

**Contribución corta**<https://doi.org/10.61767/mjte.001.2.4856>

Castillo-Minjarez et al., 2022

Recibido: 09-07-2022

Revisado: 01-08-2022

Aceptado: 06-09-2022

Publicado: 11-09-2022

IMPLEMENTACIÓN DE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS EN LA DISMINUCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

IMPLEMENTATION OF BIOLOGICAL TREATMENTS IN THE REDUCTION OF URBAN SOLID WASTE

J.M. Castillo-Minjarez¹, E. A. Vargas-León², P. López-Ordaz², A. Angel-Cuapio³ y F. J. Martínez-Valdez^{2*}

Universidad Tecnológica de Tecámac, División de Electromecánica Industrial. C.P. 55740, Estado de México, México.

Universidad Tecnológica de Tecámac, División Químico Biológicas. C.P. 55740, Estado de México, México.

AAC BIOLAB, Laboratorio de Investigación, Norte 8 #214, Santa Cruz, C.P. 56617, Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, México.

*Correspondencia: fco.jav.mv@gmail.com

Resumen

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son una colección heterogénea de residuos producidos en las zonas urbanas los cuales varían según la región. Se pueden subdividir en dos componentes principales: orgánicos e inorgánicos. En México, se estima una producción de 120 128 Ton/día con una generación per cápita aproximada de 0.944 kg/hab*día. Considerando que la acumulación de RSU es una problemática actual, se han implementado como alternativas de degradación de estos desechos, tratamientos biológicos, entre los que figuran la degradación aerobia y la digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU). Ambos métodos de degradación han presentado alta viabilidad en términos del proceso de degradación de la FORSU. La degradación aerobia presenta ventajas en términos de tiempo de tratamiento y con ello, se obtienen productos estables y libres de patógenos que pueden ser utilizados como fertilizantes. Por su parte, en digestión anaerobia existe el beneficio de la producción de biogás (una mezcla de dióxido de carbono y metano), producto que tiene un alto valor agregado. Para hacer una selección del método de degradación a utilizar, es necesario tomar en cuenta la composición de la FORSU y la infraestructura con la que se cuenta.

Palabras clave: Residuos urbanos, fase orgánica, digestión aerobia, digestión anaerobia.



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

Abstract

Municipal solid wastes (MSW) are a heterogeneous waste collection produced in urban areas which vary by region. It can subdivide into two main components: organic and inorganic. In Mexico, waste production is approximate estimated by 120 128 tons / day, which represent a per capita generation of 0.944 kg / hab * day. The accumulation of MSW is considered a current problem, as alternative degradation these material, biological treatments, that include aerobic degradation and anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW), has been implemented. Both degradation methods show high feasibility in terms of the mineralization process of OFMSW. Aerobic degradation has advantages in terms of processing time and final product is stable, free of pathogens and capable of be used as a mineralizing agent. On the other hand, anaerobic digestion has the benefit of the biogas production (carbon dioxide and methane mixture) having a high added value. Choosing any degradation method should be considered the OFMSW composition and the infrastructure.

Keywords: Municipal waste, organic fraction, aerobic digestion, anaerobic digestion.

1. Introducción

La presencia de insectos considerados plaga en el En México, la fracción XXXIII del artículo 5° de la ley general para la prevención y gestión integral de los residuos (LGPGI) [1], define a los residuos sólidos urbanos (RSU) como: “Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por esta Ley como residuos de otra índole”.

La clasificación de los RSU está contenida en el Artículo 18° de la LGPGIR, la cual establece que los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables. Estableciendo en el artículo 99° que los municipios, de

conformidad con las leyes estatales, llevarán a cabo las acciones necesarias para la prevención de la generación, valorización y la gestión integral de los residuos sólidos urbanos.

2. Generación y composición de los residuos sólidos urbanos

La generación de residuos varía en función de la riqueza, sin embargo, las variaciones regionales y nacionales pueden ser importantes, ya que las tasas de generación pueden variar a nivel macro y micro regional [2]. Ejemplificando, la generación anual de residuos en Asia Oriental y el Pacífico son de aproximadamente 270 millones de toneladas por año. Esta cantidad está influenciada principalmente por la generación de residuos en China, que representa el 70% del total de la región [3].

