

Capacidade dos fungos lignocelulolíticos em degradar polímeros de lodo de esgoto

Lignocellulolytic fungi ability to degrade sewage sludge polymers

Fábio Pacheco Menezes¹, Caroline Borges Bevilacqua^{2,*}, Marcelo Aloisio Sulzbacher², Zaida Inês Antonioli² e Rodrigo Josemar Seminoti Jacques²

¹Jardim Botânico, Universidade Federal de Santa Maria, Campus Universitário, 971050-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

²Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, CCR, Campus Universitário, 971050-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

(*E-mail: carolinebevi@gmail.com)

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA16165>

Recebido/received: 2016.12.22

Recebido em versão revista/received in revised form: 2017.04.25

Aceite/accepted: 2017.04.26

RESUMO

A disposição final do lodo de esgoto é problema para muitos países. Porém, significativa porcentagem destes resíduos é constituída por polímeros biodegradáveis, tais como lignina, celulose e hemicelulose. Os fungos do Filo Basidiomycota poderiam degradar estes polímeros nos leitos de secagem da estação de tratamento de esgoto e contribuir para a diminuição dos volumes finais dispostos no ambiente. O objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade de 20 fungos Basidiomycota lignocelulolíticos em biodegradar lodo e os polímeros que o constituem. Foram selecionados quatro isolados para efetuar a biodegradação em diferentes temperaturas. Além disso, a fração orgânica presente no lodo foi determinada antes e depois da biodegradação. A inoculação com *Agaricus bisporus*, *Fomes fasciatus*, *Schizophyllum commune* e *Trametes versicolor* aumentou a degradação do lodo, a qual é maximizada em altas temperaturas. Estes fungos reduziram o teor de carbono orgânico total, de carbono solúvel e de polímeros presentes. A maior redução foi verificada na fração hemicelulose, seguida da lignina e celulose. A inoculação de fungos com capacidade de degradar o lodo pode ser uma alternativa para reduzir os volumes dispostos no ambiente.

Palavras-chave: Basidiomycota, biodegradação, biosólidos, fungos da podridão branca, Van Soest.

ABSTRACT

The final disposal of biosolids is a global matter. Polymers such as lignin, cellulose and hemicellulose comprise significant rate of biosolids arrangement. Fungi from Basidiomycota phylum could degrade these polymers in the drying beds of the treatment plant and it can contribute decreasing final volumes of sludge disposed in the environment. The aim of this study was assess the capacity of 20 lignocellulolytic Basidiomycota fungi to biodegrade the sludge and the polymers that constitute it. Four isolates were selected to carry out sludge biodegradation at different temperatures. In addition, the organic fraction present in the sludge were determined before and after biodegradation. The inoculation of *Agaricus bisporus*, *Fomes fasciatus*, *Schizophyllum commune* and *Trametes versicolor* has enhanced the degradation of sludge, which is improved upon in higher temperatures. These fungi reduced the total organic carbon content of soluble carbon and polymers present in the sludge. The largest reduction was verified in the hemicellulose fraction, followed by lignin and cellulose. The inoculation performed by fungi capable of degrading sludge is an alternative to reduce the volumes deposited in the environment.

Keywords: Basidiomycota, white rot funghi, sewage ludge, biodegradation, Van Soest.

INTRODUÇÃO

A crescente urbanização da população mundial indica que a geração do esgoto doméstico tende a aumentar muito nas próximas décadas e a sociedade exerce forte pressão para que todo este esgoto seja adequadamente tratado (Pedroza *et al.*, 2010). Porém, o tratamento do esgoto doméstico gera grandes quantidades do lodo de esgoto (biossólido), o qual necessita ser adequadamente disposto no ambiente. O lodo de esgoto apresenta na sua composição uma complexa mistura de compostos orgânicos, microrganismos, parasitas, metais pesados, fármacos, etc. (Silva *et al.*, 2007), o que faz com que ocorra sérias limitações legais para sua disposição final, tornando-se um problema a nível global (Pedroza *et al.*, 2010).

Buscando mitigar os possíveis problemas da destinação final do lodo de esgoto, países precursores na reutilização destes resíduos (Japão, Estados Unidos e Singapura) têm buscado alternativas, envolvendo áreas da Agricultura (A), Construção (C) e na geração de Energia (E), o chamado plano ACE de reaproveitamento deste resíduo (JSWA, 1990). A aplicação de lodo de esgoto na agricultura é uma prática com tendência de crescimento em nível mundial, pois resulta em diversos benefícios para o solo, para o crescimento das plantas e tem menor custo que as demais alternativas, desde que utilizado de acordo com critérios técnicos (Damasceno e Campos, 2006). Independente do destino final é de fundamental importância buscar a redução dos volumes do lodo de esgoto, o que pode ser alcançado recorrendo à utilização de fungos do filo Basidiomycota, que quando incorporados nos leitos de secagem das estações de tratamento, são capazes de degradar polímeros complexos. Isto é justificado pelo fato de que durante o tratamento do esgoto pelo sistema de lodo ativado, a maior parte dos microrganismos degradadores, assim como o trato digestório dos seres humanos, não é capaz de degradar polímeros mais complexos, como a lignina, a celulose e a hemicelulose (Andrade, 2004; Andrade *et al.*, 2006). Disto resulta que significativa porcentagem da composição do lodo de esgoto é formada por polímeros, os quais podem ser degradados por fungos lignocelulolíticos no período em que o lodo permanece nos leitos de secagem (Souza e Rosado, 2009).

