sendo chamado de “fungo comedor de plástico” (PIANCÓ *et al.*, 2022).

4.1.5 Condições de Cultivo *in vitro*

As condições para cultivo *in vitro* do fungo *Pestalotiopsis microspora* variam de acordo com a substância bioativa que se deseja extrair. Entretanto, de uma maneira geral, o cultivo *in vitro* dessa espécie pode ser realizado das seguintes formas:

- Placas de Petri contendo meio batata dextrose ágar (BDA) inoculadas com o fungo e incubadas em BOD (Demanda Bioquímica de Oxigênio) a 25 °C sob abrigo da luz. Em tais condições, é possível avaliar o crescimento micelial que ocorre a partir do 4º dia de incubação, e é feito pela média de duas medidas diametralmente opostas, além de eliminar placas contaminadas (SILVA, 2016). A **Figura 3** apresenta o crescimento das colônias.
- Placas de Petri contendo meio ágar preparado a partir de 1,5% de agarose e água bidestilada, e agulhas secas de teixo, inoculadas com o fungo, em temperatura entre 16 °C e 20 °C com pelo menos 12 horas de luz por dia (METZ *et al.*, 2000). A **Figura 4** detalha as estruturas da espécie após o período de incubação.

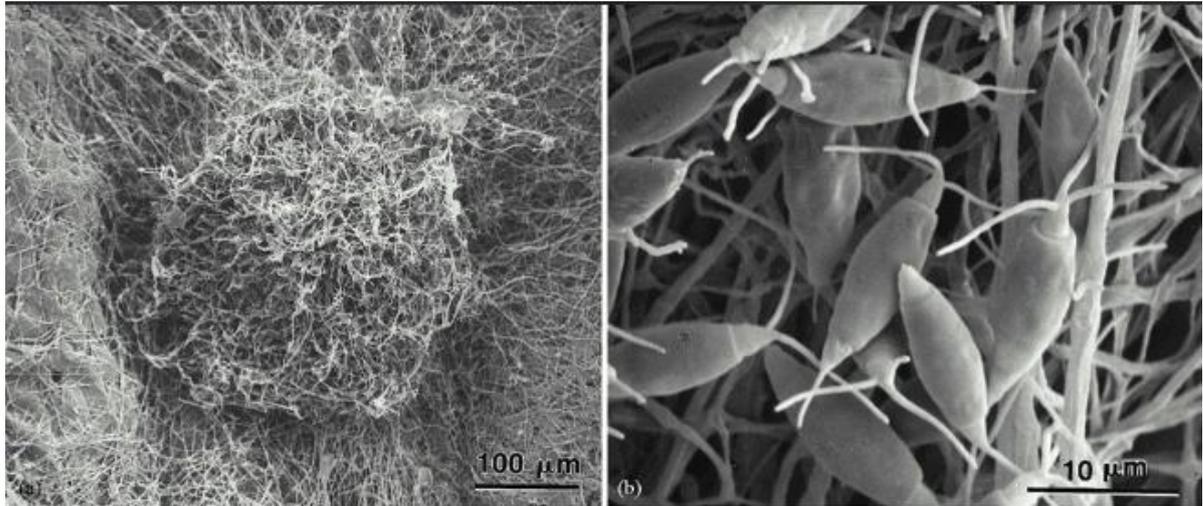
Figura 3 - Colônias de *P. microspora*.



A seta indica as aglutinações escuras correspondentes ao desenvolvimento de acérvulo do fungo.

Fonte: SILVA, 2016.

Figura 4 - Estruturas morfológicas de *P. microspora*



Estruturas primárias do corpo de frutificação da espécie. (a) acérvulo de *P. microspora* (b) conidiósporos portadores de apêndices de *P. microspora*.

Fonte: METZ *et al.*, 2000

4.1.6 Ações de Degradação

Russell *et al.* (2011) avaliaram a biotransformação de poliuretano devido à ação da enzima extracelular serina hidrolase, produzida pelo *Pestalotiopsis microspora*, que tem a capacidade de hidrolisar as ligações éster na ligação uretano tanto em condições aeróbicas como anaeróbicas. A hidrólise da ligação éster na ligação uretano resulta na quebra da estrutura do poliuretano, o que possibilita a conversão dos resíduos em compostos menores e mais simples, como dióis e ácidos carboxílicos. Esses compostos podem ser utilizados como fonte de energia para o fungo ou liberados no meio ambiente de forma menos prejudicial do que o poliuretano original (RUSSELL *et al.*, 2011).

