

Aceleração do Processo de Compostagem. Uma revisão

Rolan Roney Ressetti^{1*}, Sandro Xavier de Campos²

DOI: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2020.20286>

Resumo

A compostagem é uma das formas mais viáveis para o tratamento de resíduos orgânicos. Porém seu inconveniente é o tempo, a demora que o processo convencional leva. Desta forma tem-se buscado maneiras de acelerar o processo de compostagem. Existem processos que empregam aeração, aquecimento e agitação mecânica. Tais procedimentos tem se revelado eficientes, porém necessitam de aparatos extras, o que encarece o processo. Devido aos maiores custos envolvidos em tais procedimentos, os mesmos não serão levados em consideração neste estudo, visto que uma das maiores vantagens da compostagem é justamente o seu baixo custo. São vários os procedimentos possíveis de acelerar o processo de compostagem. Tais procedimentos podem ser divididos em: pré-tratamento, adição de co-substratos e mudanças no processo. A utilização de biocarvão e de inóculos microbianos têm sido bastante eficientes na aceleração do processo de compostagem. A celulase, apesar de ter sido citada como uma substância bastante viável para acelerar o processo, ainda não foi utilizada em muitos estudos com esta finalidade.

Palavras-chave: Compostagem. Aceleração da Compostagem. Biocarvão. Inoculantes. Celulase.

Acceleration of the Composting Process. A review

Abstract

Composting is one of the most viable ways to treat organic waste. However, its inconvenience is the time, the delay that the conventional process takes. In this way, ways have been sought to speed up the composting process. There are processes that employ aeration, heating and mechanical agitation. Such procedures have proven to be efficient, but require extra devices, which makes the process more expensive. Due to the higher costs involved in such procedures, they will not be taken into account in this study, since one of the greatest advantages of composting is precisely its low cost. There are several possible procedures to speed up the composting process. Such procedures can be divided into: pre-treatment, addition of co-substrates and changes in the process. The use of biochar and microbial inoculants have been very efficient in accelerating the composting process. Cellulase, despite having been cited as a very viable substance to accelerate the process, has not been used in many studies for this purpose.

Keywords: Composting. Acceleration of Composting. Biochar. Inoculants. Cellulase.

¹Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, PR. Brasil
<https://orcid.org/0000-0003-0924-2017>

²Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, PR. Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-7585-7573>

*Autor para correspondência: rrressetti@hotmail.com

Introdução

Um dos grandes problemas enfrentados atualmente pela humanidade é a geração de resíduos. Dentre os resíduos sólidos urbanos cerca de 50 a 60% são constituídos de resíduos orgânicos. Uma das alternativas mais viáveis para estes resíduos é a sua biodecomposição, gerando um composto para ser aplicado ao solo (Albrecht *et al.*, 2011; Bustamante *et al.*, 2014; Jurado *et al.*, 2014; Külçü; Yaldiz, 2014; Reyes-Torres *et al.*, 2018; Sundberg; Navia, 2014; Wang *et al.*, 2016).

Através deste processo de degradação microbiana ocorre a eliminação de patógenos, imobilização de nutrientes que ficam disponíveis por mais tempo no solo e a fixação de metais tóxicos (que têm seu efeito neutralizado, ao menos temporariamente) gerando um composto para ser empregado como adubo orgânico (Briški *et al.*, 2012; Cosic *et al.*, 2013; Laschermes *et al.*, 2012; Mehta *et al.*, 2014; Rashad; Saleh; Moselhy, 2010; Reyes-Torres *et al.*, 2018; Tandy *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2016).

Por meio da compostagem, resíduos poluentes orgânicos são degradados pela atividade de diversos microrganismos, promovendo a decomposição de substâncias tóxicas (Briški *et al.*, 2012; Cosic *et al.*, 2013; Lashermes *et al.*, 2012). Desta forma podem ser tratados diversos substratos residuais (como resíduos sólidos orgânicos, resíduos agrícolas e agroindustriais, lodo de esgoto, lodo de tratamento de resíduos industriais, fumo de cigarros contrabandeados apreendidos, resíduos de tabaco, etc.) transformando estes materiais poluentes e tóxicos em um composto estabilizado, rico em substâncias húmicas, para ser aplicado ao solo (Campos; Ressetti; Zittel, 2014; Fialho *et al.*, 2010; Malakahmad *et al.*, 2017; Piotrowska-Cyplik *et al.*, 2013; Zittel *et al.*, 2018).

A Resolução nº 481 de 03 de outubro de 2017, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, define como **compostagem** o processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem; sendo denominado **composto** o produto estabilizado, oriundo do processo de compostagem, podendo ser caracterizado como fertilizante orgânico, condicionador de solo e outros produtos de uso agrícola.

De acordo com esta Resolução as unidades de compostagem devem atender a requisitos de prevenção e controle ambiental como a adoção de medidas para minimizar lixiviados, emissão de odores e geração de chorume; proteção do solo por meio da impermeabilização; instalação de sistemas de coleta, manejo e tratamento dos líquidos lixiviados gerados; implantação de sistema de recepção e armazenamento de resíduos orgânicos *in natura* garantindo o controle de odores, de geração

de líquidos, de vetores e de incômodos à comunidade; adoção de medidas de isolamento e sinalização da área; controle dos resíduos a serem tratados e da destinação final ambientalmente adequada dos resíduos gerados.

É vedada a adição dos seguintes resíduos: resíduos perigosos, de acordo com a Legislação e Normas Técnicas Aplicáveis; lodo de estações de tratamento de efluentes de estabelecimentos de serviços de saúde, de portos e aeroportos; lodos de estações de tratamento de esgoto sanitário quando classificado como resíduo perigoso.

O processo de compostagem passa naturalmente por um período de aquecimento denominado fase termofílica, onde os microrganismos termófilos degradam gorduras, celulose, hemicelulose e lignina, ocorrendo uma intensa degradação da matéria orgânica, com grande aumento de temperatura e destruição de patógenos. Esta Resolução também estabelece o período de tempo e temperatura necessários para a higienização dos resíduos: Para sistemas de compostagem abertos que atingem uma temperatura de 55°C o período é de pelo menos 14 dias, para sistemas abertos que chegam a 65°C é de 3 dias e para sistemas fechados que atingem 60°C é de 3 dias.

A Instrução Normativa nº 25 de 23/07/2009, da Secretaria de Defesa Agropecuária, do **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**, que trata dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura, estabelece que todo fertilizante orgânico composto, obtido pela separação da parte orgânica dos resíduos sólidos domiciliares e sua compostagem, resultando em produto de utilização segura na agricultura, deve apresentar as seguintes especificações: Umidade máxima de 50%; pH mínimo igual a 6,5; nitrogênio total mínimo de 0,5%; carbono orgânico mínimo igual a 15%; relação C/N equivalente a no máximo 20.

Aceleração da compostagem

A compostagem é uma das formas mais viáveis para o tratamento de resíduos orgânicos. Porém seu inconveniente é o tempo, a demora que o processo convencional leva. Desta forma tem-se buscado maneiras de acelerar o processo de compostagem.

Tanto para a compostagem em leiras como em reatores existem processos que empregam aeração, aquecimento e agitação mecânica. Tais procedimentos tem se revelado eficientes, porém necessitam de aparatos extras para realizarem a aeração, o aquecimento e a agitação mecânica, o que encarece o processo (Jiang *et al.*, 2015; Kasinski; Wojnowska-Baryla, 2014; Onwosi *et al.*, 2017; Reyes-Torres *et al.*, 2018).

Jiang *et al.* (2015) estudando a produção rápida de fertilizante orgânico por fermentação aeróbia dinâmica

a alta temperatura de resíduos alimentares, observaram que manter a matriz de compostagem em colisão contínua e atrito, sob uma temperatura relativamente alta, pode acelerar significativamente o progresso da compostagem. Utilizando um biorreator projetado de acordo com este processo conseguiam obter um fertilizante orgânico em apenas 96 horas.

