

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: UTILIZAÇÃO DE FUNGOS BASIDIOMICETOS NA
DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNINOCELULÓSICOS COMO PRÁTICA
SUSTENTÁVEL PARA O MEIO AMBIENTE**

Romário da Silva Santana¹;
Cristiane Suely Melo de Carvalho²;
Renato Abreu Lima³.

RESUMO

O que se levanta no presente estudo, é uma preocupação, vendo que com o aumento da população mundial, gera por consequência, uma crescente demanda por alimentos e bens de consumo, para suprir esse contingente populacional, havendo produção em uma quantidade enorme de resíduos agroindustriais e ligninocelulósicos que se torna um problema de âmbito ambiental. O Brasil chega a produzir milhões de toneladas (1,3 bilhão) desses resíduos, por ano, durante o processo de beneficiamento ou processamento de alimentos, incluindo até o descarte incorreto. Mas sabemos que existem alternativas sustentáveis para o controle dos resíduos ligninocelulósicos, com utilização de organismos que atuam na degradação, usado em estudos de biorremediação. Diante disso, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica da utilização de fungos na degradação de poluentes, pois, acredita-se que estes organismos são mais eficientes na decomposição de alguns poluentes no meio ambiente atual. Sabendo dessa ação que os fungos exercem no ambiente é que se torna bastante útil aplicá-los como fonte sustentável na degradação de quaisquer resíduos, principalmente ligninocelulósicos. Nesta revisão, discutimos diversos métodos que usam microrganismos para fins de minimizar os impactos. No entanto, os fungos mais utilizados são *Pleurotus ostreatus*, *Lentinus crinitus*, *Lentinus edodes*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Ganoderma lucidum*, *Picnoporus sanguineus*, *trametes versicolor* e *Phellinus gilvus*. Conclui-se que, a aplicação destes fungos na biorremediação, principalmente, resultou na descoberta da ação de enzimas produzidas para degradar a composição química das plantas os quais são a celulose, hemicelulose e lignina, principais constituintes dos materiais ligninocelulósicos, como Álcool veratrílico, Compostos aromáticos clorados e Celobiose-desidrogenase. Onde estas se mostraram eficientes em processos de biodegradação de resíduos ligninolíticas tanto da podridão branca quanto parda.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Fungos. Biodegradação.

1. Introdução

Os problemas de poluição e degradação ambiental agravaram-se com o desenvolvimento dos centros urbanos e, sobretudo, a partir da Revolução Industrial, por conta do aumento da geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e compostos voláteis (DIAS, 2000).

A Organização das Nações Unidas (ONU) levantou estimativas que em 2017, a população mundial chegou a 7,6 bilhões de pessoas. Com base nesse número de habitantes, conforme o relatório da Food and Agriculture Organization (FAO), o mundo

¹ Discente do curso de Ciências Biológicas, no Centro de Estudos Superiores de Tabatinga, pela Universidade do Estado do Amazonas-CESTB/UEA.

² Professora Dra. do curso de Ciências Biológicas, no Centro de Estudos Superiores de Tabatinga, pela Universidade do Estado do Amazonas-CESTB/UEA.

³ Professor Dr. do curso de Ciências: Biologia e Química, pelo Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente na Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

perde ou desperdiça, anualmente, cerca de 1,3 bilhão de toneladas de alimentos ou 1,6 bilhão de toneladas de “produto primário equivalente”, se incluídas a partes não comestíveis (FAO; ONU, 2017).

Tal aumento faz com que o planeta esteja se tornando um imenso depósito de resíduos gerados pela humanidade e têm causado crescente poluição e impactos ambientais devido ao tratamento incorreto e disposição final, e pouco se faz para a solução dos problemas causados pela má condução do gerenciamento desses resíduos. Diante disso, Martins e Azevedo (2012) afirmam que a poluição se tornou uma preocupação global devido à contaminação do ambiente com compostos indesejáveis e ao efeito negativo que esses poluentes causam não somente no ambiente, mas também na saúde humana.

E com isso, atualmente, inúmeras pesquisas relacionadas à remediação e biorremediação estão sendo realizadas justamente com a finalidade de testar microrganismos, em especial fungos, para degradar quaisquer compostos de difícil decomposição pelo ambiente.

Os fungos estão diretamente ligados à recuperação ambiental, tanto na reciclagem de resíduos agrícolas e agroindustriais, como na biodegradação de materiais lignocelulósicos (constituídos por celulose, poliose e lignina), especialmente a madeira (FERRAZ, 2004).

No entanto, o presente estudo realiza uma revisão bibliográfica da utilização de fungos na degradação de poluentes, pois, acredita-se que estes organismos são mais eficientes na decomposição de alguns poluentes no meio ambiente atual. Sabendo dessa ação que os fungos exercem no ambiente é que se torna bastante útil aplica-los como fonte sustentável na degradação de quaisquer resíduos, principalmente lignocelulósicos.

2. Importância sustentável

Consolida-se o conceito de desenvolvimento sustentável: “o atendimento das necessidades do presente sem comprometer a possibilidade para as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (PINTO et al., 2011). Fernandez (2005) aborda, que para se alcançar a sustentabilidade, é necessário e importante conservar o meio ambiente, controlando o crescimento populacional, diminuindo o consumismo, os valores culturais e transformando os pensamentos econômicos de que, se ganhando lucro individual, se obtém prejuízo coletivo.

A sustentabilidade dos sistemas ecológicos tem como suporte três pilares: a biodiversidade, a ciclagem de nutrientes e o fluxo de energia. A remoção da floresta ou qualquer outra vegetação natural inicia o processo de perda de matéria orgânica do solo (BOFF et al., 2013).

Barbiere et al. (2010), abordam que a evolução do tema sustentabilidade, em relação à sua necessidade para a sociedade, passa a ser importante para as indústrias, nas quais se têm ostentado, de maneira integrada, os três pilares de estratégia, que contemplam as dimensões econômica, social e ambiental, tendo como desafio para as organizações mensurar a gestão adequada a cada um desses pilares, devendo apresentar proximidade às expectativas organizacionais e considerar ainda importantes aspectos mercadológicos e socioambientais.

O Brasil apresenta 8,5 milhões de km² de extensão que ocupam quase a metade da América do Sul, concentrando de 11% a 14% da diversidade de plantas no mundo tem mais de 41 mil espécies catalogadas além de milhares ainda desconhecido pela ciência (OLIVEIRA, 2017). De acordo com a WWF (2012), o impacto humano sobre o planeta é fator do número da população; da parcela de consumo de cada indivíduo; e da tecnologia empregada na produção de bens e serviços.

Essa matéria orgânica que continuamente se forma na terra não se acumula de forma progressiva, mas mantém-se mais ou menos constante através de um processo de equilíbrio entre acumulação e degradação (SANTOS; VENÂNCIO e LIMA, 2002). No entanto, Alves (2006) afirma que, restaurar ecossistemas é o que se tem atribuído ao desafio de, por meio de interferências planejadas, reconstruir a estrutura e criar condições para que se restabeleçam os processos ecológicos naturais de cada ecossistema.