Além disso, Arfi *et al.* (2013) indicaram que *Pestalotiopsis* sp. é capaz de produzir enzimas celulolíticas, hemicelulolíticas, ligninolíticas e pectinolíticas que podem ser usadas na bioconversão de polímeros plásticos em moléculas menos nocivas ao meio ambiente (MANRIQUE, 2021).

5 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E APLICABILIDADE DO POLÍMERO SINTÉTICO POLIÉSTER POLIURETANO (PUR)

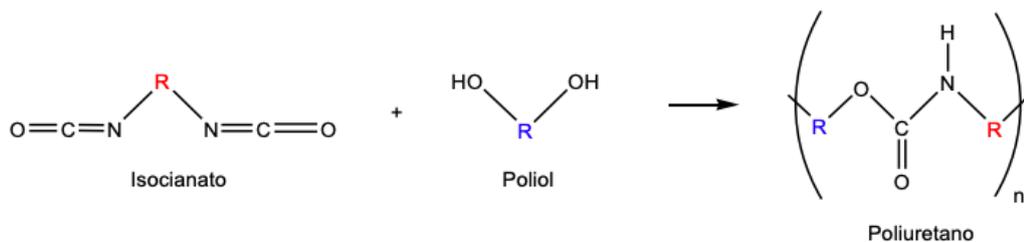
O plástico é a terceira aplicação de petróleo mais utilizada no mundo (CASAS-MARTÍNEZ *et al.*, 2022). Devido ao seu peso leve e a sua durabilidade, esses materiais se tornam adequados para uma ampla gama de produtos, como exemplo: revestimento de superfícies em diversos tipos de indústrias, como a automotiva, aeronáutica e naval, proporcionando alta resistência à abrasão, impacto e produtos químicos, além de ter excelentes propriedades de adesão a diferentes substratos; também é utilizado na fabricação de espumas para isolamento térmico e acústico em edifícios, móveis, colchões e outros produtos; na formulação de adesivos, que têm diversas aplicações, como colagem de materiais em geral, montagem de peças automotivas, adesivos estruturais para construção civil, dentre outros; na produção de fibras utilizadas na confecção de roupas esportivas, tecidos técnicos, tapetes e carpetes; na produção de elastômeros utilizados em peças automotivas, buchas e juntas; e na produção de resinas utilizadas na fabricação de peças automotivas, peças de barcos, protótipos, dentre outros (CÓZAR *et al.*, 2014), se estabelecendo em todo o mundo como uma necessidade básica essencial para a vida cotidiana (EKANAYAKA *et al.*, 2022).

O poliéster poliuretano (PUR) é uma classe multifuncional de materiais poliméricos sintéticos, amplamente utilizado na indústria e manufatura, classificado como o 6º tipo de plástico mais comum usado em todo o mundo (LIU *et al.*, 2021). Em 2018 foram produzidas 359 milhões de toneladas de plásticos em escala global, sendo o PUR responsável por 7,9% desse mercado (PLASTICSEUROPE; EPRO, 2019). A garantia de maior durabilidade a longo prazo e de alta resistência a fatores ambientais são parâmetros importantes durante a produção da maioria dos materiais de PUR. Apesar de ser um material de difícil degradação, tais características fazem com que esse tipo de polímero seja buscado cada vez mais ao longo dos anos por diversos setores industriais, o que gera, conseqüentemente, uma grande quantidade de resíduo que requer um descarte correto (LIU *et al.*, 2021).