Porém, devido aos maiores custos envolvidos em tais procedimentos, os mesmos não serão levados em consideração neste trabalho, o qual buscará se ocupar de procedimentos que não utilizem mecanismos adicionais que possam gerar o encarecimento do processo, visto que uma das maiores vantagens da compostagem é justamente o seu baixo custo (Albrecht *et al.*, 2011; Bustamante *et al.*, 2014; Campos; Resseti; Zittel, 2014; Jurado *et al.*, 2014; Külcü; Yaldiz, 2014; Reyes-Torres *et al.*, 2018; Sundberg; Navia, 2014; Wang *et al.*, 2016; Zittel *et al.*, 2018).

Segundo Reyes-Torres *et al.* (2018), em sua revisão sistemática sobre compostagem, as estratégias mais promissoras para melhorar o processo, as quais levaram com sucesso à redução do tempo e conseguiram transformar substâncias recalcitrantes em um produto final de alta qualidade, foram:

- pré-tratamento: tratamento inicial físico ou químico, sendo mais comum o físico, visando a redução do tamanho das partículas (trituração e separação de frações dos resíduos);
- adição de co-substratos: buscando alterações energéticas (por exemplo, açúcar não refinado, rocha fosfática, resíduos alimentares, cinzas voláteis), materiais de volume (por exemplo, biocarvão, aparas de madeira) ou inóculo microbiano (por exemplo, consórcios fúngicos);
- mudanças no processo: variações nos parâmetros operacionais (como aeração, temperatura e compostagem bifásica), os quais, no entanto, geram encarecimento do processo.

Pré-tratamento

Tratamento inicial para otimizar o processo de compostagem, podendo ser físico ou químico, sendo mais comum o físico visando a redução do tamanho das partículas (trituração e separação de frações dos resíduos) (Bernal; Alburquerque; Moral, 2009; Haug, 1993; Karnchanawong; Mongkontep; Praphunsri, 2017; Onwosi *et al.*, 2017; Reyes-Torres *et al.*, 2018; Sundberg; Jönsson, 2008; Zhou *et al.*, 2014).

Segundo Reyes-Torres *et al.* (2018) partículas pequenas tendem a criar uma massa que dificulta a formação de poros e partículas grandes impedem o aumento da temperatura da matéria prima, de forma que a degradação se torna mais lenta (Bernal; Alburquerque; Moral, 2009; Onwosi *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2014).

Zhang e Sun (2014) avaliaram os efeitos da escolha de diferentes tamanhos de partículas (10, 15 e 25 mm de diâmetro) em seu estudo de co-compostagem de resíduos verdes. Ao utilizarem partículas com 15 mm constataram um aumento no conteúdo de nitrogênio total no composto e uma redução na relação C/N em comparação com o controle, provavelmente devido à maior degradação da matéria orgânica e à manutenção do teor de nitrogênio na mistura. Neste estudo os autores destacaram a importância de selecionar um tamanho de partícula adequado para a transformação de componentes recalcitrantes, como a lignocelulose, uma vez que a exposição do interior das partículas poderia ajudar na degradação da celulose, reduzindo o tempo de processamento. Assim sendo, é necessário fragmentar previamente os resíduos, para homogeneizar e reduzir o volume do material, aumentando a área de superfície, promovendo a degradação das substâncias recalcitrantes e permitindo a infiltração de água o que também reduz a evaporação a partir da superfície. No entanto partículas muito pequenas podem formar uma massa que dificulte a formação de poros. Esta estratégia contribui simultaneamente para a degradação da matéria orgânica e a redução do tempo de processamento.

O pré-tratamento químico mais comum é a adição de materiais alcalinos para correção de pH ácido para melhorar o desenvolvimento microbiano (Haug, 1993; Karnchanawong; Mongkontep; Praphunsri, 2017; Sundberg; Jönsson, 2008).

De acordo com Sundberg e Jönsson (2008) o pH do substrato e a produção de ácidos no início do processo podem influenciar no aparecimento de certos grupos microbianos que interferem na transformação da matéria orgânica, sendo que a maior variabilidade de espécies microbianas ocorre em pHs entre 5,5 e 8,0.

Karnchanawong, Mongkontep e Praphunsri (2017) estudando o efeito do pré-tratamento de resíduos verdes por hidróxido de sódio e cinzas de biomassa de usinas termoeletricas, no processo de compostagem, constataram que a adição de 1 a 2% de NaOH e 6,2% de cinzas pode melhorar a decomposição dos resíduos verdes reduzindo os teores de lignina duas vezes mais que o controle. Porém doses mais altas de material alcalino podem aumentar a perda de nitrogênio devido à volatilização da amônia em pH mais alto.

Na literatura também são citados outros tipos de pré-tratamentos.

Kuryntseva, Galitskaya e Selivanovskaya (2016) em seu estudo sobre mudanças nas propriedades de resíduos orgânicos, durante seu tratamento biológico, concluíram que o pré-tratamento anaeróbio da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos constitui uma ferramenta de aceleração efetiva para a compostagem, tanto em relação à decomposição da matéria orgânica quanto à diminuição da fitotoxicidade do composto obtido.

Yu et al. (2019) pesquisando a aplicação de congelamento e descongelamento sazonal para pré-tratamento de matéria-prima a fim de acelerar a compostagem, constataram que esta estratégia aumenta significativamente a mineralização do carbono orgânico total, promove a degradação da lignina e da celulose e a síntese de substâncias húmicas. De acordo com os autores, o pré-tratamento sazonal por congelamento e degelo é uma estratégia ecológica (sem aditivos que podem ter efeitos indesejados no meio ambiente) e econômica (sem aditivos ou tratamentos caros, mas apenas utilizando a baixa temperatura no inverno) para acelerar o processo de compostagem de resíduos verdes em regiões frias.

Co-substratos

De acordo com Reyes-Torres et al. (2018) diferentes estudos têm utilizado co-substratos para melhorar a qualidade do produto final ou reduzir a duração do processo de compostagem.

Em geral, a literatura sugere a adição de materiais ou microrganismos para complementar as características do material a ser compostado:

- Materiais de volume: material (orgânico ou inorgânico) usado para controlar a umidade, aumentar a porosidade e o suporte estrutural e melhorar a circulação do ar na mistura;
- Materiais de emenda: material adicionado ao substrato ou ao produto final para melhorar o desenvolvimento do processo ou a qualidade do produto; portanto, utilizado para melhorar as características químicas dos materiais, como deficiências em N, C ou algum outro elemento;
- Aditivos: mistura de diferentes tipos de microrganismos (ou seja, inoculantes), nutrientes minerais, formas facilmente disponíveis de C, enzimas e compostos para equilibrar o pH; usados para melhorar a atividade microbiana.

Xie et al. (2012) pesquisaram a adição de atapulgita modificada na redução da emissão de óxido nítrico e amônia a partir de esterco de galinha compostado aerobicamente. A atapulgita é um mineral de silicato de magnésio e alumínio hidratado, com uma estrutura cristalina de cadeia laminada, onde os cristais contêm quantidades variáveis de Na^+ , Ca^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+} e estão presentes como agulhas, fibras ou aglomerados fibrosos. Em sua pesquisa os autores constataram que a adição de atapulgita, além de reduzir a emissão de óxido nítrico e amônia, aumentou as concentrações de nitrato, promoveu a degradação da matéria orgânica, aumentou os índices de germinação das sementes e acelerou o processo de compostagem.

Costa et al. (2017) pesquisando a compostagem para o tratamento de resíduos agroindustriais de frangos

de corte, e seleção da fonte de carbono para otimizar o processo e melhorar a qualidade do composto final, constataram que dentre as fontes de carbono testadas, os resíduos de algodão, aparas de árvores urbanas, bagaço de cana ou capim Napier, são boas alternativas em relação à otimização da área de compostagem. O uso desses agentes de volume é viável e sustentável porque eles estão disponíveis regionalmente e permitem que o processo de compostagem termine em aproximadamente três meses. Além de diminuir o tempo de compostagem, essas fontes de carbono, principalmente resíduos de fibra de algodão, também permitem que os nutrientes permaneçam no composto final, evitando o impacto ambiental (causado pelo seu descarte indevido) e agregando valor agrônomico e comercial.

