

Artigo Técnico

Avaliação de novas práticas de compostagem em pequena escala com aproveitamento energético

Evaluation of new composting practices in small-scale with energy recovery

Roberto Guião de Souza Lima Junior¹, Claudio Fernando Mahler²,
Albiane Carvalho Dias³, Willker Figueirêdo da Luz Junior⁴

RESUMO

Foram avaliados neste estudo novos sistemas de compostagem de mínimo impacto ambiental para o tratamento *in loco* de resíduos orgânicos. Dois tipos de composteiras e quatro formas de manejo foram testados. Focaram-se ainda duas composições de resíduos sólidos orgânicos com relação ao aproveitamento energético por aquecimento de água. Os resíduos mantiveram temperaturas termofílicas por mais de 20 dias, apresentaram produção desprezível de metano e não geraram chorume em condições de aeração passiva. Como aspectos de maior influência, podem ser considerados: a suspensão das composteiras sobre *pallets*, a composição dos resíduos, as condições de contorno das composteiras e o manejo adotado. No teste de recuperação energética, temperaturas de até 51°C foram alcançadas após 24 horas de circulação de água no sistema, sugerindo que o processo pode ser uma fonte potencial de economia de energia. O modelo de compostagem proposto é ambientalmente adequado, porque minimiza emissões e geração de lixiviado se comparado a aterros sanitários e plantas de compostagem industrial, sendo indicado para cozinhas industriais, condomínios, *shopping centers* e outros geradores em pequena e média escalas.

Palavras-chave: compostagem *in loco*; mínimo impacto; recuperação energética.

ABSTRACT

This study comprehends the research of new composting systems for the organic solid waste treatment with low environmental impact. Two types of composting, four types of management and its economic feasibility were tested, as well as two compositions of organic solid waste focused at energy recovery by heating water. The composting maintained the thermophilic process for more than 20 days, showed a non-significant CH₄ emission, maintained aerobic conditions by passive aeration, without leachate generation. The aspects with increase influence were: suspension of composters on pallets, waste composition, condition of composters, and adopted management. The test of energetic recovery showed that the water reached temperatures up to 51°C after 24 hours of recirculation, demonstrating that this process can be a potential energy source. The proposed composting model is environmental feasible, because it minimizes gas emission and leachate generation compared to the landfill or industrial composting plants. Therefore, it is suggested to be used in industrial kitchens, condos, shopping malls, and other small and medium generators.

Keywords: decentralized composting; minimum impact; energetic recovery.

INTRODUÇÃO

A compostagem de resíduos sólidos orgânicos (RSO) é uma alternativa vantajosa com relação aos aterros por conta de sua característica aeróbia, minimizando emissões e lixiviados (PIRES; MARTINHO; NI-BIN, 2011). Contudo, questões de escala são relevantes, como discutido por Martínez-Blanco *et al.* (2010), mediante a análise do ciclo de vida, que evidencia as vantagens ambientais da compostagem em pequena escala em comparação à de escala industrial, pois, mesmo predominantemente aeróbica, a compostagem pode ser fonte de CH₄, NH₃, NO₃, SO₂ e N₂O.

Nesse contexto, emissões indesejáveis podem ser minimizadas ou evitadas de acordo com o manejo, como visto em Amlinger, Peyr & Cuhls (2008), Andersen *et al.* (2010a), Ermolaev *et al.* (2014) e Zuokaite & Zigmontiene (2013). Como exemplo, citam-se as maiores emissões dos gases de efeito estufa (GEE) em compostagens caseiras com mais frequência de revolvimento em comparação às de menor frequência (ANDERSEN *et al.*, 2010a; 2011; 2012). O mesmo foi observado por Ahn *et al.* (2011) no tocante a CH₄ em resíduos agrossilvopastoris, o que causou certa surpresa, pois acreditava-se que quanto mais revoltamentos mais aerobiose e menos formação de CH₄.

¹Professor do Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) - Volta Redonda (RJ), Brasil.

²Professor do Departamento de Geotecnia do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

³Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) - Seropédica (RJ), Brasil.

⁴Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

Endereço para correspondência: Roberto Guião de Souza Lima Junior - Avenida Paulo Erlei Alves Abrantes, 1.325 - Três Poços - 27240-560 - Volta Redonda (RJ), Brasil - E-mail: robertoguiiao@hotmail.com

Recebido: 11/02/16 - **Aceito:** 27/06/16 - **Reg. ABES:** 159687

Tal fenômeno pode ser explicado pela dificuldade em manter a homogeneidade de condições ambientais ideais na fermentação no estado sólido, corroborando para a formação de sítios de menor oxigenação com produção de CH_4 , que acaba tendo sua liberação facilitada pelo revolvimento (DURAND, 2003). Por outro lado, minimizando-se a frequência de revolvimento ou operando-se em condição estática controlada, microrganismos metanotróficos oxidam até 98% do CH_4 produzido na compostagem, como observado por Inácio & Miller (2009) e Jackel, Thummes & Kampfer (2005), o que é econômica e tecnicamente mais viável em operações em pequena escala.

Inácio, Bettio & Miller (2009) chamam atenção ainda para o potencial de mitigação de emissões e obtenção de créditos de carbono, considerando-se o somatório de diferentes projetos de compostagem estática em pequena escala. O composto orgânico gerado também apresenta vantagens ecológicas quanto aos fertilizantes químicos tradicionais (ANDERSEN *et al.*, 2012), agrega valor ao processo e atua como condicionador de solo (KIEHL, 1998).

Levando-se em conta as dificuldades econômicas e a fragilidade das políticas públicas de gestão de resíduos no Brasil, em que 70% dos municípios ainda dispõem seus resíduos em lixões (BRASIL, 2010), assim como a escassez no mercado de equipamentos viáveis sanitária ou economicamente para o tratamento *in loco* dos RSO gerados em condomínios, cozinhas industriais, supermercados, escolas e outros, este estudo testou o desempenho de novos modelos de composteira e estratégias de compostagem de mínimo impacto, fácil instalação e operação sem proliferação de vetores ou odores, com foco no tratamento *in loco* dos restos de alimentos e aparas vegetais. Foi também verificado o aproveitamento energético da compostagem via aquecimento de água, buscando agregar valor ao processo.

METODOLOGIA

Foram testados e monitorados por 60 dias dois modelos de composteira, chamadas de 1 e 2, utilizando dois gabiões de 4 m de comprimento \times 1 m de altura \times 1 m de largura, divididos cada um em quatro compartimentos (A, B, C e D) de 1 m³ (Figura 1). As composteiras

foram cobertas com manta de polietileno de alta densidade (PEAD) para controle da umidade proveniente de chuvas, e seus compartimentos, revestidos lateralmente por mantas de drenagem compostas por filtros geotêxteis em seus dois lados, núcleo drenante plástico tridimensional com 90% de vazios. As composteiras também foram apoiadas sobre *pallets*, incrementando sua aeração passiva por todos os lados, inclusive pela base, via convecção térmica, para “efeito chaminé”, descrito em Andersen *et al.* (2010b). Abaixo dos *pallets*, instalou-se um leito com membrana de PEAD de 1 mm, para proteção do solo e coleta de lixiviados.

