

# Quality and time of biosolid compost when varying ratios and weight of substrates

Calidad y tiempo de compostaje de biosólidos al variar las proporciones y pesos de los sustratos

Beatriz Juárez-Robles<sup>1</sup>; Isaías de la Rosa-Gómez<sup>1\*</sup>; Ma. del Consuelo Mañon-Salas<sup>1</sup>; Ma. del Consuelo Hernández-Berriel<sup>1</sup>; Rocío Vaca-Paulín<sup>2</sup>; Jorge Lugo-de la Fuente<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental. Av. Tecnológico s/n, col. Agrícola Bellavista. C. P. 52149. Metepec, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Edafología y Ambiente. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas. C. P. 50200. Toluca, Estado de México, México.

\*Corresponding author: [kivodelarosa@yahoo.com](mailto:kivodelarosa@yahoo.com), tel.: +52 (722) 208 7236 ext. 3630.

## Abstract

**Introduction:** Biosolids generated in the treatment of wastewater are an environmental problem due to their inadequate handling and disposal.

**Objective:** To know the effects when varying substrate ratios and pile weight on quality and time of biosolid compost.

**Materials and Methods:** The mixture of biosolids (BS) with clay soil (CS) and equine degraded manure (DM) was evaluated in the following ratios: 70:30:00, 65:30:05, 60:30:10 and 50:30:20 to determine the optimum ratio in piles of 250 kg and evaluate it in 500 and 2 000 kg. The parameters of quality were temperature, Ph, humidity, organic matter (OM), total Kjeldahl nitrogen (TKN), C/N ratio, K/Na ratio and phosphorus (P).

**Results and Discussion:** the ratio 65:30:05 had higher temperature (63.8 °C) and lower composting time (21 days). Significant differences ( $P < 0.05$ ) were found in the parameters of quality with respect to the substrates and pile weight. The treatments of 250 kg had the shortest processing time (28 days) with higher OM, TKN, C/N and P.

**Conclusion:** The DM and CS favor BS composting by reducing the process to a maximum of 32 days. The ratio 65:30:05 in 250 kg increases the agronomic quality of the compost.

**Keywords:** Biodegradation, composite, clay, aerated piles.

## Resumen

**Introducción:** Los biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales son un problema ambiental debido a su manejo inadecuado y disposición.

**Objetivo:** Conocer los efectos de la variación de proporciones de los sustratos y pesos de los montículos sobre la calidad y tiempo de compostaje de biosólidos.

**Materiales y métodos:** La mezcla de biosólidos (BS) con suelo arcilloso (SA) y estiércol degradado (ED) de equino se evaluó en las proporciones: 70:30:00, 65:30:05, 60:30:10 y 50:30:20, para determinar la proporción óptima en pilas de 250 kg y evaluarla en 500 y 2 000 kg. Los parámetros de calidad medidos fueron temperatura, pH y humedad, materia orgánica (MO), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), relación C/N, relación K/Na y fósforo (P).

**Resultados y discusión:** La proporción 65:30:05 destacó con mayor temperatura (63.8 °C) y menor tiempo de compostaje (21 días). Se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en los parámetros de calidad con respecto a los sustratos y pesos del montículo. Los tratamientos de 250 kg tuvieron el menor tiempo de proceso (28 días) con mayor contenido de MO, NTK, relación C/N y P.

**Conclusión:** El ED y SA favorecen el compostaje de BS al reducir el proceso a 32 días como máximo. La proporción 65:30:05 en pilas de 250 kg incrementa la calidad agronómica de la composta.

**Palabras clave:** Biodegradación, composta, arcilla, pilas aireadas.

## Introduction

Biosolids derived from the treatment of wastewater have pathogens, parasites, and in some cases, heavy metals that, when handled improperly, can migrate to soil and groundwater, causing environmental and public health problems (Semblante et al., 2015). In Mexico, most biosolids are located on land adjacent to water treatment plants (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2014), although one of the techniques that allows to value such residues is through composting.

Composting stabilizes and obtains from the biosolids a high content of nutrients that stimulate plant growth. The process time varies from three to six months on average by the method of aerated compost piles, so that shorter periods of composting represent an opportunity in the technological, public health and environmental aspects. In order to improve the quality of the compost and influence the processing time, biosolids are mixed with passive or active bulking agents such as sawdust, rice husks, microbial consortia, enzymes and manure of various animal species (Jiang, Liu, Huang, & Huang, 2015). These agents modify the physical and chemical properties in the compost matrix, contribute to create air spaces between the particles that optimize the oxygen distribution, regulate humidity, improve the C/N ratio, allow microbial proliferation, change the kinetics of biodegradation and determine composting time (Yuan et al., 2015).

Manure used as a substrate increases water retention capacity in the manure compost pile and minimizes the loss of nitrogen by volatilization and phosphorus by leaching (Ksheem, Bennett, Antille, & Raine, 2015). Other substrates such as mature composite, clay and zeolite minimize nitrogen losses by  $\text{NH}_3$  emissions during the process (Zhang & Sun, 2015) and increase  $\text{CO}_2$  temperature and generation (Jolanun & Towprayoon, 2010).

In this context, the purpose of this study was to study the influence of different mixtures of biosolids with clay soil and degraded equine manure on the quality of compost and the composting time, as well as to evaluate the effect of changing weight of piles from 250 to 500 and 2 000 kg, using the method of piles with periodic aeration.