Wang et al. (2017) em sua pesquisa sobre a comparação de aditivos para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e de amônia durante co-compostagem de lodo de esgoto, constataram que a adição de 10% de zeólito, em massa, tamponou o pH, aumentou consideravelmente a temperatura, melhorou a degradação da matéria orgânica, diminuiu a emissão de amônia e de gases do efeito estufa e reduziu o período de maturidade em duas semanas. Os zeólitos são aluminosilicatos hidratados que possuem uma estrutura aberta acomodando uma grande variedade de cátions, como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , entre outros, os quais estão fracamente ligados à estrutura, podendo ser substituídos por outros em solução.

Awasthi et al. (2018a) estudando o efeito da mistura de aditivos em atividades enzimáticas, degradação da matéria orgânica e humificação, durante a co-compostagem de biossólidos, concluíram que a adição de 30% de zeólito mais 1% de calcário, aumenta significativamente as atividades enzimáticas, melhora a degradação e humificação da matéria orgânica, diminui a biodisponibilidade de metais pesados e reduz o período de compostagem em duas semanas.

Waqas et al. (2019), em seu estudo sobre o potencial de zeólitos na otimização da compostagem de resíduos alimentares, concluíram que a adição de zeólito natural modificado a 15% do total de resíduos tamponou o pH ácido, aumentou a degradação da matéria orgânica. Além disso, de acordo com os autores, a adição de zeólitos contribuiu positivamente para o conteúdo de umidade, condutividade elétrica, matéria orgânica, carbono total, nitrogênio mineral, índice de nitrificação e índice de germinação. Neste estudo a estabilidade foi alcançada após 60 dias, originando um composto de acordo com os padrões internacionais recomendados por vários países.

Biocarvão

O biocarvão é um aditivo bastante citado na literatura (Agyarko-Mintah et al., 2017; Akdeniz, 2019; Du et al., 2019; Godlewska et al., 2017; Liu et al., 2017; Liu, Wang, Lei, 2019; Sánchez-Monedero et al., 2018; Vandecasteele et al., 2016; Waqas et al., 2018; Zhang et

al., 2014; Zhou *et al.*, 2019), merecendo um tópico à parte.

O biocarvão ou *biochar* é um material rico em carbono, obtido pela pirólise de biomassa em ambiente com limitação de oxigênio, que pode melhorar a qualidade do solo, devido ao aumento da microporosidade, à reserva de carbono, à retenção de água e à sua capacidade ativa de adsorção de cátions do solo e da água de irrigação, sendo também utilizado como aditivo na compostagem (Marmiroli *et al.*, 2018; Reyes-Torres *et al.*, 2018; Sánchez-Monedero *et al.*, 2018; Vandecasteele *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018).

Zhang *et al.* (2014) em sua pesquisa sobre o uso de biocarvão na compostagem, para melhorar a humificação e a degradação do lodo de esgoto, chegaram à conclusão de que o biocarvão acelerou a humificação das lamas orgânicas, ampliou as taxas de absorção de oxigênio durante a degradação aeróbica e aumentou as concentrações de compostos semelhantes a ácidos fúlvicos e húmicos no composto.

Vandecasteele *et al.* (2016) em seu estudo sobre como a adição de biocarvão, antes e depois da compostagem, afeta a qualidade do composto, as perdas de N e a absorção de P, constataram que a adição de biocarvão no início do processo diminui o tempo de compostagem, promove a decomposição da matéria orgânica durante a fase bio-oxidativa, reduz significativamente as perdas de N, possibilita maiores concentrações de P prontamente disponíveis e reduz a emissão de gases do efeito estufa.

Godlewska *et al.* (2017) em seu trabalho de revisão sobre biocarvão para melhoria da compostagem e redução de contaminantes, observaram que a adição de biocarvão acelera o processo de compostagem, reduz as perdas de nutrientes (Ca, Mg, N, etc.), aumenta a nitrificação, promove a formação de substâncias húmicas, bem como a imobilização de metais pesados (reduzindo sua biodisponibilidade), e diminui a emissão de gases do efeito estufa.

Segundo os autores, a adição de biocarvão favorece a compostagem de diversas maneiras: Contribui para manter uma umidade adequada, pois possui uma alta capacidade de retenção de água, o que favorece a proliferação de microrganismos, e com menor perda de água haverá menor perda de nutrientes. Devido à sua grande porosidade, promove uma maior oxigenação, o que torna o processo mais eficiente, acelerando a degradação da matéria orgânica através da estimulação da atividade microbiana e enzimática, que por sua vez causa um aumento de temperatura. Contribui para a obtenção de um composto com maior teor de P, K, Ca e Mg, o que está relacionado à sua superfície carregada negativamente que atrai cátions K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} através de interações eletrostáticas, impedindo que os mesmos sejam lixiviados. Promove o aumento do nitrogênio total, por proporcionar um ambiente favorável às bactérias nitrificantes, e

a diminuição das perdas de nitrogênio devido à adsorção de NH_4^+ e NH_3 volátil. Apresenta grande afinidade com metais pesados, promovendo sua imobilização, de modo que os mesmos não serão eliminados, mas terão sua mobilidade significativamente reduzida, diminuindo o risco de sua migração para o meio ambiente. Absorve poluentes orgânicos dos mais variados tipos, o que reduz sua concentração biodisponível e, além disso, estimula a proliferação de microrganismos potencialmente capazes de degradá-los. Diminui emissão de CO_2 , devido à sua sorção, e estimula o desenvolvimento de microrganismos metanotróficos, reduzindo a emissão de CH_4 .

Agyarko-Mintah *et al.* (2017) em sua pesquisa sobre a utilização do biocarvão para reduzir a emissão de amônia e melhorar a retenção de nitrogênio, na compostagem de restos de frango, provenientes da indústria avícola, concluíram que a adição de biocarvão pode ser considerada uma estratégia eficaz para reduzir as perdas de N na compostagem e melhorar o valor nutricional do produto acabado.

Liu *et al.* (2017) em seu trabalho sobre o papel do biocarvão de bambu, durante a compostagem aeróbica de esterco de frango, chegaram à conclusão de que a adição de biocarvão aumenta a porosidade, melhora a permeabilidade ao ar assegurando um ambiente aeróbico, reduz as emissões de NH_3 , CH_4 e demais gases do efeito estufa e facilita o crescimento de vários microrganismos que promovem a degradação da matéria orgânica e a maturação, acelerando o processo.

Sánchez-Monedero *et al.* (2018) estudando o papel do biocarvão como aditivo na compostagem de resíduos orgânicos, constataram que o uso de biocarvão proporciona condições favoráveis que incluem grande porosidade, aumento da área superficial e da capacidade de troca catiônica, maior desenvolvimento das comunidades microbianas, maior retenção de nutrientes, redução na emissão de gases do efeito estufa e imobilização de metais pesados. Concluindo que o biocarvão é um substrato ideal para reduzir o tempo do processo de compostagem e aumentar a qualidade do composto.

Segundo Waqas *et al.* (2018) em seu estudo sobre a otimização da compostagem de resíduos alimentares, a adição de biocarvão, numa taxa de 15 % em peso, causou um rápido aumento da temperatura, alta decomposição da matéria orgânica, aumentou o pH do composto e favoreceu a nitrificação.

Akdeniz (2019) em sua revisão sistemática sobre o uso do biocarvão na compostagem de resíduos animais, constatou que a sua aplicação numa taxa de 5 a 10% pode diminuir o pH do material de compostagem, impedir a formação de lixiviados, reduzir as emissões de amônia, metano e óxido nítrico e estender a fase termofílica, otimizando o processo.

De acordo com este autor a adição de biocarvão influi de várias maneiras na comunidade microbiana. O biocarvão constitui um excelente *habitat* para os microrganismos, servindo como fonte de nutrientes, apresentando uma alta capacidade de retenção de água e porosidade, grande área de superfície e absorção de carbono orgânico dissolvido. Também propicia condições ambientais que estimulam o desenvolvimento microbiano, facilitando a aeração da mistura, não apenas como um agente de volume, mas também devido aos microporos presentes em sua estrutura, que melhoram a micro aeração. A maior proliferação de microrganismos irá influir de modo positivo na temperatura, na degradação e mineralização da matéria orgânica, na diminuição das emissões de gases de efeito estufa e no conteúdo de nutrientes do produto final. Porém a utilização de quantidades superiores a 10% de biocarvão pode causar perda de água e dissipação de calor, o que seria prejudicial ao processo.