A composteira 1 também foi equipada com um tubo de drenagem de 200 mm de diâmetro, perfurado em toda a sua extensão, no centro de cada um de seus compartimentos, simulando uma chaminé, para aumentar a aeração passiva dos RSO (Figura 1).

Aportaram-se os resíduos nos compartimentos A, B, C e D de cada composteira em um período de 15 dias, sendo eles inoculados, conforme descrito na Tabela 1, e cobertos por uma camada de folhas secas com 5 cm de altura após cada aporte de RSO, com o objetivo de auxiliar a manutenção da temperatura, da umidade e o combate a vetores.

Os RSO foram constituídos experimentalmente por 33,3% de restos de alimentos, 33,3% de grama ou folhas secas e 33,3% de troncos triturados em volume, somando cerca de 500 kg de RSO por compartimento.

Tabela 1 - Estratégias de manejo dos compartimentos.

Compartimentos	Estratégia de inoculação
A	RSO inoculados com 10% de seu volume com composto após cada aporte.
B	RSO inoculados com 10% de seu volume com composto no primeiro aporte.
C	RSO inoculados com 10% de seu peso úmido com inóculo líquido EM® a cada aporte. Composição de EM®: bactérias acidolácticas, bactérias fototróficas e leveduras.
D	Compartimentos controle, recebendo RSO sem inoculante externo.

EM®: effective microorganisms.

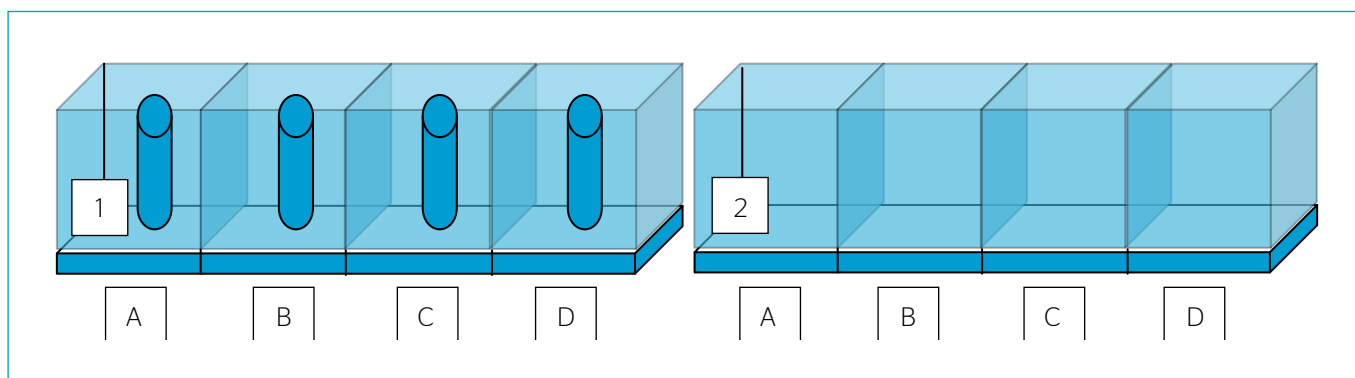


Figura 1 - Composteiras 1 e 2 e seus compartimentos A, B, C, D.

Operaram-se as composteiras de maneira estática, sem revolvimento. Ou seja, a cada aporte, apenas se abria a camada de folhas secas que cobria o material aportado anteriormente, facilitando o contato dos RSO frescos com os já em compostagem.

Os compartimentos foram monitorados quanto à temperatura e umidade a 10, 25 e 50 cm de distância da parede e a 25, 50 e 75 cm de profundidade em cada compartimento, utilizando termômetro e medidor de umidade analógicos com haste de 90 cm, modelo Reotemp, totalizando 1.800 leituras em 60 dias de monitoramento.

Os percentuais dos gases CH_4 e O_2 foram medidos a 10, 25 e 50 cm da parede e a 30 e 60 cm de profundidade em cada compartimento, por meio de um analisador de gás Dräger modelo X-AM7000 conectado a uma haste metálica de 1 m, chegando ao total de 1.200 leituras.

O mesmo analisador de gás foi usado para verificar as emissões de cada compartimento, associado a um fluxímetro modelo ADM2000, da Agilent Technologies, e a uma câmara de fluxo em formato piramidal, ocupando toda a superfície de cada compartimento, conforme descrito em Andersen *et al.* (2010a).

Os dados foram agrupados em duplas de tratamento, considerando-se as médias obtidas nos compartimentos A, B, C e D das composteiras 1 e 2, ou seja, 1A e 2A, 1B e 2B, 1C e 2C e 1D e 2D, as quais foram tratadas como repetições, pois as diferenças entre as composteiras 1 e 2, relativas à presença de aeração central na composteira 1, eram as mesmas para os quatro tipos de tratamento, chamados daqui em diante simplesmente de compartimentos A, B, C e D. Também se avaliaram os dados levando-se em conta somente as composteiras 1 e 2, para identificação de variações entre ambas, englobando as médias de dados obtidos nos compartimentos A, B, C e D de cada composteira em conjunto, uma vez que as diferenças entre esses compartimentos também eram comuns às duas composteiras.

Além disso, foram avaliados o pH, a relação carbono e nitrogênio (C/N) e os nutrientes P, K, Na e Mg dos resíduos antes do aporte e a 60 dias em compostagem, com amostras em duplicata, seguindo as metodologias descritas em Abreu, Andrade & Falcão (2006).

Os lixiviados gerados nas composteiras 1 e 2, independentemente dos compartimentos, foram avaliados quanto ao pH e à demanda química de oxigênio (DQO) após 60 dias em compostagem, com amostras em duplicata, de acordo com metodologia sugerida em “*Standard methods for examination of water and wastewater*” (APHA; AWWA; WPCF, 2005).

O termo chorume foi designado para nomear subprodutos líquidos dos RSO em anaerobiose, e o termo lixiviado, para nomear os líquidos provenientes de operações de umectação das composteiras via aporte de água, distinguindo-os.

As comparações entre os parâmetros citados foram feitas por análise de variância (Anova) ao nível de significância de 95% de confiança, com verificação prévia da normalidade e da

homocedasticidade das variáveis, como sugerido por Sokal & Rohlf (2012). Como a maioria dos dados não atendeu a esses requisitos, foi utilizada a transformação logarítmica $\text{Log}(x+1)$, em que Log é o logaritmo na base 10, e x , o valor não transformado. As transformações foram feitas previamente à Anova e seguidas do teste *a posteriori* de diferenças de médias de Tukey ao nível de confiança de 95% ($p < 0,05$). Os dados relativos às variações de profundidade e distância da parede dos compartimentos foram apresentados separadamente, entre todos os compartimentos e as composteiras, para um melhor entendimento de seu comportamento, tendo em vista as diferenças entre tratamentos e composteiras.

