

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DE REVOLVIMENTOS SOBRE A ACELERAÇÃO DA COMPOSTAGEM REALIZADA EM TAMBORES

Franciele Aparecida Plotásio Duarte¹
* Valéria Cristina Palmeira Zago²
Raphael Tobias de Vasconcelos Barros³
Marihus Altoé Baldotto⁴

EVALUATION OF THE FREQUENCY OF TURNING IN THE ACCELERATION ON THE BIOSTABILIZATION OF COMPOSTING HELD ON DRUMS

Recibido el 30 de mayo de 2020. Aceptado el 12 de abril de 2021

Abstract

Composting is a method of recycling the organic waste which has a low cost compared to other existing technologies, mainly when carried out near its generating source. In urban centers, generators generally do not have the area to compost, making it challenging to adopt. A faster-composting process can reduce the space required. Among several factors, oxygen is essential to achieve the maturation of the organic compost. In this context, the present study was planned to investigate three different frequencies of turning the mass of organic waste in the composting acceleration, occurring in plastic drums. Food residues mixed with leaves and tree pruning were used. During the process, the attributes temperature, humidity, pH, and electrical conductivity were monitored. Thirty days after the experiment's beginning, nutrients content and the germination percentage of lettuce and arugula were analyzed. During the monitoring, the temperature did not exceed 60°C, and humidity remained high, condensing water in the drums, which may be the reason for the low temperature. Through the nutrient content and C/N ratio, it can be confirmed that the material was not yet matured. It was concluded that the frequencies of turning tested did not interfere in the acceleration of composting. The germination percentage was high only for arugula, while for lettuce, it was lower, showing some degree of phytotoxicity. Thus, the organic compost at this stage would not be recommended for food crops and can only be used for planting perennial crops and tree pits in parks, gardens, and reforestation projects.

Keywords: acceleration, biowaste, closed container, recycling.

¹ Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Produtos e Processos, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil.

² Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

⁴ Departamento do Curso de Agronomia, Universidade Federal de Viçosa – Campus Florestal, Brasil.

* Autor correspondente: Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brasil. Av. Amazonas, 5253, Belo Horizonte - MG, CEP 30421-169, Brasil. Email: valeriazago@cefetmg.br; valzagomg@gmail.com

Resumo

A compostagem é um método de reciclagem dos resíduos orgânicos, que apresenta baixo custo em relação às demais tecnologias existentes, especialmente quando realizada junto a sua fonte geradora. Nos centros urbanos, os geradores geralmente não têm espaço físico para realizar a compostagem, dificultando a sua adoção. Um processo de compostagem mais rápido, pode diminuir esse espaço necessário. Dentre vários fatores, o oxigênio é indispensável para se alcançar a maturação do composto orgânico. Neste contexto, o presente estudo objetivou avaliar três diferentes frequências de revolvimentos da massa de resíduos orgânicos na aceleração da compostagem, ocorrendo em tambores plásticos. Foram utilizados resíduos de alimentos misturados a folhas e podas de árvores. Durante o processo, foram monitorados os atributos, temperatura, umidade, pH e condutividade elétrica. Aos 30 dias do início do experimento, foram analisados os teores de nutrientes no composto e a germinação de alface e rúcula. Durante o monitoramento, a temperatura não superou os 60°C e a umidade manteve-se elevada, devido à condensação de água nas bombonas. Os teores de nutrientes e a relação C/N foram equivalentes à de composto ainda não maturado. Concluiu-se que as frequências de revolvimentos testadas não interferiram na aceleração da compostagem. A percentagem de germinação foi alta apenas para a rúcula, denotando algum grau de fitotoxicidade para a alface. Desta forma, o composto neste estágio não poderia ser recomendado para culturas alimentícias, podendo ser utilizado para o plantio de culturas perenes e covas de árvores, em parques, jardins e projetos de reflorestamento.

Palavras chave: aceleração, bioresíduos, reciclagem, tambores.

Introdução

No Brasil, apesar da constituição dos resíduos sólidos urbanos ser muito heterogênea, a sua composição gravimétrica revela que a fração composta pelos materiais orgânicos (restos de alimentos, podas e outros putrescíveis) é, em média, mais de 50% do total de resíduos domésticos coletados pelos serviços de limpeza pública (Abreu, 2017). Historicamente, a destinação desses resíduos, em quase sua totalidade, tem sido os aterros sanitários e os lixões (Massukado e Schalch, 2010). Segundo o IPEA (2012), apenas 1.6% dos resíduos orgânicos são destinados à compostagem no país.

Essa realidade atual da gestão de resíduos sólidos orgânicos no país não está em consonância com o direcionamento dado por outros países. Em países como os EUA e os da Comunidade Europeia, por exemplo, tem havido um crescente interesse em desviar esses resíduos dos aterros sanitários. Grandes cidades americanas como São Francisco, Seattle, Austin e Portland estão mais avançadas e já proibiram a disposição de resíduos de alimentos nos aterros sanitários (Guran *et al.*, 2019). Os restos de alimentos, além de representarem grande parte dos resíduos urbanos, inviabilizam a reciclagem dos demais (feitos de papel, plásticos, metais), quando não separados eficientemente através de coleta seletiva (Arrigoni *et al.*, 2018; Storino *et al.*, 2017). Todavia, por serem facilmente decompostos, podem ser utilizados de forma mais eficiente para a produção de energia limpa e de adubo orgânico (Edjabou *et al.*, 2016, Ghinea *et al.*, 2019).

De forma mais abrangente, a gestão de resíduos orgânicos e as suas tecnologias tem se mostrado uma área cheia de oportunidades em várias cidades pelo mundo, onde já se compreende a sua contribuição para proteger-nos das consequências trágicas da degradação do solo, erosão e as mudanças climáticas (Lin *et al.*, 2018; Williams *et al.*, 2019). Nos últimos anos, a compostagem tem sido estudada também para a biorremediação de solos contaminados com metais pesados (Park *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2017; Liang *et al.*, 2017).