Com tantos avanços nos estudos de recuperação de ecossistemas de uma forma sustentável, os microrganismos se fazem bastante eficiente nesse aspecto de degradar poluente de diversas fontes. Para Jardim (1998) a prioridade deve ser dada a quaisquer atividades que minimizem o passivo, quer seja por reaproveitamento, reuso, troca num banco de resíduos, recuperação, entre outros. A massa microbiana é responsável direta e indiretamente por processos microbiológicos e bioquímicos diversos, os quais exercem influência na produtividade e sustentabilidade dos ecossistemas terrestres (SIQUEIRA et al., 1994).

A principal função desses organismos no solo é a degradação da matéria orgânica, tais como na redução da celulose e lignina, gerando biomassa protéica ou mesmo, servindo como alimento para outros organismos (ROITMAN et al., 1991). Assim, a biomassa microbiana do solo funciona como importante reservatório de vários nutrientes das plantas e atua diretamente na sustentabilidade dos ecossistemas florestais (GRISI; GRAY, 1986; HUNTER-CEVERA, 1998; BRITZ et al., 1999).

A decomposição de material vegetal envolve pelo menos quatro grupos distintos de microrganismos: celulolíticos, hemicelulolíticos, pectinolíticos e ligninolíticos. A degradação de um substrato complexo, folhas, tecidos microbianos mortos ou exoesqueletos de insetos

é processada mais rapidamente na presença de uma comunidade microbiana do que na presença de uma única população (TAUK, 1990).

Um exemplo dessa capacidade degradadora é dado por Baldani et al., (2000), que ao realizar o estudo nos fungos, comprovou que são mais eficientes na utilização do substrato do carbono, sendo os decompositores dominantes dos estágios iniciais da degradação da serrapilheira (BALDANI et al., 2000).

Sabendo da ação importante que os fungos exercem na degradação de compostos nocivos para o ambiente é que se torna bastante útil aplicá-los como fonte sustentável de qualquer fonte emitente de resíduos. Conforme Afonso (2006, p.11) “a sustentabilidade implica na manutenção quantitativa e qualitativa do estoque de recursos ambientais, utilizando tais recursos sem danificar suas fontes ou limitar a capacidade de suprimento futuro”.

3. Resíduos ligninocelulósicos

Anualmente, são geradas grandes quantidades de resíduos ligninocelulósicos pela agroindústria, que poderiam estar sendo empregados como substratos para conversão microbiana em produtos de valor agregado: enzimas, biocombustíveis e outros produtos bioquímicos. Os bioprodutos obtidos da fermentação de glicose, utilizada como substrato básico para o crescimento microbiano, podem ser teoricamente, obtidos de resíduos ligninocelulósicos, desde que haja a devida conversão dos mesmos a açúcares fermentáveis. Palha de milho, trigo e soja; cascas de tangerina e banana foram utilizadas para produção de enzimas ligninolíticas por fungos (VIKINESWARY et al., 2006; LOPEZ et al., 2007; SONGULASHVILI et al., 2007; SÁNCHEZ, 2009).

Conforme Moraes (2007), a utilização de subprodutos tanto de indústrias alimentícias como da própria agricultura, além de ser uma ótima alternativa de minimizar custos no segmento agrícola é prioritariamente um fator de ordem ecológica, por criar um destino útil para esses resíduos.

Em um país como o Brasil, onde a agricultura é a principal atividade econômica, os resíduos e subprodutos agrícolas, agroindustriais e florestais são extremamente abundantes. Dessa forma, uma das possibilidades promissoras de utilização desses materiais lignocelulósicos é a sua conversão em biocombustíveis e outros bioprodutos, dentro do conceito de biorrefinarias (KAMM e KAMM, 2004).

Os órgãos fiscalizadores brasileiros têm se mobilizado e constantes revisões têm ocorrido em resoluções ligadas a tratamentos de resíduos. As leis de Gestão Ambiental e certificação da ISO 14000 visam o desenvolvimento de atividades (manejo, separação, identificação, acondicionamentos, coleta, transporte, armazenamento e tratamento) dos

mais diversos segmentos (hospitais, domicílios, indústrias) sem transgredir as leis ambientais vigentes (BENTO; CASARIL, 2012).

Com a grande exploração de madeira na Amazônia, são necessárias medidas com relação ao aproveitamento de seus resíduos, gerados pelo processamento da indústria. O potencial de uso dessa enorme quantidade de resíduos vem sendo subestimado pela indústria madeireira regional (BARBOSA et al., 2001).

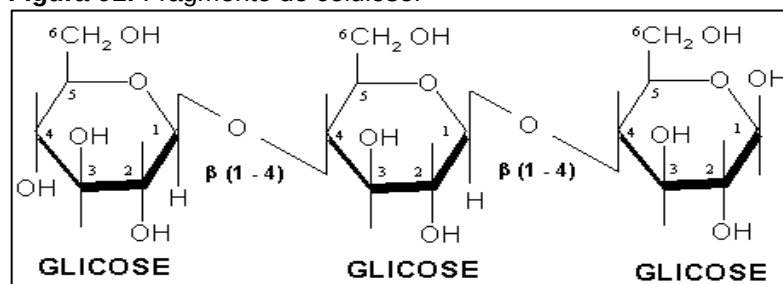
3.1 A madeira e seus constituintes

De uma maneira geral as madeiras são constituídas de quatro componentes principais: celulose, hemicelulose, lignina e os assim chamados extrativos (D'ALMEIDA, 1982; FENGEL E WEGENER, 1989).

3.1.1 Celulose

A celulose é um polímero homogêneo, não ramificado, cuja cadeia polimérica é constituída de centenas de unidades monossacarídicas, de apenas um tipo, D-glicose, ligadas covalentemente por ligações glicosídicas do tipo (1→4). D' Almeida, (1982) em seu estudo, define que o peso molecular pode variar de 162.000 a 2.400.000. Os dois resíduos terminais de glicose da cadeia polimérica de celulose diferem entre si pela natureza redutora de uma das extremidades (Figura 01).

Figura 01: Fragmento de celulose.



Fonte: Fengel e Wegener (1989).

Na madeira, as moléculas de celulose são mantidas juntas, de tal maneira a formar microfibrilas, as quais por sua vez são organizadas em um arranjo paralelo, lado a lado, formando fibrilas, que se entrelaçam, formando então as fibras de celulose (FENGEL; WEGENER, 1989).

3.1.2 Hemicelulose

As Hemiceluloses constituem na verdade um grupo de substâncias poliméricas formadas a partir de unidades monossacarídicas diferentes. Portanto, são polissacarídeos heterogêneos, contendo nas suas estruturas tanto hexonas, quanto pentoses. Possuem cadeia polimérica ramificada e de baixa massa molecular. Em geral, as hemiceluloses

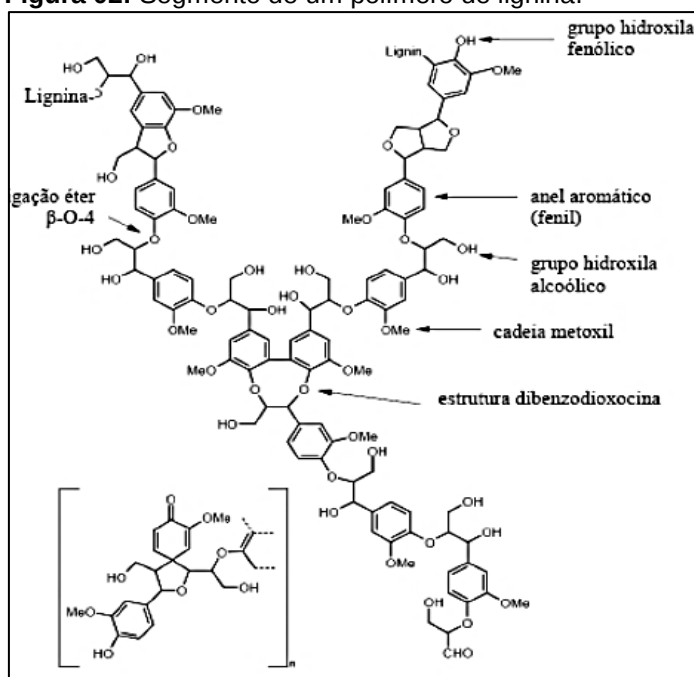
contidas na madeira são misturas complexas de polissacarídeos, variando em composição de acordo com o tipo de madeira (D'ALMEIDA, 1982).