## Materials and methods

### Conditioning of materials and composting

The experiments were carried out using local biosolids, derived from an activated sludge process. A thin layer of biosolids (BS) was placed on a polyethylene film to dehydrate them by solar radiation to obtain  $35 \pm 5 \%$

## Introducción

Los biosólidos derivados del tratamiento de agua residual contienen patógenos, parásitos, y en algunos casos, metales pesados que al ser manejados inadecuadamente pueden migrar al suelo y mantos freáticos, causando problemas ambientales y de salud pública (Semblante et al., 2015). En México, la mayoría de los biosólidos se disponen en terrenos aledaños a las plantas de tratamiento de agua (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] & Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2014), aun cuando una de las técnicas que permite valorizar tales residuos es mediante el compostaje.

El compostaje estabiliza y obtiene de los biosólidos un contenido alto de nutrientes que estimulan el crecimiento vegetal. El tiempo de proceso varía de tres a seis meses en promedio por el método de pilas aireadas, por lo que periodos menores de compostaje representan una oportunidad en los aspectos tecnológicos, salud pública y ambiental. Para mejorar la calidad de la composta e influir en el tiempo de proceso, los biosólidos se mezclan con agentes estructurantes o de carga, ya sean activos o inertes, como el aserrín, cáscaras de arroz, consorcios microbianos, enzimas y estiércol de diversas especies animales (Jiang, Liu, Huang, & Huang, 2015). Dichos agentes modifican las propiedades físicas y químicas en la matriz de compostaje, contribuyen a crear espacios de aire entre las partículas que optimizan la distribución de oxígeno, regulan la humedad, mejoran la relación C/N, permiten la proliferación microbiana, cambian la cinética de biodegradación y determinan el tiempo de compostaje (Yuan et al., 2015).

El estiércol, utilizado como sustrato, aumenta la capacidad de retención de agua en la pila de compostaje y minimiza la pérdida de nitrógeno por volatilización y de fósforo por lixiviación (Ksheem, Bennett, Antille, & Raine, 2015). Otros sustratos como la composta madura, arcilla y zeolita minimizan las pérdidas de nitrógeno por emisiones de  $\text{NH}_3$  durante el proceso (Zhang & Sun, 2015) e incrementan la temperatura y generación de  $\text{CO}_2$  (Jolanun & Towprayoon, 2010).

En tal contexto, la finalidad de la presente investigación fue estudiar la influencia de diversas mezclas de biosólido con suelo arcilloso y estiércol equino degradado sobre la calidad de la composta y el tiempo de compostaje, así como evaluar el efecto al cambiar el peso de los montículos de 250 a 500 y 2 000 kg, utilizando el método de pilas con aireación periódica.

## Materiales y métodos

### Acondicionamiento de materiales y compostaje

Los experimentos se realizaron con biosólidos de origen municipal, derivados de un proceso de lodos

moisture (Hbh) and then grind with a hammer mill. Clay soil (SA) came from clay mines located in the southern area of Valle de Toluca, Estado de México. BS and CS were sifted using a 5.0 mm mesh to have a uniform particle size. Equine degraded manure (DM) was stored for more than three months on mounds. Each substrate was obtained from a single lot to form the initial mixture of treatments.

The piles were placed in open field. Four treatments (ratios of substrates) and one control treatment (100 % biosolids) were established; experiments were performed in quintuplicate. The ratios of BS:CS:DM in piles of 250 kg were 70:30:00, 65:30:05, 60:30:10, 50:30:20 (w/w, dry base) and were identified as PA, PB, PC and PD, respectively. Subsequently, the proper ratio of the three substrates in the piles of 250 kg was used in the piles of 500 and 2 000 kg, identified as PE and PF, respectively.

The process variables were measured in morning hours. The temperature (T), humidity and pH were determined every 24 h; turns and irrigation were conducted every 48 h. These variables were monitored throughout the composting process, which included the following phases: mesophilic ( $T < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), thermophilic ( $T \geq 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and second mesophilic or cooling phase. When temperature matched the room temperature, the composting process was concluded. The temperature was measured using a digital thermometer (HANNA® Model HI740024, Italy) on the inner and outer layers of the piles at nine random points. Moisture was determined with an OHAUS® moisture analyzer (model MB45, USA) and pH was measured with a CONDUCTRONIC® potentiometer (model PC18, Mexico) in a solution of compost:water (w/v) with a ratio of 1:5 at  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Compost characteristics

Sampling and analysis of compost were carried out under the guidelines of the Mexican regulation NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003). Analyzes were carried out in triplicate, determining the following quality parameters: OM by the method of Walkley and Black (1934), TKN by Kjeldahl digestion-distillation (1982), K and Na available by the Mehlich-3 reagent extraction method and atomic absorption spectrophotometry (Perkin-Elmer, model A100, Mexico), and P available by Mehlich-3 extraction and colorimetry (spectrophotometer Vis Thermo Scientific™ GENESYS 10S, Germany).

The heavy metals Cd, Cr and Pb were determined by atomic absorption spectrophotometry, prior digestion with concentrated  $\text{HNO}_3$  and HCl in a ratio of 1:3 v/v. The contents of fecal coliforms and *Salmonella* spp. were determined by the multi-tube fermentation

activados. Una capa delgada de biosólidos (BS) se colocó sobre una película de polietileno para deshidratarlos por radiación solar hasta obtener  $35 \pm 5\%$  de humedad (Hbh) y posteriormente tritularlos con un molino de martillos. El suelo arcilloso (SA) se adquirió de minas de arcilla ubicadas en la zona sur del Valle de Toluca, Estado de México. Los BS y el SA se cribaron utilizando una malla de 5.0 mm de diámetro para tener un tamaño de partícula uniforme. El estiércol degradado (ED) de origen equino estuvo almacenado más de tres meses en montículos expuestos a la intemperie. Cada sustrato se obtuvo de un solo lote para conformar la mezcla inicial de los tratamientos.