Liu, Wang e Lei (2019) em sua pesquisa sobre o impacto positivo do biocarvão no equilíbrio térmico durante a compostagem de esterco suíno a temperatura ambiente relativamente baixa, constataram que o biocarvão prolonga significativamente a duração do estágio termofílico e portanto tem potencial para desempenhar um papel positivo na melhoria da compostagem aeróbica a baixa temperatura.

Zhou et al. (2019) estudando a influência do biocarvão na sucessão de comunidades microbianas e nas suas funções metabólicas, durante a compostagem de palha de arroz com esterco de porco, constataram que a adição de biocarvão melhorou a maturidade e fertilidade do composto, bem como regulou significativamente a estrutura e as funções da comunidade microbiana, acelerando o processo.

Du et al. (2019) pesquisando os efeitos do biocarvão na atividade e na estrutura da comunidade microbiana, durante a compostagem de lodo de esgoto, concluíram que o biocarvão, nas dosagens de 10% e 20%, promove a atividade de enzimas (desidrogenase, aril-sulfatase, protease, celulase, β -glicosidase e peroxidase) e das comunidades bacterianas, reduzindo o tempo de compostagem.

Inoculantes

Dentre os aditivos, os inoculantes também são citados em muitos estudos (Abdel-Rahman et al., 2016; Awasthi et al., 2015; Awasthi et al., 2018b; Barrena et al., 2006; Hemati; Aliasghar zad; Khakvar, 2018; Karnchanawong; Nissai kla, 2014; Kato; Miura, 2008; Krusir et al., 2019; Li et al., 2017; Maji et al., 2015; Mat Saad et al., 2013; Nakasaki et al., 1996; Nakasaki; Araya; Mimoto, 2013; Nakasaki; Hirai, 2017; Pan; Dam; Sen, 2012; Safari et al., 2017; Sharma et al., 2014; Song et al., 2018a, 2018b; Tran; Mimoto; Nakasaki, 2015; Voběrková et al., 2017; Wang et al., 2015; Wei et al., 2019; Xi et al., 2012; Yang et al., 2018; Yeoh et al., 2011; Zhao et al., 2016;

Zhao et al., 2017), portanto também são tratados num tópico em separado.

Os inoculantes são microrganismos adicionados ao material a ser compostado com o objetivo de acelerar o processo (Awasthi et al., 2018b; Heidarzadeh; Amani; Javadian, 2019; Hemati; Aliasghar zad; Khakvar, 2018; Krusir et al., 2019; Song et al., 2018a, 2018b; Wei et al., 2019; Yang et al., 2018).

Nakasaki et al. (1996) em sua pesquisa sobre o uso do *Bacillus Licheniformis* HA1 para acelerar a compostagem de resíduos orgânicos, observaram que sua utilização evitou a queda de pH no estágio inicial e, assim, estimulou a proliferação de outros microrganismos termófilos, que contribuíram para o aumento da decomposição da matéria orgânica na fase termofílica, diminuindo o tempo do processo.

Barrena et al. (2006) pesquisaram o efeito da inoculação na compostagem da fração orgânica de resíduos sólidos municipais. Os efeitos do inóculo comercial (*MicroGest 10X*, *Brookside Agra LC*) foram estudados seguindo os parâmetros de rotina do processo de compostagem (temperatura, teor de oxigênio e umidade) e testes biológicos, como o índice respirométrico e o grau de maturidade. A unidade de bactérias totais utilizadas foi de 4×10^9 Unidades de Formação de Colônias (UFC) g^{-1} . A conclusão foi de que o *MicroGest 10X* é um inóculo eficaz para acelerar a compostagem, aprimorando a atividade biológica no estágio termofílico e, entre as doses de inóculo testadas, 106 UFC g^{-1} por leira, é o ideal em termos de economia do tratamento e redução do tempo de compostagem, em aproximadamente 50%.

Kato e Miura (2008), em seu estudo sobre o efeito de um composto amadurecido, como agente de volume e inoculação na comunidade microbiana e na maturidade do composto de esterco bovino, constataram que a utilização de um composto obtido anteriormente, como agente de volume e inoculação para a produção subsequente de um novo composto, acelerou a sucessão da comunidade microbiana e ajudou a manter a sua diversidade durante o processo, reduzindo o período de compostagem.

Yeoh et al. (2011) em sua pesquisa sobre os efeitos da aceleração do inóculo microbiano na compostagem de resíduos orgânicos de fábricas de óleo de palma, constataram que a utilização de um inóculo microbiano composto por *Agromonas*, *Aspergillus*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Cellulomonas*, *Chaetomium*, *Clostridium*, *Coprinus*, *Microbispora*, *Penicillium*, *Pseudomonas*, *Thermoactinomyces*, *Trichoderma* e *Trichurus* reduziu a tempo de compostagem para 5 semanas, em vez de 9 semanas para o composto sem inoculação.

Pan, Dam e Sen (2012), estudaram a compostagem de resíduos orgânicos comuns, usando como inoculantes vários microrganismos dos gêneros *Bacilli* e

Pseudomonas, os quais foram selecionados com base em seus potenciais hidrolíticos. Dos substratos testados, a palha de trigo foi o material mais adequado para compostagem em larga escala, a qual, com a utilização do consórcio bacteriano, deu origem a um composto estável em 75 dias.

Xi *et al.* (2012) estudaram o efeito dos métodos de inoculação na eficiência de compostagem de resíduos sólidos municipais. Foi testada a inoculação no estágio inicial, em dois estágios e em vários estágios. Neste estudo foi constatado que a inoculação melhorou a degradação de compostos alifáticos, proteínas e polissacarídeos, aumentou o peso molecular e o grau de humificação dos compostos, contribuindo significativamente no progresso e eficiência da compostagem. Dentre os métodos estudados, foi a inoculação em várias etapas que deu melhores resultados. Neste processo os microrganismos desodorizantes são inoculados no estágio inicial, quando a temperatura ainda não aumentou, as bactérias de decomposição da celulose são inoculadas no período de resfriamento, quando a temperatura está abaixo de 55°C, e por último, os microrganismos decompositores da lignina, inoculados no estágio de cura, quando a temperatura está abaixo de 40°C.

Mat Saad *et al.* (2013) em seu trabalho sobre compostagem de resíduos mistos de quintal e de alimentos, utilizaram dois tipos de microrganismos efetivos (EM) para aceleração do processo de compostagem; *Takakura EM* e *Fruit Waste EM*. A pesquisa, que levou 7 semanas de compostagem, tinha como objetivo encontrar o melhor EM para acelerar o processo. No final verificou-se que o *Takakura EM* foi mais eficiente, porque exigiu menos tempo e produz um composto de melhor qualidade.

Nakasaki, Araya e Mimoto (2013) estudaram os efeitos da inoculação de *Pichia kudriavzevii* RB1 em processos de compostagem e concluíram que a mesma acelera a degradação dos ácidos orgânicos presentes no material bruto, aumenta o pH, o que resulta numa proliferação mais intensa das bactérias mesofílicas e termofílicas, acelerando o processo de compostagem em pelo menos dois dias.

Sharma *et al.* (2014) realizaram um estudo para acelerar o processo de compostagem de palha de arroz utilizando um consórcio eficiente de microrganismos e um inoculante composto. O consórcio eficiente de microrganismos (EM) empregado era constituído pelos microrganismos *Candida tropicalis* (Y6), *Phanerochaete chrysosporium* (VV18), *Streptomyces globisporous* (C3) e *Lactobacillus sp.* e o inoculante composto (CI) era formado por *Aspergillus nidulans* (ITCC 2011), *Trichoderma viride* (ITCC 2211), *Phanerochaete chrysosporium* (NCIM1073) e *A. awamori* (F-18). A conclusão final foi de que a inoculação combinada de EM e CI pode acelerar o processo de compostagem resultando em um composto maduro dentro de 60 dias.

Karnchanawong e Nissaikla (2014), em sua pesquisa sobre os efeitos da inoculação microbiana na compostagem de resíduos orgânicos domésticos, compararam a utilização de dois inoculantes populares comercialmente disponíveis na Tailândia com o emprego de composto maduro. A conclusão final foi de que os inoculantes comerciais para facilitar a compostagem do lixo orgânico doméstico podem ser substituídos por composto maduro, o qual produz os mesmos efeitos.