6 BIODEGRADAÇÃO DO POLÍMERO POLIÉSTER POLIURETANO (PUR)

Ao contrário de outros plásticos produzidos em massa, como polietileno (PE), polipropileno (PP) e Polietileno tereftalato (PET), PUR é uma família de polímeros sintéticos que diferem consideravelmente em suas propriedades físicas devido a diferentes monômeros (por exemplo, poliéster ou poliéter-poliol) usados em suas sínteses (LIU *et al.*, 2021). O polímero PUR é gerado pela condensação de um poliisocianato e um polioliol, resultando em um polímero composto por uma série de ligações de uretano. A **Figura 5** apresenta a reação de formação do monômero uretano, que resulta no polímero. As variações no espaçamento entre as ligações de uretano bem como a natureza das substituições podem alterar as propriedades do polímero resultante de linear e rígido para ramificado e flexível. Em uma suspensão líquida o PUR apresenta coloração branca leitosa e completamente opaca (RUSSELL *et al.*, 2011). Apesar de suas propriedades xenobióticas, o polímero tem se mostrado suscetível à biodegradação por diferentes microrganismos, embora em taxas muito baixas em condições ambientais e laboratoriais. A descoberta e caracterização de micróbios altamente eficientes na metabolização de PUR e enzimas capazes de decompor as cadeias deste polímero em compostos oligo e monoméricos é de fundamental importância para uma economia plástica circular (LIU *et al.*, 2021).

Figura 5 - Reação de formação do monômero uretano



Fonte: CARRIÇO, 2017.

A biodegradação é um processo metabólico e enzimático realizado por microrganismos como bactérias e alguns fungos, que secretam enzimas capazes de romper a estrutura molecular do plástico e reduzir seu peso. Por sua eficiência, a biorremediação é um processo aceito pela comunidade científica, já que os microrganismos atacam, de forma aeróbia ou anaeróbia, a superfície do plástico, que se degrada e é utilizada como fonte de carbono para o crescimento microbiano (CASAS-MARTÍNEZ *et al.*, 2022).

O PUR é degradado pelos seguintes microrganismos: *Gliocladium roseum*, *Aspergillus* spp., *Emericella* spp., *Fusarium* spp., *Penicillium* spp., *Trichoderma* spp., *Gliocladium pannorum*, *Nectria gliocladioides*, *Penicillium ochrochloron*, *Aureobasidium pullulans*, *Rhodotorula aurantiaca* e *Kluyvermyces* spp. Outros fungos como *Plectosphaerella*, *Nectria*, *Neonectria*, *Phoma* e *Alternaria* também mostraram sua capacidade de biodegradação desse tipo de plástico (SRIKANTH *et al.*, 2022). *Aspergillus niger* é capaz de deteriorar o material, mas com crescimento lento, sendo visível somente após 30 dias. Em estudos com *Pestalotiopsis microspora* a degradação de poliuretano, utilizado como fonte de carbono, em associação com a enzima serina hidrolase ocorre em poucos dias (RUSSELL *et al.*, 2011).

No estudo realizado por Russell *et al.* (2011) foram identificados dois isolados de *Pestalotiopsis microspora* (E2712A e E3317B) capazes de degradar PUR quando cultivados anaerobicamente com Impranil DLN, uma dispersão contendo poliéster-poliuretano alifático aniônico, servindo como única fonte de carbono. Para esses dois organismos o nível de atividade foi o mesmo em condições aeróbicas e anaeróbicas, ao contrário de *Aspergillus niger* que foi utilizado como controle e teve sua atividade consideravelmente diminuída em um ambiente anaeróbico.

A enzima produzida por *Pestalotiopsis microspora* que é responsável pela degradação do PUR parece ser um membro da família da serina hidrolase. Além disso, a atividade enzimática estendeu-se por todo o meio a uma distância considerável das áreas de crescimento fúngico, o que sugere que ela também seja extracelular, secretada e difusível (RUSSELL *et al.*, 2011).