Os fungos do filo Basidiomycota, em especial os causadores de podridão branca da madeira, possuem habilidade de degradar os polímeros presentes no lodo de esgoto (Alonso *et al.*, 2007; Souza e Rosado, 2009; Pandey *et al.*, 2016). Esses organismos também podem realizar com sucesso a degradação de outros compostos orgânicos recalcitrantes que estejam presentes no lodo, tendo a sua capacidade degradativa sido comprovada em corantes têxteis (Kamida *et al.*, 2005), derivados do petróleo (Isikhuemhen *et al.*, 2003; Fuentes *et al.*, 2014), compostos fenólicos (Jacques *et al.*, 2007), entre outros. Assim, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade de alguns fungos lignocelulolíticos do filo Basidiomycota em biodegradar o lodo de esgoto e os polímeros que o constituem (hemicelulose, celulose e lignina).

MATERIAL E MÉTODOS

Coleta e caracterização do lodo de esgoto

O lodo de esgoto foi gerado pelo tratamento do esgoto doméstico urbano da cidade de Santa Maria, no estado do Rio Grande do Sul, pelo sistema de lodo ativado de aeração prolongada. A coleta do lodo de esgoto ocorreu em seis pontos do leito de secagem. As amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 40°C por sete dias, homogeneizadas e peneiradas em malha 2 mm.

Estas amostras foram utilizadas para as seguintes determinações, em triplicatas: pH em água (1:1), sólidos voláteis, carbono orgânico, nitrogênio Kjeldahl, fósforo total, potássio total, cálcio total e magnésio total. Todas as análises seguiram os procedimentos recomendados pela Resolução n. 380/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. Os teores dos metais pesados arsênio, bário, cádmio, cromo, mercúrio, níquel e chumbo foram determinados em amostras do lodo de esgoto seguindo metodologia proposta pela *United State Environment Protection Agency* (USEPA) na POP PA 035 / SMWW 3120, USEPA 6010C, conforme recomendações do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2006).

As frações orgânicas presentes no lodo de esgoto foram determinadas antes e após a degradação

pelos isolados fúngicos. A massa de 0,3 g das amostras foi submetida à análise laboratorial em triplicatas pelo método de Van Soest (1991). Neste procedimento, as seguintes frações foram obtidas: fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), hemicelulose (HEM), celulose (CEL), lignina em detergente ácido (LIG) e fração solúvel (FS) (Van Soest *et al.*, 1991). Também realizaram-se as determinações analíticas de matéria orgânica, C e N total (combustão a seco), C-solúvel, N inorgânico [$N-NH_4^+$ e $N-(NO_3^- + NO_2^-)$] (Tedesco *et al.*, 1995), N orgânico (diferença entre o N inorgânico e o N total), relação C/N (C total/N total) e P orgânico total (Olsen e Sommer, 1982). Todos os resultados foram expressos em base seca.

Fungos e a biodegradação do lodo de esgoto

Foram realizados dois experimentos respirométricos para quantificação da produção de C-CO₂ resultante da biodegradação do lodo de esgoto pelos isolados fúngicos. Na primeira modalidade, 20 isolados provenientes do banco de culturas do Laboratório de Biologia de Solo e Ambiente da Universidade Federal de Santa Maria (LBA/UFSM), além de amostras procedentes do banco de culturas da Embrapa, unidade Recursos Genéticos e Biotecnologia (CENARGEN) foram utilizadas. As espécies de fungos pertencentes ao Filo Basidiomycota foram avaliadas de acordo com a capacidade de degradação do lodo de esgoto: *Agaricus bisporus* (J.E.Lange) Imbach (LBA/UFSM), *Agaricus blazei* Murrill (LBA/UFSM), *Ceriporiopsis lowei* Rajchenb. (LBA/UFSM), *Fomes fasciatus* (Sw.) Cooke (LBA/UFSM), *Ganoderma applanatum* (Pers.) Pat. (Cenargen/Brasília), *Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst. (Cenargen/Brasília), *Gloeophyllum trabeum* (Pers.) Murrill (Cenargen/Brasília), *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. (Cenargen/Brasília), *Irpex* sp. (LBA/UFSM), *Laetiporus* sp. (LBA/UFSM), *Lentinus sajor-caju* (Fr.) Fr. (Cenargen/Brasília), *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler (Cenargen/Brasília), *Pleurotus citrinopileatus* Singer (LBA/UFSM), *Pleurotus djamor* (Rumph. ex Fr.) Boedijn (LBA/UFSM), *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm. (Cenargen/Brasília), *Pycnoporus sanguineus* (L.) Murrill (Cenargen/Brasília), *Schizophyllum commune* Fr. (Cenargen/Brasília), *Skeletocutis diluta* (Rajchenb.) A. David & Rajchenb.