En América Latina y el Caribe, la cantidad total de residuos generados por año es de 160 millones de toneladas, presentando una generación diaria de RSU per cápita de 0.1 a 1.4 kg con un promedio de 1.1 kg/hab*día [4].

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, estima que se generan diariamente 120.128 toneladas de RSU, de los



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

cuales. En lo que respecta a la fracción orgánica, se ha estimado que a nivel nacional se producen alrededor de 56,427 t/día de este tipo de residuos los cuales tienen el potencial para ser tratados mediante procesos de compostaje o biodigestión; sin embargo, sólo el 6.2% son recolectados de forma separada [5].

Por otra parte, los diagnósticos contenidos en los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PEyMPGIR), permitieron estimar un valor promedio ponderado de 0.852 kg/hab*día. Para la determinación de este valor se tuvieron disponibles 1, 144 datos que representan 46.56 % del total de los municipios. El peso volumétrico (pv) promedio ponderado en el 2012 fue de 153.12 kg/m³, valor ajustado al número de habitantes por tamaño de municipio [6].

La composición de la generación mundial de RSU es variable según el nivel de desarrollo del país (Figura 1), dentro de los diferentes niveles de desarrollo, se producen residuos con una fracción orgánica de 30 a 65 %. La composición depende, entre otros factores, de los patrones de consumo de la población: países con menores ingresos producen menos residuos, dentro de los cuales dominan los de naturaleza orgánica, mientras que, en los países con mayores ingresos, los residuos son mayormente inorgánicos a procedentes de productos manufacturados. En México, la composición de los RSU ha cambiado de manera importante en las últimas décadas. En la década de los 50, el porcentaje de residuos orgánicos en la basura oscilaba entre 65 y 70 %, mientras que para 2017, esta cifra se redujo al 52.4 % y a 51.6 % (Figura 2) [7].

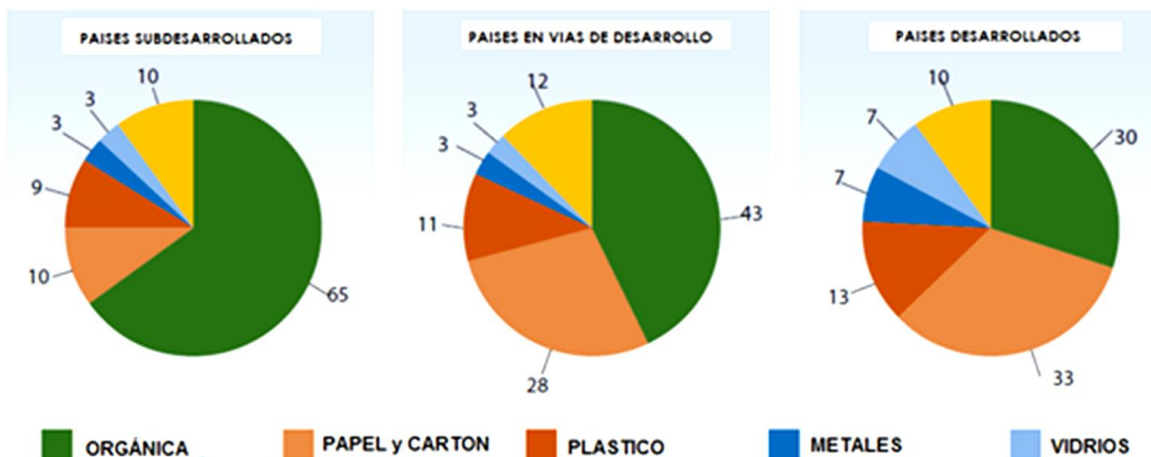


Figura 1. Composición mundial de los residuos sólidos urbanos según nivel de desarrollo (UNEP, Green economy report, 2015).