8 UTILIZAÇÃO DO FUNGO *Pestalotiopsis microspora* EM ATERROS SANITÁRIOS

Após diversos autores analisarem o fungo *Pestalotiopsis microspora*, descoberto em 2008 no Parque Nacional Yasuní (Equador), foi possível identificar a enzima responsável pela degradação do poliuretano em suspensões sólidas e líquidas. Conforme estudos de Russell *et al.* (2011), endófitos isolados de amostras de plantas da Amazônia equatoriana foram avaliados quanto a sua capacidade de degradar poliéster poliuretano (PUR). Quase metade dos organismos mostrou alguma atividade no ensaio inicial de halos de inibição. Dezoito endófitos ativos e dois inativos foram caracterizados, e oito dos organismos mais ativos pertenciam ao gênero *Pestalotiopsis*. Além disso, a biodegradação do polímero poliéster poliuretano realizada pelo *Pestalotiopsis microspora* em comparação com a biodegradação deste mesmo polímero realizada por outros microrganismos, se mostrou muito mais rápida, inclusive em ambiente anaeróbico (SRIKANTH *et al.*, 2022; RUSSELL *et al.*, 2011). Estas características são um indício muito forte de que seu uso pode ser eficaz e eficiente na biodegradação dos resíduos plásticos de PUR em aterros especializados para tal função. Entretanto, para que se possa afirmar a eficácia e segurança da utilização deste fungo em aterros sanitários, é necessário a realização de estudos mais profundos.

9 CONCLUSÃO

A produção e o consumo excessivo de plásticos em todo o mundo vem gerando grande acúmulo desses materiais nos ambientes terrestre e aquático, levando a graves consequências para a saúde, economia e, principalmente, para a biodiversidade e o clima do planeta. Tanto no Brasil quanto no mundo, o percentual de lixo plástico que é efetivamente reciclado é muito inferior à quantidade produzida e consumida anualmente destes materiais, o restante é descartado em aterros sanitários ou de forma irregular em lixões a céu aberto.

Estudos relatando a descoberta de microplásticos em organismos animais e humanos, inclusive em placenta humana, demonstram o quanto esses materiais estão presentes nos nossos ecossistemas, aumentando a preocupação de autoridades e organizações de todo o mundo para que se encontre uma solução eficaz para o problema de acúmulo de materiais plásticos no meio ambiente.

Diante deste cenário, muitos estudos foram realizados com a finalidade de encontrar meios viáveis para reverter a atual situação do planeta em relação aos resíduos plásticos que já estão contaminando solos, rios e mares. Já é sabido que existem fungos e bactérias que degradam polímeros plásticos, assim, a biorremediação pode ser uma possível solução para este problema. Além disso, a partir da descoberta do fungo *Pestalotiopsis microspora*, que biodegrada o polímero poliéster poliuretano (PUR) tanto em ambientes aeróbicos quanto anaeróbicos, é possível pensar na sua utilização em aterros sanitários como solução mais sustentável para a gestão de resíduos plásticos. Entretanto, é necessário a realização de estudos com a finalidade de desenvolver metodologias para o uso deste fungo em aterros sanitários de forma segura e eficaz. Até que se obtenham estudos focando nessa aplicabilidade especificamente, não é possível afirmar que a biorremediação com o fungo *Pestalotiopsis microspora* nesses ambientes é seguramente eficaz para a biodegradação do polímero PUR.