A valorização dos resíduos orgânicos através da compostagem e/ou biometanização assume uma relevância ainda maior para os países em desenvolvimento (Loan *et al.*, 2019). A compostagem é considerada a forma mais viável, econômica e ambientalmente, em relação às demais alternativas de desvio desses resíduos (incineração e biometanização) (Zulkepli *et al.*, 2017; Aleluia e Ferrão, 2017), além de ser mais simples e de fácil operação (Chen, 2016). A compostagem descentralizada e em escala doméstica tem sido muito incentivada, de forma a reciclar os resíduos orgânicos, o mais proximamente possível da fonte geradora, e assim, reduzir os custos de transporte e da disposição em aterros (Gauthier *et al.*, 2011; Karkanias *et al.*, 2016; Zorpas *et al.*, 2018). Além disso, possibilita o envolvendo dos diversos geradores de resíduos da sociedade, desde residências e condomínios (Andersen *et al.*, 2012; Zorpas *et al.*, 2018), estabelecimentos comerciais, indústrias e instituições públicas (Bringhenti *et al.*, 2018).

De acordo com a resolução CONAMA nº. 481/2017 (Brasil, 2017), “a compostagem é 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”. O processo ocorre, resumidamente, em estágios distintos e sucessivos: degradação ativa (decomposição e bioestabilização) e maturação. Segundo Kiehl (2004), o processo da compostagem inicia-se com a oxidação de matéria orgânica facilmente degradável; esta primeira fase é chamada de decomposição. A segunda fase, a bioestabilização, inclui a mineralização das moléculas lentamente degradáveis. Por fim, a maturação, onde ocorre a humificação de compostos lignocelulósicos, ou seja, quando o composto final possui todas as características, físicas, químicas e biológicas recomendadas como adubo, que pode proporcionar um bom desenvolvimento vegetal. Mesmo o composto imaturo pode ser utilizado, porém, apenas para culturas perenes ou em cova de plantas arbóreas; quando colocado no solo recomenda-se aguardar um tempo para depois semear.

A transformação da matéria orgânica fresca em composto é muito importante principalmente para superar a fitotoxicidade do material ainda não estabilizado; para reduzir a presença de agentes (vírus, bactérias, fungos, parasitas) que são patogênicos para homem, animais e plantas a um nível que não constitua um risco para a saúde e para produzir um fertilizante orgânico ou um condicionador de solo, reciclando resíduos orgânicos e biomassa (Diaz e Savage, 2011).

Uma das questões-chave na definição da qualidade do composto final é a avaliação da estabilidade da matéria orgânica. Por esse motivo, é necessário definir métodos analíticos capazes de acompanhar a transformação da matéria orgânica durante o processo de compostagem e determinar o nível de estabilidade alcançado (Tittarelli *et al.*, 2011).

Vários parâmetros são utilizados para auxiliar na determinação do estágio de bioestabilização e maturação do composto orgânico: pH, relação carbono/nitrogênio (C/N), teor de umidade, taxa de aeração e tamanho das partículas, devem ser monitorados durante o processo, além da análise de atividades enzimáticas (Vaverková *et al.*, 2020) e de fitotoxicidade (Polprasert, 2017). Cesaro *et al.* (2019) ressaltam que a avaliação da fitotoxicidade está intimamente relacionada à estabilidade biológica, pois a atividade microbiana da matéria orgânica instável pode produzir compostos fitotóxicos. Já para a qualidade química do composto, também se consideram os teores de nutrientes e metais pesados (De Bertoldi, 2013).

Obter um composto orgânico com qualidade no menor tempo possível, especialmente para estimular a compostagem em espaços reduzidos nos centros urbanos, seria um ganho do ponto de vista econômico e ambiental. Normalmente, a maturação é alcançada entre 90 e 120 dias (Kiehl, 1985). Mesmo quando um resíduo altamente putrescível é processado usando um sistema de aeração bastante eficaz, são necessários no mínimo 12 a 14 dias de tempo de degradação ativa (Díaz *et al.*, 2011).

Entretanto, existe na literatura uma divergência em relação à frequência de revolvimentos para oxigenar a massa de resíduos e seu efeito na aceleração do tempo de maturação. De acordo com estudos realizados por Raabe [s/d] citado por Díaz e Savage (2011), os revolvimentos frequentes aceleram o processo da compostagem, podendo-se obter um composto bioestabilizado em 18 dias. Por outro lado, Kiehl (1985) considera que os revolvimentos feitos periodicamente provocam perda de calor e umidade, fatores importantes para acelerar a decomposição.

Além disso, os sistemas e modelos de compostagem (leiras, recipientes, biorreatores, etc) também podem interferir no tempo de decomposição da matéria orgânica (Díaz *et al.*, 2011). Existe pouca informação disponível sobre a influência da aeração na aceleração do processo de compostagem realizada em recipientes fechados.

Neste contexto, este trabalho teve por objetivo avaliar a influência de diferentes frequências de revolvimentos, na aceleração do estágio de bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, em processo de compostagem conduzida em tambores.

Metodologia

Protótipos das composteiras e delineamento experimental

O experimento foi desenvolvido no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (em Belo Horizonte, MG), *Campus I*, entre 28 de agosto à 26 de setembro de 2017. Foram utilizadas como protótipos de composteiras ou biorreatores verticais, tambores (bombonas) de plástico rígido com tampas, com capacidade de 80 litros, formato cilíndrico, com 70 cm de altura e 38 cm de largura. As bombonas e suas tampas foram igualmente furadas para drenagem do excesso do lixiviado, gerado durante o processo.

Foram utilizados resíduos orgânicos oriundos do preparo dos alimentos do refeitório universitário do CEFET-MG, *campus I* (constituído de folhas, talos, cascas de legumes e frutas cruas do pré-preparo) e de um comércio de alimentos local (folhas e frutas que iriam para o lixo). Esses resíduos foram picados em frações menores, de aproximadamente 5 cm. Como resíduos ricos em carbono (volumosos) foram utilizadas podas de árvores e dos gramados do CEFET-MG, triturados em um picador forrageiro elétrico. Os resíduos foram homogeneizados e pesados anteriormente à montagem do experimento. Foram usados 16 kg de resíduos de alimentos e 5 kg de podas de árvores e gramados em cada bombona, totalizando aproximadamente 200 kg de resíduos no experimento.