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

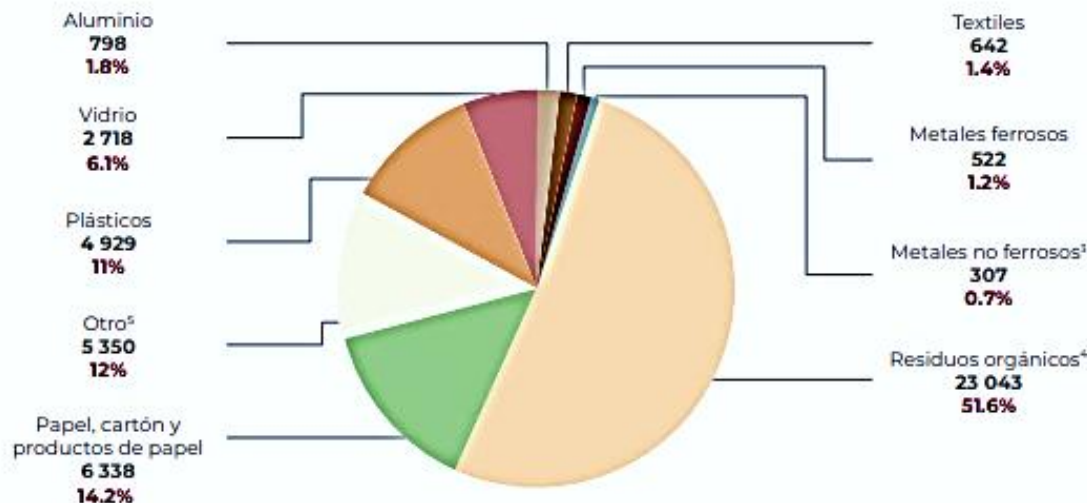


Figura 2. Composición de los residuos sólidos urbanos (SEMARNAT, 2018).

Como se ha expuesto, la generación de RSU es alta y tiende a incrementarse al paso del tiempo, esto ha generado una acumulación masiva de residuos, la preocupación generada por la acumulación ha inspirado estrategias para el tratamiento de residuos, en su mayoría orientadas a la recuperación de materiales útiles desechados en los RSU. Para esto, existen una gran variedad de opciones que pueden ser integradas a una estrategia global de gestión de residuos, entre ellas, existen técnicas para la recuperación de residuos (reutilización de muebles, reciclado de vidrio, papel, metal, etc.), mineralización de compuestos (compostaje) y generación de energía (incineración y digestión anaerobia) [8]. Dentro de esas estrategias se han generado procesos que involucran la acción de microorganismos capaces de transformar la materia contenida en los RSU. A continuación, se describen algunos tratamientos que han sido empleados para el tratamiento de RSU.

3. Los tratamientos biológicos de los residuos sólidos urbanos

Los tratamientos biológicos de los RSU han sido diseñados para explotar la capacidad de

diferentes microorganismos para mineralizar total o parcialmente la materia orgánica, transformándola en compuestos de utilidad. Estos procesos de degradación pueden dividirse, por la concentración de oxígeno, en aerobios y anaerobios. Los cuales se diferencian por sus consorcios microbianos presentes y los productos que se generan en la degradación [9].

3.1 Degradación aerobia (Compostaje)

La degradación aerobia es un proceso de mineralización donde los microorganismos degradan la materia orgánica generando CO₂, H₂O y el producto denominado compost (Figura 3). La aireación es uno de los factores más importantes en los sistemas de compostaje, como se puede observar en la reacción química de la Figura 4 [10]. El oxígeno es esencial para la actividad microbiana en este tratamiento, ya que se requiere una concentración mínima del 5 % en los espacios porosos de la pila de compostaje para mantener condiciones aeróbicas [11, 12]. Los principales métodos de aireación que proporcionan O₂ durante el compostaje son el mezclado, la convección natural y la aireación forzada [13].



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022



Figura 3. Esquema (compostaje) de la degradación aerobia de la FORSU.

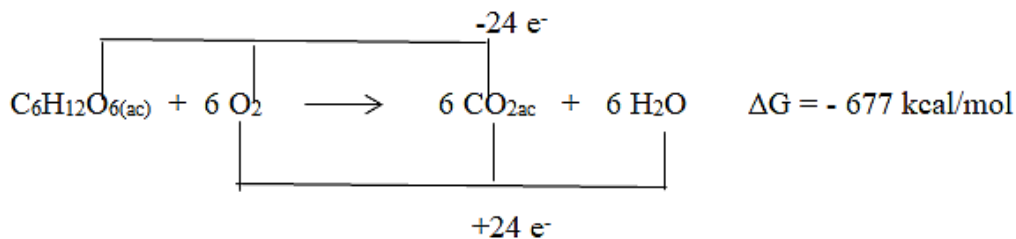


Figura 4. Reacción representativa de la degradación aerobia de la FORSU [10]. * ac: en solución acuosa