Para o teste de aproveitamento energético via aquecimento de água, utilizou-se uma composteira com volume total de 2 m^3 e foram testadas duas composições de resíduos expressas em volume: 1) composição: 33,3% de restos de alimentos, 33,3% de grama e folhas (secas e verdes), e 33,3% de troncos triturados; 2) composição: 50% de troncos triturados e 50% de grama verde.

A composteira foi equipada com 44 m de serpentina de cobre, diâmetro de 12,70 mm, imersa nos RSO a 50 cm de distância do fundo. Nela, foram circulados 300 L de água 24 horas após o aporte dos RSO entre a composteira e um *boiler* com isolamento térmico, via bomba elétrica, com a medição de temperatura sendo feita no ambiente e na saída de água da composteira.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Temperatura

Os compartimentos A, B, C e D apresentaram temperaturas médias mesofílicas e atingiram máximas termofílicas próximas dos 70°C (Gráfico 1A), as quais foram mantidas por mais de 20 dias consecutivos, tempo suficiente para a higienização dos resíduos (USEPA, 1992). Temperaturas significativamente menores foram observadas nos compartimentos A em relação aos C e D, o que pode ter contribuído para os 10% de composto adicionado como inóculo nesses compartimentos, amenizando sua temperatura, por melhorar a porosidade e conseqüentemente a oxigenação dos RSO, da mesma forma como observado em solos, nos quais a adição de composto favorece a formação de grânulos (KIEHL, 1998).

Entre as composteiras, temperaturas significativamente maiores foram observadas na 2 (Gráfico 1B), o que foi atribuído à ausência de chaminé central.

No interior dos compartimentos da composteira 1, constataram-se as maiores temperaturas a 25 cm de distância da parede dos compartimentos, contra 50 cm nos compartimentos da composteira 2, evidenciando a influência da chaminé presente nos compartimentos da composteira 1 como elemento diferencial no que

tange à refrigeração passiva do sistema. Avaliando-se verticalmente, verificou-se um padrão comum aos compartimentos das composteiras 1 e 2, relativo à obtenção das maiores médias de temperatura a 25 cm de profundidade, se comparadas a 50 e 75 cm. Esse resultado, provavelmente relacionado ao posicionamento das composteiras sobre *pallets*, modifica os padrões tradicionais de estabelecimento das maiores temperaturas na base de leiras e composteiras convencionais, como averiguado por Inácio *et al.* (2009) e Jackel, Thummes & Kampfer (2005). Tal aspecto pode auxiliar o estabelecimento do “efeito chaminé” à medida que ajuda na redistribuição do calor pelo sistema, influenciando positivamente a oxigenação passiva e minimizando a formação dos sítios de anaerobiose que resultam na geração de CH₄ e chorume (MÜNNICH; MAHLER; FRICKE, 2006) (Gráfico 2).

Gases

O percentual de CH₄ variou entre 0,0 e 2,6% nos resíduos, com maior média abaixo de 0,2% no tratamento D (Gráfico 3A). Essa minimização de geração de CH₄ contrasta com o observado por Inácio *et al.* (2009), estudando leiras de dimensionamento, composição e regime de aporte bastante semelhantes aos do presente estudo, em que foi encontrado valor médio de até 15% de CH₄ em áreas centrais de suas leiras, cerca de seis vezes mais que o maior resultado máximo obtido em áreas centrais desta investigação. Tal resultado positivo pode ser relacionado à aeração passiva eficiente, fruto dos materiais e das estratégias de manejo adotados, garantindo condições aeróbias em todos os compartimentos, mesmo os desprovidos de chaminé, uma vez que a geração de CH₄ está diretamente associada com o estabelecimento das condições anaeróbias nos RSO (MÜNNICH; MAHLER; FRICKE,

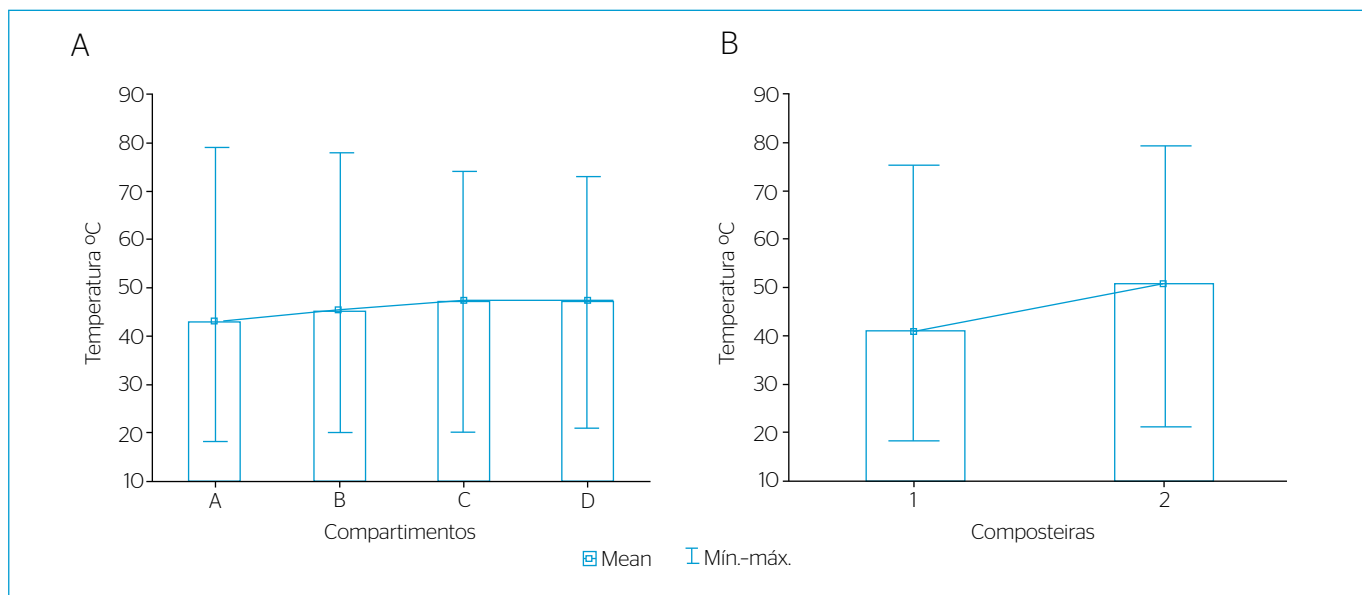


Gráfico 1 - Temperaturas médias, mínimas e máximas por compartimentos (A) e composteiras (B), em °C.