Cada bombona foi preenchida com 5 camadas intercaladas de resíduos de alimentos e de podas, começando com uma camada de podas (altura da camada = 15 cm) e resíduos de alimentos (altura da camada = 5 cm), sucessivamente até 55 cm de altura. Buscou-se, com essa proporção, manter uma relação C/N de aproximadamente 30:1. Após a montagem, os resíduos foram irrigados somente uma vez com aproximadamente 0.5 L de água potável.

O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos (revolvimento diário, a cada três dias e semanal) e três repetições. Cada bombona correspondeu a uma unidade experimental. Os revolvimentos foram realizados manualmente utilizando-se uma pá de jardinagem. O experimento foi conduzido por 30 dias, quando o material foi peneirado, utilizando-se uma peneira com malha de 5 mm.

Monitoramento dos atributos físico-químicos durante a compostagem

Foram monitorados diariamente os atributos, temperatura (com uso de um termômetro digital, modelo ITTH 1400, com haste de 90 cm de comprimento); condutividade elétrica, (condutímetro digital Instrutherm CD-880); pH e umidade (Instrutherm pH 2500). A temperatura foi medida em três profundidades diferentes das bombonas: inferior (10 cm a partir da base), meio (35 cm a partir da base) e superior (10 cm a partir do topo). Para os demais atributos estabeleceu-se para o monitoramento, o ponto central da leira (altura x largura).

Aos 30 dias, amostras de composto orgânico com 1 kg (composta por subamostras de cada unidade experimental) foram encaminhadas para realização das análises químicas. As análises foram realizadas de acordo com o Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivo, sendo utilizados os seguintes métodos: Carbono orgânico: método volumétrico de dicromato de potássio; Nitrogênio total: Macrométodo da liga de Raney; Fósforo total (P_2O_5): Método do Gravimétrico do Quimociac; Potássio (K_2O): Método volumétrico do tetrafenilborato de sódio (TFBS); Cálcio e Magnésio: solúveis em citrato neutro de amônio (CNA) ou em ácido cítrico a 2%; Enxofre: Método gravimétrico do sulfato de bário; Boro: Método volumétrico do D-manitol (D-sorbitol); Cloro: Método de Mohr; Cobre, cobalto, ferro, manganês, molibdênio, níquel, zinco: Método espectrométrico por absorção atômica; Silício: Método espectrofotométrico do molibdato de amônio; CTC: solução diluída de ácido clorídrico, eliminação do excesso de ácido, deslocamento dos íons hidrogênio adsorvidos com solução de acetato de cálcio e titulação do ácido acético formado. C/N: A relação C/N foi calculada pela divisão dos resultados em porcentagem em massa obtidos para o carbono orgânico e o nitrogênio, ambos referidos a amostra em base seca (Mapa, 2017).

Teste de germinação

Ao final do experimento, vinte gramas de composto orgânico em condições naturais oriundo de cada unidade experimental foram diluídas em 100 mL de água destilada. As soluções foram agitadas manualmente por 2 minutos. O teste foi conduzido em caixas Gerbox, utilizando-se papel de germinação, previamente umedecido com água destilada. Foram adicionadas 100 mL de solução sobre o papel de germinação. Vinte sementes de alface (*Lactuca sativa*) e 20 de rúcula (*Eruca sativa*) foram colocadas em cada caixa, em triplicata. As caixas foram embaladas com papel alumínio e colocadas em uma câmara de germinação com temperatura constante de 25°C por sete dias. Foi utilizada a porcentagem de germinação aos sete dias, para os cálculos.

Análises estatísticas

Os parâmetros temperatura, umidade, pH, condutividade elétrica e porcentagem de germinação foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% ($p < 0.05$), utilizando-se o software SISVAR (Ferreira, 1996).

Resultados e discussão

Temperatura

A temperatura é um dos principais parâmetros para verificar o progresso do processo de compostagem, como para indicar a taxa de atividade microbiana (Manu *et al*, 2019), além do controle de patógenos (Smith e Jasim, 2009; Adhikari *et al.*, 2012).

O processo de compostagem tem três estágios sucessivos de temperatura. Inicialmente, a temperatura aumenta rapidamente para 55-65°C num período de 24-72h (primeira fase mesofílica), é a fase onde compostos ricos em energia e facilmente degradáveis, como açúcares e proteínas, são abundantes e degradados por fungos e bactérias. Sucessivamente, ocorrerá a fase termofílica, onde ocorre a bioestabilização dos resíduos e a destruição de patógenos é mais eficaz. Organismos adaptados à temperatura mais alta obtêm uma vantagem competitiva e gradualmente substituem os mesofílicos iniciais. Por fim, a temperatura começa a diminuir (segunda fase mesofílica), os microrganismos termofílicos desaparecem devido ao esgotamento dos substratos, ocorrendo a diminuição gradativa da temperatura, até igualar-se à do ambiente (Insam e Bertoldi, 2011).

Neste estudo, em todos os tratamentos, a maior temperatura foi observada logo nos primeiros dias após o início do experimento, demarcando uma primeira fase mesofílica muito curta e a termofílica já após 24 h. Em seguida, observou-se o início da segunda fase mesofílica e a partir daí, o decaimento da temperatura progressivo ao longo do tempo, até igualar-se à do ambiente. Apenas o tratamento com revolvimento semanal apresentou temperatura superior a 50°C; entretanto, por um período de apenas dois dias. Durante o experimento, o tratamento com revolvimento diário apresentou menores temperaturas em relação aos demais, para todas as profundidades. (Figura 1).