(LBA/UFSM), *Nigroporus vinosus* (Berk.) Murrill (LBA/UFSM) e *Trametes versicolor* (L.) Lloyd. (Cenargen/Brasília). O experimento foi composto de um delineamento inteiramente casualizado com três repetições. Cada unidade experimental consistiu de um frasco de vidro com volume de 1,0 L e 100 g de lodo de esgoto peneirado. Três discos do micélio fúngico de 5 mm de diâmetro, resultante do crescimento em meio de cultura Batata-dextrose-ágar (BDA), foram inoculados individualmente na superfície do lodo de esgoto. Todos os frascos foram equipados com aparato de captura de CO₂, composto por um copo de plástico de 50 mL contendo 20 mL de NaOH 1 mol L⁻¹, fechados hermeticamente e incubados a 22±1°C, no escuro, por 66 dias. Semanalmente os frascos eram abertos e a solução de NaOH recebia 1,0 mL de BaCl₂ 1,0 mol L⁻¹, três gotas de fenolftaleína 1% e era titulada com solução de HCl 2,0 mol L⁻¹ padronizada com Tris, conforme os protocolos de Tedesco *et al.* (1995). A produção de C-CO₂ foi quantificada conforme Stotzky (1965). A umidade do lodo de esgoto foi mantida em 80% da capacidade de campo, por meio da pesagem semanal dos frascos e adição de água destilada, quando necessário.

Os isolados que apresentaram as maiores produções de C-CO₂ compuseram o segundo experimento respirométrico. Para este teste, foram utilizados 100 dias de incubação com o objetivo de manter os fungos o maior tempo possível em contato com o lodo para que houvesse tempo suficiente para expressarem sua capacidade de degradação. As condições utilizadas foram as mesmas descritas no primeiro experimento, porém a incubação ocorreu nas temperaturas de 24°C (±1°C), 28°C (±1°C) e 32°C (±1 °C), selecionadas por serem representativas das condições de observadas nos leitões de secagem.

Análises estatísticas

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas através do teste de *Scott-Knott*, a 5 % de probabilidade de erro. As análises de variância foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SISVAR (Ferreira, 1998).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do lodo de esgoto

A maioria dos parâmetros analisados no lodo de esgoto estão dentro do intervalo de referência observado por Machado (2001) e abaixo dos limites impostos pela legislação do CONAMA (2006) e da USEPA para metais pesados (Quadro 1), indicando que este lodo de esgoto não apresenta limitações graves para sua disposição final no ambiente. Isto provavelmente é consequência do esgoto tratado ser predominantemente doméstico, com pouca contribuição de efluentes industriais, uma vez que a cidade de Santa Maria não é altamente industrializada. Segundo Rocha e Shirota (1999), o setor industrial influencia direta ou indiretamente os teores de metais pesados nos lodos de esgoto, pois esses elementos participam em diferentes fases do processo de produção de inúmeras indústrias nas diversas áreas econômicas.

Entretanto, é importante considerar que mesmo que o lodo tenha atendido a legislação vigente, tal

condição não o isenta da possibilidade de causar danos ao ambiente quando seu uso for cumulativo (Oliveira *et al.*, 2009). Este alerta deve-se principalmente ao alto teor de fósforo total quantificado no lodo de esgoto, que atingiu 58.332 mg kg⁻¹ (Quadro 1). Araújo *et al.* (2009) obtiveram o valor de 16.000 mg kg⁻¹ para lodo de esgoto oriundo da ETE do município de Franca (São Paulo). Galdos *et al.* (2004) avaliando lodos aeróbios obtiveram resultados variando entre 6.600 a 7.200 mg kg⁻¹ para o teor de fósforo total. Uma possível explicação para os elevados teores de fósforo obtidos neste estudo é o emprego de cloreto férrico no tratamento do esgoto, visando a redução do fósforo no efluente líquido e concentrando-o no lodo do esgoto (CONAMA, 2006). Portanto, a possível destinação deste lodo para uso agrícola deve considerar também o seu teor de fósforo, uma vez que normalmente é o teor de nitrogênio que tem sido utilizado para recomendar a quantidade aplicada (Rodrigues *et al.*, 2006). O excesso de fósforo no solo pode ocasionar graves impactos ambientais, principalmente nos recursos hídricos próximos aos locais da aplicação do lodo de esgoto (Berwanger *et al.*, 2008).

Quadro 1 - Caracterização química do lodo de esgoto, valores de referência e limites máximos estabelecidos pelo CONAMA (2006) e USEPA, expressos em base seca

Parâmetro	Unidade	Valor	Valor de referência ^a
pH (suspensão 1:1)	---	7,1	5,5 - 7,9
Carbono Orgânico Total	%	26,0	20 - 35
Sólidos Voláteis	%	42,6	30 - 60
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg kg ⁻¹	6.925	2.740 – 88.000
Fósforo	mg kg ⁻¹	58.332	15.000 – 40.000
Potássio	mg kg ⁻¹	2.237	0,0 – 3.000
Cálcio	mg kg ⁻¹	23.581	0,0 – 42.700
Magnésio	mg kg ⁻¹	4.479	200 – 4.200
Metal pesado	Lodo	CONAMA ^b	USEPA ^c
	mg kg ⁻¹		
Arsênio	<1	41	75
Bário	677,0	1.300	1.300
Cádmio	<0,1	39	85
Chumbo	47,0	300	840
Cobre	2,0	1.500	4.300
Cromo	69,0	1.000	3.000
Mercúrio	1,8	17	57
Níquel	25,0	420	420
Zinco	40,5	2.800	7.500

^aAdaptado de Machado (2001); ^b CONAMA (2006, resolução 375); ^cUSEPA.