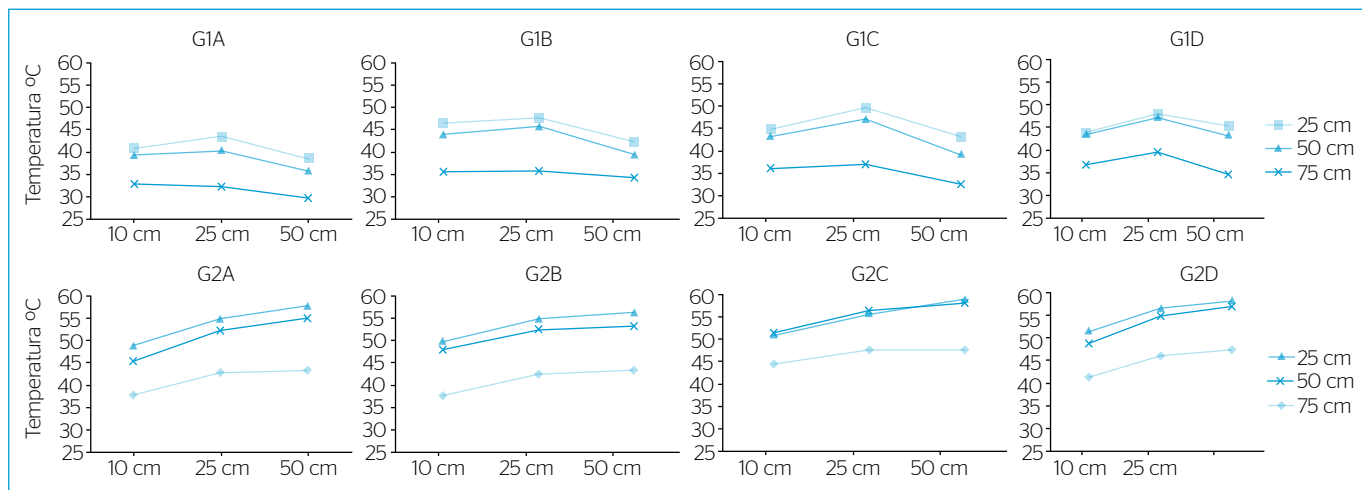


Gráfico 2 - Temperaturas médias em °C no interior dos compartimentos a 10, 25 e 50 cm de distância da parede e a 25, 50 e 75 cm de profundidade.

2006), geralmente correlatas à alta de umidade e à baixa penetração de O_2 (JIANG *et al.*, 2011; KIEHL, 1998).

Contudo, mesmo com a pequena geração de CH_4 , foram achados percentuais significativamente menores desse gás nos resíduos do tratamento A em comparação aos C e D. Tal aspecto pode ser atribuído ao composto em maturação adicionado como inóculo a cada aporte em A, sugerindo eficiência dos microrganismos metanotróficos presentes ali em colonizar os RSO e oxidar o CH_4 eventualmente produzido, como comprovado em Jackel, Thummes & Kampfer (2005) e Rose, Mahler & Izzo (2012), investigando a minimização das emissões de CH_4 em compostagem e aterros sanitários com cobertura final de composto.

No tocante às composteiras, ambas apresentaram baixos percentuais de CH_4 em seus resíduos (Gráfico 3B), embora a composteira 1 tenha

apresentado valores significativamente menores que a 2, o que se atribui à maior oxigenação e predominância de temperaturas mesofílicas em 1, uma vez que os microrganismos metanogênicos se desenvolvem melhor em temperaturas termofílicas e os metanotróficos encontram melhores condições de crescimento e oxidação de CH_4 em temperaturas mesofílicas (JACKEL; THUMMES; KAMPFER, 2005).

Horizontalmente, no interior da composteira 1, as maiores médias de CH_4 foram observadas nos resíduos a 25 cm de distância da parede da composteira, por conta da aeração central desses compartimentos. Na composteira 2, sem aeração central, os maiores percentuais de CH_4 predominaram a 50 cm de distância da parede da composteira. As variações do CH_4 por profundidade não exibiram padrão característico, com maiores valores alterando-se entre 30 e 60 cm de profundidade, embora tenham predominado maiores valores a 60 cm (Gráfico 4).

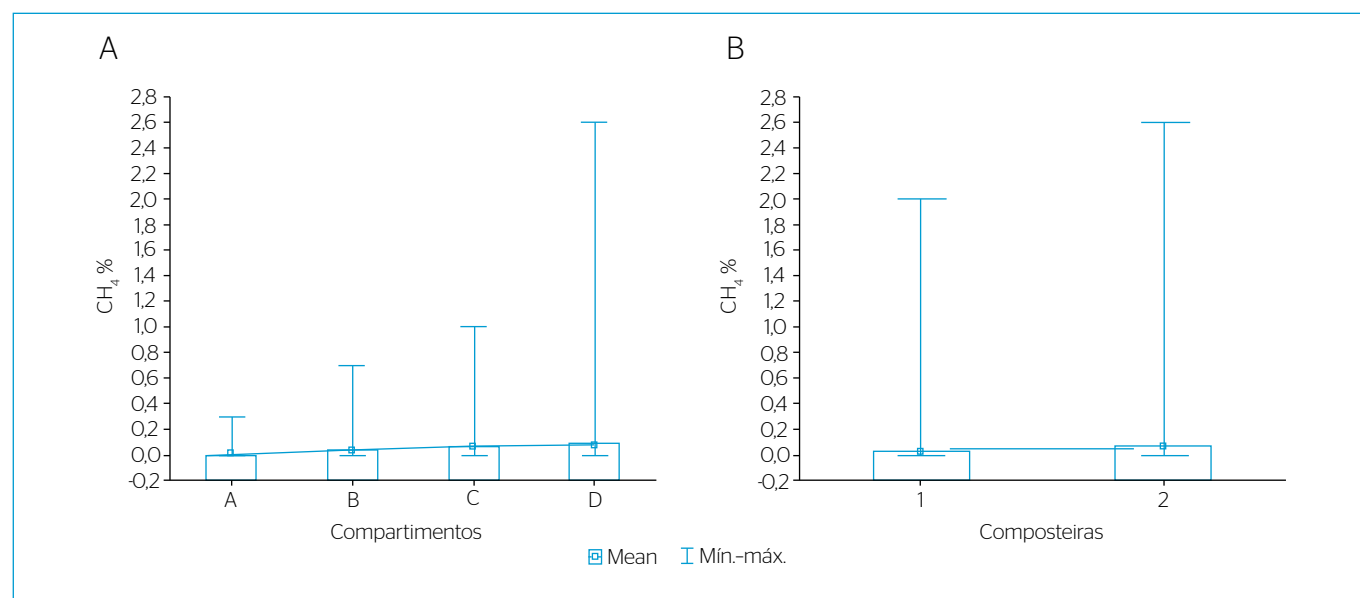


Gráfico 3 - Percentuais médios, mínimos e máximos de CH_4 por compartimento (A) e composteira (B).