Maji *et al.* (2015) estudaram o efeito de uma nova cepa fúngica de *Trichoderma atroviride* para acelerar processos de compostagem e vermicompostagem, para a produção de composto e vermicomposto ricos em ácidos húmicos. Suas conclusões foram de que o uso de cepas fúngicas selecionadas tem potencial para produzir composto e vermicomposto qualitativamente superiores, com alto teor de ácidos húmicos (35-62% a mais em relação ao padrão), além de reduzir o tempo de 110 para 90 dias.

Awasthi *et al.* (2015) estudando a co-compostagem de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos, misturados a diferentes resíduos de volume com a caracterização de parâmetros físico-químicos e da dinâmica enzimática microbiana, concluíram que a adição de resíduos aumenta a atividade enzimática e a taxa de compostagem, e que a inoculação do consórcio microbiano com agente de volume, reduz o período do processo. A utilização do consórcio microbiano (*Phanerochaete chrysosporium*, *Trichoderma viride* e *Pseudomonas aeruginosa*) reduziu o período de compostagem em quatro semanas.

Tran, Mimoto e Nakasaki (2015) estudando como a inoculação de bactéria láctica acelera degradação de matéria orgânica durante compostagem, constataram que a adição de *Pediococcus acidilactici* TM14 na matéria-prima do composto, aumenta o crescimento de fungos com a capacidade de degradar os ácidos orgânicos. Estes fungos modificam o ambiente e facilitam o crescimento dos fungos termofílicos, acelerando a compostagem através de um novo mecanismo.

Wang *et al.* (2015) pesquisaram o efeito de inoculantes na compostagem de resíduos de *Sophora flavescens* (planta medicinal chinesa), avaliados com base em vários parâmetros físicos, químicos e biológicos, bem como em análises de infravermelho. Comparado ao composto de controle sem inoculantes, o composto com inoculantes (*Bacillus subtilis* estirpe G-13 e *Chaetomium thermophilum* cepa GF-1) teve duração termofílica significativamente maior e maior taxa de degradação de celulose, hemicelulose e lignina, acelerando de forma acentuada o processo e aumentando o grau de maturidade do composto.

Zhao *et al.* (2016) pesquisando o efeito de métodos de inoculação de actinobactérias na degradação da celulose durante a compostagem, observaram que a inoculação de actinobactérias incluindo *Streptomyces sp.*

e *Micromonospora* sp. acelera consideravelmente a degradação da matéria orgânica, especialmente as celuloses.

Abdel-Rahman et al. (2016) em seu estudo sobre a aplicação biotecnológica de bactérias termotolerantes de decomposição da celulose na compostagem de palha de arroz, constataram que a inoculação (com *Bacillus licheniformis* 1-1v e *Bacillus sonorensis* 7-1v) reduziu o tempo de compostagem em 40-43% (de 89-96 dias para 51-58 dias). Também constataram um maior decréscimo no carbono orgânico total e na razão C/N, bem como uma melhora na qualidade do composto por um aumento no conteúdo total de N, P e K.

Voběrková et al. (2017) em seu trabalho sobre o efeito da inoculação, com fungos da podridão-branca e consórcio fúngico, na eficiência da compostagem de resíduos sólidos urbanos, constataram que a inoculação usando fungos lignocelulolíticos pode ser uma estratégia útil para melhorar as propriedades do composto final e também acelerar a degradação dos resíduos.

Zhao et al. (2017) ao pesquisarem o efeito da inoculação de actinomicetos termotolerantes, na degradação da celulose e na formação de substâncias húmicas durante a compostagem, observaram que a inoculação pode acelerar a degradação da celulose e alterar a estrutura da comunidade actinomicética, particularmente quando inoculada no estágio termofílico, e que, a inoculação no momento adequado, pode melhorar a relação entre os actinomicetos exógenos e a formação de substâncias húmicas.

Saffari et al. (2017) pesquisando o isolamento e identificação de bactérias celulolíticas efetivas, no processo de compostagem de diferentes fontes, constataram que a eficiência da compostagem pode ser aumentada pelo uso de inoculantes. A eficiência da inoculação é afetada por vários fatores, como a competição com outros microrganismos. A inoculação com oito cepas celulolíticas aumentou a população microbiana benéfica e melhorou a qualidade da produção útil de enzimas, acelerando a conversão de matéria orgânica em adubo maduro. As bactérias Gram-positivas melhoraram as propriedades celulolíticas e aceleraram o processo de compostagem em comparação com as bactérias Gram-negativas.

Nakasaki e Hirai (2017) estudando uma estratégia de controle de temperatura, para melhorar a atividade da levedura inoculada em matéria-prima para acelerar a compostagem, concluíram que a inoculação da levedura *Pichia kudriavzevii* RB1, que degrada os ácidos orgânicos, pode ser utilizada para acelerar o processo, mantendo a temperatura a 40°C por um determinado período de tempo após a inoculação.

Li et al. (2017) em sua pesquisa sobre as influências de inoculantes de lodo municipal e resíduos sólidos na estabilidade do composto, maturidade e atividade enzimática durante a compostagem de esterco

de galinha, constataram que a atividade enzimática é um índice importante para avaliar de forma abrangente a estabilidade e a maturidade durante o processo. Os microrganismos provenientes de lodo funcionam melhor em termos de acelerar a estabilização e a maturação do composto. Os inóculos microbianos estenderam o tempo da fase termofílica e aumentaram significativamente a atividade da catalase, da urease e da celulase, acelerando a compostagem.

Yang et al. (2018) pesquisando sobre os efeitos da adição de inóculo microbiano composto na diversidade da comunidade microbiana e a atividade enzimática durante co-compostagem, concluíram que a adição do composto microbiano (*Ralstonia* sp., *Penicillium* sp., *Penicillium aurantiogriseum* e *Acremonium alternatum*) diminuiu a duração do processo de compostagem e melhorou a taxa de maturação, melhorando a qualidade do composto e a eficiência da compostagem.

Awasthi et al. (2018b) em seu estudo sobre a avaliação da dinâmica microbiana durante a compostagem de resíduos alimentares, observaram que a inoculação, empregando um consórcio de bactérias proteolíticas aeróbias, amilolíticas, celulolíticas, degradantes de óleo e aeróbicas totais, aumentou a eficiência da compostagem e reduziu o período de maturidade.

Song et al. (2018a) pesquisando o impacto do consórcio microbiano anti-acidificação, no metabolismo de carboidratos de micróbios-chave, durante a compostagem de resíduos alimentares, concluíram que o consórcio microbiano anti-acidificação acelera a degradação de carboidratos, melhora a eficiência da compostagem e aumenta significativamente os tipos de enzimas que catalisam a degradação de lignina, celulose e hemicelulose.

Song et al. (2018b) estudando o efeito da inoculação, com um consórcio microbiano que degrada ácidos orgânicos, na eficiência da compostagem de restos de alimentos, concluíram que a utilização deste consórcio microbiano atua sinergicamente na degradação dos ácidos orgânicos, aumentando a eficiência da compostagem e encurtando o período de tempo.

Hemati, Aliasgharzarad e Khakvar (2018) em seu estudo sobre a avaliação in vitro da atividade lignocelulolítica de bactérias termofílicas, isoladas de diferentes compostos de solos do Irã, chegaram à conclusão de que micróbios termofílicos que possuem atividade lignocelulolítica, podem facilitar o processo de compostagem. Desta forma *Paenibacillus validus*, *Paenibacillus koreensis*, *Paenibacillus thailandensis*, *Paenibacillus cellulositrophicus*, *Paenibacillus lautus* e *Bacillus nealsonii*, podem ser utilizados como aceleradores do processo de compostagem.

Krusir et al. (2019) em seu estudo sobre o papel da microbiocenose do solo na compostagem da fração orgânica do resíduo sólido municipal, pesquisaram a utilização de um aditivo microbiológico extraído do solo,

concluindo que o mesmo acelera o processo em 3,3 vezes durante o regime termofílico e em 2,1 vezes durante o período mesofílico.