3.1.1 Otros factores que afectan la degradación aerobia

El pH es uno de los factores ambientales más importantes en el proceso de compostaje. Se ha observado que la disminución inicial de pH está asociada con la formación de ácidos, el pH bajo puede inhibir severamente el progreso de las reacciones químicas asociadas al compostaje [14]. La actividad microbiana tiene un papel muy importante en las transformaciones que se producen durante el proceso. Existen reportes que han demostrado que la inoculación con microorganismos adecuados puede activar la biodegradación de la materia orgánica y mejorar la calidad del compost. Por ejemplo, cuando los sustratos composteados son de origen agrícola, las sustancias lignocelulósicas constituyen una

fracción importante de la materia orgánica total. Este hecho favorece la actividad de microorganismos lignocelulolíticos, debido a que son los más adecuados para llevar a cabo el proceso de degradación [15]. La degradación y la transformación de residuos lignocelulósicos se atribuye al metabolismo endógeno de los microorganismos durante el compostaje. Diferentes poblaciones microbianas dominan en diversas etapas de compostaje, y tienen papeles distintos en la degradación de la materia orgánica [16]. Por otra parte, durante la actividad de los microorganismos implicados en el compostaje se genera la síntesis de biomasa microbiana que contiene aproximadamente 50 % de carbono (C), 5 % de nitrógeno (N) y 0.25 % fósforo (P) con base en peso seco [17]. Por lo cual, la relación



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

inicial Carbono/Nitrógeno (C/N) es otro de los factores más importantes que afectan el proceso de compostaje y la calidad del compost. Esta relación se ha utilizado como una directriz de la calidad del producto final; se propone una relación inicial C/N de 25 a 30 para un proceso en óptimas condiciones [18]. La temperatura es otro factor importante, ya que influye sobre la dinámica de población y en la eficiencia de la degradación aerobia. Se ha observado que a temperaturas por debajo de 20°C disminuye la actividad microbiana y la degradación aerobia prácticamente se detiene. Por otra parte, temperaturas superiores a 60°C, pueden reducir la actividad microbiana [19, 20].

3.2 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es la degradación y la estabilización de materiales orgánicos bajo

condiciones anaeróbicas debido a la actividad microbiana, la cual conduce a la formación de biogás (una mezcla de dióxido de carbono y metano que es una fuente de energía renovable) y biomasa microbiana [21]. La digestión anaerobia, es un proceso por el cual casi cualquier residuo orgánico puede ser biológicamente transformado, resultando en la producción de biogás y otros compuestos orgánicos ricos en energía como productos finales. Esta degradación se lleva a cabo por medio de una serie de reacciones metabólicas conocidas como hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis que se muestran en la Figura. 5 [22].