Las pilas se construyeron sobre la tierra a cielo abierto. Se establecieron cuatro tratamientos (proporciones de sustratos) y un control (100 % biosólidos); los experimentos se realizaron por quintuplicado. Las proporciones de BS:SA:ED en los montículos de 250 kg fueron 70:30:00, 65:30:05, 60:30:10, 50:30:20 (p/p, base seca) y se identificaron como PA, PB, PC y PD, respectivamente. Posteriormente, la proporción adecuada de los tres sustratos en las pilas de 250 kg se empleó en las pilas de 500 y 2 000 kg, identificadas como PE y PF, respectivamente.

Las variables de proceso se midieron en horario matutino. La temperatura (T), humedad y pH se determinaron cada 24 h; los volteos y el riego se realizaron cada 48 h. Estas variables se monitorearon durante todo el proceso de compostaje que contempló las fases mesofílica ( $T < 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), termofílica ( $T \geq 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y segunda fase mesofílica o de enfriamiento. Cuando la temperatura se igualó a la temperatura ambiente, el proceso de compostaje se consideró finalizado. La temperatura se midió con un termómetro digital (HANNA® modelo HI740024, Italia) en la capa interior y exterior de las pilas en nueve puntos aleatorios. La humedad se determinó con un analizador de humedad OHAUS® (modelo MB45, EUA) y el pH se midió con un potenciómetro CONDUCTRONIC® (modelo PC18, México) en una solución de composta:agua (p/v) con una relación 1:5 a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Caracterización de la composta

El muestreo y análisis de la composta se hicieron bajo los lineamientos de la norma mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003). Los análisis se realizaron por triplicado determinando los siguientes parámetros de calidad: MO por el método de Walkley y Black (1934), NTK por digestión-distilación Kjeldahl (1982), K y Na disponible por el método de extracción con reactivo Mehlich-3 y espectrofotometría de absorción atómica (Perkin-Elmer, modelo A100, México), y P disponible por extracción Mehlich-3 y colorimetría (espectrofotómetro de UV Vis Thermo Scientific™ GENESYS 10S, Alemania).

method or most probable number method and the viable helminth egg content by the modified Balinger method (SEMARNAT, 2003).

The experiment was completely randomized and the data generated were subjected to an analysis of variance (ANOVA). All values were expressed as statistical means. The Tukey test ( $P < 0.05$ ) was applied to determine statistically significant differences, using the statistical package SPSS 16.0 (SPSS, 2007).

## Results and discussion

### Selection of the optimum ratio of BS:CS:DM in compost piles of 250 kg

After 24 h of initiating the process, the temperatures were higher than 45 °C, where the thermophilic phase lasted from 9 to 14 days. At this stage, the PB treatment (65:30:05) had the highest temperature (63.8 °C) in contrast to the control pile (48.7 °C) (Figure 1). According to the results of the microbiological analysis, reported in Table 1, the temperatures reached ensure the elimination of pathogenic microorganisms. These were similar to those obtained by Ho, Yuan, Jien, and Hseu (2010), who incorporated residues of activated clay and rice husk as bulking agents to biosolids.

On the other hand, the addition of substrates influenced the availability of metals since a higher concentration was observed in P0 with respect to the rest of the treatments (Table 1). However, the concentration was lower than that established by Mexican legislation (SEMARNAT, 2003) and the United State Environmental Protection Agency (USEPA, 1999), which is important when considering its incorporation to the soil due to phytotoxicity and low tolerance of certain plant species.

Figure 1 shows that from day 2, the pH reached a value of 9.0, due to the CO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> released into the atmosphere during aeration of the piles. Emissions were higher in the control (P0), which had the highest pH levels. These differences show that the absence of CS and DM favored greater dissociation of the ammonium and rapid decomposition of nitrogenous compounds, causing losses of nitrogen by volatilization. The final pH (8.0 to 8.5 units) indicated the stability of the organic matter (Hachicha et al., 2009). These results are similar to those reported by other researchers such as Malinska, Zabochnicka-Swiatek, and Dach (2014), who used biosolids, wood shavings and charcoal, and Scoton, Battistelle, Bezerra, and Akutsu (2016) who used sugar cane and coffee.

Table 2 shows the initial and final measurements of the composting process. In this study, initial moisture varied from 34 to 45 %, because the addition of CS and DM increased water retention and made it difficult to

Los metales pesados Cd, Cr y Pb se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, previa digestión con HNO<sub>3</sub> concentrado y HCl en una proporción 1:3 v/v. Los contenidos de coliformes fecales y *Salmonella* spp. se determinaron por el método de fermentación en tubos múltiples o del número más probable (NMP), y el contenido de huevos de helminto viables, por el método Balinger modificado (SEMARNAT, 2003).

El experimento tuvo un diseño completamente al azar y los datos generados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA). Todos los valores se expresaron como medias estadísticas. La prueba de Tukey ( $P < 0.05$ ) se aplicó para determinar las diferencias estadísticamente significativas, utilizando el paquete estadístico SPSS 16.0 (SPSS, 2007).