Wei *et al.* (2019) estudando o melhor desempenho da degradação de lignocelulose, durante a compostagem de palha de diversas fontes, com inoculação de actinomicetos, regulando as principais atividades enzimáticas, observaram que a inoculação de actinomicetos termofílicos pode aumentar significativamente a degradação das frações lignocelulósicas recalcitrantes (celulose, hemicelulose e lignina) e as atividades das enzimas-chave degradadoras de lignocelulose.

Celulase

A celulase, apesar de ter sido citada na literatura como uma substância bastante viável para acelerar o processo de compostagem, ainda não foi utilizada em muitos estudos com esta finalidade. Porém, devido à sua potencial aplicação nesta área (Liu *et al.*, 2018; Marco *et al.*, 2017; Reyes-Torres *et al.*, 2018; Tuomela *et al.*, 2000), foi tratada neste tópico separadamente.

Celulases são enzimas responsáveis pela degradação da celulose, principal composto presente nas células vegetais. A celulose é um polissacarídeo formado por várias unidades de β -glicose unidas entre si através de ligações β -1,4-glicosídicas. As celulases realizam a quebra das ligações químicas existentes entre as unidades de glicose que formam a celulose (Akintola *et al.*, 2019; Marco *et al.*, 2017; Saini *et al.*, 2016).

De acordo com Reyes-Torres *et al.* (2018) a aplicação de celulase na mistura de compostagem é uma forma inovadora de melhorar a degradação da celulose e promover a formação de substâncias húmicas, que é um dos principais requisitos para um produto final de alta qualidade

Marco *et al.* (2017), em seu trabalho sobre a purificação e caracterização de uma celulase alcalina termoestável, produzida por *Bacillus licheniformis* 380, isolado de um composto, concluíram que a mesma pode ter potencial aplicação em biotecnologia, acelerando a degradação da matéria orgânica, degradando resíduos celulósicos durante a fase de degradação primária, fornecendo também uma base para estudos sobre a otimização da compostagem.

Liu *et al.* (2018) avaliaram os efeitos da celulase e de um inóculo microbiano no processo de compostagem de resíduos verdes. Segundo eles a adição de ambos poderia acelerar o processo e melhorar a qualidade do produto final em termos de promover as temperaturas termofílicas, reduzir a relação C/N e aumentar o índice de germinação no composto.

Conclusões

São vários os procedimentos possíveis para acelerar o processo de compostagem. Existem processos que empregam aeração, aquecimento e agitação mecânica. Tais procedimentos tem se revelado eficientes, porém necessitam de aparatos extras, o que encarece o processo.

As estratégias empregadas para acelerar o processo de compostagem podem ser divididas em: pré-tratamento, adição de co-substratos e mudanças no processo.

Os co-substratos podem ser divididos em: materiais de volume, materiais de emenda e aditivos.

Dentre os aditivos destacam-se o biocarvão ou *biochar* (material rico em carbono, obtido pela pirólise de biomassa em ambiente com limitação de oxigênio) e os inoculantes (microrganismos).

A celulase (enzima degradadora da celulose), apesar de ter sido citada como uma substância bastante viável para acelerar o processo, ainda não foi utilizada em muitos estudos com esta finalidade.

Referências

- Abdel-Rahman, M. A.; Nour El-Din, M.; Refaat, B. M.; Abdel-Shakour, E. H.; Ewais, E. El-D.; Alrefaey, H. M. A. 2016. Biotechnological Application of Thermotolerant Cellulose-Decomposing Bacteria in Composting of Rice Straw. *Annals of Agricultural Sciences*, 61: 135-143. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.aos.2015.11.006>.
- Agyarko-Mintah, E.; Cowie, A.; Van Zwieten, L.; Singh, B. P.; Smillie, R.; Harden, S.; Fornasier, F. 2017. Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting. *Waste Management*, 61: 129-137. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.009>.
- Akdeniz, N. 2019. A systematic review of biochar use in animal waste composting. *Waste Management*, 88: 291-300. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.054>.
- Akintola, A.; Oyediji, O.; Adewale, I.; Bakare, M. 2019. Production and physicochemical properties of thermostable, crude cellulase from *Enterobacter cloacae* ip8 isolated from plant leaf litters of *Lagerstroemia indica* linn. *The Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 8: 989-994. Doi: <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2019.8.4.989-994>.
- Albrecht, R.; Le Petit, J.; Terrom, G.; Périsol, C. 2011. Comparison between UV spectroscopic and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting. *Bioresource Technology*, 102: 4495-4500. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.12.053>.
- Awasthi, M. K.; Pandey, A. K.; Bundela, P. S.; Khan, J. 2015. Co-composting of organic fraction of municipal solid waste mixed with different bulking waste: Characterization of physicochemical parameters and microbial enzymatic dynamics. *Bioresource Technology*, 182: 200-207. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.104>.

- Awasthi, M. K.; Wang, Q.; Chen, H.; Awasthi, S. K.; Wang, M.; Ren, X.; Zhao, J.; Zhang, Z. 2018a. Beneficial effect of mixture of additives amendment on enzymatic activities, organic matter degradation and humification during biosolids co-composting. *Bioresource Technology*, 247: 138-146. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.061>.
- Awasthi, S. K.; Wong, J. W. C.; Li, J.; Wang, Q.; Zhang, Z.; Kumar, S.; Awasthi, M. K. 2018b. Evaluation of microbial dynamics during post-consumption food waste composting. *Bioresource Technology*, 251: 181-188. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.040>.
- Barrena, R.; Pagans, E.; Faltys, G.; Sánchez, A. 2006. Effect of inoculation dosing on the composting of source-selected organic fraction of municipal solid wastes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 81: 420-425. Doi: <https://doi.org/10.1002/jctb.1418>.
- Bernal, M. P.; Albuquerque, J. A.; Moral, R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100: 5444-5453. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>.
- Briški, F.; Kopčič, N.; Cosic, I.; Kučić, D.; Vukovic, M. 2012. Biodegradation of tobacco waste by composting: Genetic identification of nicotine-degrading bacteria and kinetic analysis of transformations in leachate. *Chemical Papers*, 12: 1103-1110. Doi: <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0234-3>.
- Bustamante, M. A.; Moral, R.; Bonmatí, A.; Palatsí, J.; Solé-Mauri, F.; Bernal, M. P. 2014. Integrated Waste Management Combining Anaerobic and Aerobic Treatment. A Case Study. *Waste and Biomass Valorization*, 5: 481-490. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9260-9>.
- Campos, S. X. de.; Ressetti, R. R.; Zittel, R. 2014. Monitoring and characterization of compost obtained from household waste and pine sawdust in a facultative reactor by conventional and spectroscopic analyses. *Waste Management & Research*, 32: 1186-1191. Doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X14543817>.
- Cosic, I.; Vukovic, M.; Gomzi, Z.; Briški, F. 2013. Modelling of kinetics of microbial degradation of simulated leachate from tobacco dust waste. *Chemical Papers*, 67: 1138-1145. Doi: <https://doi.org/10.2478/s11696-012-0287-3>.
- Costa, M. S. S. de M.; Bernardi, F. H.; Costa, L. A. de M.; Pereira, D. C.; Lorin, H. E. F.; Rozatti, M. A. T.; Carneiro, L. J. 2017. Composting as a cleaner strategy to broiler agro-industrial wastes: Selecting carbon source to optimize the process and improve the quality of the final compost. *Journal of Cleaner Production*, 142: 2084-2092. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.075>.
- Du, J.; Zhang, Y.; Qu, M.; Yin, Y.; Fan, K.; Hu, B.; Zhang, H.; Wei, M.; Ma, C. 2019. Effects of biochar on the microbial activity and community structure during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 272: 171-179. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.020>.
- Fialho, L. L., da Silva, W. T. L., Milori, D. M. B. P., Simões, M. L., Martin-Neto, L. 2010. Characterization of organic matter from composting of different residues by physicochemical and spectroscopic methods. *Bioresource Technology*, 101: 1927-1934. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.039>.
- Godlewska, P.; Schmidt, H. P.; Ok, Y. S.; Oleszczuk, P. 2017. Biochar for composting improvement and contaminants reduction. A review. *Bioresource Technology*, 246: 193-202. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.095>.
- Haug, R. T. 1993. *The Practical Handbook of Compost Engineering*. 1 ed. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA. Disponível em: <http://93.174.95.29/main/7F1C9A9343CD1D7C1AEDEC113B0D6E02>.
- Heidarzadeh, M.; Amani, H.; Javadian, B. 2019. Improving municipal solid waste compost process by cycle time reduction through inoculation of *Aspergillus niger*. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17: 295-303. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00348-z>.
- Hemati, A.; Aliasgharzad, N.; Khakvar, R. 2018. In vitro evaluation of lignocellulolytic activity of thermophilic bacteria isolated from different composts and soils of Iran. *Biocatálise e Biotecnologia Agrícola*, 14: 424-430. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.04.010>.
- Jiang, Y.; Ju, M.; Li, W.; Ren, Q.; Liu, L.; Chen, Y.; Yang, Q.; Hou, Q.; Liu, Y. 2015. Rapid production of organic fertilizer by dynamic high-temperature aerobic fermentation (DHAF) of food waste. *Bioresource Technology*, 197: 7-14. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.053>.
- Jurado, M. M.; Suárez-Estrella, F.; Vargas-García, M. C.; López, M. J.; López-González, J. A.; Moreno, J. 2014. Evolution of enzymatic activities and carbon fractions throughout composting of plant waste. *Journal of Environmental Management*, 133: 355-364. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.12.020>.
- Kato, K.; Miura, N. 2008. Effect of matured compost as a bulking and inoculating agent on the microbial community and maturity of cattle manure compost. *Bioresource Technology*, 99: 3372-3380. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.019>.
- Karnchanawong, S.; Nissakla, S. 2014. Effects of microbial inoculation on composting of household organic waste using passive aeration bin. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3: 113-119. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0072-0>.
- Karnchanawong, S.; Mongkontep, T.; Praphunsri, K. 2017. Effect of green waste pretreatment by sodium hydroxide and biomass fly ash on composting process. *Journal of Cleaner Production*, 146: 14-19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.126>.
- Kasinski, S.; Wojnowska-Baryla, I. 2014. Oxygen demand for the stabilization of the organic fraction of municipal solid waste in passively aerated bioreactors. *Waste Management*, 34: 316-322. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.037>.
- Krusir, G.; Shpyrko, T.; Sagdeeva, O.; Zakharchuk, V. 2019. The role of soil microbiocenosis in the composting of the organic component of the municipal solid waste. *Food science and technology*, 13: 34-43. Doi: <https://doi.org/10.15673/fst.v13i2.1387>.
- Külcü, R.; Yaldiz, O. 2014. The composting of Agricultural wastes and new parameter for the assessment of the process. *Ecological Engineering*, 60: 220-225. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.03.097>.
- Kuryntseva, P.; Galitskaya, P.; Selivanovskaya, S. 2016. Changes in the ecological properties of organic wastes during their biological treatment. *Waste Management*, 58: 90-97. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.031>.
- Lashermes, G.; Barriuso, E.; Le Villio-Poitrenaud, M.; Houot, S. 2012. Composting in small laboratory pilots: Performance and reproducibility. *Waste Management*, 32: 271-277. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.011>.
- Li, S.; Li, J.; Yuan, J.; Li, G.; Zang, B.; Li, Y. 2017. The influences of inoculants from municipal sludge and solid waste on compost stability, maturity and enzyme activities during chicken manure composting. *Environmental Technology*, 38: 1770-1778. Doi: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1291755>.