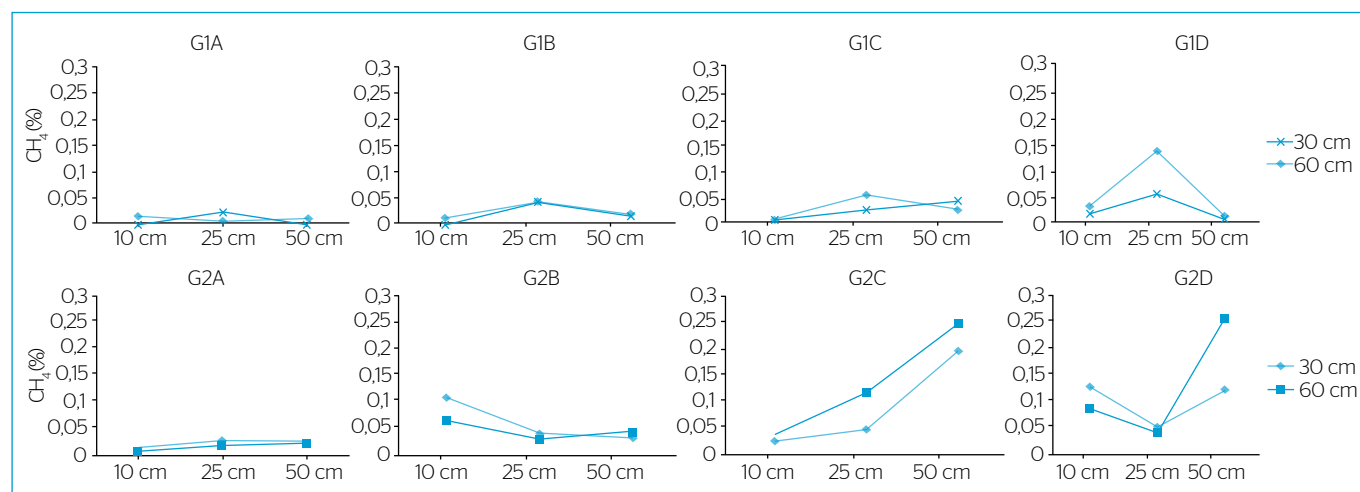


Gráfico 4 - Percentuais médios de CH_4 no interior dos compartimentos a 10, 25 e 50 cm de distância da parede e a 30 e 60 cm de profundidade.

As emissões de CH_4 foram escassas e mínimas em todas as medições realizadas, assim como próximas ao limite de detecção mínimo de 0,01% e do erro de leitura de 5% do analisador de gás utilizado. Logo, com todos os tratamentos mostrando-se eficientes em minimizar a produção e/ou metabolizar o CH_4 eventualmente produzido, optou-se por considerar a emissão de todos os compartimentos como desprezível, o que encontra ressonância nos estudos de Inácio *et al.* (2009) e Jackel, Thummes & Kampfer (2005), em que até 98% do CH_4 produzido foi oxidado por comunidades metanotróficas antes de ser emitido. Concorda ainda com essa afirmação o fato de as temperaturas médias terem variado entre 40 e 50°C em todos os compartimentos, faixa de ótima atividade para os microrganismos metanotróficos, como já discutido. Portanto, levando-se em conta a emissão de 600 kg de CO_2 equivalente (eq.)/t de RSO aterrado (USEPA, 2005), as 4 t de RSO compostadas neste experimento evitaram a emissão de 2,4 t de CO_2 eq., bem como a ausência de transporte das toneladas de RSO compostadas evitou a emissão de 87 kg de CO_2 eq., tendo em vista a emissão de 2,9 kg de $\text{CO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ de óleo diesel e o consumo de 7,5 L de óleo diesel por tonelada de resíduo transportado (MAHLER, 2012). Descontando-se as emissões que poderiam ser teoricamente evitadas em aterros sanitários com captura, queima e/ou aproveitamento energético do CH_4 , admitindo-se a eficiência máxima entre 40 e 30% de emissões evitadas, segundo Maciel & Jucá (2011) e Viana (2011), respectivamente, as emissões evitadas pela compostagem *in loco* diminuiriam 34%.

Muitos aspectos contribuem em conjunto para a minimização da gênese e das emissões de CH_4 na compostagem, sendo dimensão, densidade, intensidade de aporte e presença de microrganismos metanotróficos os mais relevantes (JACKEL; THUMMES; KAMPFER, 2005). Tais elementos estão diretamente relacionados com a oxigenação e a temperatura do sistema, parâmetros de variação inversamente proporcionais à geração de CH_4 .

Sendo o presente estudo calcado em operação estática, acredita-se também ter sido fundamental a combinação de alta proporção de material estruturante e o posicionamento das composteiras sobre *pallets*, os quais auxiliaram no estabelecimento da aeração passiva eficiente, como atestam as médias de O_2 entre 17 e 20% entre compartimentos e composteiras (Gráficos 5A e 5B), e foram suficientes para garantir a todos os tratamentos condições aeróbias adequadas ao processo de compostagem, definidas como acima de 5% de O_2 , por Kiehl (1998), e acima de 10%, por Miller (1993).

Contudo, os RSO presentes nos tratamentos A e B exibiram percentuais médios de O_2 significativamente maiores do que os tratamentos C e D, o que pode ser atribuído ao composto utilizado como inóculo, o qual ajuda a entrada de O_2 em função do possível aumento da porosidade dos RSO, principalmente no tratamento A, como discutido no item “Temperatura”.

Em leiras estáticas, a concentração de O_2 depende também da intensidade do consumo pelos microrganismos e de sua reposição via aeração passiva, que sofre influência da porosidade do material contido na leira, da umidade e do calor interno sobre o fluxo de ar (RANDLE & FLEGG, 1978), o que vem ao encontro do discutido. Nesse aspecto, vale ressaltar que a menor temperatura média e o maior percentual médio de O_2 foram observados no compartimento 1A, o que de certa forma minimiza a responsabilidade da diferença de temperatura com relação ao incremento da aeração passiva e maximiza a influência de um possível aumento de porosidade nos RSO por conta da utilização de composto como inóculo. Corroborando também com a influência do composto sobre a oxigenação dos RSO o fato de o compartimento 2A, desprovido de chaminé e inoculado com composto, apresentar média de O_2 compatível com as verificadas nos compartimentos 1C e 1D, equipados com chaminé central, mesmo com umidade maior em 2A.