REFERÊNCIAS

1. ALY, A. H. *et al.* Fungal endophytes from higher plants: a prolific source of phytochemicals and other bioactive natural products. *Fungal Diversity*, [s. l.], v. 41, p. 1-16, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13225-010-0034-4>. Acesso em: 16 dez. 2022.
2. AMELIA, T. S. M. *et al.* Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans. **Progress in Earth and Planetary Science**, [s. l.], v. 8, Jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00405-4>. Acesso em: 27 dez. 2022.
3. ARFI, Y. *et al.* Characterization of salt-adapted secreted lignocellulolytic enzymes from the mangrove fungus *Pestalotiopsis* sp. **Nature Communications**, [s. l.], v. 4, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms2850>. Acesso em: 17 dez. 2022.
4. AZEVEDO, J. L. Endophytic fungi from Brazilian tropical hosts and their biotechnological applications. In: Kharwar, R. N. *et al.* **Microbial diversity and biotechnology in food security**. Nova Delhi: Springer, 2014. p. 17-22. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-81-322-1801-2_2. Acesso em: 16 dez. 2022.
5. BANHOS, E. F. dos. **Análises moleculares de linhagens selvagens e mutantes de *Pestalotiopsis* spp. associadas a plantas e basidiomicetos da Amazônia Brasileira**. 2016. Tese (Doutorado em Biodiversidade e Biotecnologia) - Programa de Pós-graduação BIONORTE, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6065>. Acesso em: 15 dez. 2022.
6. BONHOMME, S. *et al.* Environmental biodegradation of polyethylene. **Polymer Degradation and Stability**, [s. l.], v. 81, n. 3, p. 441–452, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(03)00129-0). Acesso em: 05 jan. 2023.
7. BRITO, J. H. **Produção e caracterização estrutural, morfológica e térmica de filmes biodegradáveis utilizando amido de caroço de abacate (*Persea americana* Mill) e bagaço de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/2788>. Acesso em: 12 jan. 2023.
8. BRYANT, J. A. *et al.* Diversity and activity of communities inhabiting plastic debris in the North Pacific Gyre. **mSystems**, [s. l.], v. 1, n. 3, Mai./Jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/mSystems.00024-16>. Acesso em: 15 jan. 2023.
9. CARRIÇO, C. S. **Obtenção de espumas de poliuretano a partir de coprodutos da cadeia dos biocombustíveis e resíduos agroindustriais**. 2017. Tese (Doutorado em Química - Físico-Química) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de

- Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/SFSA-ARZULR>. Acesso em: 16 dez. 2022.
10. CASAS-MARTÍNEZ, Y. P. *et al.* Avances en biotecnología ambiental: biorremediación de plásticos. **I3+**, Boyacá, v. 4, n. 2, p. 89-114, Jan./Jun. 2022. Disponível em: <https://revistasdigitales.uniboyaca.edu.co/index.php/reiv3/article/view/939/742>. Acesso em: 27 dez. 2022.
 11. CÓZAR, A. *et al.* Plastic debris in the open ocean. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 111, n. 28, p. 10239-10244, Jul. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1314705111>. Acesso em: 27 dez. 2022.
 12. EGGER, K. N. Molecular analysis of ectomycorrhizal fungal communities. **Canadian Journal of Botany**, Canadá, v. 73, n. S1, p. 1415–1422, Dez. 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/b95-405>. Acesso em: 17 dez. 2022.
 13. EKANAYAKA, A. H. *et al.* A review of the fungi that degrade plastic. **Journal of Fungi**, Basel, v. 8, n. 8, p. 772, Ago. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jof8080772>. Acesso em: 17 dez. 2022.
 14. FELBER, A. C. *et al.* Bioprospecting foliar endophytic fungi of *Vitis labrusca* Linnaeus, Bordô and Concord cv. **Annals of Microbiology**, [s. l.], v. 66, p. 765–775, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13213-015-1162-6>. Acesso em: 05 jan. 2023.
 15. GARCIA, F. S. **Enzimas oxidorreductases produzidas por fungos filamentosos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) - Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.87.2019.tde-21052019-145855>. Acesso em: 12 jan. 2023.
 16. GESAMP. Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. **GESAMP Rep. Stud.**, Londres: International Maritime Organization, v. 93, 2016.
 17. GRIFFITHS, D. A.; SWART, H. J. Conidial structure in *Pestalotia pezizoides*. **Transactions of the British Mycological Society**, Grã-Bretanha, v. 63, n. 1, p. 169-173, Ago. 1974a. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(74\)80149-X](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(74)80149-X). Acesso em: 12 jan. 2023.
 18. GRIFFITHS, D. A.; SWART, H. J. Conidial structure in two species of *Pestalotiopsis*. **Transactions of the British Mycological Society**, Grã-Bretanha, v. 62, n. 2, p. 295-304, 1974b. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(74\)80038-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(74)80038-0). Acesso em: 27 dez. 2022.
 19. GUBA, E. F. **Monograph of *Pestalotia* and *Monochaetia***. Cambridge: Harvard University Press, 1961.