- Liu, L.; Wang, S.; Guo, X.; Zhao, T.; Zhang, B. 2018. Succession and diversity of microorganisms and their association with physicochemical properties during green waste thermophilic composting. *Waste Management*, 73: 101-112. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.026>.
- Liu, N.; Zhou, J.; Han, L.; Ma, S.; Sun, X.; Huang, G. 2017. Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, 241: 190-199. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144>.
- Liu, H.; Wang, L.; Lei, M. 2019. Positive impact of biochar amendment on thermal balance during swine manure composting at relatively low ambient temperature. *Bioresource Technology*, 273: 25-33. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.033>.
- Maji, D.; Singh, M.; Wasnik, K.; Chanotiya, C.; Kalra, A. 2015. The role of a novel fungal strain *Trichoderma atroviride* RVF3 in improving humic acid content in mature compost and vermicompost via ligninolytic and cellulolytic activities. *Journal of Applied Microbiology*, 119: 1584-1596. Doi: <https://doi.org/10.1111/jam.12954>.
- Malakahmad, A., Idrus, N. B., Abualqumboz, M. S., Yavari, S., Kutty, S. R. M. 2017. In-vessel co-composting of yard waste and food waste: an approach for sustainable waste management in Cameron Highlands, Malaysia. *Int. J. Recycl. Organic Waste Agriculture*, 6: 149-157. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0163-9>.
- Marco, É. G. D.; Heck, K.; Martos, E. T.; Van Der Sand, S. T. 2017. Purification and characterization of a thermostable alkaline cellulase produced by *Bacillus licheniformis* 380 isolated from compost. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89: 2359-2370. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170408>.
- Marmiroli, M.; Bonas, U.; Imperiale, D.; Lencioni, G.; Mussi, F.; Marmiroli, N.; Maestri, E. 2018. Structural and Functional Features of Chars From Different Biomasses as Potential Plant Amendments. *Frontiers in Plant Science*, 9. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01119>.
- Mat Saad, N. F.; Nadrah Ma'Min, N.; Md Zain, S.; Ahmad Basri, N. E.; Md Zaini, N. S. 2013. Composting of mixed yard and food wastes with effective microbes. *Jurnal Teknologi*. *Jurnal Teknologi*, 65: 89-95. Doi: <https://doi.org/10.11113/jt.v65.2196>.
- Mehta, C. M.; Palni, U.; Franke-Whittle, I. H.; Sharma, A. K. 2014. Compost: its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. *Waste Management*, 34: 607-622, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.012>.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Defesa Agropecuária - Instrução normativa nº 25, de 23 de julho de 2009. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=recuperarTextoAtoTematicaPortal&codigoTematica=1229186>.
- Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) - Resolução nº 481, de 03 de outubro de 2017. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=728>.
- Nakasaki, K.; Uehara, N.; Kataoka, M.; Kubota, H. 1996. The Use of *Bacillus Licheniformis* HA1 To Accelerate Composting of Organic Wastes. *Compost Science & Utilization*, 4: 47-51. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/1065657X.1996.10701852>.
- Nakasaki, K.; Araya, S.; Mimoto, H. 2013. Inoculation of *Pichia kudriavzevii* RB1 degrades the organic acids present in raw compost material and accelerates composting. *Bioresource Technology*, 144: 521-528. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.005>.
- Nakasaki, K.; Hirai, H. 2017. Temperature control strategy to enhance the activity of yeast inoculated into compost raw material for accelerated composting. *Waste Management*, 65: 29-36. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.019>.
- Onwosi, C. O.; Igbokwe, V. C.; Odimba, J. N.; Eke, I. E.; Nwankwoala, M. O.; Iroh, I. N.; Ezeogu, L. I. 2017. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 190: 140-157. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>.
- Pan, I.; Dam, B.; Sen, S. K. 2012. Composting of common organic wastes using microbial inoculantes. *3 Biotech*, 2: 127-134. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13205-011-0033-5>.
- Piotrowska-Cyplik, A.; Chrzanowski, L.; Cyplik, P.; Dach, J.; Olejnik, A.; Staninska, J.; Czarny, J.; Lewicki, A.; Marecik, R.; Powierska-Czarny, J. 2013. Composting of oiled bleaching earth: fatty acids degradation, phytotoxicity and mutagenicity changes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 78: 49-57. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.12.007>.
- Rashad, F. M.; Saleh, W. D.; Moselhy, M. A. 2010. Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments of organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices. *Bioresource Technology*, 101: 5952-5960. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.103>.
- Reyes-Torres, M.; Oviedo-Ocaña, E.R.; Dominguez, I.; Komilis, D.; Sánchez, A. 2018. A systematic review on the composting of green waste: Feedstock quality and optimization strategies. *Waste Management*, 77: 486-499. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.037>.
- Saffari, H.; Pourbabae, A. A.; Asgharzadeh, A.; Besharati, H. 2017. Isolation and identification of effective cellulolytic bacteria in composting process from different sources. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63: 297-307. Doi: <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1198006>.
- Saini, J. K.; Patel, A. K.; Adsul, M.; Singhanian, R. R. 2016. Cellulase adsorption on lignin: A roadblock for economic hydrolysis of biomass. *Renewable Energy*, 98: 29-42. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.089>.
- Sanchez-Monedero, M. A.; Cayuela, M. L.; Roig, A.; Jindo, K.; Mondini, C.; Bolan, N. 2018. Role of biochar as an additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247: 1155-1164. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>.
- Sharma, A.; Sharma, R.; Arora, A.; Shah, R.; Singh, A.; Pranaw, K.; Nain, L. 2014. Insights into rapid composting of paddy straw augmented with efficient microorganism consortium. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 3. Doi: <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0054-2>.
- Song, C.; Li, M.; Qi, H.; Zhang, Y.; Liu, D.; Xia, X.; Pan, H.; Xi, B. 2018a. Impact of anti-acidification microbial consortium on carbohydrate metabolism of key microbes during food waste composting. *Bioresource Technology*, 259: 1-9. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.022>.
- Song, C.; Zhang, Y.; Xia, X.; Qi, H.; Li, M.; Pan, H.; Xi, B. 2018b. Effect of inoculation with a microbial consortium that degrades organic acids on the composting efficiency of food waste. *Microbial Biotechnology*, 11: 1124-1136. Doi: <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13294>.
- Sundberg, C.; Jönsson, H. 2008. Higher pH and faster decomposition in biowaste composting by increased aeration. *Waste Management*, 28: 518-526. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.011>.
- Sundberg, C.; Navia, R. 2014. Is there still a role for composting? *Waste Management & Research*, 32: 459-460. Doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X14536094>.