Seleção de fungos lignocelulolíticos

Os isolados de *Agaricus bisporus*, *Fomes fasciatus*, *Schizophyllum commune* e *Trametes versicolor* apresentaram produções de C-CO₂ estatisticamente maiores que o controle durante a biodegradação do lodo de esgoto (dados não apresentados). Todos são fungos produtores da podridão branca. Já as espécies *Agaricus blazei*, *Ceriporiopsis lowei*, *Hericium erinaceus*, *Pleurotus citrinopileatus*, *Pleurotus djamor*, *Pycnoporus sanguineus* e *Skeletocutis diluta*, não diferiram estatisticamente do tratamento controle. Os demais isolados avaliados (*Ganoderma applanatum*, *Ganoderma lucidum*, *Gloeophyllum trabeum*, *Irpex* sp., *Laetiporus* sp., *Lentinus sajor-caju*, *Lentinula edodes*, *Pleurotus ostreatus* e *Nigroporus vinosus*) não foram eficientes na biodegradação do lodo de esgoto, uma vez que apresentaram produção de C-CO₂ inferior à do tratamento controle.

O fungo *Fomes fasciatus* foi anteriormente estudado por Miranda *et al.* (2010), que avaliando a capacidade de 20 basidiomicetos, observaram que isolados de *F. fasciatus* foram hábeis em descolorir entre 92 a 94% do corante presente no efluente têxtil. O fungo *Agaricus bisporus* é considerado um decompositor secundário de compostos lignocelulósicos complexos e por isso necessita que outros microrganismos iniciem a degradação do substrato anteriormente ao seu desenvolvimento (Adams e Frostick, 2008). Provavelmente a diversa microbiota do lodo de esgoto favoreceu esta interação sinérgica. O fungo *Schizophyllum commune* é amplamente distribuído no mundo, ocorrendo em todos os continentes, exceto na Antártida. Estudos apontam que *S. commune* produz níveis elevados de laccases com capacidades enzimáticas degradativas (De Vries *et al.*, 1986). Abdulla *et al.* (2000) testando a capacidade degradativa de diferentes fungos causadores da podridão branca, observaram que *Trametes hirsuta* possui alta capacidade em degradar compostos recalcitrantes (compostos fenólicos) devido ao seu complexo enzimático lignolítico. O fungo *Trametes versicolor* apresenta alta capacidade de atuar sobre compostos recalcitrantes devido a produção de enzimas como a lacase, manganês peroxidase e lignina peroxidase. Esta habilidade tem sido explorada na degradação de corantes têxteis (Libra *et al.*, 2003), resíduos celulósicos (Selvam *et al.*, 2002), fenóis, clorofenóis (Pallerla e Chambers, 1998) e hidrocarbonetos

aromáticos policíclicos (Font, 2003). Além destas enzimas, este organismo pode produzir enzimas responsáveis pela degradação da celulose e das polioses (hemicelulose), as quais são hidrolases que apresentam certa especificidade pelo respectivo substrato (Kirk e Chang, 1981).

Biodegradação em diferentes níveis de temperaturas

A temperatura está entre os fatores abióticos que mais interferem na atividade fúngica durante a degradação dos lodos de esgoto (Alcântara, 2007). Além disto, há carência de dados sobre a degradação de lodos ativados, em especial em condições subtropicais, onde ocorrem baixas temperaturas no inverno. Por isto, os quatro fungos que se destacaram na degradação do lodo de esgoto foram testados em diferentes temperaturas. De modo geral, as maiores produções de C-CO₂ foram observadas na temperatura de 32°C e as menores a 24°C (Quadro 2).

Quadro 2 - Produção acumulada de C-CO₂ e porcentagem de mineralização após 100 dias de biodegradação do lodo de esgoto pelos fungos selecionados nas temperaturas de 24 °C, 28 °C e 32 °C, expressos em base seca

Modalidade	Produção acumulada de C-CO ₂ (mg kg ⁻¹)
	24 °C
Sem inoculação	8519,81j
<i>Fomes fasciatus</i>	8075,75l
<i>Agaricus bisporus</i>	7991,72l
<i>Schizophyllum commune</i>	7979,62l
<i>Trametes versicolor</i>	7968,65l
28 °C	
Sem inoculação	8907,72h
<i>Fomes fasciatus</i>	8805,88i
<i>Agaricus bisporus</i>	9345,09f
<i>Schizophyllum commune</i>	9540,59e
<i>Trametes versicolor</i>	9032,60fg
32 °C	
Sem inoculação	8892,60i
<i>Fomes fasciatus</i>	10390,93c
<i>Agaricus bisporus</i>	10054,11d
<i>Schizophyllum commune</i>	11448,70a
<i>Trametes versicolor</i>	10658,47b

*Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo *Scott-Knott* em nível de 5% de probabilidade de erro.

