



III-05 - AVALIAÇÃO DA COMPOSTAGEM TERMOFÍLICA PARA HIGIENIZAÇÃO DE EXCRETAS HUMANAS E RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

Isabela Tsutiya Andrade⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Responsabilidade Social e Terceiro Setor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Mestranda em Agroecossistemas pela UFSC.

Amanda Silva Nunes⁽²⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Mestre em Engenharia Ambiental pela UTFPR. Doutoranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Karen Isabel Sotero Tavares⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Priscila Carlon⁽³⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre em Engenharia Ambiental pela UFSC. Doutoranda em Engenharia Civil e Geociências na Newcastle University (NCL).

Maria Elisa Magri⁽²⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Mestre e Doutora em Engenharia Ambiental pela UFSC. Docente do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS/UFSC).

Endereço⁽¹⁾: Rod. Admar Gonzaga, 1346 - Itacorubi, Florianópolis - SC, 88034-000 - Brasil - Tel: (48) 3721-5341 - e-mail: isa.t.andrade@gmail.com

RESUMO

Promover o tratamento adequado das excretas humanas provenientes de banheiros secos separadores é essencial para produzir um material higienizado/sanitizado e, conseqüentemente, para garantir o seu reuso de forma segura. Este estudo investigou eficiência do tratamento de excretas humanas provindas de banheiro seco e resíduos sólidos orgânicos através do método de compostagem termofílica com leiras estáticas e aeração passiva, com foco na higienização do material. Neste contexto, três leiras compostas por palhada, maravalha, folhas secas, resíduos orgânicos e excretas foram montadas em um pátio de compostagem. Amostras do composto foram coletadas e avaliadas para parâmetros físico-químicos (pH e umidade) e microbiológicos (*Escherichia Coli*, *Enterococcus faecalis* e *Salmonella spp*, como modelos bacterianos; e Colifago somático e bacteriófago RNA F-específico, como modelos virais). Como resultado, o composto final apresentou teor médio de umidade de 55% e pH entre 7 e 8. O método apresentou inativação de microrganismos na fase de decomposição e re-crescimento de microrganismos na fase de maturação. Os valores de coeficiente de inativação (k) e tempo de decaimento (T_{90}) foram de 0,021 e 47,6 dias para *Escherichia Coli*, 0,069 e 14,5 dias para *Enterococcus faecalis*, e 0,012 e 80,6 dias para Colifago somático, respectivamente. A bactéria *Salmonella spp* foi detectada apenas nas primeiras análises e o bacteriófago RNA F-específico se manteve estável durante o estudo e, portanto, não foi possível testar o decaimento para esses dois microrganismos. Em suma, o composto apresentou características físico-químicas satisfatórias, no entanto, o estudo destaca que é necessário adequar as relações entre tempo e temperatura para assegurar a segurança microbiológica do composto, uma vez que os usos pretendidos envolvam o contato primário com o material .



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



PALAVRAS-CHAVE: Compostagem, Saneamento Ecológico, Banheiro Seco, Reciclo agrícola e Excretas Humanas.

INTRODUÇÃO

No mundo, até 2017, mais de 800 milhões de pessoas não tinham acesso ao abastecimento de água e 673 milhões praticavam a defecação a céu aberto (WHO/UNICEF, 2019). No Brasil, 17% da população não conta com rede de abastecimento de água e 47% de rede de coleta de esgoto (SNIS, 2018), a maioria em situação de pobreza e/ou áreas rurais. Apesar desses números, a Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº11.445/07, estabelece diretrizes para o saneamento básico e no artigo 2º, discorre sua universalização (BRASIL, 2007).

Considerando essa problemática, um dos objetivos para o desenvolvimento sustentável da Agenda 2030 da ONU engloba a temática. É o caso do “Objetivo 6: Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos” (ONU, 2015). Porém, a complexidade dessa universalização inviabiliza considerar apenas uma solução (AUSTIN, 2007), como o saneamento convencional centralizado. Em alternativa a ele há o saneamento descentralizado, que visa tratar o efluente próximo à geração e, também, o saneamento ecológico que busca conectar o saneamento à agricultura.

O saneamento ecológico, aborda de forma sistêmica a conservação de recursos, proteção ambiental, agricultura, planejamento urbano e segurança alimentar (LANGERGRABER; MUELLEGGER, 2005; WERNER, 2004). A conexão saneamento-agricultura, se dá a partir da reciclagem de nutrientes, redução do consumo de água e substituição de fertilizantes químicos (HAQ; CAMBRIDGE, 2012). Essa técnica ressignifica subprodutos do saneamento, que passam a ser vistos como recursos, fonte de nutrientes, água e energia.