- Tandy, S.; Healey, J. R.; Nason, M. A.; Williamson, J. C.; Jones, D. L. 2009. Heavy metal fractionation during the co-composting biosolids deinking paper fibre and green waste. *Bioresource Technology*, 100: 4220-4226. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.02.046>.
- Tran, Q. N. M.; Mimoto, H.; Nakasaki, K. 2015. Inoculation of lactic acid bacterium accelerates organic matter degradation during composting. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 104: 377-383. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.07.007>.
- Tuomela, M.; Vikman, M.; Hatakka, A.; Itävaara, M. 2000. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology*, 72: 169-183. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00104-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00104-2).
- Vandecasteele, B.; Sinicco, T.; D'Hose, T.; Vanden Nest, T.; Mondini, C. 2016. Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake. *Journal of Environmental Management*, 168: 200-209. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.045>.
- Voběrková, S.; Vavěrková, M. D.; Burešová, A.; Adamcová, D.; Vršanská, M.; Kynický, J.; Brtnický, M.; Adam, V. 2017. Effect of inoculation with white-rot fungi and fungal consortium on the composting efficiency of municipal solid waste. *Waste Management*, 61: 157-164. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.039>.
- Wang, H. B.; Han, L. R.; Feng, J. T.; Zhang, X. 2015. Evaluation of microbially enhanced composting of sophora flavescens residues. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 51: 63-70. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/03601234.2015.1080503>.
- Wang, H.; Chou, C.; Chiou, C.; Tian, G.; Chiu, C. 2016. Humic Acid Composition and Characteristics of Soil Organic Matter in Relation to the Elevation Gradient of Moso Bamboo Plantations. *Plos One*, September 1. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162193>.
- Wang, M.; Awasthi, M. K.; Wang, Q.; Chen, H.; Ren, X.; Zhao, J.; Li, R.; Zhang, Z. 2017. Comparison of additives amendment for mitigation of greenhouse gases and ammonia emission during sewage sludge co-composting based on correlation analysis. *Bioresource Technology*, 243: 520-527. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.158>.
- Waqas, M.; Nizami, A. S.; Aburizaiza, A. S.; Barakat, M. A.; Ismail, I. M. I.; Rashid, M. I. 2018. Optimization of food waste compost with the use of biochar. *Journal of Environmental Management*, 216: 70-81. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.015>.
- Waqas, M.; Nizami, A. S.; Aburizaiza, A. S.; Barakat, M. A.; Asam, Z. Z.; Khattak, B.; Rashid, M. I. 2019. Untapped potential of zeolites in optimization of food waste composting. *Journal of Environmental Management*, 241: 99-112. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.014>.
- Wei, Y.; Wu, D.; Wei, D.; Zhao, Y.; Wu, J.; Xie, X.; Zhang, R.; Wei, Z. 2019. Improved lignocellulose-degrading performance during straw composting from diverse sources with actinomycetes inoculation by regulating the key enzyme activities. *Bioresource Technology*, 271: 66-74. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.081>.
- Xi, B.-D.; He, X.-S.; Wei, Z.-M.; Jiang, Y.-H.; Li, M.-X.; Li, D.; Li, Y.; Dang, Q.-L. 2012. Effect of inoculation methods on the composting efficiency of municipal solid wastes. *Chemosphere*, 88: 744-750. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.032>.
- Xie, K.; Jia, X.; Xu, P.; Huang, X.; Gu, W.; Zhang, F.; Yang, S.; Tang, S. 2012. The addition of modified attapulgite reduces the emission of nitrous oxide and ammonia from aerobically composted chicken manure. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62: 1174-118. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10962247.2012.699442>.
- Yang, L.; Jie, G.; She-Qi, Z.; Long-Xiang, S.; Wei, S.; Xun, Q.; Man-Li, D.; Ya-Nan, Y.; Xiao-Juan, W. 2018. Effects of Adding Compound Microbial Inoculum on Microbial Community Diversity and Enzymatic Activity During Co-Composting. *Environmental Engineering Science*, 35: 27-278. Doi: <https://doi.org/10.1089/ees.2016.0423>.
- Yeoh, C. Y.; Chin, N. L.; Tan, C. S.; Ooi, H. S. 2011. Acceleration Effects of Microbial Inoculum on Palm Oil Mill Organic Waste Composting. *Compost Science & Utilization*, 19: 135-142. Doi: <http://dx.doi.org/10.1080/1065657X.2011.10736989>.
- Yu, K.; Li, S.; Sun, X.; Cai, L.; Zhang, P.; Kang, Y.; Yu, Z.; Tong, J.; Wang, L. 2019. Application of seasonal freeze-thaw to pretreat raw material for accelerating green waste composting. *Journal of Environmental Management*, 239: 96-102. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.128>.
- Zhang, L.; Sun, X. 2014. Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste. *Bioresource Technology*, 163: 112-122. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.041>.
- Zhang, J.; Lü, F.; Shao, L.; He, P. 2014. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge. *Bioresource Technology*, 168: 252-258. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.02.080>.
- Zhang, C.; Liu, L.; Zhao, M.; Rong, H.; Xu, Y. 2018. The environmental characteristics and applications of biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 21525-21534. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2521-1>.
- Zhao, Y.; Lu, Q.; Wei, Y.; Cui, H.; Zhang, X.; Wang, X.; Shan, S.; Wei, Z. 2016. Effect of actinobacteria agent inoculation methods on cellulose degradation during composting based on redundancy analysis. *Bioresource Technology*, 219: 196-203. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.117>.
- Zhao, Y.; Zhao, Y.; Zhang, Z.; Wei, Y.; Wang, H.; Lu, Q.; Li, Y.; Wei, Z. 2017. Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose degradation and the formation of humic substances during composting. *Waste Management*, 68: 64-73. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.022>.
- Zhou, H.-B.; Ma, C.; Gao, D.; Chen, T.-B.; Zheng, G.-D.; Chen, J.; Pan, T.-H. 2014. Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 152: 329-336. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.061>.
- Zhou, G.; Xu, X.; Qiu, X.; Zhang, J. 2019. Biochar influences the succession of microbial communities and the metabolic functions during rice straw composting with pig manure. *Bioresource Technology*, 272: 10-18. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.135>.
- Zittel, R.; Silva, C. P.; Domingues, C. E.; Stremel, T. R. O.; Almeida, T. E.; Damiani, G. V.; Campos, S. X. 2018. Treatment of smuggled cigarette tobacco by composting process in facultative reactors. *Waste Management*, 71: 115-121. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.023>.