A temperatura exerce dois importantes efeitos sobre os organismos degradadores, pois afeta a atividade enzimática e a taxa de difusão de substratos e nutrientes na célula (Baptista, 2012). Os dados obtidos neste estudo corroboram os resultados de Chen *et al.* (2000), que observaram que a produção de C-CO₂ por fungos degradadores de lignocelulose tende a aumentar com o aumento da temperatura, até o limite de 40°C.

Destaca-se que a inoculação dos fungos resultou, em média, num aumento de 20% da produção de C-CO₂ do lodo de esgoto na temperatura mais elevada (Quadro 2). Também foi possível estabelecer a seguinte ordem de eficiência na mineralização do lodo de esgoto: *Schizophyllum commune*>*Trametes versicolor*>*Fomes fasciatus*>*Agaricus bisporus*.

Modificações no lodo de esgoto durante a biodegradação

A biodegradação do lodo de esgoto por 100 dias pelos fungos selecionados modificou a sua composição química (Quadro 3). Os teores de matéria orgânica, carbono total e carbono solúvel foram reduzidos por todos os fungos, porém em maior magnitude pelos fungos *Schizophyllum commune* e *Trametes versicolor*, à exceção do carbono solúvel, onde o fungo *Agaricus bisporus* apresentou desempenho destacado, mas ainda assim inferior a

S. commune (Quadro 2). Isto indica que o crescimento fúngico foi realizado às custas do carbono do lodo de esgoto sendo o mesmo parcialmente convertido em biomassa fúngica e em CO₂. A fração carbono solúvel em água, que compreende uma série de compostos facilmente degradáveis (açúcares, ácidos orgânicos, peptídeos, etc.) foi preferencialmente degradada, reduzindo-se em média em 33%, enquanto que o carbono total foi reduzido somente em 13%. Isto indica que o lodo de esgoto, mesmo após o tratamento na estação, ainda possui significativa fração de carbono de fácil degradação, justificando a biodegradação pelos fungos no leito de secagem.

Como os teores de N não demonstraram uma tendência clara de alteração durante a biodegradação do lodo de esgoto (Quadro 3), a relação C/N foi reduzida em função da conversão do C orgânico em CO₂. De modo geral, os valores da relação C/N obtidos neste estudo são baixos, fato este que indicaria uma alta disponibilidade de N e possibilidade de rápida mineralização dos compostos orgânicos presentes no lodo de esgoto (Brady e Weil, 2002). Entretanto, valores da relação C/N inferiores a 12 também podem indicar presença de resíduos com constituição bioquímica recalcitrante e com predominância de matéria orgânica parcialmente decomposta (Bernal *et al.*, 1998). Os teores de fósforo orgânico do lodo de esgoto foram reduzidos pela biodegradação, provavelmente devido a conversão em formas inorgânicas (mineralização) durante o crescimento micelial.

Quadro 3 - Fracionamento químico do carbono e do nitrogênio do lodo de esgoto após biodegradação por 100 dias em 32°C pelos fungos *Schizophyllum commune*, *Trametes versicolor*, *Agaricus bisporus* e *Fomes fasciatus*, expressos em base seca. Os valores representam a média de três repetições (± desvio padrão)

Fungo	MO (%)	C total (%)	C solúvel (mg L ⁻¹)	N total (%)	N org (%)	N inorg (%)	Relação C/N	P org (%)
Sem inoculação	37,63 (± 0,53)	21,84 (± 1,21)	2500 (± 12,69)	3,34 (± 0,18)	2,20 (± 0,15)	1,14 (± 0,04)	6,54 (± 0,05)	2,57 (± 0,07)
<i>Schizophyllum commune</i>	30,17 (± 0,85)	18,41 (± 1,03)	1452,85 (± 125,44)	3,36 (± 0,33)	1,87 (± 0,85)	1,29 (± 0,13)	5,37 (± 0,77)	1,37 (± 0,56)
<i>Trametes versicolor</i>	30,14 (± 1,18)	18,45 (± 1,45)	1752,85 (± 239,13)	3,25 (± 0,56)	1,90 (± 0,65)	1,11 (± 0,43)	6,37 (± 0,37)	2,01 (± 0,44)
<i>Agaricus bisporus</i>	33,35 (± 2,58)	19,91 (± 2,25)	1567,58 (± 224,34)	3,39 (± 0,83)	2,37 (± 0,95)	1,39 (± 0,52)	5,67 (± 0,87)	2,09 (± 0,45)
<i>Fomes fasciatus</i>	34,13 (± 0,23)	19,58 (± 0,83)	1976,66 (± 55,53)	3,39 (± 0,16)	2,46 (± 0,25)	1,13 (± 0,19)	6,24 (± 0,54)	1,52 (± 0,38)

Modificações nos polímeros que constituem o lodo de esgoto

A biodegradação do lodo de esgoto ao fim de 100 dias pelos fungos selecionados reduziu, em média, em 17,50% os polímeros presentes no lodo de esgoto (Quadro 4). As maiores alterações foram observadas na fração hemicelulose, a qual foi reduzida, em média, em 33%. As reduções nos polímeros celulose e lignina foram menores, em média de 7 e 12%, respectivamente. A hemicelulose apresenta composição química menos recalcitrante que as frações celulose e lignina, por isto sua degradação normalmente é maior (Brady e Weil, 2002). Andrade *et al.* (2006) também observaram respostas semelhantes ao analisar as fibras lignocelulósicas de diferentes lodos de esgoto. Estes autores obtiveram estreita relação entre as taxas de biodegradação e os teores de hemicelulose nos lodos avaliados, indicando a viabilidade deste parâmetro para estimar a degradação dos lodos de esgoto.