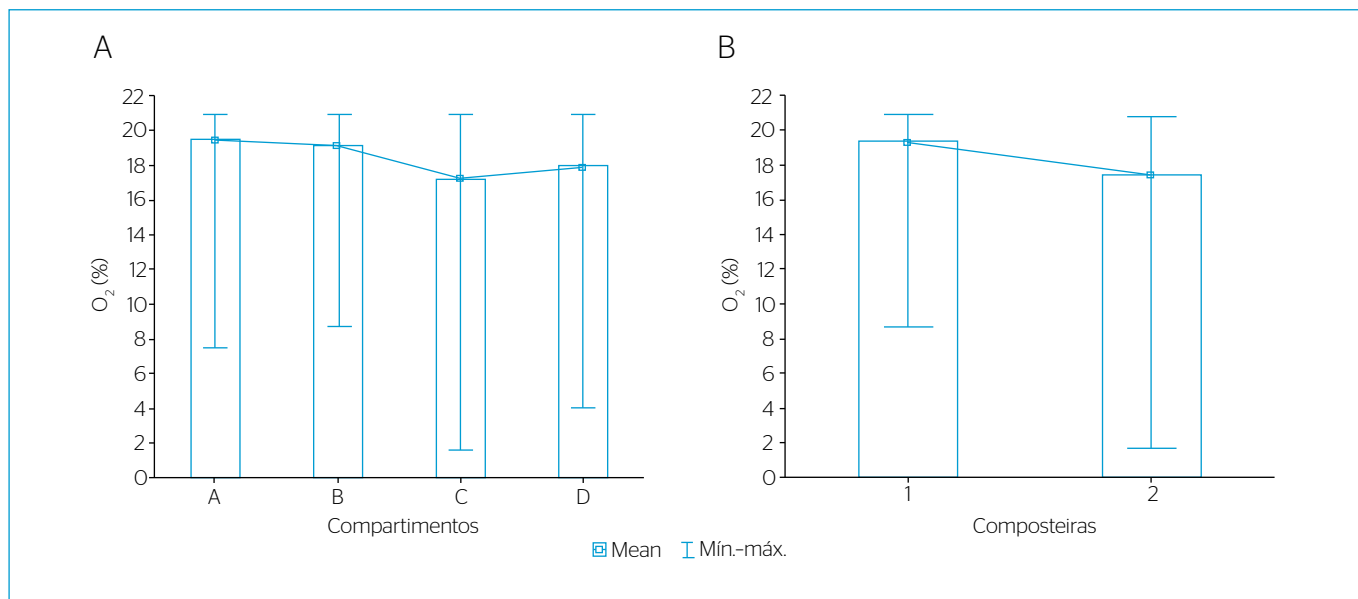


Gráfico 5 - Percentuais médios, mínimos e máximos de O_2 por compartimentos (A) e composteiras (B).

Entre composteiras, maiores percentuais de O_2 eram de certa maneira esperados na 1, em razão da presença de chaminé central, facilitando sua oxigenação e conseqüente perda de umidade. Tal fato encontra respaldo na maior umidade visualizada na composteira 2, assunto discutido adiante.

Umidade

Entre os compartimentos, as médias de umidade em seus resíduos apresentaram-se próximas a 60%, com diferenças significativamente menores para o tratamento A em relação aos demais, o que pode ser atribuído ao composto utilizado como inóculo, uma vez que o aumento da oxigenação atribuída à presença de composto favorece o ressecamento da massa em compostagem mesmo com as menores temperaturas observadas em A. Entre as composteiras, as menores médias de umidade em seus resíduos foram constatadas na 1, por volta de 50%, e as maiores médias na 2, situando-se próximo a 70%, o que se atribuiu à aeração central na composteira 1.

Assim, as médias de umidade por compartimentos e por composteiras ficaram entre os limites mínimo e máximo de umidade ideal para compostagem, relativos a 50 e 70%, como sugerido em Jiang *et al.* (2011), Kiehl (1998) e Brasil (2009), indicando manutenção adequada desse parâmetro. Compostagens com umidade acima de 70% demonstram redução do O_2 por excesso de água nos macroporos dos resíduos, e umidade abaixo de 50% implica diminuição da atividade microbiana por escassez de água, chegando até a interrupção do processo por volta dos 40% (KIEHL, 1998).

Sob o ponto de vista ambiental, Jiang *et al.* (2011) sugerem que 65% de umidade seja o valor ideal para minimizar a emissão de GEE, mais próximo de ser atingido pelos tratamentos B, C e D e pela composteira 2, embora o compartimento 2A (A da composteira 2) tenha sido separadamente o que mais se aproximou dos 65% de umidade.

Chama a atenção o fato de o compartimento B, não diferente significativamente de C e D em umidade, ter obtido desempenho significativamente melhor no que se refere ao O_2 que C e D, assemelhando-se aos compartimentos A. Tal aspecto confirma novamente a importância do tipo de inoculação aplicada à massa de compostagem no que tange à adequação de parâmetros ambientais.

Lixiviados

Não houve geração de chorume nas composteiras avaliadas; foi apenas gerada pequena quantidade de lixiviado decorrente do aporte externo de água para umectação dos compartimentos. Atribui-se essa característica aos mesmos aspectos relacionados com a manutenção da aerobiose já discutidos, uma vez que a geração de chorume e CH_4 está diretamente associada com o estabelecimento de condições anaeróbias (MÜNNICH; MAHLER; FRICKE, 2006).

Os lixiviados gerados apresentaram valor médio da demanda química de oxigênio (DQO) de 116,5 $mg.L^{-1}$, podendo ser reutilizados na umectação das composteiras, como fertilizante líquido ou mesmo descartados, considerando que, por meio da média de correlação da DQO/demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de 2/1, sugerida por Jordão & Pessoa (2005), o valor médio de DBO para o lixiviado em questão seria de 55,5 $mg.L^{-1}$, atendendo aos padrões de lançamento de efluentes estabelecidos por Brasil (2005), relativo a DBO de até 60 $mg.L^{-1}$, já que não existem limites para lançamento de efluentes baseados em DQO na legislação federal brasileira.

Tais valores da DQO contrastam com os 9.870 $mg.L^{-1}$ obtidos em compostagem residencial tradicional (ANDERSEN *et al.*, 2011). Tais diferenças são previstas, pois estão sendo comparados lixiviados oriundos de umectação com chorume, porém eles não demandam pós-tratamento, diferentemente do chorume, evidenciando as vantagens da não geração de chorume em operações de compostagem.

A média de pH dos lixiviados das composteiras 1 e 2 após 60 dias foi 7,1 e 7, respectivamente, atendendo ao limite de pH para descarte de efluentes, segundo Brasil (2005).

Maturação do composto

A relação $C/N < 20$ é um dos indicadores de estabilidade para fertilizante orgânico classe C, segundo Brasil (2009). Nesse quesito, a maioria dos tratamentos apresentou relação C/N, indicando estabilidade após 60 dias, à exceção dos compartimentos D, com C/N média próxima a 21, com A significativamente menor do que D, sugerindo vantagem da inoculação com composto no que tange à degradação dos RSO.

Avaliando-se a relação C/N entre as composteiras, ambos os resíduos demonstraram $C/N < 20$, sugerindo estabilidade do material após 60 dias. No entanto, a composteira 1 apontou relação C/N significativamente maior que a composteira 2, resultado que pode ter sido influenciado pelas maiores temperaturas atingidas na composteira 2.

O valor médio inicial da relação C/N dos RSO frescos foi de 26/1.