Ceglie e Abdelrahman (2014) reiteram que a fase termofílica é importante para a eliminação de plantas daninhas e larvas de insetos. Polprasert e Koottatep (2017) reproduzem dados do Banco Mundial, que indicam a eliminação de microrganismos patogênicos como *Vibrio cholerae*, *Shigella*, *Taenia* e vírus entéricos, com a combinação tempo-temperatura de pelo menos: 1h à $T \geq 62^{\circ}\text{C}$, 1 dia à $T \geq 50^{\circ}\text{C}$ e 1 semana à $T \geq 46^{\circ}\text{C}$. Porém, segundo Zhang e Sun (2016), a temperatura deve permanecer $> 55^{\circ}\text{C}$ por três dias consecutivos. Já Bohn (2011) cita que para compostagem em recipientes fechados, com ambiente aeróbico, há necessidade de permanência de pelo menos uma semana à temperatura de 65°C.

No Brasil, a recente resolução do Conama n. 481/2017, estabelece que durante o processo de compostagem deverá ser garantido o período termofílico de três dias, à temperatura $>60^{\circ}\text{C}$, necessário para redução de agentes patogênicos. Nenhum dos tratamentos neste estudo apresentou as temperaturas indicadas pela resolução Conama nº 481/2017. Trabalhos realizados com compostagem em recipientes fechados mostram que as temperaturas também não alcançaram valores acima de 60°C (Lleó *et al.* 2013; Faverial e Sierra, 2014; Vich *et al.*, 2017; Bhave e Joshi, 2017).

Ao final do experimento, o tratamento com revolvimento diário manteve os menores valores de temperatura. Segundo Kiehl (1985), os revolvimentos feitos periodicamente provocam perda de calor e umidade. O revolvimento semanal e o revolvimento a cada três dias apresentaram as maiores temperaturas finais, nas três diferentes profundidades analisadas (Tabela 1).

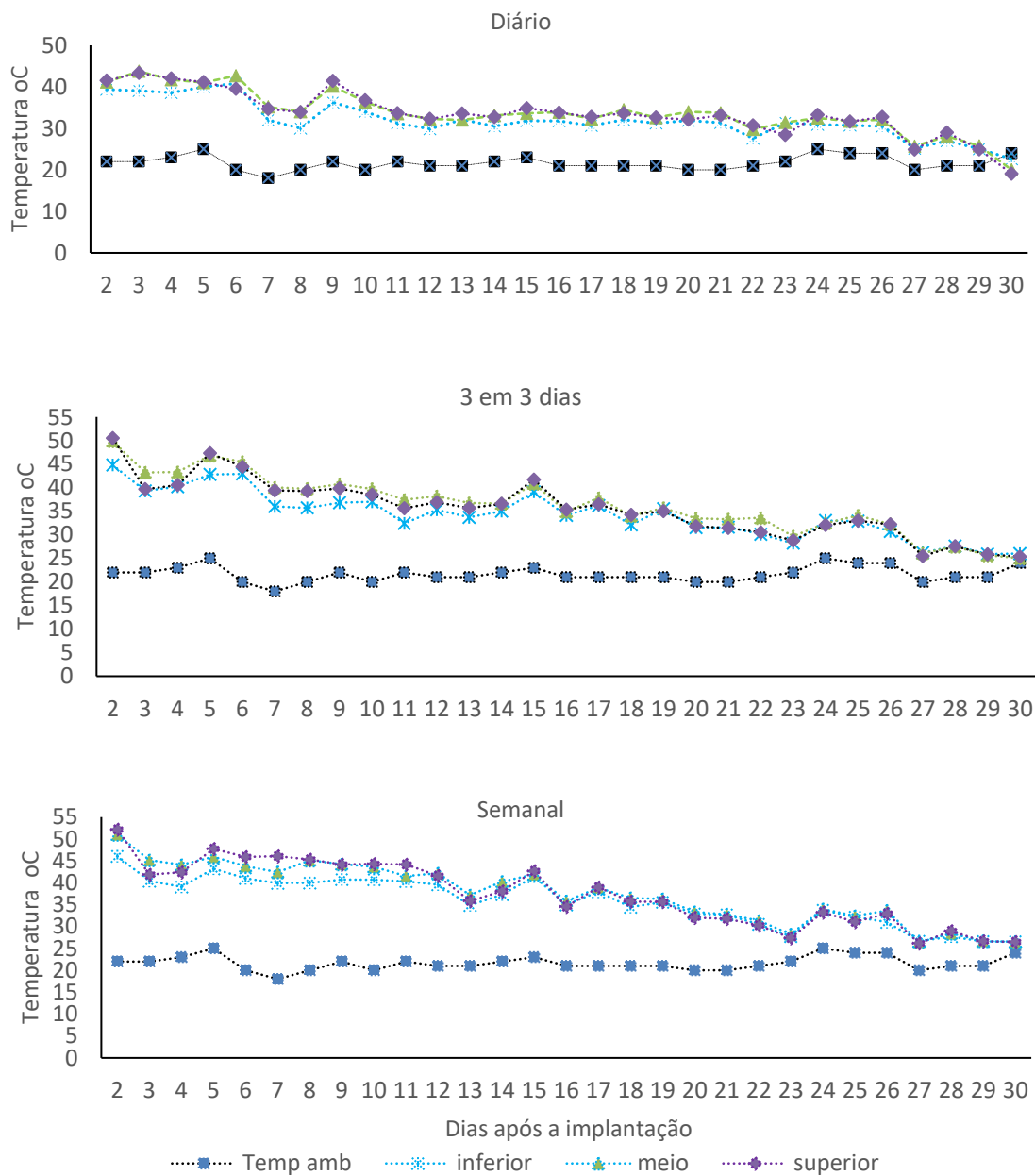


Figura 1. Evolução da temperatura (°C), em função das diferentes frequências de revolvimento, considerando-se as posições inferior, meio e superior, dentro das bombonas e temperatura ambiente.

Tabela 1. Temperatura (°C) nas diferentes profundidades das bombonas, em função da frequência de revolvimentos, ao final do experimento (30 dias após implantação).