De modo geral, a celulose foi a fração menos alterada em comparação com a hemicelulose e a lignina, ainda que o fungo *Trametes versicolor* tenha se destacado, com redução de 14% neste polímero. Esses resultados estão coerentes com os relatos de Andrade (2004) e Andrade *et al.* (2006), e provavelmente estejam relacionados com a maior recalcitrância da celulose em relação a hemicelulose. Na média dos quatro fungos, a lignina foi degradada em maior porcentagem que a celulose (Quadro 4), apesar de ser um polímero reconhecidamente mais recalcitrante. Este comportamento pode ser devido aos quatro fungos avaliados serem causadores da podridão branca, os quais são excelentes produtores de enzimas lacase, manganês peroxidase e lignina peroxidase, que atuam sobre

os componentes da lignina. Outra característica importante dos fungos de podridão branca é sua capacidade de atuar simultaneamente sobre a celulose, hemicelulose e lignina, fato comprovado com base nos dados do Quadro 4. O teor de proteína bruta foi reduzido, em média, em 13% no lodo de esgoto. Esta redução pode estar associada a conversão do N em formas minerais pela ação dos fungos biodegradadores ou dos outros microrganismos proteolíticos presentes no lodo de esgoto (Loll e Bollag, 1983).

A utilização do lodo de esgoto na agricultura é na maioria dos países a alternativa mais viável para a correta destinação deste resíduo (Barros *et al.*, 2011). Isto porque o lodo de esgoto apresenta em sua composição macro e micronutrientes essenciais ao crescimento das plantas (Ros *et al.*, 1991). Além disto, o lodo de esgoto adiciona matéria orgânica ao solo, o que resulta em diversos benefícios, como no aumento da capacidade de troca de cátions, da retenção de água e da atividade biológica (Melo *et al.*, 2001; Barros *et al.*, 2011).

Se a disposição final do lodo de esgoto for o solo, é provável que a degradação pelos fungos inoculados continue ocorrendo, pois o lodo de esgoto que é retirado dos leitos de secagem estará colonizado por estes fungos. Assim, a degradação dos constituintes do lodo de esgoto poderá ser ainda maior que aquela observada no presente trabalho. A continuidade da degradação poderá inclusive aumentar o valor fertilizante do lodo de esgoto, devido a maior mineralização dos nutrientes contidos em seus constituintes orgânicos.

Outro aspecto importante é que provavelmente não será necessário a reinoculação dos fungos degradadores a cada nova adição de lodo de esgoto

Quadro 4 - Porcentagem de polímeros presentes na composição do lodo de esgoto após ser biodegradado por 100 dias pelos fungos na temperatura de 32°C, expressos em base seca. Os valores são média de três repetições (\pm desvio padrão)

Fungo	Hemicelulose	Celulose	Lignina	Proteína Bruta
Sem inoculação	16,51 (\pm 0,14)	19,52 (\pm 0,28)	12,84 (\pm 0,11)	8,13 (\pm 0,25)
<i>Schizophyllum commune</i>	11,55 (\pm 1,12)	18,22 (\pm 1,87)	11,56 (\pm 0,81)	7,06 (\pm 0,87)
<i>Trametes versicolor</i>	9,37 (\pm 1,12)	16,73 (\pm 0,95)	10,98 (\pm 1,31)	7,05 (\pm 1,25)
<i>Agaricus bisporus</i>	9,98 (\pm 1,32)	19,63 (\pm 0,44)	11,01 (\pm 0,74)	6,98 (\pm 0,75)
<i>Fomes fasciatus</i>	13,33 (\pm 1,36)	18,25 (\pm 1,64)	11,60 (\pm 0,51)	7,11 (\pm 1,12)

nos leitos de secagem. Isto porque uma pequena quantidade de lodo de esgoto colonizado pelos fungos poderá ser mantida nos leitos de secagem para funcionar como inóculo para o novo lodo de esgoto advindo do sistema de tratamento.

CONCLUSÕES

A inoculação dos fungos do filo Basidiomycota causadores de podridão branca *Agaricus bisporus*, *Fomes fasciatus*, *Schizophyllum commune* e *Trametes versicolor* aumenta a degradação do lodo de esgoto, sendo esta degradação mais acentuada nas temperaturas mais elevadas avaliadas. A biodegradação do lodo de esgoto pelos fungos reduz os teores de carbono orgânico total, do carbono solúvel e dos