3.1.3 Lignina

Lignina é uma substância cuja molécula é extremamente complexa, polimérica, heterogênea, formada a partir de três tipos diferentes de unidades monoméricas, derivadas de 4-hidroxiarilpropenil álcoois, sendo eles; álcool transpara-cumárico (I) (unidade hidroxifenil), álcool trans-sinapílico (II) (unidade siringil) e álcool trans-coniferílico (III) (unidade guaiacil) (ADLER, 1977; FENGEL; WEGENER, 1989; HIGUCHI, 1990).

Os grupamentos funcionais que, portanto, definem as características estruturais e químicas de lignina são os grupos hidroxílicos de álcoois primários e secundários, hidroxílicos de fenóis, eterificados e livres, grupos carboxílicos de diferentes tipos, metoxilas ligadas a anéis aromáticos e insaturações (Figura 02). O caráter aromático da estrutura de lignina está em torno de 51% (D'ALMEIDA, 1982).

Figura 02: Segmento de um polímero de lignina.



Fonte: Barrichelo e Britto (1989).

Esse segmento de da Lignina se apresenta como uma molécula tridimensionalmente e estereoquimicamente muito complexa além de ser amorfa e oticamente inativa. É neste sentido, que se observa, dependendo da origem e da composição do tipo de madeira ou diferentes partes de um mesmo tecido, que a lignina irá possuir diferentes características estruturais.

Usa-se como exemplo ligninas encontradas em madeiras coníferas que apresentam um alto teor de álcool coniferílico (unidades guaiacil) em contraposição às ligninas encontradas em madeiras folhosas, as quais apresentam quantidades equivalentes de

álcool coniferílico e álcool sinapílico (unidades siringil) (ADLER, 1977; FENGEL; WEGENER, 1989).

3.2 Utilização de fungos na degradação de poluentes

Os organismos, predominantemente, responsáveis pela degradação da ligninocelulose são os fungos, e os mais rápidos degradadores deste grupo são os fungos basidiomicetos (TEN HAVE e TEUNISSEN, 2001; BENNETT et al., 2002; RABINOVICH et al., 2004; SÁNCHEZ, 2009). Blanchette et al. (1992); Goodell et al. (1997), em seus estudos afirmam que os fungos secretam inúmeras enzimas lignocelulolíticas que são requeridas para a biodegradação destes componentes da madeira, sabe-se que estas enzimas são de elevada dimensão molecular para penetrarem na parede celular da madeira intacta em tempos curtos de biodegradação.

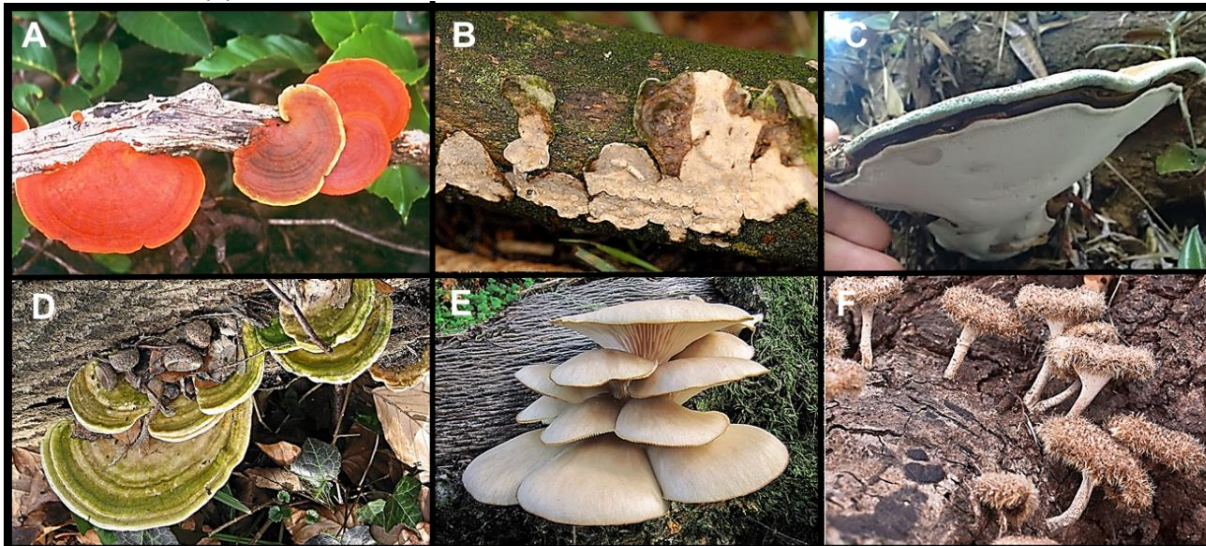
Uma alternativa para a utilização de grande parte destes resíduos é a utilização como substrato em processos microbiológicos aplicados, tais como a produção de cogumelos comestíveis. E esta produção, vêm aumentando nas últimas décadas no Brasil, devido a fatores como o alto valor nutritivo, descobertas científicas que comprovam atividades medicinais e também pelo fácil cultivo, consistindo numa fonte de renda para pequenos e médios produtores (BENTO; CASARIL, 2012).

Com o exacerbado descarte de resíduos no meio ambiente, a habilidade degradativa dos fungos vem como uma forma de utilização desses resíduos como substratos no cultivo de cogumelos comestíveis, diminuindo os impactos ambientais ocasionados por estes (SALES-CAMPOS et al., 2010). Poppe (2000) em seu estudo, relatou que existe cerca de 200 tipos de resíduos na qual os cogumelos comestíveis podem ser produzidos.

Assim, o aproveitamento de resíduos ligninocelulósicos oriundos da produção agrícola para produção de proteína alimentar na forma de biomassa fúngica é uma alternativa para agregar valor aos resíduos, considerando que a produção de cogumelos comestíveis é uma atividade comercial já bem estabelecida e rentável. São inúmeros os benefícios da conversão desses resíduos em cogumelos, como o fornecimento de alimentos, controle da geração de resíduos, redução de impactos ambientais, melhoria da renda familiar entre outras (BENTO; CASARIL, 2012).

Os organismos mais efetivos na biodegradação dos materiais lignocelulósicos na natureza são os fungos que agem na decomposição branca e parda da madeira. A grande maioria desses organismos pertence ao filo Basidiomycota (Figura 03), sendo que ascomicetos e fungos mitospóricos normalmente são classificados como fungos de decomposição branda (podem degradar lignina e polissacarídeos, porém em velocidades mais baixas). (ESPOSITO; AZEVEDO, 2004).