20. HARPER, J. K. *et al.* Stereochemical analysis by solid-state NMR: structural predictions in ambuic acid. **The Journal of Organic Chemistry**, [s. l.], v. 68, n. 12, p. 4609-4614. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jo020377i>. Acesso em: 27 dez. 2022.
21. HEATHER, A. L. *et al.* Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. **Environment International**, [s. l.], v. 163, Mai. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107199>. Acesso em: 05 jan. 2023.
22. HU, H. *et al.* Phylogenetic diversity of endophytic *Pestalotiopsis* species in *Pinus armandii* and *Ribes* spp.: evidence from rDNA and β -tubulin gene phylogenies. **Fungal Diversity**, [s. l.], v. 24, p. 1-22, Jan. 2007. Disponível em: <https://www.fungaldiversity.org/fdp/sfdp/24-1.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2023.
23. JEEWON, R. *et al.* Phylogenetic significance of morphological characters in the taxonomy of *Pestalotiopsis* species. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 372–383, Jun. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1055-7903\(03\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S1055-7903(03)00010-1). Acesso em: 17 dez. 2022.
24. KAI, A. *et al.* Biosynthesis of hetero-polyssacharides by *Pestalotiopsis microspora* from various monosaccharides as carbon source. **Carbohydrate Polymers**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 381–383, Nov. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(03\)00166-8](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(03)00166-8). Acesso em: 16 dez. 2022.
25. KWON, G. S. *et al.* A novel flocculant biopolymer produced by *Pestalotiopsis* sp. KCTC 8637P. **Biotechnology Letters**, [s. l.], v. 18, n. 12, p. 1459-1464, Dez. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00129355>. Acesso em: 27 dez. 2022.
26. LI, J. Y.; STROBEL, G. A. Jesterone and hydroxy-jesterone antioomycete cyclohexenone epoxides from the endophytic fungus *Pestalotiopsis jesteri*. **Phytochemistry**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 261-265, Mai. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(01\)00021-8](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00021-8). Acesso em: 05 jan. 2023.
27. LIU, J. *et al.* Biodegradation and up-cycling of polyurethanes: Progress, challenges, and prospects. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 48, Mai./Jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107730>. Acesso em: 17 dez. 2022.
28. LEE, J. C. *et al.* Torreyanic acid: a selectively cytotoxic quinone dimer from the endophytic fungus *Pestalotiopsis microspora*. **The Journal of Organic Chemistry**, [s. l.], v. 61, n. 10, p. 3232-3233, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jo960471x>. Acesso em: 13 jan. 2023.
29. MACARTHUR, E.; HOLMES, H. The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics. **Ellen MacArthur Foundation**, 2017. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>. Acesso em: 28 dez. 2022.

30. MAHARACHCHIKUMBURA, S. S. N. *et al.* *Pestalotiopsis* - morphology, phylogeny, biochemistry and diversity. **Fungal Diversity**, [s. l.], v. 50, p. 167-187, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13225-011-0125-x>. Acesso em: 13 jan. 2023.
31. MANRIQUE, S. E. C. **Evaluación de hongos filamentosos con capacidad de colonización de tapabocas quirúrgicos**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Microbiologia Industrial) - Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2021. Disponível em: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/58205/Castro-Manrique%202021%20-%20Trabajo%20de%20grado%20%28final%29.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Acesso em: 16 dez. 2022.
32. METZ, A. M. *et al.* Induction of the sexual stage of *Pestalotiopsis microspora*, a taxol-producing fungus. **Microbiology**, Grã-Bretanha, v. 146, n. 8, p. 2079-2089, Ago. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1099/00221287-146-8-2079>. Acesso em: 27 dez. 2022.
33. MORAES, A. M. L. de.; PAES, R. de A.; HOLANDA, V. L. de. Micologia. In: MOLINARO, E. M.; CAPUTO, L. F. G.; AMENDOEIRA, M. R. R. (Org.). **Conceitos e métodos para formação de profissionais em laboratórios de saúde**. V. 4. Rio de Janeiro: EPSJV, IOC, 2009. p. 399-496. Disponível em: <https://www.epsjv.fiocruz.br/publicacao/livro/conceitos-e-metodos-para-formacao-de-profissionais-em-laboratorios-de-saude-volum-0>. Acesso em: 15 jan. 2023.
34. NETALA, V. R. *et al.* Biogenesis of silver nanoparticles using endophytic fungus *Pestalotiopsis microspora* and evaluation of their antioxidant and anticancer activities. **International Journal of Nanomedicine**, [s. l.], v. 11, p. 5683-5696, Out. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2147/IJN.S112857>. Acesso em: 11 jan. 2023.
35. PIANCÓ, E. S. *et al.* Fungos endofíticos na ilha de Upaon-açú, Maranhão, Brasil, e sua importância na conservação da flora. In: ROMERO, F. M. B.; CASTRO, R. B.; TELLO, J. C. R. (Org.). **Estudos dendrológicos e ecológicos na Amazônia: oportunidades e experiências**. 1. ed. Guarujá: Científica Digital, 2022. p. 119-134. Disponível em: 10.37885/978-65-5360-075-1. Acesso em: 21 dez. 2022.
36. PLASTICSEUROPE; EPRO. **Plastics – the facts 2019: an analysis of european plastics production, demand and waste data**. Bélgica: PlasticsEurope, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2019-Plastics-the-facts.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2023.
37. PORRAS-ALFARO, A.; BAYMAN, P. Hidden fungi, emergent properties: endophytes and microbiomes. **Annual Review of Phytopathology**, [s. l.], v. 49, p. 291-315, 2011. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19400639/>. Acesso em: 21 dez. 2022.