## Resultados y discusión

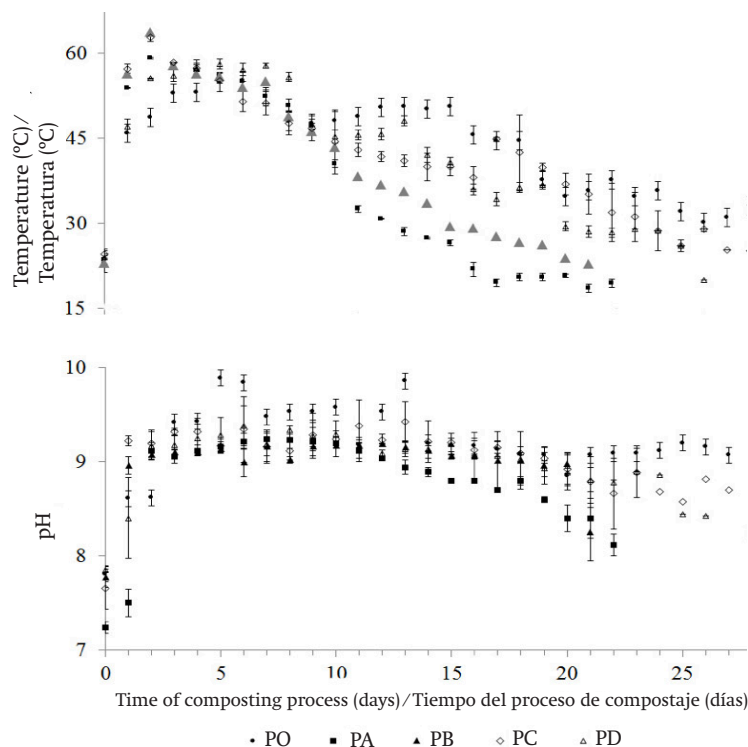
### Selección de la proporción óptima de BS:SA:ED en pilas de 250 kg

Después de 24 h de iniciado el proceso, las temperaturas fueron superiores a 45 °C, donde la fase termofílica tuvo una duración de 9 a 14 días. En esta fase, el tratamiento PB (65:30:05) presentó la temperatura más alta (63.8 °C) en contraste con la pila control (48.7 °C) (Figura 1). De acuerdo con los resultados del análisis microbiológico, reportado en el Cuadro 1, las temperaturas alcanzadas garantizaron la eliminación de microorganismos patógenos. Estas fueron similares a las obtenidas por Ho, Yuan, Jien, y Hseu (2010), quienes incorporaron residuos de arcilla activada y cáscara de arroz, como agentes estructurantes, a los biosólidos.

Por otra parte, la incorporación de los sustratos influyó en la disponibilidad de los metales ya que se observó una mayor concentración en P0 con respecto al resto de los tratamientos (Cuadro 1). No obstante, la concentración fue inferior a la establecida por la legislación mexicana (SEMARNAT, 2003) y la *United State Environmental Protection Agency* (USEPA, 1999), lo cual es importante al considerar su incorporación al suelo, debido a la fitotoxicidad y poca tolerancia de ciertas especies vegetales.

En la Figura 1 se observa que a partir del día 2, el pH alcanzó un valor de 9.0, debido al CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub> liberados a la atmósfera durante la aireación de las pilas. Las emisiones fueron mayores en el control (P0), el cual presentó los niveles más altos de pH. Estas diferencias muestran que la ausencia de SA y ED propiciaron mayor disociación del amonio y la rápida descomposición de los compuestos nitrogenados, provocando pérdidas de nitrógeno por volatilización. El pH final (8.0 a 8.5 unidades) indicó la estabilidad de la materia orgánica (Hachicha et al., 2009). Estos resultados son similares a





**Figure 1. Temperature and pH profile in the composting process of biosolids: clay soil: degraded equine manure in different ratios (P0 = control, PA = 70:30:00, PB = 65:30:05, PC = 60:30:10, PD = 50:30:20).**

**Figura 1. Perfil de temperatura y pH en el proceso de compostaje de biosólidos:suelo arcilloso:estiércol degradado de equino en distintas proporciones (P0 = control, PA = 70:30:00, PB = 65:30:05, PC = 60:30:10, PD = 50:30:20).**

**Table 1. Concentration of heavy metals, pathogenic microorganisms and parasites in biosolid compost: clay soil: equine degraded manure in different ratios.**

**Cuadro 1. Concentración de metales pesados, microorganismos patógenos y parásitos en la composta de biosólidos:suelo arcilloso:estiércol degradado de equino en distintas proporciones.**

Treatments/ Tratamientos		Heavy metals /Metales pesados			Microbiological indicators / Indicadores microbiológicos		
Pile (kg)/ Montículo (kg)	Proportion/ Proporción	Pb (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg·kg <sup>-1</sup> )	CF (NMP·g <sup>-1</sup> )	HH (HH·g <sup>-1</sup> )	Salmonella spp. (NMP·g <sup>-1</sup> )
250	P0	4.1	2.7	0.5	390 000	2.0	9.0
250	PA	2.5	1.5	<0.1	ND	<1.0	ND
250	PB	3.0	1.6	<0.1	ND	<1.0	ND
250	PC	2.3	1.2	<0.1	ND	<1.0	ND
250	PD	3.0	1.6	<0.1	ND	<1.0	ND
500	PE	<0.05	2.4	<0.1	ND	<1.0	ND
2 000	PF	4.2	ND	0.4	ND	<1.0	ND
Normativity/ Normatividad <sup>a</sup>							
<sup>a</sup> Type A / <sup>a</sup> Clase A		300	1 200	39	<1.0 x 10 <sup>3</sup>	<1.0	< 3.0
<sup>b</sup> Type A / <sup>b</sup> Clase A		300	1 500	39	1.0 x 10 <sup>3</sup>	1.0	3.0

Biosolid compost: clay soil: equine degraded manure in different ratios (P0 = control; PA = 70:30:00; PB, PE and PF = 65:30:05; PC = 60:30:10; PD = 50:30:20). CF: fecal coliforms, HE: viable helminth eggs, MPN: most probable number, ND: not detected. The results are given on a dry basis. <sup>a</sup>Limits for heavy metals and pathogens in biosolids Type A (excellent quality) according to NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003)<sup>a</sup> and USEPA (1999)<sup>b</sup>.