Figura 03: Alguns representantes de degradadores da madeira como *Pycnoporus sanguineus* (A), *Phanerochaete velutina* (B), *Ganoderma* sp. (C), *Trametes gibbosa* (D), *Pleurotus ostreatus* (E) e *Lentinus crinitus* (F).



Fonte: Imagens baixadas e modificadas do <http://www.ccb.ufsc.br/bot/micologia/fotos.htm>

Esses basidiomicetos são considerados um amplo grupo com mais de 30.000 espécies, que inclui cogumelos comestíveis e venenosos e orelhas de pau, onde muitos deles, são saprófitos envolvidos direta ou indiretamente na degradação da madeira. Portanto, desenvolvendo e desempenhando um papel fundamental na reciclagem de nutrientes.

Na natureza, os basidiomicetos lignocelulolíticos crescem principalmente sobre madeira em decomposição e outros resíduos de origem vegetal. A elucidação do processo de degradação da lignina conduziu a inúmeras pesquisas para a utilização do fungo da podridão branca em processos biotecnológicos (MELO; AZEVEDO, 1997).

Ferraz (2004), reporta que os fungos são importantes tanto do ponto de vista ecológico, quanto econômico. Ecologicamente, são considerados os lixeiros do mundo, pois degradam todo tipo de restos orgânicos, independente da origem, transformando-os em elementos assimiláveis pelas plantas. Já economicamente, tem implicações em várias áreas: medicina humana e veterinária, farmácia, nutrição, fitopatologia, entre outras.

Os fungos são microrganismos produtores de sistemas enzimáticos complexos capazes de degradar substâncias químicas de estruturas complexas como as que compõem a madeira, de maneira a produzir moléculas mais simples e mais facilmente assimiláveis. Estas características incentivam o interesse de aplicar a biotecnologia em produtos da floresta focando na exploração de fungos basidiomicetos degradadores de madeiras e suas enzimas extracelulares (HAMMEL, 1996).

Além disso, são geralmente classificados com base nas diferenças dos respectivos padrões de degradação da madeira que apresentam, levando-se em consideração as características macroscópicas da degradação. Assim, podem ser classificados como fungos de podridão branca; podridão parda e de podridão mole (RODRIGUEZ, 1990).

Segundo Songulashvili (2007), é necessário explorar mais micro-organismos e substratos ligninocelulósicos com diferentes composições para avaliar o verdadeiro potencial da produção de enzimas ligninolíticas por fungos.

3.2.1 Podridão branca

Os fungos de podridão branca, que incluem muitos dos fungos comestíveis e medicinais, entre eles *Lentinula edodes* (shiitake) e *Pleurotus ostreatus* (hiratake), são saprófitas e capazes de utilizar lignina, celulose e hemicelulose como fonte de carbono e nutrientes. Essas características permitem que sejam cultivados em grande variedade de matérias ligninocelulósicas, como resíduos agroindustriais, que poderiam ser utilizados também como substratos alternativos de baixo custo para a produção de cogumelos (RIBEIRO, 2009).

Eggert et al. (1996), argumentam que o gênero *Pycnoporus* se mostra bastante promissor devido sua capacidade em produzir enzimas ligninolíticas. Lomascolo et al. (2002), afirmam que linhagens de *Pycnoporus sanguineus* de origem tropical e subtropical produzem maior quantidade de enzimas ligninolíticas que as linhagens de outras regiões.

Estes organismos possuem a capacidade de degradar simultaneamente os principais componentes da parede celular a lignina, hemicelulose e celulose, deixando a região da madeira degradada com uma coloração clara. Este grupo coloniza preferencialmente madeiras da subdivisão Angiospermae (folhosas, madeira dura). Os fungos de decomposição branca podem ser divididos em dois tipos, os que estão envolvidos na decomposição de todos os componentes da madeira simultaneamente, neste caso a degradação ocorre pela formação de erosão e pelo afinamento progressivo da parede celular devido às múltiplas enzimas que atuam na superfície exposta da madeira (ALEXOPOULUS et al., 1996).

Hatakka (1994), enfatiza que o vasto arsenal de enzimas extracelulares, tanto hidrolíticas quanto oxidativas, que os fungos degradadores de madeira exibem particularmente o grupo de fenoloxidase é tido como o de maior importância ou determinante da capacidade degradativa destes organismos.

3.2.2 Podridão parda

Fungos de podridão parda estão associados à degradação de madeiras moles e apresentam a capacidade de despolimerizar os polissacarídeos da parede celular e são

capazes de degradar celulose e hemicelulose sem a remoção da lignina. A celulose é atacada inicialmente por radicais hidroxí (sistema $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$). Propõe-se que moléculas fenólicas de baixo peso molecular queladoras de ferro e que produzem radicais hidroxilas estejam relacionadas diretamente na degradação de celulose (KAPICH et al., 2005).

3.2.3 Podridão mole

Os fungos de podridão mole degradam a lignina mais lentamente do que os polissacarídeos, produzindo um amolecimento característico na superfície da madeira. Neste estágio, as hifas penetram na parede secundária da célula (RODRIGUEZ, 1990).

4. Compostos enzimáticos

Os fungos, reconhecidos como biodegradadores, possuem um papel fundamental no desenrolar do ciclo do carbono. Por outras palavras, uma melhor compreensão dos mecanismos de degradação enzimática dos fungos, bem como da sua ecologia, pode permitir a possibilidade do seu uso em diferentes áreas da biotecnologia ambiental (SANTOS; VENÂNCIO e LIMA, 2002). Partindo desse princípio, os compostos mais atuantes na degradação da matéria orgânica são as formas mais comuns de carbono orgânico presente em todos organismos vivos tais como as proteínas, os lipídios, os ácidos nucleicos, o amido, a celulose, as pectinas, a quitina e a lenhina sendo estes transformados e sintetizados pelos fungos filamentosos.

De acordo com a baixa especificidade e elevado potencial de oxidação do sistema enzimático, os basidiomicetos ligninolíticos são também capazes de degradar uma variedade de compostos recalcitrantes (FRAGOEIRO; MAGAN, 2005). É nessa vantagem, que várias enzimas os fungos chegam a produzir durante a colonização da madeira e, basicamente, os complexos enzimáticos produzidos constituem-se dos sistemas hidrolítico e oxidativo. As enzimas responsáveis pela degradação da celulose e das polioses são hidrolases que apresentam certa especificidade pelo respectivo substrato (KIRK; CULLEN, 1998), ao passo que as enzimas envolvidas na degradação da lignina são oxidases e, em geral, são pouco específicas (CULLEN; KERSTEN, 2004).

Devido à natureza e tamanho da molécula de lignina, as enzimas responsáveis pelo ataque inicial devem ser extracelulares e não específicas. Os basidiomicetos de decomposição branca têm dois sistemas enzimáticos extracelulares: hidrolítico, responsável pela hidrólise de polissacarídeos, e sistema oxidativo, que promove a degradação de lignina (TUOMELLA et al., 2000; JÖRGENSEN et al., 2003).