Frequência	Inferior	Meio	Superior
Diária	22.6 b*	20.0 b	18.5 b
A cada três dias	26.1 a	25.0 a	25.4 a
Semanal	26.6 a	26.5 a	26.5 a
CV%	5.38	7.61	7.71

(*) Letras iguais na coluna– não houve diferença estatística pelo teste de Tukey ($P<0.05$)

Umidade

Os resíduos de alimentos utilizados no experimento (frutas e folhas de legumes) possuem umidade muito elevada (Ghinea et al., 2019). E, apesar do uso de materiais secos (podas de árvores e gramados), a umidade do material dentro das bombonas se manteve alta (superior a 70%) durante todo o monitoramento, em todos os tratamentos. Além disso, houve geração de lixiviado em todas as bombonas. Não houve diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p<0.05$) entre os tratamentos para o atributo umidade, nas amostras analisadas ao final do experimento.

O ambiente fechado das bombonas provavelmente impediu a evaporação de vapor d'água e a sua condensação pode ter contribuído para os teores de umidade altos e constantes, impedindo também a elevação da temperatura na fase termófila. Esse fenômeno também foi relatado por Abdullah et al. (2013) e Orthodoxou *et al.* (2015), em estudos com compostagem em recipientes fechados. Segundo Merkel (1981), a faixa de umidade ideal para obter-se a decomposição máxima é entre 40 e 60%, pois proporciona o suprimento de água ideal para o crescimento de organismos biológicos envolvidos e para as reações bioquímicas que ocorrem durante a compostagem. Teores de umidade acima de 65%, de acordo com Lima (2015), podem afetar a aeração, favorecendo o processo de anaerobiose, apresentando odores, atração de insetos ou lixiviação de chorume.

Atributos químicos

Ao final do experimento, não foi observado diferença estatística para o pH, entre os tratamentos ($p<0.05$). Porém, durante o experimento, observou-se que nos primeiros três dias, no tratamento com revolvimento diário houve uma redução brusca de 5.5 para 4.0. Posteriormente, no tratamento com revolvimento diário, o pH subiu gradativamente a partir do 4º dia até o final do experimento, finalizando em 6.5. Já nos tratamentos com revolvimento a cada três dias e semanal, o pH subiu de 5.8 e 5.5 desde o início, respectivamente, até alcançarem 6.5, ao final do experimento (Figura 2).

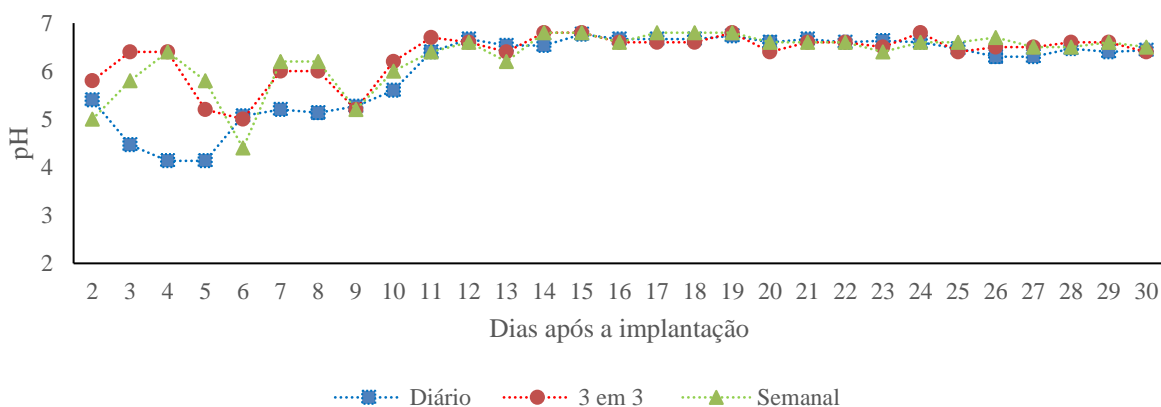


Figura 2. Evolução do pH durante a compostagem, em função dos diferentes revolvimentos (diário, a cada três dias e semanal), entre os dias 28/08 a 06/10/2017.

Segundo Diaz e Savage (2011) e Zhang *et al.* (2013) esclarecem, no início da compostagem, como consequência da atividade de bactérias que degradam material carbônico complexo a ácidos orgânicos, o pH diminui. Porém, à medida que a matéria orgânica avança no processo de decomposição, o pH progressivamente aumenta para 6 a 7.

Já a condutividade elétrica (CE) indica a liberação de íons através da mineralização da matéria orgânica e, além disso, a salinidade de fertilizantes que podem afetar o desenvolvimento vegetal (Jeong *et al.*, 2017). Para evitar danos às plantas quando se utiliza composto orgânico, os sais solúveis totais não devem exceder 1.5 mS.cm^{-1} para culturas de viveiro e 2.0 mS.cm^{-1} para cultivo a campo (Tittarelli *et al.*, 2011). A CE foi medida ao final do experimento e observou-se que os valores foram menores que os limites de danos às plantas; ademais, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0.05$), onde os valores foram 0.17; 0.12 e 0.11 mS.cm^{-1} , para os revolvimentos diário, a cada três dias e semanal, respectivamente. Valores similares também foram observados por Vázquez, Sen e Soto (2015).

Foram analisados o conteúdo de nutrientes nas amostras dos compostos orgânicos e os resultados comparados aos limites estabelecidos pela normativa IN nº 25/2009 (Brasil, 2009), que visa a estabelecer padrões mínimos de qualidade de composto para comercialização. Para os atributos C- orgânico, N-total e Ca, os teores encontrados no composto atenderam ou estavam muito próximos dos permitidos pela regulamentação brasileira (Tabela 2). A normativa brasileira não exige a determinação de P e K. Por sua vez, a legislação da Espanha exige que os teores de N, P, K sejam superiores a 1%, não ultrapassando a soma dos três a 4% (Vázquez, Sen e Soto, 2015). Neste experimento, os valores de N, P e K ficaram abaixo de 1%.

Tabela 2. Comparação dos parâmetros químicos em função da frequência dos revolvimentos e os valores normativos para comercialização de fertilizantes orgânicos pela IN nº 25/2009.