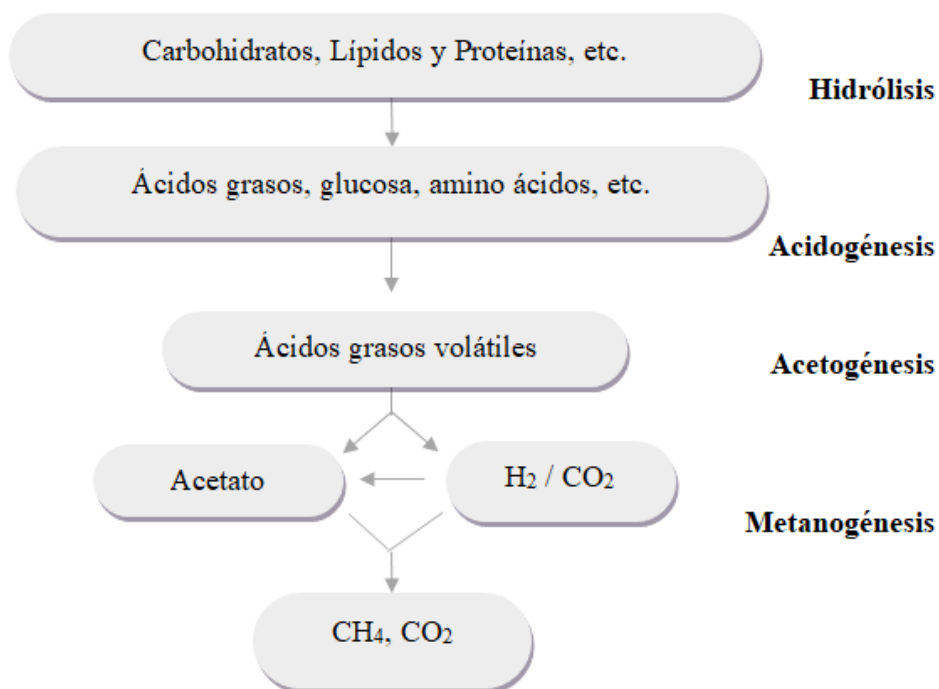


Figura 5. Proceso de digestión anaerobia de sustratos orgánicos [23].

La digestión anaeróbica puede ser una opción atractiva, tanto como una vía de eliminación de residuos y una fuente de generación de energía

alternativa. El biogás producido durante la digestión anaerobia se compone de 48-65 % de metano y 36-41 % de dióxido de carbono, hasta



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

un 17 % de nitrógeno, < 1 % de oxígeno, sulfuro de hidrógeno 32-169 ppm, y trazas de otros gases [24]. En los últimos años, se ha hecho mucho esfuerzo en la introducción de la digestión anaerobia para el tratamiento industrial de la FORSU.

3.2.1. Factores que afectan la generación de metano en la digestión anaerobia

La digestión anaerobia de compuestos orgánicos es un proceso complejo en cuyas etapas, pueden intervenir una serie de microorganismos los cuales pueden estar presentes en una o varias etapas del proceso, con posibles requerimientos específicos en cada etapa como son: temperatura, pH, humedad, relación sustrato/carbono y C/N [22]. El pH es uno de los factores más importantes en la digestión anaerobia, se ha aceptado un pH de 7 como óptimo para la metanogénesis, reportando incluso un rango muy estrecho (7 – 8) de pH adecuado [25]. Lee y Cols. [26], reportaron que la metanogénesis en un digestor anaeróbico se lleva a cabo a pH 6.5- 8.2, mientras que la hidrólisis y la acidogénesis se produce a pH 5.5 y 6.5, respectivamente. Asimismo, Pantini y Cols. [27], analizaron la influencia de diferentes condiciones de operación en la producción de biogás, variando el contenido de agua (26-43 % p/p hasta 75 % p/p) y la temperatura (de 20 a 25 °C hasta 55°C). Para cada condición, se determinó el rendimiento de generación de biogás, es decir, el volumen de biogás producido por sólido volátil presente, y las velocidades de generación de biogás, observando que el contenido de agua es uno de los factores clave que limita el proceso. Los resultados experimentales mostraron que cuando la humedad fue inferior al 32 % p/p, la actividad microbiana metanogénica se inhibió completamente. Para el mayor contenido de agua (75 % p/p), se obtuvieron altos valores de volumen acumulado de gas. El efecto de la temperatura también se hizo evidente, ya que se observaron tasas de generación de gas de 0.007 d⁻¹ a temperatura ambiente, mientras que la tasa aumentó a 0.03 y 0.05 d⁻¹ a 37 °C, y a 0.04 y 0.11 d⁻¹ a 55°C.

4. Conclusiones

La generación de residuos sólidos urbanos es una problemática que se ha incrementado durante los últimos años, la cual, se encuentra asociada a la población. Los tratamientos biológicos para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos como la degradación aerobia (compostaje) y la digestión anaerobia son alternativas viables para abonar a la solución de la problemática. Ambas estrategias ofrecen ventajas, en el caso de la degradación aerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, los tiempos de tratamiento son cortos, mientras que en la digestión anaerobia se presenta la producción de biogás, el cual es un producto de valor agregado.