Alguns dispositivos hidráulicos utilizados no saneamento ecológico possibilitam a separação de fezes e urina na origem (SMITH, 2015), permitindo tratamentos distintos para as duas frações, otimizando seu reuso. Além disso, uma tecnologia do saneamento ecológico que dispensa o uso de água é o banheiro seco (ANAND; APUL, 2014), reconhecido pela ONU como uma das cinco tecnologias do saneamento melhorado (WHO; UNICEF, 2020). Sua concepção necessita de um ou dois contentores para as excretas, material aditivo para recobrimento e ventilação para evitar odores desagradáveis (ANAND; APUL, 2014).

Nos banheiros secos podem ser usados vasos separadores, que coletam fezes e urina separadamente, ou vasos sem separação que as coleta juntas. Para promover a ciclagem de nutrientes e garantir a efetividade de seu uso é preciso que as excretas sejam tratadas adequadamente garantindo redução da concentração de patógenos e resultando em material estável (MAGRI, 2013; SCHÖNNING; STENSTRÖM, 2004). Alguns tratamentos existentes são a co-compostagem com resíduos orgânicos, a incineração, a secagem ou desidratação e o tratamento químico (NIWAGABA, 2009).

Este estudo avalia a eficiência da compostagem de excretas humanas de um banheiro seco, com resíduos orgânicos. O processo é denominado co-compostagem e utilizou leiras estáticas e de aeração passiva. Os parâmetros de avaliação da eficiência foram: análises microbiológicas de microrganismos patogênicos/indicadores durante a compostagem, bem como a análise físico-química do produto final.

MATERIAIS E MÉTODOS

A eficiência do processo de compostagem foi mensurada pela remoção de microrganismos patogênicos/indicadores: *Escherichia Coli*, *Enterococcus faecalis* e *Salmonella spp*, como modelos bacterianos; e Colifago somático e bacteriófago RNA F-específico, como modelos virais.

O estudo teve duração de 8 meses. Três leiras foram montadas em um pátio de compostagem. As leiras de compostagem possuíam 3,0 m de comprimento e 1,5 m de largura e eram constituídas de palhada, maravalha, folhas secas, resíduos orgânicos e excretas (exemplo na Figura 01). Os resíduos orgânicos eram provenientes de um restaurante de um hotel e as excretas (fezes e serragem/cepilho) de um banheiro seco.

A montagem das leiras foi dividida em duas etapas: a fase inicial, em que as leiras receberam apenas resíduos orgânicos quatro vezes em intervalos de três dias; e a fase de compostagem, em que as leiras atingiram a fase termofílica e receberam as excretas três vezes em intervalos de 11 dias e resíduos outras seis vezes. As leiras receberam 320 kg de excretas e em média 387 kg de resíduos a cada carga de alimentação.

Amostras compostas formadas pela mistura de três amostras simples foram coletadas nas excretas sem tratamento (C0) e nas leiras sempre antes do recebimento de uma nova carga de fezes, sendo: dia 09 (C1), dia 20 (C2), dia 31 (C3), dia 42 (C4), final da fase de maturação - 90 dias (C5).



Figura 01. Pátio de compostagem do Sesc Cacupé.

Foram analisados temperatura (ambiente e interna das leiras), umidade, sólidos totais e pH. A temperatura interna das leiras foi medida em três pontos distintos a 20 cm da superfície em profundidade. As bactérias *Escherichia Coli* e *Enterococcus faecalis* foram analisadas a partir de diluições seriadas, seguida pelo plaqueamento em ágar *MacConkey* e *SlaBa* (*Slanetz and Bartley Agar*), respectivamente. As placas de *MacConkey* e *SlaBa* foram incubadas a 37°C por 24h e 41°C por 48h, respectivamente. Os resultados foram expressos em unidade formadora de colônias por grama (UFC.g⁻¹).

A bactéria *Salmonella spp* foi analisada através do método 1682, da *Environmental Protection Agency*. Foi realizado crescimento em meio TSB, seguido do plaqueamento em ágar RAPPAPORT, incubadas a 41 °C por 18h. A partir das colônias formadoras de halos, foram realizados esfregaços em ágar XLD (*Xylose Lysine Deoxycholate*). Colônias típicas de *Salmonella sp.* foram submetidas a confirmação bioquímica nos meios TSI, LIA e Caldo de ureia. Os resultados foram expressos em número mais provável por grama (NPM.g⁻¹).

Os bacteriófagos foram analisados através do método da dupla camada de ágar, seguindo os requisitos da ISO 10705-1:1995 e da ISO 10705-2:2000. Para os bacteriófagos RNA F-específico e Colifago somático foram utilizados os meios de cultura TYGA (*Tryptone-Yeast extract-Glucose Agar*) e MSA (*Modified Scholtens' Agar*), e as bactérias hospedeiras *Salmonella enterica* (WG49NCTC12484) e *Escherichia coli* (ATCC 13706), respectivamente. As placas foram incubadas a 37°C por 18h. Os resultados foram expressos em unidade formadora de placa por grama (UFP.g⁻¹). Os dados microbiológicos obtidos foram testados com modelo de decaimento linear.