Parâmetros	Unidade	Diário	A cada 3 dias	Semanal	IN 25/2009 ¹
C orgânico		16.71	16.71	16.67	15
N total		0.46	0.52	0.53	0.5
P ₂ O ₅ Total		0.11	0.33	0.16	-
K ₂ O		0.3	0.3	0.43	-
Ca		0.78	1.01	1.01	1
Mg		0.08	0.11	0.11	1
S		0.03	0.04	0.04	1
B		-	-	-	0.03
Cl	%	-	-	-	0.1
Co		0.0003	0.0003	0.0003	0.005
Cu		0.003	0.004	0.005	0.05
Fe		0.102	0.132	0.127	0.2
Mn		0.005	0.005	0.005	0.05
Mo		-	-	-	0.005
Ni		-	-	-	0.005
Si		-	-	-	1.0
Zn		0.002	0.002	0.002	0.1
CTC ²	(mmol/kg)	1175.75	1210.45	1245.38	Conforme declarado
CTC/C		70.36	72.44	74.71	Conforme declarado
C/N		36.33	32.13	31.45	Máx. 20

1. Valores mínimos (exceto umidade e relação C/N), expressos na base a 65°C;

2. CTC – capacidade de troca catiônica. É obrigatória a declaração no produto.

Os teores de nutrientes em compostos orgânicos dependem das matérias primas utilizadas e, portanto, variam grandemente (Chatterjee *et al.* 2013). Guinea *et al.* (2019) encontraram teores de N inferiores a 1%, em resíduos de frutas e legumes. Por sua vez, Kiehl (2002) relata que um composto produzido com resíduos contendo folhas, cascas de frutas e capinas possuem teores de P e K baixos. Oviedo-Ocaña *et al.* (2019) também observaram valores baixos de P em compostagem realizada com resíduos de alimentos. Em relação ao K, por ser um íon muito solúvel e móvel, é facilmente perdido por lixiviação (Tumuhairwe *et al.*, 2009; Vázquez, Sen e Soto, 2015). Neste experimento, os teores de macronutrientes encontrados no experimento são considerados baixos para um composto orgânico maduro, de acordo com Kiehl (1985). Para os demais parâmetros (S, Co, Cu, Fe, Mn e Zn), os valores foram inferiores aos estabelecidos pela IN 25/2009.

A relação C/N das amostras estava acima do permitido (máximo de 20), pela IN 25/2009. Vich *et al.* (2017), em ensaios com compostagem em recipientes fechados, também encontraram resultados semelhantes. Alta relação C/N indica que o processo de decomposição e humificação

não está completo (Vázquez, Sen e Soto, 2015). Segundo Kiehl (2004), quando o composto atinge a semicura, ou bioestabilização, a relação C/N se situa em torno de 18/1 e, quando atinge a maturidade - ou seja, transformou-se em produto acabado ou humificado -, a relação C/N se situa em torno de 10/1. Desta forma, o material obtido neste experimento, ainda estava em processo de bioestabilização, ou seja, não totalmente mineralizado.

Os valores de CTC para os três tratamentos foram superiores a 1000 mmolc/kg, evidenciando um alto conteúdo de matéria orgânica, por grande quantidade de material ainda não decomposto. Reis (2005) enfatiza que a faixa ótima de CTC para um composto final é entre 600 a 800 mmolc/kg.

Teste de germinação

As percentagens de germinação em ambas as hortaliças testadas (rúcula - 80, 83 e 88 % e alface -26, 30 e 43 %), não apresentaram diferenças significativas ($P < 0.05$) entre os tratamentos revolvimento diário, a cada três dias e semanal, respectivamente, nas espécies analisadas separadamente. Segundo Luo *et al.* (2018), taxa superior a 70% indicam que o composto não interferiu na germinação. A alface mostrou-se mais sensível, com uma percentagem de germinação bem inferior à rúcula. De acordo com Emino e Warman (2004), a alface é considerada uma das espécies mais sensíveis para os testes de fitotoxicidade.

Segundo Insam e Bertoldi (2007), nas primeiras semanas da compostagem há uma liberação temporária de fitotoxinas (metabólitos intermediários, amônia, etc.). Ao final do processo, essa fitotoxicidade é completamente superada e o produto final é benéfico para o crescimento da planta.

Conclusões

Tanto a temperatura, umidade, relação C/N e alguns macronutrientes estão abaixo dos valores adequados para um composto maturado ou humificado. A condutividade elétrica indicou que a quantidade de sais, nos três tratamentos não causaria danos ao desenvolvimento fisiológico das plantas.

O teste de germinação mostrou que para a rúcula não houve fitotoxicidade, porém a alface se mostrou mais sensível.

Em face do exposto, as frequências de revolvimento testadas não proporcionaram a aceleração do estágio de bioestabilização aos 30 dias. Foi possível identificar a fase termófila e a segunda fase mesófila, nos três tratamentos. No entanto, a fase termófila, por não ter alcançado temperaturas superiores a 60°C, pode não ter possibilitado a eliminação de sementes invasoras, alguns fitopatógenos e/ou patógenos humanos, assim o composto não poderia ser recomendado para culturas alimentícias. Mas, poderia ser utilizado como condicionar do solo, plantio de culturas perenes e covas de árvores, em parques, jardins e projetos de reflorestamento.

Em áreas espacialmente reduzidas e com grande geração de resíduos orgânicos, do início da decomposição até o término da bioestabilização, a compostagem pode ser realizada em recipientes fechados e, posteriormente, para a maturação pode-se amontoá-los em um local coberto, por mais duas ou três semanas. Por ser uma prática simples e de fácil implantação, recomenda-se a compostagem em condomínios, instituições públicas e comércio de alimentos, pois recicla os resíduos orgânicos de forma eficiente, reduz os gastos de transporte para sua disposição, aumentando a vida útil dos aterros sanitários e, por gerar um fertilizante natural para hortas urbanas e jardins.