Composta de biosólidos:suelo arcilloso:estiércol degradado de equino en distintas proporciones (P0 = control; PA = 70:30:00; PB, PE y PF = 65:30:05; PC = 60:30:10; PD = 50:30:20). CF: coliformes fecales, HH: huevos de helminto viables, NMP: número más probable, ND: no detectado. Los resultados están dados en base seca. <sup>a</sup>Límites para metales pesados y patógenos en los biosólidos Clase A (excelente calidad) según la NOM-004-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2003)<sup>a</sup> y USEPA (1999)<sup>b</sup>.

mix the substrates during the aeration process. It was observed that this did not limit the microbial activity, as high temperatures were reached in response to the heat released by the degradation of OM. Variation and loss of moisture were attributed to the generation of water by biodegradation, evaporation, aeration rate and substrate capacity to maintain moisture in the piles (Jolanun & Towprayoon, 2010). Other researchers such as Barrena, Font, Gabarrell, and Sánchez (2014) worked with values lower than 40 %, while Ho et al. (2010) reported humidity from 45 to 65 %.

With respect to OM, we found significant differences between treatments ( $P < 0.05$ ). The control treatment (P0) had the highest percentage (Table 2), which is attributed to the chemical and microbiological oxidation of OM caused by the substrates in the rest of the treatments. The reduction of OM in treatments was  $51.14 \pm 5.13$  %, as recommended by Antil, Raj, Narwal, and Singh (2011), who mention that the loss of OM should be greater than 42 %. As shown in Table 2, the substrates and the proportion used influenced the degradation of OM. Other researchers such as Bustamante et al. (2008) made mixtures between wine residues and cattle and poultry manure, observing a faster mineralization of OM. In the study of Jolanun and Towprayoon (2010), when 15 % of granulated clay was added, an improvement in the thermophilic phase of the composting was tested, as well as an increase in the degradation of OM.

Table 2 also shows that the C/N ratio is strongly influenced by the initial substrates. The C/N ratio of the compost obtained does not represent an environmental risk when applied to soil nor does it alter the microbiological balance when it is lower than 15 (typical C/N ratio in soils), therefore, it can be assumed that the compost has maturity for use (Antil et al., 2011; Bernal, Navarro, Roig, Cegarra, & García, 1996). The C/N values were similar to those reported by Yañez, Alonso, and Díaz (2009) in the composting of biosolids with mimosa (*Acacia dealbata* Link).

The duration of the composting process in the treatments was 21 to 29 days (Figure 1), in contrast to the control that failed to stabilize in this period. The use of the substrates in the piles influenced the processing time due to the characteristics of the components, since the DM is rich in degrading microorganisms and CS favors the conditions for their growth.

The P content was higher and statistically different ( $P < 0.05$ ) in PB and PD compared to the rest of the treatments, and the K/Na ratio was higher in PA and PB, those characteristics denote a product of agronomic quality.

The treatment PB (65:30:05) was chosen for the piles of 500 (PE) and 2 000 kg (PF) taking into account the

los reportados por otros investigadores como Malinska, Zabochnicka-Swiatek, y Dach (2014), quienes utilizaron biosólidos, virutas de madera y carbón vegetal; y Scoton, Battistelle, Bezerra, y Akutsu (2016) que trabajaron con bagazo de caña de azúcar y café.

El Cuadro 2 presenta las mediciones iniciales y finales del proceso de compostaje. En esta investigación, la humedad inicial varió de 34 a 45 %, debido a que la incorporación de SA y ED incrementó la retención de agua y dificultó la mezcla de los sustratos durante el proceso de aireación. Se observó que esto no limitó la actividad microbiana, pues se alcanzaron altas temperaturas como respuesta al calor liberado por la degradación de la MO. La variación y pérdida de humedad se atribuyeron a la generación de agua por la biodegradación, evaporación, tasa de aireación y capacidad de los sustratos para mantener la humedad en las pilas (Jolanun & Towprayoon, 2010). Otros investigadores como Barrena, Font, Gabarrell, y Sánchez (2014) trabajaron con valores menores de 40 %, mientras que Ho et al. (2010) reportaron humedad de 45 a 65 %.

Con relación a la MO se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ( $P < 0.05$ ). El tratamiento control (P0) tuvo el mayor porcentaje (Cuadro 2), lo cual se atribuye a la oxidación química y microbiológica de la MO ocasionada por los sustratos en el resto de los tratamientos. La reducción de MO en los tratamientos fue de  $51.14 \pm 5.13$  %, de acuerdo con lo recomendado por Antil, Raj, Narwal, y Singh (2011), quienes mencionan que la pérdida de MO debe ser mayor de 42 %. Como se observa en el Cuadro 2, los sustratos y la proporción empleada influyeron en la degradación de la MO. Otros investigadores como Bustamante et al. (2008) realizaron mezclas entre residuos vinícolas y estiércol bovino y avícola, observando una mineralización más rápida de la MO. En el trabajo de Jolanun y Towprayoon (2010), al añadir 15 % de arcilla granulada, se comprobó una mejora en la fase termófila del compostaje, así como un incremento en la degradación de la MO.

En el Cuadro 2 también se aprecia que la relación C/N está influenciada fuertemente por los sustratos de partida. La relación C/N de la composta obtenida no representa un riesgo ambiental al aplicarse en el suelo ni altera el equilibrio microbiológico al ser menor de 15 (relación C/N típica en suelos), por lo tanto, se puede asumir que la composta posee madurez para su uso (Antil et al., 2011; Bernal, Navarro, Roig, Cegarra, & García, 1996). Los valores de C/N fueron similares a los reportados por Yañez, Alonso, y Díaz (2009) en el compostaje de biosólidos con mimosa (*Acacia dealbata* Link).