38. RAGUSA, A. *et al.* Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. **Environment International**, [s. l.], v. 146, Jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>. Acesso em: 05 jan. 2023.
39. RUSSELL, J. R. *et al.* Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. **Applied and Environmental Microbiology**, [s. l.], v. 77, n. 17, p. 6076-6084, Set. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/AEM.00521-11>. Acesso em: 09 dez. 2022.
40. SCHWABL, P. *et al.* Detection of various microplastics in human stool - A prospective case series. **Annals of Internal Medicine**, [s. l.], v. 171, n. 7, p. 453-457, Out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.7326/M19-0618>. Acesso em: 27 dez. 2022.
41. SEN, S. K.; RAUT, S. Microbial degradation of low density polyethyl-ene (LDPE): a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 462–473, Mar. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.01.003>. Acesso em: 08 jan. 2023.
42. SILVA, L. R. da. **Potencial patogênico e recuperação da esporulação de isolados de *Pestalotiopsis microspora* do eucalipto após longo período de armazenamento.** 2016. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual de Goiás, Ipameri, 2016. Disponível em: <http://www.bdtd.ueg.br/handle/tede/448>. Acesso em: 16 dez. 2022.
43. SRIKANTH, M. *et al.* Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. **Bioresources and Bioprocessing**, [s. l.], v. 9, Abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>. Acesso em: 12 jan. 2023.
44. STEYAERT, R. L. Contributions à l'étude monographique de *Pestalotia* de Not. et *Monochaetia* Sacc. (*Truncatella* gen. nov. et *Pestalotiopsis* gen. nov.). **Bulletin du Jardin botanique de l'État a Bruxelles**, Bruxelles, v. 19, n. 3, p. 285-354, Jun. 1949. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3666710>. Acesso em: 08 jan. 2023.
45. STEYAERT, R. L. New and old species of *Pestalotiopsis*. **Transactions of the British Mycological Society**, Bruxelles, v. 36, n. 2, p. 81-89, Jun. 1953a. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(53\)80052-5](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(53)80052-5). Acesso em: 10 dez. 2022.
46. STEYAERT, R. L. *Pestalotia*, *Pestalotiopsis* et *Truncatella*. **Bulletin du Jardin botanique de l'État a Bruxelles**, Bruxelles, v. 25, n. 2, p. 191–199, Jun. 1955. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3667065>. Acesso em: 08 jan. 2023.
47. STEYAERT, R. L. *Pestalotiopsis* from the Golden Coast and Togoland. **Transactions of the British Mycological Society**, Bruxelles, v. 36, n. 3., p. 235–242, Set. 1953b. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(53\)80008-2](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(53)80008-2). Acesso em: 27 dez. 2022.