A biodegradação efetiva da lignina é observada somente com fungos de decomposição branca. Neste processo atuam um grupo de enzimas oxidativas que

O esquema abaixo representa o processo de biodegradação da lignina por fungos basidiomicetos de decomposição branca (Figura 04). Onde se dá pela remoção sem perda marcante da celulose degradando todos os componentes da parede celular.

The diagram illustrates the proposed mechanism of lignin degradation by the AAO enzyme system. It shows a cycle involving AAO, AAD, and QR, with the involvement of H_2O_2 , Fe^{3+} , and various lignin intermediates.

Key components and reactions:

- AAO (Aromatic Amine Oxidase):** Catalyzes the oxidation of AAO to AAD, releasing H_2O_2 and Fe^{3+} .
- AAD (Aromatic Amine Dehydrogenase):** Catalyzes the reduction of AAD to AAO by QR, releasing H_2O_2 and Fe^{3+} .
- QR (Quinone Reductase):** Catalyzes the reduction of AAD to AAO by QR, releasing H_2O_2 and Fe^{3+} .
- Lignin Intermediates:** Various lignin structures are shown, including those with $HOCH_2$, HC , $HC=O$, H_2COH , $HCOH$, CH , $C=O$, H_3CO , OH , and OCH_3 groups.
- Enzymes:** Laccase, Peroxidase, and AAO are shown catalyzing the degradation of lignin intermediates.

The diagram shows a complex network of reactions involving these enzymes and intermediates, leading to the degradation of lignin.

Fonte: Adaptado de MARTÍNEZ, 2005.

Um número significativo de fungos foi identificado como produtores de enzimas ligninolíticas: *Phanerochaete chrysosporium* (KUWAHARA et al., 1984) *Trametes trogii* (MECHICHI et al., 2006), *Nematoloma frowardii* (ROGALSKI, et al., 2006); *Schizophyllum sp.* (XIAOBIN et al., 2007), *Trametes villosa* (BUKH et al., 2006; AHNA et al., 2007), *Pleurotus sajor-caju* (REDDY et al., 2003; KAMIDA et al., 2005), *Ganoderma* spp. (SILVA et al., 2005), *Pycnoporus sanguineus* (VIKINESWARY et al., 2006), *Pycnoporus cinnabarinus* (MEZA et al., 2005), *Quercus petraea* (VALÁŠKOVÁ et al., 2007); *Dichomitus squalens*, *Ischnoderma resinsum* e *Pleurotus calypttratus* (EICHLEROVÁ et al., 2005).

Os processos de degradação de celulose e hemicelulose são de natureza hidrolítica e ocorrem com relativa facilidade (WOOD; GARCIA-CAMPAYO, 1994; SÁNCHEZ, 2009). Entretanto, a degradação da lignina representa um processo oxidativo complexo, não específico e estritamente dependente das condições do meio de cultivo do organismo (KIRK; FARREL 1987; SÁNCHEZ, 2009).

4.1 Lacase/Mediador

A lacase, com seu relativo baixo potencial redox (cerca de 0,6-0,8 V) está restrita a reagir somente com substâncias facilmente oxidáveis, como fragmentos fenólicos de lignina (TEN HAVE; TEUNISSEN, 2001). Apesar disso, a inclusão de substâncias oxidáveis de baixa massa molar, conhecidas como mediadores, expande a atividade oxidativa desta enzima (BOURBONNAIS; PAICE, 1995).

Um mediador é uma molécula de baixa massa molar que atua como um carreador de elétrons. Após ser oxidado pela enzima, difunde-se para fora do sítio ativo e ao encontrar o substrato retira seus elétrons, que não são diretamente oxidados pela enzima por impedimentos estéricos ou termodinâmicos. Dessa forma, este processo pode levar a um mecanismo de oxidação que não seria possível para a enzima sozinha, estendendo, assim, a faixa de substratos oxidáveis (BANCI et al., 1999; CANTARELLA et al., 2003).

Resultados mais recentes demonstraram que compostos modelo de lignina foram eficientes mediadores de lacase (CAMARERO et al., 2007), indicando um possível envolvimento dos produtos de degradação da lignina e extrativos solúveis de baixa massa molar como mediadores naturais de lacase durante a biodegradação da madeira por fungos de decomposição branca, principalmente nos estágios iniciais de biodegradação.

4.2 Álcool veratrílico-LiP

O álcool veratrílico (álcool 3,4-dimetoxi-benzílico, AV) é um metabólito secundário de baixa massa molar produzido e acumulado no meio de cultura de fungos de decomposição

branca (SHIMADA *et al.*, 1981; ZAPANTA; TIEN, 1997) principalmente aqueles que secretam LiP (JONG *et al.*, 1994).

O AV pode atuar como um mediador redox difusível da LiP. Neste mecanismo, a oxidação de AV envolve a transferência de um elétron do composto I (espécie enzimática ativa), formado pela oxidação da enzima nativa com H₂O₂, levando à formação de um radical catiônico (AV^{•+}) (HARVEY *et al.*, 1986; TEN HAVE; TEUNISSEN, 2001; ZAPANTA; TIEN 1997; GIRALDI *et al.*, 1990; KHINDARIA *et al.*, 1995) ao passo que o composto I é reduzido ao composto II.

Assim, a formação de um complexo LiPII- AV^{•+} com tempo de vida maior foi sugerido como a espécie que atua na oxidação da lignina. Com base nessas observações, os autores sugeriram que AV^{•+} gerado enzimaticamente pode atuar como um mediador redox somente como uma espécie ligada à enzima, e não como um oxidante difusível (KHINDARIA *et al.*, 1996; KHINDARIA; YAMAZAKI; AUST, 1995).

4.3 Compostos aromáticos clorados-LiP

Em uma revisão da literatura feita a pouco mais de uma década, de Jong e Field relacionaram 81 compostos halogenados produzidos por 46 gêneros diferentes de basidiomicetos, principalmente fungos de decomposição branca. Dentre estes compostos, 66 eram aromáticos halogenados produzidos por 35 gêneros diferentes, sendo os mais comuns os metoxi-benzílicos clorados (DE JONG *et al.*, 1997).

De acordo com Ten. Have e Teunissen (2001) vários autores têm mostrado que 2-cloro-1,4-dimetoxi-benzeno pode substituir AV na oxidação de corantes azo e do corante polimérico Poly R-478 por LiP, sendo que os azo somente foram oxidados na presença de mediador. Todavia, ainda não é certo se 2-cloro-1,4-dimetoxi-benzeno está na verdade envolvido na biodegradação da lignina, uma vez que sua biossíntese não coincide com a produção de LiP, como mostrado para AV (TEN HAVE; TEUNISSEN, 2001).

Recentemente, Arantes identificou vários compostos aromáticos clorados de baixa massa molar no cultivo do fungo de decomposição branca seletiva *Perenniporia medullarum* que aparentemente é deficiente em LiP, e sugeriu que na ausência de LiP estes compostos poderiam atuar como substratos da aril álcool oxidase para a produção de peróxido de hidrogênio, o qual é requerido para a atuação da MnP e, também, para a geração de radicais hidroxilas pela reação de Fenton (ARANTES, 2008). A produção de peróxido de hidrogênio pela aril álcool oxidase utilizando compostos organo-clorados foi também reportada por ten Have e Teunissen (2001).