polímeros presentes no lodo de esgoto, sendo as maiores reduções observadas na fração hemicelulose, na lignina e na celulose, respectivamente. A inoculação de fungos degradadores nos leitos de secagem apresenta potencial biotecnológico para aumentar a degradação do lodo de esgoto gerado nas estações de tratamento.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos revisores e às agências de fomento, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulla, E.; Tzanov, T.; Costa, S.; Robra, K.H.; Paulo, A.C. & Gubitz, G.M. (2000) – Decolorization and detoxification of textile dyes with a laccase from *Trametes hirsuta*. *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 66, n. 8, p. 3357-3362. <http://dx.doi.org/10.1128/AEM.66.8.3357-3362.2000>
- Adams J.D.W. & Frostick L.E. (2008) – Investigating microbial activities in compost using mushroom (*Agaricus bisporus*) cultivation as an experimental system. *Bioresource Technology*, vol. 99, n. 5, p. 1097-1102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.019>
- Alcântara, P.B. (2007) – *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 364 p.
- Alonso, S.K.; Silva, A.G. & Kasuya, M.C.M. (2007) – Isolamento e seleção de fungos causadores da podridão branca da madeira em florestas de *Eucalyptus* spp. com potencial de degradação de cepas e raízes. *Revista Árvore*, vol.31, n. 1, p. 145-155. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000100016>
- Andrade, C.A. de (2004) – *Fração orgânica de biossólido e efeito no estoque de carbono e qualidade da matéria orgânica de um Latossolo cultivado com Eucalipto*. Tese de Doutorado em Agronomia. Escola Superior Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 135 p.
- Andrade, C.A.; Oliveira, C. & Cerri, C.C. (2006) – Cinética de degradação da matéria orgânica de biossólidos após aplicação no solo e relação com a composição química inicial. *Bragantia*, vol.65, n. 4, p. 659-668. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052006000400017>
- Araújo, F.F.; Gil, F.G. & Tiritan, C.S. (2009) – Lodo de esgoto na fertilidade do solo, na nutrição de *Brachiaria decumbens* e na atividade da desidrogenase. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, vol.39, p. 1-6.
- Baptista, N.M.Q. (2012) – Produção das Enzimas Lignina Peroxidase e Lacase por Fungos Filamentosos. *Scientia Plena*, vol. 8, n. 1, p. 8-14.
- Barros, I.T.; Andreoli, C.V.; Junior, I.G.S. & Costa, A.C.S. (2011) – Avaliação agrônômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, n. 6, p. 630-638. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000600014>
- Bernal, M.P.; Paredes, C.; Sanchez-Monedero, M.A. & Cegarra, J. (1998) – Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, vol. 63, n. 1, p. 91-99. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00084-9)

- Berwanger, A.L.; Ceretta, C.A. & Santos D.R. (2008) – Alterações no teor de fósforo no solo com aplicação de dejetos líquidos de suínos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 32, n. 6, p. 14-26. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600029>
- Brady, C.B. & Weil, R.R. (2002) – *The nature and properties of soils*. 3th ed. New York: Prentice Hall, 960 p.
- Chen, H.; Harmon, M.E.; Griffiths, R.P. & Hicks, W. (2000) – Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing wood roots. *Forest Ecology and Management*, vol. 138, n. 1-3, p. 51-64. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00411-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00411-4)
- CONAMA (2006) – Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA n. 375/2006, de 30 de agosto de 2006 – In: *Resoluções, 2006*. [cit. 2016.10.21]. <http://www.mma.gov.br/conama/>
- Damasceno, S. & Campos, J.R. (2006) – *Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitários para Uso Agrícola*. [cit. 2017.04.14]. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/bratar035.pdf>
- De Vries, O.M.H.; Kooistra, W.H.C.F. & Wessel, J.G.H. (1986) – Formation of an extracellular laccase by a *Schizophyllum commune* dikaryon. *Journal of General Microbiology*, vol. 132, n. 10, p. 2817-2826. <http://dx.doi.org/10.1099/00221287-132-10-2817>
- Ferreira, D.F. (1998) – Sisvar – sistema de análise de variância para dados balanceados. UFLA, Lavras. 19 p.
- Font, X. (2003) – Black liquor detoxification by lacase of *Trametes versicolor* pellets. *Journal of Chemical and Biotechnology*, vol. 78, n. 5, p. 548-554. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.834>
- Fuentes, S.; Méndez, V.; Aguila, P. & Seeger, M. (2014) – Bioremediation of petroleum hydrocarbons: catabolic genes, microbial communities, and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 98, n. 11, p. 4781-4794. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-014-5684-9>
- Galdos, M.V.; Maria, I.C. & Camargo, O.A. (2004) – Atributos químicos e produção de milho em um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 28, n. 3, p. 569-577. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000300017>
- Isikhuemhen, O.S.; Anoliefo, G.O. & Oghale, O.I. (2003) – Bioremediation of crude oil polluted soil by white rot fungus, *Pleurotus tuberregium* (Fr.) Sing. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 10, n. 2, p. 108-112. <http://dx.doi.org/10.1065/espr2002.04.114>
- Jacques, R.J.S.; Bento, F.M. & Camargo, F.A.O. (2007) – Biodegradação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos. *Revista Ciência e Natura*, vol. 29, p. 7-24.
- JSWA (1990) – *A reawide sewage sludge treatment and disposal project*. Japan Sewage Works Agency, Tóquio. [cit. 2016.03.21]. www.env.go.jp/en/wpaper/1990/eae190000000030.html
- Kamida, H.M.; Durrant, L.R.; Monteiro, R.T.R. & Armas, E.D. (2005) – Biodegradação de Efluente têxtil por *Pleurotus sajor-caju*. *Química Nova*, vol. 28, n. 4, p. 629-632. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000400014>
- Kirk, T.K. & Chang, H. (1981) – Potencial applications of bio-lignolytic systems. *Enzyme and Microbial Technology*, vol. 3, n. 3, p. 189-196. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(81\)90085-5](https://doi.org/10.1016/0141-0229(81)90085-5)
- Libra, J.A.; Borchert, M. & Banit, S. (2003) – Competition strategies for the decolorization of a textile-reactive dye with the white-rot fungi *Trametes versicolor* Under Nonsterile Conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 82, n. 6, p. 736-744. <http://dx.doi.org/10.1002/bit.10623>
- Loll, M.J. & Bollag, J.M. (1983) – Protein transformation in soil. *Advances in Agronomy*, vol. 36, p. 351-382.
- Machado, M.F.S. (2001) – *A Situação Brasileira dos Biossólidos*. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 109 p.
- Melo, W.J.; Marques, M.O.; Melo, V.P. (2001) – O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: Tsutiya, M.T.; Comparini, J.B.; Além Sobrinho, P.; Hespagnol, I.; Carvalho, P.C.T.; Melfi, A.J.; Melo, W.J. & Marques, M.O. (Ed.) – *Biossólidos na agricultura*. SABESP, São Paulo, p. 289-363.
- Miranda, R.; Gomes, E.B.; Gouveia, E.R.; Machado, K.M.G. & Gusmao, N.B. (2010) – Decolorization of laundry effluent by filamentous fungi. *African Journal of Biotechnology*, vol. 11, n. 18, p. 4216-4224.
- Oliveira, G.S.S.; Araújo, C.V.M.; Fernandes, J.G.S. (2009) – Microbiologia de sistema de lodos ativados e sua relação com o tratamento de efluentes industriais: a experiência da Cetrel. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 14, n. 2, p. 183-191. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522009000200006>
- Olsen, S.R. & Sommer, L.E. (1982) – Phosphorus. In: Page, A.L.; Miller, R.H. & Keeney, Q.R. (Eds.) – *Methods of soil analysis, Part 2. Chemical and microbiological properties*. ASA-Soil Science Society American, Madison, p. 403-430.