RESULTADOS

As temperaturas médias na superfície das leiras alcançaram 50 °C nas primeiras semanas e assim permaneceram por mais de 50 dias após a última adição de resíduos, indicando longa fase termofílica. No entanto, a temperatura foi variável em diferentes pontos das leiras, e como o processo testado foi sem revolvimento, não podemos afirmar que toda a massa esteve em fase termofílica. O composto final apresentou teor médio de umidade de 55% e pH entre 7 e 8.

A Tabela 01 apresenta o decaimento médio dos microrganismos avaliados durante os primeiros 30 dias de compostagem, bem como o coeficiente de decaimento linear, e o tempo de redução decimal. O bacteriófago de



RNA foi estável durante o processo e não foi observado decaimento ou crescimento. Por outro lado, a *Salmonella spp.* foi detectada nas primeiras análises (0,24 NMP/g em média), mas análises subsequentes não detectaram, indicando eficácia na redução.

Na fase de maturação (90 dias se iniciando após os primeiros 30 dias), a bactéria *Escherichia coli* apresentou estabilidade e crescimento. Este comportamento foi semelhante ao dos colifagos somáticos, o que é condizente com o fato destes fagos infectarem bactérias do grupo coliformes, como a *Escherichia coli*. Por outro lado, *Enterococcus faecalis* não apresentou recrescimento importante, mas também não manteve a taxa de decaimento da primeira fase de $0,069 \text{ d}^{-1}$.

Tabela 01. Redução logarítmica, coeficiente de inativação (k), tempo de decaimento (T_{90}) de *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis* e Colifago somático.

Microrganismo	Redução logarítmica em 30 dias	k (dias ⁻¹)	T_{90} (dias)	R ²
<i>Escherichia coli</i>	0,80	0,021	47,6	0,60
<i>Enterococcus faecali</i>	2,03	0,069	14,5	0,94
Colifago somático	0,60	0,012	80,6	0,66

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste estudo, as leiras apresentaram longa fase termofílica (temperaturas entre 50-60 °C), sugerindo uma intensa atividade de microrganismos termófilos (AZIM et al., 2017). A variação espacial da temperatura pode ser resultado de fatores, como níveis de aeração, teor de umidade, disponibilidade de substrato, radiação solar e temperatura ambiente. A variação de temperatura sugere que a eficiência da compostagem e qualidade sanitária do composto também variaram em diferentes pontos das leiras (TURNER et al., 2005; TIQUIA; TAM et al., 2000).

O pH do composto ficou dentro de uma faixa entre neutro e alcalino, o que foi consistente com outros estudos (WANG et al., 2022; NIWAGABA et al., 2009). O pH tem sido frequentemente utilizado para estimar a maturidade do composto, que é um critério importante para avaliar a adequação do composto para aplicação no solo. Estudos relataram que um pH entre 7 e 9 é indicativo de um bom grau de maturidade do composto (AWASTHI et al., 2020). Considerando esse critério, o composto final apresentou maturidade aos 90 dias.

O teor de umidade observado no composto final ficou acima do valor de 30% sugerido por Kong et al. (2023), o que pode estar relacionado com aumento da precipitação nos dias que antecederam a coleta final. A detecção de *Escherichia coli*, *Enterococcus faecalis*, Colifago somático e bacteriófago RNA F-específico no composto final pode ser resultado da variação espacial da temperatura que resultou em áreas com temperaturas baixas o suficiente para a sobrevivência dos mesmos.

A rápida inativação de *Salmonella spp.* em um período curto de nove dias está de acordo com outros trabalhos que revelam que a *Salmonella* é menos resistente a altas temperaturas e condições ambientais adversas quando comparada com outros indicadores (DÉPORTES et al., 1998). Nossos resultados revelaram um crescimento de *Escherichia coli* na fase de maturação, o que pode estar relacionado ao teor de umidade do composto e a necessidade de água para sobrevivência desses microrganismos. Resultados semelhantes foram observados por Niwagaba (2009).

Os resultados deste estudo estão de acordo com outros trabalhos que observaram que os Colifagos somáticos são mais resistentes a altas temperaturas que outros bacteriófagos, como por exemplo o RNA F-específico (MOCÉ-LLIVINA et al., 2003). Os Colifagos somáticos também apresentaram um crescimento na maturação, o que pode ser atribuído ao comportamento da *Escherichia coli*, sua bactéria hospedeira. Esse crescimento interferiu na qualidade sanitária do composto final.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES



A compostagem para tratar excretas humanas provenientes de banheiro seco e resíduos sólidos orgânicos em leiras estáticas de aeração passiva se mostrou eficiente no alcance de temperaturas termofílicas ($> 45^{\circ}\text{C}$) em curto período de tempo de operação (< 7 dias) se mantendo por longos períodos (> 50 dias). Porém, como as medições foram realizadas em apenas três pontos superficiais das leiras, não se pode garantir que todas as partículas atingiram as temperaturas termofílicas pela mesma duração.