4.4 Celobiose-desidrogenase (CDH)

A CDH é outra enzima que também participa do complexo celulolítico de alguns fungos, porém possui atividade oxidativa e não hidrolítica. A CDH oxida vários açúcares como celobiose, oligômeros de glicose, lactose e até mesmo celulose (HENRIKSSON et al., 2000).

Esta enzima pertencente ao complexo celulolítico, produzida principalmente por fungos de decomposição branca, oxida vários açúcares e reduz quinonas, O_2 , Fe^{3+} e Cu^{2+} . Ao reduzir Fe^{3+} a Fe^{2+} , o Fe^{2+} pode reagir com H_2O_2 (proveniente da redução de O_2 pela própria CDH ou por outras enzimas produtoras de peróxido) gerando radicais hidroxilas via reação de Fenton, que podem atuar na despolimerização de polissacarídeos e na modificação estrutural da lignina (HENRIKSSON et al., 2000; KUHAD et al., 1997). Assim, a parcial auto-oxidação criaria a combinação Fe^{2+}/H_2O_2 permitindo que radicais hidroxila sejam gerados a certa distância da hifa (HYDE; WOOD, 1997).

5. Considerações finais

A utilização de fungos ligninolíticos em bioprocessos envolvendo descontaminação ambiental, principalmente basidiomicetos vem ganhando e consolidando um forte espaço no campo da pesquisa nos últimos tempos, principalmente no emprego de sistemas enzimáticos, como vantagem nas pesquisas, se destacando na diminuição de compostos nocivos e transformando em nutrientes para a natureza.

No entanto, representantes da ordem Agaricales (*Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sajor-caju*, *Lentinus crinitus* e *Lentinus edodes*) e Polyporales (*Phanerochaete chrysosporium*, *Ganoderma lucidum*, *Picnoporus sanguineus*, *Trametes versicolor* e *Phellinus gilvus*) mostraram-se eficientes em processos de biodegradação e, consequentemente, havendo maior produção de enzimas capazes de degradar resíduos ligninolíticos.

No entanto, se observa nos trabalhos de ten Have, Teunissen e Blanchette que os fungos são os organismos mais eficientes e rápidos na degradação de poluentes, assim como se dá pela produção de inúmeras enzimas de elevada dimensão, tendo ação em tempos curtos. E podem-se destacar os cogumelos *Lentinus edodes*; *Pycnoporus sanguineus*; *Phanerochaete chrysosporium* e *Trametes trogii* que chegam a sintetizar as enzimas oxidativas (LiP e MnP).

Referências Bibliográficas

AFONSO, Cintia Maria. Sustentabilidade caminho ou utopia?. São Paulo: Annapume, 2006, 71p.

AHNA, M.; ZIMMERMANB, A. R.; MARTÍNEZ, C. E.; ARCHIBALD, D. D; BOLLAG, J.; DEC, J. Characteristics of *Trametes villosa* laccase adsorbed on aluminum hydroxide. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 41, p. 141–148, 2007.

ALVES, M.C. Recuperação dos solos degradados pela agricultura. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDUCAÇÃO AMBIENTAL NA AGRICULTURA, 5., 2006, Campinas. **Anais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2006. 1-CD-ROM.

ALEXOPOULUS, C.J.; MIMS, C.W.; BLACKWELL, M. **Introductory mycology**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

ADLER, E. **Lignin Chemistry - Past, Present and Future wood**. **Science Technology**. n. 11. p. 169-218. Atlanta: TAPPI Press, 1977.

ARANTES, Valdeir; MILAGRES, Adriane M. F. Relevância de compostos de baixa massa molar produzidos por fungos e envolvidos na biodegradação da madeira. **Quim. Nova**, Vol. 32, No. 6, 1586-1595, 2009.

BARBIERI, J. C. et al. **Inovação e Sustentabilidade**: Novos Modelos e Proposições. Revista RAE, FGV, 2010.

BALDANI, V et al. **Quantificação de microorganismos em solos sob plantio puro de pseudosamanea guachapele (KUNTH) harms e em consorcio com Eucalipitus hill ex maiden**. Comunicado Técnico Embrapa, 2000.

BARBOSA, A.P.; VIANEZ, B.F.; VAREJÃO, M.J; ABREU, R.L.S. Considerações sobre o perfil tecnológico do setor madeireiro na Amazônia Central. **Parcerias Estratégicas**, v.6, n.12, p.42-61, 2001.

BARRICHELO, L.E.G. & BRITTO, J.O. - Química da Madeira - **Manual Didático** - Centro Acadêmico Luiz de Queiróz. USP Piracicaba: 1989.

BENTO, Cláudia Braga Pereira; CASARIL, Kérley Braga Pereira Bento. Bioconversão de resíduos agroindustriais ligninocelulósicos por fungos causadores da podridão branca: uma alternativa à produção de alimentos. Volume 14 – Número 19 – Jan/Jun 2012 – pp. 151-180.

BENNETT, J. W.; WUNCH, K.G.; FAISON, B. D., 2002. Use of fungi in biodegradation. In: Hurst CJ, editor. **Manual of Environmental Microbiology**. WashingtonDC: MAS press; p. 960–71.

BOFF, Vera Lúcia; MENDES, Aila da Silva; OLIVEIRA et al. Fungos Micorrízicos Arbusculares na Sustentabilidade de Sistemas Agroflorestais Comparados à Monocultivos com Teca. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Florianópolis 28 de junho a 2 de agosto de 2013.

BRITEZ, R. M.; MARQUES, R.; PIRES, L.; BASSFELD, J. C.; BONET, B. R.; LOPEZ, M. R. Decomposição de serapilheira e liberação de nutrientes em florestas da planície litorânea da Ilha do Mel, PR, Brasil. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE LA CIENCIA DEL SUELO, 14., 1999, Pucon. **Anais ...** Temuco: Universidad de la Forntera, 1999. 569 p.

BLANCHETTE, R.A. **Rvaluating isolates of Phanerochaete chrysosporium and Ceriporiosis subnermispora for use in biological pulping processes Holzforchung**. V. 46, p. 109-115, 1992.

BABOROVÁ, P.; MÖDER, M.; BALDRIAN, P. CAJTHAMLOVÁ, K.; CAJTHAML, T. Purification of a new manganese peroxidase of the white-rot fungus *Irpelex lacteus*, and degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by the enzyme. **Research in Microbiology**. v. 157, p. 248–253, 2006.

BUKH, C.; LUND, M.; BJERRUM, M. J. Kinetic studies on the reaction between *Trametes villosa* laccase and dioxygen. **Journal of Inorganic Biochemistry**. v. 100, p. 1547–1557, 2006.

BOURBONNAIS, R.; PAICE, M. G.; Appl. Microbiol. **Biotechnol.** 1992, 36, 823.

BANCI, L.; CIOFI-BAFFONI, S.; TIEN, M.; **Biochem.** 1999, 38, 3205.

CAMARERO, S.; IBARRA, D.; MARTÍNEZ, A. T.; ROMERO, J.; GUTÍERREZ, A.; Del Río, J. C.; Enzyme Microb. **Technol.** 2007, 40, 1264.

CANTARELLA, G.; GALLI, G.; GENTILI, C.; J. Mol. **Catal. B** 2003, 22, 135.

CULLEN, D.; KERSTEN, P. J.; **The Mycota III Biochemistry and Molecular Biology**, Springer-Verlag: Berlin, 2004.