El tiempo de duración del proceso de compostaje en los tratamientos fue de 21 a 29 días (Figura 1), en

**Table 2. Characterization of the initial mixture of biosolids, clay soil and degraded manure, and finished compost. Cuadro 2. Caracterización de la mezcla inicial de biosólidos, suelo arcilloso y estiércol degradado, y de la composta terminada.**

Treatment/ Tratamiento	OM (%)/ MO (%)	NTK (%)	C/N	P (%)	K/Na	pH*	Hbh (%)
Initial/Inicial							
Treatments with different substrate ratios/Tratamiento con diferentes proporciones de sustratos							
P0	28.79 ± 0.42	4.6 ± 0.37	3.63 ± 1.00	0.24 ± 0.07	10.40 ± 0.51	7.8 ± 0.28	36.9 ± 0.62
PA	21.39 ± 0.57	3.24 ± 0.22	3.83 ± 0.43	0.23 ± 0.05	9.09 ± 0.88	7.2 ± 0.12	40.5 ± 0.53
PB	25.12 ± 0.19	3.00 ± 0.10	4.86 ± 0.16	0.22 ± 0.09	15.75 ± 0.51	7.8 ± 0.17	36.1 ± 0.88
PC	24.00 ± 0.42	2.88 ± 0.20	4.83 ± 0.48	0.28 ± 0.06	7.84 ± 0.14	7.7 ± 0.10	35.6 ± 0.51
PD	26.61 ± 0.52	2.52 ± 0.19	6.12 ± 0.79	0.24 ± 0.08	7.50 ± 0.27	7.9 ± 0.12	35.5 ± 0.99
Initial/Inicial							
Treatments with different pile weight/Tratamiento con diferentes pesos de montículo							
PE-500	22.69 ± 0.68	3.06 ± 0.19	4.30 ± 0.95	0.27 ± 0.05	16.50 ± 1.94	6.8 ± 0.13	45.0 ± 1.72
PF-2000	22.72 ± 0.35	3.10 ± 0.25	4.25 ± 0.17	0.28 ± 0.07	6.71 ± 0.74	7.0 ± 0.22	39.6 ± 1.09
Final							
Treatments with different substrate ratios/Tratamientos con diferentes proporciones de sustratos							
P0	15.35 <sup>c</sup> ± 0.48	1.42 <sup>a</sup> ± 0.42	6.67 <sup>b</sup> ± 1.87	0.20 <sup>a</sup> ± 0.01	9.00 <sup>a</sup> ± 0.32	8.46 <sup>a</sup> ± 0.34	19.18 <sup>b</sup> ± 0.54
PA	11.40 <sup>a</sup> ± 0.61	1.50 <sup>a</sup> ± 0.25	4.10 <sup>a</sup> ± 0.25	0.20 <sup>a</sup> ± 0.02	13.00 <sup>b</sup> ± 0.74	8.24 <sup>a</sup> ± 0.15	15.00 <sup>a</sup> ± 0.65
PB	12.70 <sup>b</sup> ± 0.16	1.43 <sup>a</sup> ± 0.04	5.17 <sup>ab</sup> ± 0.16	0.30 <sup>b</sup> ± 0.10	10.90 <sup>c</sup> ± 0.63	8.08 <sup>a</sup> ± 0.26	24.76 <sup>c</sup> ± 0.93
PC	10.90 <sup>a</sup> ± 0.30	1.49 <sup>a</sup> ± 0.25	4.34 <sup>a</sup> ± 0.73	0.20 <sup>a</sup> ± 0.01	6.30 <sup>d</sup> ± 0.19	8.20 <sup>a</sup> ± 0.07	19.80 <sup>b</sup> ± 0.39
PD	11.10 <sup>a</sup> ± 0.57	1.50 <sup>a</sup> ± 0.28	4.12 <sup>a</sup> ± 0.85	0.30 <sup>b</sup> ± 0.04	5.40 <sup>e</sup> ± 0.20	8.40 <sup>a</sup> ± 0.16	18.70 <sup>b</sup> ± 0.83
Final							
Treatments with different pile weight/Tratamientos con diferentes pesos de montículo							
PB-250	12.70 <sup>a</sup> ± 0.16	1.43 <sup>a</sup> ± 0.04	5.17 <sup>a</sup> ± 0.16	0.30 <sup>a</sup> ± 0.10	10.90 <sup>a</sup> ± 0.63	8.08 <sup>a</sup> ± 0.26	24.76 <sup>a</sup> ± 0.93
PE-500	10.82 <sup>b</sup> ± 0.75	1.20 <sup>a</sup> ± 0.14	5.01 <sup>a</sup> ± 0.51	0.29 <sup>a</sup> ± 0.03	20.20 <sup>b</sup> ± 1.79	8.06 <sup>a</sup> ± 0.09	36.96 <sup>b</sup> ± 1.88
PF-2000	9.96 <sup>c</sup> ± 0.23	1.32 <sup>a</sup> ± 0.19	4.44 <sup>a</sup> ± 0.56	0.08 <sup>b</sup> ± 0.01	8.84 <sup>c</sup> ± 0.55	8.50 <sup>b</sup> ± 0.16	34.40 <sup>b</sup> ± 2.30

Biosolid compost: clay soil: equine degraded manure in different ratios (P0 = control; PA = 70:30:00; PB, PE and PF = 65:30:05; PC = 60:30:10; PD = 50:30:20). OM: organic matter. TKN: total Kjeldahl nitrogen, Hwb: Humidity on wet basis. Data are given in dry weight except pH and humidity. \* The pH was determined in a solution of composite:water (w/v) with a ratio of 1:5 at 25 °C. In the final treatments, different letters in each column indicate significant difference (Tukey, *P* < 0.05). n = 5. ± Standard deviation of the mean.