Nutrientes

O teor de nutrientes após 60 dias atingiu níveis compatíveis com outros trabalhos que utilizaram RSO semelhantes, como observado na Tabela 2, à exceção dos níveis de P e K, que de modo geral ficaram abaixo dos valores obtidos em outros estudos. Tal fato pode estar relacionado às operações de umectação dos compartimentos, causando lixiviação desses nutrientes. Não foram realizadas análises de nutrientes nos lixiviados, as quais poderiam confirmar ou não essa hipótese, contudo os níveis de P e K encontrados nos RSO antes da compostagem já indicavam baixos teores desses nutrientes, como visto na Tabela 2, o que pode ser corrigido de maneira simples, como descrito em Souza & Alcântara (2008).

Tabela 2 - Percentual de nutrientes e pH dos RSO frescos (antes da compostagem) e após 60 dias em compostagem.

Parâmetros em % de st (exceto pH)	Na	K	Mg	P	Nkt	pH
RSO frescos	1,11	0,14	0,49	0,44	2,26	5,6
A	1,08	0,11	0,29	0,28	2,41	7,5
B	1,29	0,12	0,34	0,29	2,67	7,3
C	1,14	0,09	0,45	0,24	2,32	7,1
D	0,83	0,07	0,30	0,31	2,07	6,7
Referências	0,18 - 0,50d	>0,5a	0,33e	0,46-0,56d	>0,5a >2b	<6,5c 6,5/8b

st: sólidos totais; A: fertilizante orgânico (KIEHL, 1998); B: resíduo orgânico misto (praças, jardins e doméstico) (GIRÓ, 1994); C: fertilizante orgânico proveniente de resíduos orgânicos sólidos urbanos (BRASIL, 2009); D: resíduos orgânicos domésticos (ANDERSEN et al., 2011); E: resíduos orgânicos domésticos (TEIXEIRA et al., 2004).

pH

O pH dos resíduos nos tratamentos A, B e C, que receberam algum tipo de inóculo, atingiu valores médios superiores a 7 após 60 dias, o que não foi observado em D, com pH médio abaixo da neutralidade (Tabela 2). Tal aspecto sugere lentidão da compostagem sem adição de inóculo, embora usualmente tal processo demande de 90 a 120 dias (KIEHL, 1998).

O tratamento A apresentou pH significativamente maior que C e D, o que reforça a ideia de melhoria da compostagem com o uso de inóculo de composto em maturação, porém os resíduos em todos os compartimentos atingiram o valor de referência, pH>6,5, descrito em Giró (1994) e Brasil (2009), sugerindo que o material poderia concluir seu processo de degradação já em contato com o solo.

Entre composteiras, ambas atingiram neutralidade de pH após 60 dias, sem diferenças significativas entre 1 e 2, demonstrando que as variações em relação à temperatura e oxigenação, oriundas de seus aspectos morfológicos (presença ou ausência de chaminé central), não afetaram o valor de pH.

Vetores

Todos os tratamentos foram eficientes em impedir a proliferação de moscas e ratos, fato relacionado à manutenção de temperaturas termofílicas, estratégia de manejo calcada em intervalos de aporte de RSO e cobertura diária final com material seco, como sugerido em Inácio & Miller (2009). Contudo, a composteira 2 foi mais eficiente do que a 1 no combate às moscas, provavelmente por conta das maiores temperaturas. Destaca-se ainda o compartimento 2A, que se manteve totalmente imune a moscas, fato que pode estar associado ao uso de composto a cada aporte, sugerindo sua eficiência também para a minimização de odores atrativos de vetores.

Aquecimento de água na compostagem

A utilização da compostagem para aquecimento de água mostrou-se adequada, pois os 300 L de água recirculada nos RSO atingiram 51°C após 24 horas e se mantiveram nessa temperatura por oito dias consecutivos utilizando a primeira composição de RSO, com temperatura ambiente média de 21°C e máxima de 71°C no interior da composteira.

A segunda composição de RSO aqueceu os 300 L de água a 42°C após 24 horas de circulação e manteve-se dessa forma por 15 dias consecutivos, com temperatura ambiente média de 23°C e máxima de 62°C no interior da composteira.

No entanto, a estratégia de recirculação seria dependente energeticamente para bombeamento de água, e a primeira composição de RSO testada demandaria operações de troca de carga frequentes. Por outro lado, estudos de Pain (1972) e da Native Power (2013) sugerem a passagem da água somente uma vez pelos RSO, em mangueiras plásticas com maior metragem, e o emprego somente de troncos triturados, em razão do maior tempo de degradação desses resíduos, chegando a seis meses, o que barateia e facilita a implantação de tais sistemas, conhecidos na Alemanha como *biomeiler*.

Assim, o sistema proposto demanda adaptações que facilitem seu manejo e minimizem o custo de implantação, tornando-o mais atrativo para o tratamento e aproveitamento energético de podas vegetais lenhosas mesmo nos trópicos, uma vez que o chuveiro elétrico é responsável por 23% da energia consumida nas residências brasileiras (UNICAMP, 2014).

Como vantagem adicional, 50% do peso inicial dos RSO de difícil degradação utilizados no aquecimento de água pode ser digerido em anaerobiose com produção de biogás, já que o período em compostagem atua como um pré-tratamento dos RSO de difícil degradação, adequando-os à digestão anaeróbia (PAIN, 1972).

CONCLUSÕES

Todas as composteiras e todos os tratamentos foram eficientes sanitaria e ambientalmente em compostar os RSO, com resultados ainda mais positivos para a composteira 2 e o tratamento A, em relação ao combate a vetores e degradação dos RSO, assim como para neutralização do CH₄, mais eficientemente observada no tratamento A, sugerindo a utilização do modelo 2A em aplicações práticas.

Não foram observadas deficiências de oxigenação na composteira 2, tornando desnecessária a utilização da aeração central.

O modelo de aproveitamento energético apresenta limitações de custo e produtividade, demandando adaptações tecnológicas que estimulem sua adoção.