- Pallerla, S. & Chambers, R. (1998) –Reactor development for biodegradation of pentachlorophenol. *Catalysis Today*, vol. 40, n. 1, p. 103-111. [http://doi.org/10.1016/S0920-5861\(97\)00128-4](http://doi.org/10.1016/S0920-5861(97)00128-4)
- Pandey, P.; Pathak, H. & Dave, S. (2016) – Microbial Ecology of Hydrocarbon Degradation in the Soil: A Review. *Research Journal of Environmental Toxicology*, vol. 10, n. 1, p. 1-15. <http://dx.doi.org/10.3923/rjet.2016.1.15>
- Pedroza, M.M.; Vieira, G.E.G.; Sousa, J.F.; Pickler, A.C.; Leal, E.R.M. 6 Milhomen, C.C. (2010) – Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. *Revista Liberato*, vol. 11, p. 147-157.
- Rocha, T.M. & Shiota, R. (1999) –Disposição de lodo de esgoto. *Revista de Estudos Ambientais*, vol. 1, p. 12-24.
- Rodrigues, N.T.; Arruda, R.S.; Soares, C.F.; Machado, I.F. & Arnaldo, L.F. (2006) –Produtividade de Milho e de Feijão Consorciados Adubados com Diferentes Formas de Lodo de Esgoto. *Revista de Ciencia del Suelo y Nutricion Vegetal*, vol. 6, n. 1, p. 9-18. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912006000100006>
- Ros, C.O.; Aita, C.; Ceretta, C.A. & Fries, M.R. (1991) – Lodo de esgoto: Efeito imediato no milheto e residual na associação aveia ervilhaca. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 17, p. 257-261.
- Selvam, K.; Swaminathan, K.; Song, M.H. & Chae, K.S. (2002) – Biological treatment of a pulp and paper industry effluent by *Fomes lividus* and *Trametes versicolor*. *World Journal Microbiology & Biotechnology*, vol. 18, n. 6, p. 523-526. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1016370110697>
- Silva, M.L.S.; Vitti, G.C. & Trevizam, A.R. (2007) – Concentração de metais pesados em grãos de plantas cultivadas com diferentes níveis de contaminação. *Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 42, n. 4, p. 527-535. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400011>
- Souza, A.F. & Rosado, F.R. (2009) – Utilização de fungos basidiomicetes em biodegradação de efluentes têxteis. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, vol. 2, p. 121-139.
- Stotzky, G. (1965) – Microbial respiration. In: Black, C.A. (Ed.) – *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Madison. vol. 2, p. 1551-1572.
- Tedesco, M.J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H. & Volkweiss, S.J. (1995) – *Análise de solo, plantas e outros materiais*. 2ª ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 147p. (Boletim Técnico, 5).
- Van Soest, P.J.; Robertson, J.B. & Lewis, B.A. (1991) – Methods for dietary fiber, neutral-detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, vol. 74, n. 10, p. 3583-3597. [http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)