Composta de biosólidos:suelo arcilloso:estiércol degradado de equino en distintas proporciones (P0 = control; PA = 70:30:00; PB, PE y PF = 65:30:05; PC = 60:30:10; PD = 50:30:20). MO: materia orgánica. NTK: nitrógeno total Kjeldahl, Hbh: Humedad en base húmeda. Los datos están dados en peso seco excepto pH y humedad. \*El pH se determinó en una solución de composta:agua (p/v) con una relación 1:5 a 25 °C. En los tratamientos finales, letras diferentes en cada columna indican diferencia significativa (Tukey, *P* < 0.05). n = 5. ± Desviación estándar de la media.

results of temperature, pH, Hwb, physicochemical and microbiological variables and composting time.

### Composting process in piles of 250, 500 and 2 000 kg

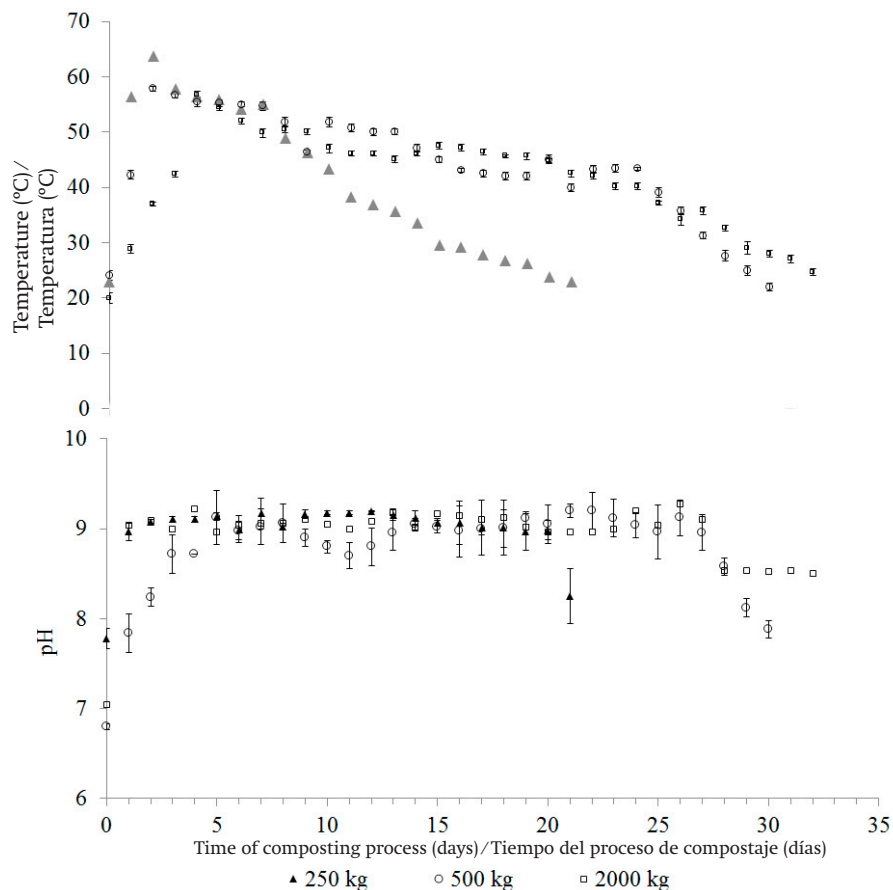
The thermophilic stage had a duration of 10, 14 and 16 days for PB (250 kg), PE (500 kg) and PF (2 000 kg) with maximum temperatures of 63.8, 57.9 and 56.0 °C, respectively. The composting time was prolonged in PF at 32 days (Figure 2). The pH was lower in PE and PF with maxima of 9.1 and 9.2, and minimum of 8.2 and 8.8, respectively. The moisture content of 34.3 to 43.5 % ensured the proper activity of the microbial consortia.

The parameters of quality showed significant differences with respect to the pile weight (Table 2). The most affected variables were OM and K/Na ratio.

contraste con el control que no logró estabilizarse en este periodo. El uso de los sustratos en las pilas influyó en el tiempo de proceso debido a las características de los componentes, ya que el ED es rico en microorganismos degradadores y el SA propicia las condiciones para su crecimiento.

El contenido de P fue mayor y estadísticamente diferente (*P* < 0.05) en PB y PD con respecto al resto de los tratamientos, y la relación K/Na fue superior en PA y PB, dichas características denotan un producto de calidad agronómica.

El tratamiento PB (65:30:05) se eligió para realizar las pilas de 500 (PE) y 2 000 kg (PF) tomando en cuenta los resultados de temperatura, pH, Hbh, variables fisicoquímicas y microbiológicas y tiempo de compostaje.



**Figure 2. Temperature and pH profile in the composting process of biosolids: clay soil: equine degraded manure in a ratio of 65:30:05 with different pile weight.**

**Figura 2. Perfil de temperatura y pH en el proceso de compostaje de biosólidos: suelo arcilloso: estiércol degradado de equino en proporción 65:30:05 con diferentes pesos del montículo.**

The PF treatment had the lowest concentrations of OM, P and K/Na ratio, with temperature and pH lower than the rest of the treatments; in addition, the composting time increased to 32 days (Figure 2). In contrast, composting time with PB was only 21 days; although the duration of the thermophilic phase was lower, the temperatures reached were higher than in the treatments performed at greater weight. On the other hand, according to the microbiological analysis, the population of fecal coliforms, *Salmonella* spp. and viable helminth eggs were removed during composting.