5. Referencias

- [1] DOF (Diario Oficial de la Federación). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. Gobierno de México [Internet]. 2018 [citado 28 dic 2022]. Disponible en: https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf
- [2] Sánchez-Muñoz MP, Cruz-Cerón JG, Maldonado-Espinel PC. Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. Finanzas y Política Económica. 2019 11.2: 321-336.
- [3] Kaza S, Yao LC, Bhada-Tata P, Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. Washington, DC: World Bank. 2018
- [4] Hoornweg D y Bhada-Tata P. What a waste: a global review of solid waste management. The World Bank. 2012
- [5] DOF (Diario Oficial de la Federación). Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2022-2024. Gobierno de México [Internet]. 2022 [citado 28 dic 2022]. Disponible en: https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/porta/publicaciones/2022/PNPGIR_2022.pdf



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

- [6] Ruiz Vicente MA. Estado actual de la contaminación ambiental presente en la Mixteca Oaxaqueña. *Journal of Negative and No Positive Results*. 2020 5(5), 535-553.
- [7] SEMARNAT. Informe Medio Ambiental 2018, SEMARNAT. 2018 [citado 28 dic 2022]. Disponible en: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/pdf/Cap7_Residuos.pdf
- [8] Tejaswini MSSR, Pathak P, Gupta DK. Sustainable approach for valorization of solid wastes as a secondary resource through urban mining. *Journal of Environmental Management*. 2022. 319, 115727.
- [9] Pineda JST, Reyes CY, Ramírez JES. Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: una revisión sistemática. *Ingeniería y Región*. 2021 25, 60-74.
- [10] Ryckeboer J, Mergaert J, Vaes K, Klammer S, De Clercq D, Coosemans J, Insam H, Swings J. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Ann Microbiol*. 2003 53(4), 349-410.
- [11] Kulcu R, Yaldiz O. Determination of aeration rate and kinetics of composting some agricultural wastes, *Bioresour Technol*. 2004 93(1), 49-57.
- [12] Rasapoor M, Nasrabadi T, Kamali M, Hoveidi H. The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Manag*. 2009 29(2), 570-573.
- [13] Diaz M, Madejón E, Lopez F, Lopez R, Cabrera F. Optimization of the rate vinasse/grape marc for co-composting process. *Process Biochem*. 2002 37(10), 1143-1150.
- [14] Nakasaki K, Yaguchi H, Sasaki Y, Kubota H. Effects of ph control on composting of garbage. *Waste Manag Res*. 1993 11(2), 117-125.
- [15] Zeng GM, Huang HL, Huang DL, Yuan XZ, Jiang RQ, Yu M, Yu HY, Zhang JC, Wang RY, Liu XL. Effect of inoculating white-rot fungus during different phases on the compost maturity of agricultural wastes. *Process Biochem*. 2009 44(4), 396-400.
- [16] Huang DL, Zeng GM, Feng CL, Hu S, Lai C, Zhao MH, Su FF, Tang L, Liu HL. Changes of microbial population structure related to lignin degradation during lignocellulosic waste composting. *Bioresour Technol*, 2010 101(11), 4062-4067.
- [17] Sadaka S, El-Taweel A. Effects of aeration and C: N ratio on household waste composting in Egypt. *Compost Sci Util*. 2003 11(1), 36-40.
- [18] Li D, Yuan J, Ding J, Wang H, Shen Y, Li G. Effects of carbon/nitrogen ratio and aeration rate on the sheep manure composting process and associated gaseous emissions. *Journal of Environmental Management*. 2022 323, 116093.
- [19] Liang C, Das KC, McClendon RW. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend, *Bioresour Technol*. 2003 86(2), 131-137.
- [20] Miller F, Metting Jr F. Composting as a process based on the control of ecologically selective factors. In: *Soil microbial ecology: applications in agricultural and environmental management*. 1992 515-544.
- [21] Chen, Y, Cheng JJ, Creamer KS. Inhibition of anaerobic digestion process: A review, *Bioresour Technol*. 2008 99(10), 4044-4064.
- [22] Khalid A, Arshad M, Anjum M, Mahmood T, Dawson L. The anaerobic digestion of solid organic waste, *Waste Manag*. 2011 31(8), 1737-1744.
- [23] Zhang C, Su H, Baeyens J, Tan T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Rev*. 2014 38(0), 383-392.
- [24] Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, Jones DL. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour Technol*. 2008 99(17), 7928-7940.



Contribución corta

Castillo-Minjarez et al., 2022

[25] Raposo F, De la Rubia MA, Fernández-Cegri V, Borja R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2012 16(1), 861-877.

[26] Lee DH, Behera SK, Kim JW, Park H-S. Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study, *Waste Manag.* 2009 29(2), 876-882.

[27] Pantini S, Verginelli I, Lombardi F, Scheutz C, Kjeldsen P. Assessment of biogas production from MBT waste under different operating conditions. *Waste Manag.* 2015 43, 37-49.