D'ALMEIDA, M.L.O. **Composição Química dos Materiais em Celulose e Papel-** Tecnologia da Fabricação de pasta Celulósica. Vol. 1. Ed. IPT. São Paulo, 1982. p. 42-54.

DESPERDÍCIO de alimento é terceiro maior emissor de CO₂ do mundo. **O Progresso**, Dourados, 18 set. 2013. Meio ambiente, p. 8.

DE JONG, E.; FIELD, J.; ANNU. Rev. **Microbiol.** 1997, 51, 375.

DIAS, A. E. X. O. Biorremediação de áreas afetadas por resíduos sólidos tóxicos. In: SISINNO, C. L. S.; OLIVEIRA, R. M. (Org.) Resíduos Sólidos, Ambiente e Saúde: uma visão multidisciplinar. Rio de Janeiro: Editora Fiocruz, 142 p, 2000.

EGGERT, C., TEMP, U., DEAN, J. F.; ERIKSSON, K. E. L. **A fungal metabolite mediates degradation of non-phenolic lignin and synthetic lignin by laccase**. FEBS Letters. V. 391, p. 144-148, 1996.

EICHLEROVÁ, I.; HOMOLKA, L.; LISÁ, L.; NERUD, F. Orange G and Remazol Brilliant Blue R decolorization by white rot fungi *Dichomitus squalens*, *Ischnoderma resinsum* and *Pleurotus calyptratus*. **Chemosphere**. v. 60, p. 398-404, 2005.

ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J.L. **Fungos - Uma Introdução à Biologia, Bioquímica e Biotecnologia**. Caxias do Sul: Educs, 2004.

FAO. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA. The state of food security and nutrition in the world: building resilience for peace and food security, 2017.

FRAGOEIRO, S. & MAGAN, N. 2005. Enzymatic activity, osmotic stress and degradation of pesticide mixtures in soil extract liquid broth inoculated with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trametes versicolor*. **Environmental Microbiology**. 7 (3): 348.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. 613 p. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.

FERRAZ, A.L. Fungos decompositores de madeira. In: ESPOSITO, E.; AZEVEDO, J.L. **Fungos: uma introdução à biologia, bioquímica e biotecnologia**. Caxias do Sul: Educ, 2004. p.215-240.

GOODELL, B.; JELLISON, J.; LIU, J.; DANIEL, G.; Paszczynski, A.; Fekete, F.; Krishnamurthy, S.; Jun, L.; Xu, G.; J. **Biotechnol.** 1997, 53, 133.

GRISI, B. M.; GRAY, T. R. G. Comparação dos métodos de fumigação, taxa de respiração em resposta à adição de glicose e conteúdo de ATP para estimar a biomassa microbiana do solo. **Revista Bras. Ci. Solo**, v. 10, p. 109-115, 1986.

HAMMEL, KE. **Extracellular free radical biochemistry of ligninolytic fungi**. New J. Chem. New Jersey. n. 20. abril, 1996.

HARVEY, P. J.; SCHOEMAKER, H. E.; PALMER, J. M.; **FEBS Lett.** 1986, 195, 242.

HATAKKA, A. **Lignin-Modifying Enzymes from Selected White-Rot Fungi: Production and Role in Lignin Degradation**. FEMS Microbiological Reviews. Finland. v. 13. 17 jan. 1994.

HENRIKSSON, G.; JOHANSSON, G.; PETTERSSON, G.; J. **Biotechnology**. 2000, 78, 93.

HIGUCHI, T. **Lignin biochemistry: Biosynthesis and biodegradation**. n. 1. v. 24. Berlin: Springer Link, 1990.

HYDE, S. M.; WOOD, P. M.; **Microbiology** 1997, 143, 259.

HUNTER-CEVERA, J. C. The value of microbial diversity. **Current Opinion in Microbiology**, v. 1, n. 3, p. 278-285, 1998.

KAMM, B.; KAMM, M. Principles of biorefineries. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.64, n.2, p.137-145, 2004.

KAMIDA, H. M.; DURRANT, L. R.; MONTEIRO, R. T. S. T.; ARMAS. E. D. BIODEGRADAÇÃO DE EFLUENTE TÊXTIL POR *Pleurotus sajor-caju*. **Química Nova**. v. 28, n. 4, p. 629-632, 2005.

KAPICH, A. N.; PRIOR, B. A.; LUNDELL, A.; HATAKKA, A. A. A rapid method to quality pro-oxidant activity in cultures of wood decaying white-rot fungi.. **Journal of Microbiological Methods**. New York. v. 61. p. 261-271, 2005.

KHINDARIA, A.; GROVER, T. A.; AUST, S. D.; **Biochem.** 1995, 34, 6020.

KHINDARIA, A.; YAMAZAKI, I.; AUST, S. D.; **Biochem.** 1996, 35, 6418.

KHINDARIA, A.; YAMAZAKI, I.; AUST, S. D.; **Biochem.** 1995, 34, 16860.

KIRK, T. K.; CULLEN, D.; **Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry**, New York, John Wiley and Sons: New York, 1998.

KUHAD, R. C.; SINGH, A. W.; ERIKSSON, K. E. L.; **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, Springer-Verlag Heidelberg: New York, vol. 57, 1997.

KUWAHARA, M.; GLENN, J. K.; MORGAN, M. N.; GOLD, M. H. Separation and characterization of two extracellular H₂O₂-dependent oxidases from ligninolytic cultures of *Phanerochaete chrysosporium*. *FEBS Lett* 1984;169:247–50.

KUHAD, R. C.; SINGH, A. W.; ERIKSSON, K. E. L.; **Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology**, Springer-Verlag Heidelberg: New York, vol. 57, 1997.

JARDIM, W.F. Gerenciamento de resíduos químico em laboratórios de ensino e pesquisa. **Química Nova**, São Paulo, v. 21, n. 5, p.671-673, mai.1998.

JONG, E.; FIELD, J. A.; BONT, J. A. M.; FEMS Microbiol. **Rev. Microbiology** 1994, 13, 153.

JÖRGENSEN, H.; ERIKSSON, T.; BÖRJESSON, J.; TJERNELD, F.; OLSSON, L. Purification and characterisation of five cellulases and one xylanases from *Penicillium brasilianum* IBT 20888. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 32, p. 851–861, 2003.

LOMASCOLO, A.; CAYOL, J.L.; ROCHE, M. GUO, L.; ROBERT, J. L.; RECORD, E.; LESAGE M. L.; OLLIVEIRA, B.; SIGOILLOT, J.C.; ASTHERR, M. **Molecular clustering of Pycnoporus strains from various geographic origins and isolation of monacaryotic strains for lacase hyper production. Mycology Research**. n. 106. p. 1193-1203, out., 2002.

LOPEZ, M. J.; VARGAS-GARCÍA, M. C.; SUÁREZ-ESTRELLA, F.; NICHOLS N. N.; DIEN, B. S.; MORENO, J. Lignocellulose-degrading enzymes produced by the ascomycete *Coniochaeta ligniaria* and related species: Application for a lignocellulosic substrate treatment. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 40, p. 794-800, 2007.

MARTINS, P. F.; AZEVEDO, R. A. **Perspectivas do uso de microrganismos na biorremediação**. Disponível em: <<http://www.genetica.esalq.usp.br/pub/seminar/PFMartins-200701-Resumo.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2012.