REFERÊNCIAS

- AHN, H.K.; MULBRY, W.; WHITE, J.W.; KONDRAD, S.L. (2011) Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 2904-2909. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.10.142.
- AMLINGER, F.; PEYR, S.; CUHLS, C. (2008) Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. *Waste Management e Research*, v. 26, p. 47-60. DOI: 10.1177/0734242X07088432.
- ANDERSEN, J.K.; BOLDRIN, A.; CHRISTENSEN, T.H.; SCHEUTZ, C. (2010a) Greenhouse gas emissions from home composting of organic household waste. *Waste Management*, v. 30, n. 12, p. 2475-2482. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.07.004.
- ANDERSEN, J.K.; BOLDRIN, A.; CHRISTENSEN, T.H.; SCHEUTZ, C. (2010b) Quantification of greenhouse gas emission from windrow composting of garden waste. *Journal of Environmental Quality*, v. 39, p. 713-724. DOI: 10.2134/jeq2009.0329.
- ANDERSEN, J.K.; BOLDRIN, A.; CHRISTENSEN, T.H.; SCHEUTZ, C. (2011) Mass balance and life cycle inventory of home composting of organic waste. *Waste Management*, v. 31, n. 9-10, p. 1934-1943. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.05.004.
- 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*, v. 32, n. 1, p. 31-40. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.014.
- ABREU, M.; ANDRADE, J.C.; FALCÃO, A.A. (2006) Protocolos de análises químicas. In: ANDRADE, J.C.; ABREU, M. (Orgs.). *Análise química de resíduos sólidos para monitoramento e estudos agro-ambientais*. Campinas: Instituto Agrônômico, p. 121-158.
- APHA - American Public Health Organization; AWWA - American Water Works Association; WPCF - Water Pollution Control Facilities. (2005) *Standard methods for examination of water and wastewater*. 21. ed. Washington: American Public Health Association/American Water Works Association.
- BRASIL. (2005) Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) n.º 357/2005, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, p. 58-63.
- _____. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010) *Censo 2010*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- _____. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2009) *Instrução Normativa n.º 25*. Disponível em: <http://systemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?meth od=consultarLegislacaoFederal>. Acesso em: 28 nov. 2014.
- DURAND, A. (2003) Bioreactor designs for solid state fermentation. *Biochemical Engineering Journal*, v. 13, n. 2-3, p. 113-125. DOI: 10.1016/S1369-703X(02)00124-9.
- EM - Efficient Microorganisms. (2012) Disponível em: <http://www.em-la.com>. Acesso em: 10 maio 2012.
- ERMOLAEV, E.; SUNDBERG, C.; PELL, M.; HÅKAN, J. (2014) Greenhouse gas emissions from home composting in practice. *Bioresource Technology*, v. 151, p. 174-182. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.10.049.
- GIRÓ, F. (1994) *Proposta de normativa de qualitat per al compost de residusmunicipals a Catalunya (in Catalan)*. Junta de Residus. Generalitat de Catalunya.
- INÁCIO, C.T.; BETTIO, D.B.; MILLER, P.R. (2009) Potencial de mitigação de emissões de metano via projetos de compostagem em pequena escala. In: Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos. *Anais...* Vitória: SBCS. CD-ROM.
- INÁCIO, C.T. & MILLER, P.R. (2009) *Compostagem, ciência e prática para gestão de resíduos orgânicos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 156p.
- INÁCIO, C.T.; PROCÓPIO, A.S.; TEIXEIRA, C.; MILLER, P.R. (2009) Dinâmica de O₂, CO₂ e CH₄ em leiras estáticas de compostagem durante a fase termofílica. In: Congresso Brasileiro de Resíduos Orgânicos. *Anais...* Vitória: SBCS. CD-ROM.
- JACKEL, U.; THUMMES, K.; KAMPFER, P. (2005) Thermophilic methane production and oxidation in compost. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 52, n. 2, p. 175-184. DOI: 10.1016/j.femsec.2004.11.003.
- JIANG, T.; SCHUCHARDT, F.; LI, G.; GUO, R.; ZHAO, Y. (2011) Effect of C/N rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the compost. *Journal of Environmental Sciences*, v. 23, n. 10, p. 1754-1760.
- JORDÃO, E.P. & PESSOA, C.A. (2005) *Tratamento de esgotos domésticos*. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES. 932p.
- KIEHL, E.J. (1998) *Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto*. 4. ed. Piracicaba: Edmar José Kiehl. 171p.
- MACIEL, F.J. & JUCÁ, J.F.T. (2011) Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*, v. 31, n. 5, p. 966-977. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.01.030.
- MAHLER, C.F. (2012) *Lixo urbano: o que você precisa saber sobre o assunto*. Rio de Janeiro: Revan. 189p.
- MARTÍNEZ-BLANCO, J.; COLÓN, J.; GABARRELL, X.; FONT, X.; SÁNCHEZ, A.; ARTOLA, A.; RIERADEVALL, J. (2010) The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. *Waste Management*, v. 30, n. 6, p. 983-994. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.02.023.

- MILLER, F.C. (1993) Composting as a process base on the control of ecologically selective factors. In: METTING, F.B. (Org.). *Soil microbial ecology: application in agricultural and environmental management*. New York: Marcel Dekker Inc., p. 515-541.
- MÜNNICH, K.; MAHLER, C.F.; FRICKE, K. (2006) Pilot project of mechanical-biological treatment of waste in Brazil. *Waste Management (Elmsford)*, v. 26, n. 2, p. 150-157. DOI: 10.1016/j.wasman.2005.07.022.
- NATIVE POWER. (2013) Disponível em: <<http://www.native-power.de>>. Acesso em: 12 mar. 2013.
- PAIN, J. (1972) *The methods of Jean Pain or another kind of garden*. Disponível em: <http://library.uniteddiversity.coop/Permaculture/Another_Kind_of_Garden-The_Methods_of_Jean_Pain.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2014.
- PIRES, A.; MARTINHO, G.; NI-BIN, C. (2011) Solid state management in European countries. A review of systems analysis techniques. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 4, p. 1033-1050. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.11.024.
- RANDLE, J. & FLEGG, M. (1978) Oxygen measurements in a mushroom compost stack. *Scientia Horticulturae*, v. 8, n. 4, p. 315-323. DOI: 10.1016/0304-4238(78)90053-5.
- ROSE, J.L.; MAHLER, C.F.; IZZO, R.L.S. (2012) Comparison of the methane oxidation rate in four media. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 36, p. 803-812. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000300011>.
- SOKAL, R.R. & ROHLF, F.J. (2012) *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. 4. ed. New York: W. H. Freeman and Co. 937p.
- SOUZA, R.B. & ALCÂNTARA, F.A. (2008) Adubação no sistema orgânico de produção de hortaliças. *Circular técnica*, Brasília, n. 65. Disponível em: <http://www.cnph.embrapa.br/paginas/serie_documentos/publicacoes2008/ct_65.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2014.
- TEIXEIRA, L.B.; GERMANO, V.L.C.; OLIVEIRA, R.F.; FURLAN JUNIOR, J. (2004) Processo de compostagem a partir de lixo orgânico urbano em leira estática com ventilação natural. *Circular Técnica*, Belém, n. 33. 7p. (Embrapa Amazônia Oriental)
- UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas. (2014) *Pesquisa prova que chuveiro é o vilão da energia*. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/clipping/2014/05/27/pesquisa-prova-que-chuveiro-e-o-vilao-da-energia>>. Acesso em: 6 nov. 2014.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. (1992) *Environmental regulation and technology control of pathogens and vector attraction in sewage sludge*. Disponível em: <http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/upload/2007_05_31_625r92013_625R92013.pdf>. Acesso em: 19 maio 2013.
- USEPA. (2005) *Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.02 user's guide*. Washington: Office of Research and Development, EPA-600/R-05/047. 48p.
- Viana, T.A.P. (2011) *Análise das estimativas de emissão de metano por aterros sanitários em projetos de MDL no Brasil*. Dissertação (Mestrado)-Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ZUOKAITE, E. & ZIGMONTIENE, A. (2013) Application of a natural cover during sewage sludge composting to reduce gaseous emissions. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 22, n. 2, p. 621-626.