O método, quando em temperaturas termofílicas e fase de decomposição ativa, apresentou bons resultados na redução de microrganismos indicadores e patogênicos. Entretanto, na maturação, sem resíduos frescos, houve re-crescimento de todos os microrganismos, exceto a *Salmonella*. A partir deste estudo recomenda-se que em processos de compostagem com fezes humanas, o uso de indicadores virais ou vírus humanos entéricos, pois os microrganismos modelos bacterianos não foram bons indicadores devido ao grande re-crescimento. O composto apresentou características físico-químicas satisfatórias.

Diante disso, é imprescindível garantir condições de sanitização por mais tempo, para assegurar a eficiência do tratamento. Esta pesquisa buscou aprofundar conhecimentos acerca da compostagem como tratamento de excretas e resíduos sólidos orgânicos, visando a universalização do acesso ao saneamento através de sistemas descentralizados e sustentáveis. Entretanto, a maioria dos estudos de referência são de escala laboratorial ou pequena, e o número de casos estudados em escala real, em forma de projeto piloto, como este, é escasso. Assim, é essencial continuar os estudos em escala real de alternativas de saneamento descentralizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANAND, C. K.; APUL, D. S. Composting toilets as a sustainable alternative to urban sanitation - A review. *Waste Management*, v. 34, n. 2, p. 329–343, 2014.
2. AUSTIN, L. M.; ENGINEERING, C. Urine-Diversion Ecological Sanitation Systems With Particular Urine-Diversion Ecological Sanitation. n. July, 2007.
3. AWASTHI, S. K. et al. (2020). Changes in global trends in food waste composting: Research challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 299, 122555.
4. AZIM, K. et al. (2018). Composting parameters and compost quality: a literature review. *Organic Agriculture*, 8(2), 141–158.
5. BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que dispõe sobre a Política Nacional de Saneamento Básico. Brasília, DF, 2007.
6. DEPORTES, BENOIT-GUYOD, ZMIROU, & BOUVIER. (1998). Microbial disinfection capacity of municipal solid waste (MSW) composting. *Journal of Applied Microbiology*, 85(2), 238–246.
7. HAQ, G.; CAMBRIDGE, H. Exploiting the co-benefits of ecological sanitation. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v.4, n.4, p.431–435, 2012.
8. KONG, Y. et al. (2023). Determining the extraction conditions and phytotoxicity threshold for compost maturity evaluation using the seed germination index method. *Waste Management*, 171, 502–511.
9. LANGERGRABER, G.; MUELLEGGGER, E. Ecological Sanitation - A way to solve global sanitation problems? *Environment International*, v.31, n.3, p.433–444, 2005.
10. MAGRI, M. E. Aplicação de Processos de Estabilização e Higienização de Fezes e Urina Humana em Banheiros Secos Segregadores. p.193, 2013.
11. MOCÉ-LLIVINA, L. et al. Survival of bacterial indicator species and bacteriophages after thermal treatment of sludge and sewage. *Applied and Environmental Microbiology*, v.69, n. 3, p.1452–1456, 2003.
12. NIWAGABA, C. B. Treatment Technologies for Human Faeces and Urine, Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala 2009.
13. NIWAGABA, C. et al. Substrate composition and moisture in composting source-separated human faeces and food waste. *Environmental Technology*, v. 30, n. 5, p. 487–497, 2009.
14. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Agenda 2030. GV-executivo, v.14, n.2, p.72, 2015.
15. SCHÖNNING, C.; STENSTRÖM, T. A. EcoSanRes - Diretrizes para o Uso Seguro de Urina e Fezes nos Sistemas de Saneamento Ecológico. Instituto Ambiental de Estocolmo, p. 41, 2004.



16. TIQUIA, S. M., & TAM, N. F. Y. (2000). Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, 110(3), 535–541.
17. TURNER, C., WILLIAMS, A., WHITE, R., & TILLET, R. (2005). Inferring pathogen inactivation from the surface temperatures of compost heaps. *Bioresource Technology*, 96(5), 521–529.
18. WANG, S.-P. ET AL. (2024). Continuous thermophilic composting of distilled grain waste improved organic matter stability and succession of bacterial community. *Bioresource Technology*, 394, 130307.
19. WERNER, C. Eco sanitation - Closing the loop. [s.l: s.n.].
20. WHO; UNICEF. JMP 2018 Annual Report Annual Report. p.2, 2020.
21. WHO/UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017.