Referências

- Abdullah, N., Chin, N. L., Mokhtar, M. N., Taip, F. S. (2013) Effects of bulking agents, load size or starter cultures in kitchen-waste composting. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, **2**(1), 1-3. <http://doi.org/10.1186/2251-7715-2-3>
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1996) *NBR13591: Compostagem*, Rio de Janeiro, 1- 4.
- Abreu, M. (2017) *Compostagem Doméstica, comunitária e institucional de Resíduos Orgânicos*. Brasília-Ministério do Meio Ambiente-Cepagro.
- Adhikari, B. K., Tremier, A., Martinez, J., Barrington, S. (2012) Home composting of organic waste—part 1: effect of home composter design. *International Journal of Environmental Technology and Management*, **15**, (3-6), 417-437. <http://doi.org/10.1504/IJETM.2012.049238>
- Aleluia, J., Ferrão, P. (2017) Assessing the costs of municipal solid waste treatment technologies in developing Asian countries. *Waste management*, **69**, 592-608. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.047>
- Andersen, J. K., Boldrin, A., Christensen, T. H., Scheutz, C. (2012) Home composting as an alternative treatment option for organic household waste in Denmark: an environmental assessment using life cycle assessment-modelling. *Waste Management*, **32** (1), 31–40. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.014>
- Arrigoni, J. P., Paladino, G., Garibaldi, L., Laos, F. (2018) Inside the small-scale composting of kitchen and garden wastes: Thermal performance and stratification effect in vertical compost bins. *Waste Management*, **76**, 284-293. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.010>
- Bhave, P.P., Joshi, Y. S. (2017) Accelerated In-vessel Composting for Household Waste. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, **98**(4), 367-376. <http://doi.org/10.1007/s40030-017-0258-3>
- Brasil MAPA (2009) *Instrução Normativa nº 25, de 23 de julho de 2009*. Aprova normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura, conforme anexos a esta instrução normativa. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 28 julho 2009. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=recuperarTextoAtoTematicaPortal&codigoTematica=1229186>
- Brasil MMA (2017) *Resolução nº 481, de 03 de outubro de 2017*. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, nº 191, de 04 de outubro de 2017.
- Bringhenti, J. R., Korres, A. M. N., Moreira, A. M. M., Rocha, S. M., Gunther, W. M. R. (2018) *Organic Waste Composting and Vermicomposting as Sustainable Practice in Higher Education Institutions*. In: Towards Green Campus Operations. Springer, Cham, 159-173. http://doi.org/10.1007/978-3-319-76885-4_10

- Ceglie F. G, Abdelrahman H. (2014) Ecological Intensification through Nutrients Recycling and Composting in Organic Farming. In: Composting for Sustainable Agriculture. *Springer International Publishing*, 1–22. http://doi.org/10.1007/978-3-319-08004-8_1
- Chatterjee, N., Flury, M., Hinman C., Cogger, C. G. (2013) *Chemical and physical characteristics of compost leachates. A Review Report prepared for the Washington State Department of Transportation*. Washington State University.
- Chen, Y. (2016) A cost analysis of food waste composting in Taiwan. *Sustainability*, **8**(11), 1210. <http://doi.org/10.3390/su8111210>
- De Bertoldi, M. (2013) *The science of composting*. Springer Science & Business Media, 504 pp.
- Diaz, L., Savage, G. (2011) *Factors affecting the process*. In: Diaz, I. F. por Bertoldi, M., Bidlingmaier, W. (Ed.). Compost science and technology. Elsevier, 49-65.
- Edjabou, M.E., Petersen, C., Scheutz, CH., Astrup, T.F. (2016). Food waste from Danish households: Generation and composition. *Waste Management*. **52**, 256–268. <http://doi.org/j.wasman.2016.03.032>
- Emino, E. R., Warman, P. R. (2004) Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization*, **12**(4), 342-348. <http://doi.org/1065657X.2004.10702203>
- Faverial, J., Sierra, J. (2014) Home composting of household biodegradable wastes under the tropical conditions of Guadeloupe (French Antilles). *Journal of Cleaner Production*, **83**, 238-244. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.068>
- Ferreira, D. F. Sisvar. (1996). Disponível em: <http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>
- Gauthier, M., Simard, L., Waaub, J.P. (2011) Public participation in strategic environmental assessment (SEA): critical review and the Quebec (Canada) approach. *Environmental Impact Assessment Review*, **31**, 48–60. <http://doi.org/doi.org/10.1016/j.eiar.2010.01.006>
- Guran, S., Mersýky, R., Specca, S., Brennan-Tonetta, M. (2019) *New Approaches for Solid Waste Management to Maximize Organic Waste Reutilization*. In: Waste Valorisation and Recycling. Springer, Singapore, 37-45. http://doi.org/10.1007/978-981-13-2784-1_4
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010) *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2008*. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro, 219 pp.
- Insam, H., Bertoldi, M. (2011) *Microbiology of the Composting Process*. In: Diaz, I. F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W. (Ed.). Compost science and technology Elsevier, 25-48.
- IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2012) *Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos*. Relatório de pesquisa. Brasília, 82 pp.
- Jeong, K., Kim, J. K., Ravindran, B., Lee, D. J., Wong, J. W., Selvam, A., Karthikeyan, O. P., Kwag, J. H. (2017) Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for Hanwoo manure management. *Bioresource Technology*, **245**, 201-206. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.127>
- Liang, J., Yang, Z., Tang, L., Zeng, G., Yu, M., Li, X., Wu, H., Qian Y., Li, X., Luo, Y. (2017) Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated wetland soil remediated with combined biochar-compost. *Chemosphere*, **181**, 281-288. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.081>
- Lima, L. C. (2015) *Avaliação de Diferentes Fontes de Carbono e Nitrogênio para Compostagem dos Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário da UFLA*. Dissertação (Mestrado), Curso de Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 94 pp.
- Lin, L. Xua, F., Gea, X., Li, Y. (2018) Improving the sustainability of organic waste management practices in the food-energy-water nexus: A comparative review of anaerobic digestion and composting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **89**, 151-167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.025>
- Lleó, T., Albacete, E., Barrera, R., Font, X., Artola, A., Sánchez, A. (2013) Home and vermicomposting as sustainable options for biowaste management. *Journal of cleaner production*, **47**, 70-76. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.011>