48. STEYAERT, R. L.; SINGER, R. Notes and brief articles: a reply and an appeal to Professor Guba. **Mycologia**, [s. l.], v. 48, n. 5, p. 767–770, 1956. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00275514.1956.12024591>. Acesso em: 08 jan. 2023.
49. STEYAERT, R. L. Type specimens of Spegazzini's collections in the *Pestalotiopsis* and related genera. **Darwiniana**, San Isidro, t. 12, n. 2, p. 157-189, Jul. 1961. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/23213061>. Acesso em: 12 dez. 2022.
50. STROBEL, G. A. *et al.* Taxol from fungal endophytes and the issue of biodiversity. **Journal of Industrial Microbiology**, [s. l.], v. 17, p. 417-423, Nov. 1996a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01574772>. Acesso em: 15 jan. 2023.
51. STROBEL, G. A. *et al.* Taxol from *Pestalotiopsis microspora*, an endophytic fungus of *Taxus wallachiana*. **Microbiology**, Grã-Bretanha, v. 142, n. 2, p. 435-440, Fev. 1996b. Disponível em: <https://doi.org/10.1099/13500872-142-2-435>. Acesso em: 08 jan. 2023.
52. STROBEL, G. *et al.* Isopestacin, an isobenzofuranone from *Pestalotiopsis microspora*, possessing antifungal and antioxidant activities. **Phytochemistry**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 179-183, Mai. 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(02\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(02)00062-6). Acesso em: 28 dez. 2022.
53. SUTTON, B. C. **The Coelomycetes: Fungi imperfecti with Pycnidia, Acervuli and Stromata.** Kew: Commonwealth Mycological Institute, 1980. 696 p.
54. TEJESVI, M. V. *et al.* Genetic diversity and antifungal activity of species of *Pestalotiopsis* isolated as endophytes from medicinal plants. **Fungal Diversity**, [s. l.], v. 24, p. 37-54, 2007a. Disponível em: <https://www.fungaldiversity.org/fdp/sfdp/24-3.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2022.
55. TEJESVI, M. V. *et al.* New hopes from endophytic fungal secondary metabolites. **Boletín de la Sociedad Química de México**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 19-26, 2007b. Disponível em: <http://bsqm.org.mx/pdf-boletines/V1/N1/02-New%20hopes.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2023.
56. TEJESVI M. V. *et al.* Phylogenetic analysis of endophytic *Pestalotiopsis* species from ethnopharmacologically important medicinal trees. **Fungal Diversity**, [s. l.], v. 38, p. 167–183, 2009. Disponível em: <https://www.fungaldiversity.org/fdp/sfdp/FD38-11.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2022.
57. TELES, J. J. da S. **Sustentabilidade e Economia Circular: O desafio do plástico. Relatório de Estágio apresentado à Faculdade de Direito da Universidade de Coimbra no âmbito do 2º Ciclo de Estudos em Administração Público-Privada.** 2020. Relatório de Estágio (Mestrado em Administração Público-Privada) - Faculdade de Direito, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/92729>. Acesso em: 16 dez. 2022.

58. UNEP. United Nations Environment Programme. **From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution**. Nairobi: UNEP, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/36963/POLSOL.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2023.
59. WWF. World Wide Fund for Nature. **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico**. Gland, Suíça: WWF, 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundo-que-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 11 dez. 2022.
60. XU, J.; EBADA, S. S.; PROKSCH, P. *Pestalotiopsis* a highly creative genus: chemistry and bioactivity of secondary metabolites. **Fungal Diversity**, [s. l.], v. 44, p. 15-31, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13225-010-0055-z>. Acesso em: 12 dez. 2022.
61. YANG, X-L.; ZHANG, J-Z; LUO, D-Q. The taxonomy, biology and chemistry of the fungal *Pestalotiopsis* genus. **Natural Product Reports**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 622-641, Jun. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/C2NP00073C>. Acesso em: 08 dez. 2022.
62. YANG, Y. *et al.* Microplastics provide new microbial niches in aquatic environments. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [s. l.], v. 104, n. 15, p. 6501-6511, Jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10704-x>. Acesso em: 08 dez. 2022.
63. YUAN, J. *et al.* Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. **Science of The Total Environment**, v. 715, Mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136968>. Acesso em: 11 dez. 2022.