MARTÍNEZ, A.; **Enzyme Microb. Technol.** 2002, 30, 425.

MARTÍNEZ, A. T.; SPERANZA, M.; RUIZ-DUEÑAS, F. J.; FERREIRA, P.; CAMARERO, S.; GUILLÉN, F.; MARTÍNEZ, M. J.; GUTIÉRREZ, A.; del RÍO, J. C. Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. **International Microbiology**. v. 8, p. 195-204, 2005.

MELLO, J.M.M. **Biodegradação dos compostos BTEX em um reator com biofilme**. 2007.152f.

MECHICHI, T.; MHIRI, N.; SAYADI, S. Remazol Brilliant Blue R decolourization by the laccase from *Trametes troglitii*. **Chemosphere**. v. 64, p. 998–1005, 2006.

MEZA, J. C.; LOMASCOLO, A.; CASALOT, L.; SIGOILLOT, J.; AURIA, R. Lacase productin by *Pycnoporus cinnabarinus* grown on sugar-cane bagasse: Influence of ethanol vapours as inducer. **Process Biochemistry**. v. 40, p. 3365-3371, 2005.

MORAES, S. A. de. **Subprodutos da agroindústria e indicadores externos de digestibilidade aparente em caprinos**. 2007. 57f. Tese (Doutorado em Nutrição Animal)-Escola de veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/VETC7AQPPH/1/tese_salette_alves_de_moraes.pdf>. Acesso em 31 maio 2012.

OLIVEIRA, Silmara Aparecida Bonani de. Fungos conidiais sapróbios da Amazônia Meridional no controle *in vitro* de fitopatógenos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Naturais, Humanas e Sociais, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Sinop, 2017.

PALMIERI, G., GENNAMO, G., SANNIA, G. Remazol Brilliant Blue R decolourisation by the fungus *Pleurotus ostreatus* and its oxidative enzymatic system. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 36, p. 17-24, 2005.

PINTO, B. D. L. et al. Indicadores de desenvolvimento sustentável para caracterização de melhoria contínua em processos de certificação ambiental. **Meio Ambiente Industrial**, São Paulo, ed. 92, ano XVI, p 18-28, 2011.

POPPE, J., 2000. **Use of agricultural waste materials in the cultivation of mushrooms**. In: L. Van Griensven ed: Proceedings 15th International Congress on Science and Cultivation of Edible Fungi, Balkema Rotterdam, 3-23.

RABINOVICH, M. L.; BOLOBOVA, A. V.; Vasil'chenko, L. G., 2004. Fungal decomposition of natural aromatic structures and xenobiotics: a review. **Applied Biochemistry and Microbiology**, 40, 1–17.

REDDY, G. V.; BABU, P. R.; KOMARAIHAH, P.; ROY, K. R. R. M.; KOTHARI, I. L. Utilization of banana waste for the production of lignolytic and cellulolytic enzymes by solid substrate fermentation using two *Pleurotus* species (*P. ostreatus* and *P. sajor-caju*). **Process Biochemistry**. v. 38, p. 1457-1462, 2003.

RIBEIRO, João Júlio Oliveira, D Sc.. Universidade Federal de Viçosa, Abril de 2009. Caracterização de cogumelos de *Pleurotus ostreatus* e *Lentinula edodes* produzidos em resíduos agroindustriais.

ROITMAN, I.; TRAVASSOS, L. R.; AZEVEDO, J. L. **Tratado de Microbiologia**. São Paulo: Manole, v.2, 1991.

RODRIGUEZ, J. **Estudo do sistema ligninolítico do ascomiceto *Chrysomya sitophila***. Tese. (Doutorado em Química). Instituto de Química, UNICAMP-SP, São Paulo: 1990.

ROGALSKI, J.; SZCZODRAK, J.; JANUSZ, G. Manganese peroxidase production in submerged cultures by free and immobilized mycelia of *Nematoloma frowardii*. **Bioresource Technology**. v. 97, p. 469–476, 2006.

SALES-CAMPOS C, MINHONI MTA, ANDRADE MCN (2010) Produtividade de *Pleurotus ostreatus* em resíduos da Amazônia. **Interciencia** 35: 198-201.

SANTOS, Isabel M.; VENÂNCIO, Armando; LIMA, Nelson. **Ecologia dos Fungos**. Livraria Ninho-Ferreira & Salgados Ltda, dezembro de 2002.

SÁNCHEZ, C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. **Biotechnology Advances**. v. 27, p. 185–194, 2009.

SHIMADA, M.; FUMIAKIN, M.; KIRK, T. K.; HIGUCHI, T.; **Archivo. Microbiol.** 1981, 129, 321.

SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F. M. de S.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M.; ARAUJO, R. S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília: EMRAPA-SPI, 1994. p.7-81.

SILVA, C. M. M. S.; MELO I. S.; OLIVEIRA, P. R. Ligninolytic enzyme production by *Ganoderma* spp. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 37, p. 324–329, 2005.

SONGULASHVILI, G. ELISASHVILI, V.; WASSER, S. P.; NEVO, E.; HADAR, Y. Basidiomycetes laccase and manganese peroxidase activity in submerged fermentation of food industry wastes. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 41, p. 57-61, 2007.

TAUK, S. M. Biodegradação de resíduos orgânicos no solo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.20, n.1-4, p.299-301 1990.

TEN HAVE, R.; TEUNISSEN, P. J. M., 2001. Oxidative mechanisms involved in lignina degradation by white-rot fungi. **Chemical Reviews**, 11:3397–414.

TUOMELA, M.; VIKMAN, M.; HATAKKA, A.; ITAVAARA, M. Biodegradation of lignin in compost environment: A review. **Bioresource Technology**. v. 72, p. 169-183, 2000.

VALÁŠKOVÁ, V.; ŠNAJDRA, J.; BITTNERB, B.; CAJTHAMLA, T.; MERHAUTOVÁ, V.; HOFRICHTERB, M.; BALDRIAN, P. Production of lignocellulose-degrading enzymes and degradation of leaf litter by saprotrophic basidiomycetes isolated from a *Quercus petraea* forest. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 39, p. 2651-2660, 2007.

VIKINESWARY, S.; ABDULLAH, N.; RENUVATHANI, M.; SEKARAN, M.; PANDEY, A.; JONES, E.B.G. Productivity of laccase in solid substrate fermentation of selected agro-residues by *Pycnoporus sanguineus*. **Bioresource Technology**. v. 97, p. 171-177, 2006.

XIAOBIN C., RONG J.; PINGSHENG, L.; SHIQIAN, T.; QIN, Z.; WENZHONG, T.; XUDONG, L. Purification of a new manganese peroxidase of the white-rot fungus *Schizophyllum* sp. F17, and decolorization of azo dyes by the enzyme. **Enzyme and Microbial Technology**. v. 41, p. 258–264, 2007.

WOOD, T.M.; GARCIA-CAMPAYO, V., 1994. Enzymes and mechanisms involved in microbial cellulolysis In: Ratledge, C. (Ed.). **Biochemistry of Microbial Degradation**. Kluwer Academic Publishers. Netherlands. p 590.

WWF - World Wide Fund, 2012. Relatório Planeta Vivo 2012 – A Caminho da Rio +20.

ZAPANTA, L. S.; TIEN, M.; J. **Biotechnology**. 1997, 53, 93.