- Loan, L. T. T., Takahashi, Y., Nomurac, H., Yabeb, M. (2019) Modeling home composting behavior toward sustainable municipal organic waste management at the source in developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, **140**, 65-71. <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.016>
- Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., Zhang, D. (2018) Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, **71**, 109-114. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.023>
- Karkanias, C., Perkoulidis, G., Moussiopoulos, N. (2016) Sustainable management of household biodegradable waste: lessons from home composting programmes. *Waste and biomass valorization*, **7**(4), 659-665. <http://doi.org/10.1007/s12649-016-9517-1>
- Kiehl, E. J. (1985) *Fertilizantes Orgânicos*. São Paulo: Agronômica Ceres Ltda, 492 pp.
- Kiehl, E. J. (2004) *Manual de Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto*. 3ª ed. Piracicaba, SP, 171 pp.
- Manu, M. K., Kumar, R., Garg, A. Decentralized composting of household wet biodegradable waste in plastic drums: Effect of waste turning, microbial inoculum and bulking agent on product quality. *Journal of Cleaner Production*, **226**, 233-241, 2019. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.350>
- MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2017) *Manual de Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes e Corretivos*, Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 24 pp.
- Massukado, L. M., Schalch, V. (2010) Avaliação da qualidade do composto proveniente da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares: Compost quality assessment from organic household waste composting. *Revista - DAE, Planaltina*, **5**(3), 1-7.
- Merkel, J. A. (1981) *Composting*. In: Managing livestock wastes. AVI, Westport, CT, 306-324.
- Orthodoxou, D., Pettitt, T. R., Fuller, M., Newton, M., Knight, N., Smith, S. R. (2015) An investigation of some critical physico-chemical parameters influencing the operational rotary in-vessel composting of food waste by a small-to-medium sized enterprise. *Waste and Biomass Valorization*, **6**(3), 293-302. <http://doi.org/10.1007/s12649-014-9332-5>
- Oviedo-ocaña, E. R., Dominguez, I., Komilis, D., Sánchez, A. (2019) Co-composting of green waste mixed with unprocessed and processed food waste: influence on the composting process and product quality. *Waste and Biomass Valorization*, **10**(1), 63-74. <http://doi.org/10.1007/s12649-017-0047-2>
- Park, J. H., Lamba, D., Paneerselvama, P., Choppalaa, G., Bolana, N., Chung, J. (2011) Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal (loid) contaminated soils. *Journal of hazardous materials*, **185**(2-3), 549-574. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082>
- Polprasert, C. Koottatep, T. (2017) *Organic waste recycling: technology, management and sustainability*. IWA publishing, 538 pp.
- Raabe, R. (1981) *The Rapid Composting Method* [s/d]. (v.21251) Leaflet (University of California (System). Division of Agricultural Sciences), 03 pp. Disponível em: <http://vric.ucdavis.edu>
- Reis, M. F. P. (2005) *Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 239 pp.
- Smith, S. R., Jasim, S. (2009) Small-scale home composting of biodegradable household waste: overview of key results from a 3-year research programme in West London. *Waste Management & Research*, **27**(10), 941-950. <http://doi.org/10.1177/0734242X09103828>
- Storino, F., Menéndez, S., Muro, J., Aparicio-Tejo, P. M., Irigoyen, I. (2017) Effect of feeding regime on composting in bins. *Compost Science & Utilization*, **25**(2), 71-81. <http://doi.org/10.1080/1065657X.2016.1202794>
- Tittarelli, F., Petruzzelli, G., Pezzarossa, B., Civilini, M., Benedetti, A., Sequi, P. (2011) *Quality and Agronomic Use of Compost*. In: Diaz, I. F., de Bertoldi, M., Bidlingmaier, W. (Ed.). *Compost science and technology*. Elsevier, 119-152.
- Tumuhairwe, J. B., Tenywa, J. S., Otabbong, E., Ledin, S. (2009) Comparison of four low-technology composting methods for market crop wastes. *Waste Management*, **29**(8), 2274-2281. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.015>

- Vázquez, M. A., Sen, R., Soto, M. (2015) Physico-chemical and biological characteristics of compost from decentralised composting programmes. *Bioresource technology*, **198**, 520-532. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.034>
- Vaverková, M. D. et al. (2020) Composting versus mechanical–biological treatment: Does it really make a difference in the final product parameters and maturity. *Waste Management*, **106**, 173-183. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.030>
- Vich, D. V., Miyamoto, H. P., Queiroz, L. M., Zanta, V. M. (2017) Household food-waste composting using a small-scale composter. *Revista Ambiente & Água*, **12**(5), 718-729. <http://doi.org/10.4136/ambi-agua.1908>
- Zhang, L., Sun, X. (2016) Influence of bulking agents on physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, **48**, 115-126. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.032>
- Zhang, H.Y., Schuchardt, F., Li, G., Yang, J., Yang, Q. (2013) Emission of volatile sulfur compounds during composting of municipal solid waste (MSW). *Waste Management*, **33**, 957–963. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.008>
- Zorpas, A. A., Lasaridi, K., Pociovalisteanu, D. M., Loizia, P. (2018) Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities. *Journal of cleaner production*, **172**, 3567-3577. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.155>
- Zulkepli, N. E., Muis, Z. A., Mahmooda, N. A.N., Hashima, H., Hoa, W. S. (2017) Cost benefit analysis of composting and anaerobic digestion in a community: A review. *Chemical Engineering Transactions*, **56**, 1777-1782. <http://doi.org/10.3303/CET1756297>
- Williams, S. R., Zhu-Barker, X., Lew, S., Croze, B. J., Fallan, K. R., Horwath, W. R. (2019) Impact of Composting Food Waste with Green Waste on Greenhouse Gas Emissions from Compost Windrows. *Compost Science & Utilization*, **27**(1)1-11. <http://doi.org/10.1080/1065657X.2018.1550023>
- Wu, S., He, H., Inthapanya, X., Yang, C., Lu, L., Zeng, G., Han, Z. (2017) Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**(20), 16560-16577. <http://doi.org/10.1007/s11356-017-9168-1>