The initial and final weight of each pile was compared and we observed a reduction of  $74.82 \pm 5.63\%$ , indicating the efficiency of composting and showing that the use of substrates is an alternative in the treatment and reduction of biosolids.

## Conclusions

The results show that the incorporation of degraded manure (DM) and clay soil (CS) favor the composting of local biosolids (BS) by reducing the processing time to a maximum of 32 days, in contrast to traditional processes

## Proceso de compostaje en las pilas de 250, 500 y 2 000 kg

La etapa termofílica tuvo una duración de 10, 14 y 16 días para PB (250 kg), PE (500 kg) y PF (2 000 kg) con temperaturas máximas de 63.8, 57.9 y 56.0 °C, respectivamente. El tiempo de compostaje se prolongó en PF a 32 días (Figura 2). El pH fue menor en PE y PF con máximos de 9.1 y 9.2, y mínimos de 8.2 y 8.8, respectivamente. El contenido de humedad de 34.3 a 43.5 % aseguró la actividad adecuada de los consorcios microbianos.

En los parámetros de calidad se encontraron diferencias significativas con respecto al peso del montículo (Cuadro 2). Las variables más afectadas fueron MO y relación K/Na. En el tratamiento PF se obtuvieron las concentraciones más bajas de MO, Py relación K/Na, con temperatura y pH inferior al resto de los tratamientos; además, el tiempo de compostaje incrementó a 32 días (Figura 2). En contraste, el tiempo de compostaje con PB fue de solo 21 días; aunque la duración de la fase termofílica fue menor, las temperaturas alcanzadas fueron mayores que en los tratamientos realizados a mayor peso. Por otra parte, de acuerdo con el análisis



that take more than three months to stabilize. The ratio 65:30:05 of BS:CS:DM in piles of 250 kg, under the piles method with regular turns, significantly increases the agronomic quality of the compost. The physicochemical and microbiological parameters are within regulated limits, which determines its agronomic use as a soil improver because of its low content of heavy metals, pathogens and parasites.

### Acknowledgments

The authors thank the Tecnológico Nacional de México (TecNM, Project no.: 5443.14-P), the Instituto Tecnológico de Toluca (ITT) for the facilities provided, the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the funding, and the Compañía Operadora de Ecosistemas (ECOSYS) for the materials provided.

### End of English version

### Referencias

- Antil, R. S., Raj, D., Narwal, R. P., & Singh, J. P. (2011). Evaluation of maturity and stability parameters of composts prepared from organic wastes and their response to wheat. *Waste and Biomass Valorization*, 4(1), 95–104. doi: 10.1007/s12649-012-9141-7
- Barrena, R., Font, X., Gabarrell, X., & Sánchez, A. (2014). Home composting versus industrial composting: Influence of composting system on compost quality with focus on compost stability. *Waste Management*, 34(7), 1109–1116. doi: 10.1016/j.wasman.2014.02.008
- Bernal, M., Navarro, A., Roig, A., Cegarra, J., & García, J. (1996). Carbon and nitrogen transformation during composting of sweet sorghum bagasse. *Biology and Fertility of Soils*, 22(1), 141–148. doi: 10.1007/BF00384446
- Bustamante, M. A., Paredes, C., Marhuenda-Egea, F. C., Pérez-Espinosa, A., Bernal, M. P., & Moral, R. (2008). Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability. *Chemosphere*, 72, 551–557. doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.03.030
- Hachicha, S., Sellami, F., Cegarra, J., Hachicha, R., Drira, N., Medhioub, K., & Ammar, E. (2009). Biological activity during co-composting of sludge issued from the OMW evaporation ponds with poultry manure-Physico-chemical characterization of the processed organic matter. *Journal of Hazardous Materials*, 162(1), 402–409. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.05.053
- Ho, C., Yuan, S., Jien, S., & Hseu, Z. (2010). Elucidating the process of co-composting of biosolids and spent activated clay. *Bioresource Technology*, 101(21), 8280–8286. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.058
- Jiang, J., Liu, X., Huang, Y., & Huang, H. (2015). Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig

microbiológico, la población de coliformes fecales, *Salmonella* spp. y los huevos de helminto viables fueron eliminados durante el compostaje.

El peso inicial y final de cada pila se comparó y se observó una reducción de  $74.82 \pm 5.63$  %, lo que indica la eficacia del compostaje y muestra que el uso de sustratos es una alternativa en el tratamiento y reducción de los biosólidos.

### Conclusiones

Los resultados muestran que la incorporación de estiércol degradado (ED) y suelo arcilloso (SA) favorece el compostaje de biosólidos (BS) municipales al reducir el tiempo de proceso a 32 días como máximo, en contraste con los procesos tradicionales que tardan más de tres meses en estabilizarse. La proporción 65:30:05 de BS:SA:ED en las pilas de 250 kg, bajo el método de pilas con volteos periódicos, incrementa la calidad agronómica de la composta significativamente. Los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se encuentran dentro de los límites normados, lo que determina su uso y aprovechamiento agronómico como mejorador de suelo por su bajo contenido de metales pesados, patógenos y parásitos.

### Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM, núm. de proyecto: 5443.14-P), al Instituto Tecnológico de Toluca (ITT) por las instalaciones, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento, y a la Compañía Operadora de Ecosistemas (ECOSYS) por los materiales proporcionados.

### Fin de la versión en español

- manure composting. *Waste Management*, 39, 78–85. doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.025
- Jolanun, B., & Towprayoon, S. (2010). Novel bulking agent from clay residue for food waste composting. *Bioresource Technology*, 101(12), 4484–4490. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.116
- Ksheem, A. M., Bennett, J. M., Antille, D. L., & Raine, S. R. (2015). Towards a method for optimized extraction of soluble nutrients from fresh and composted chicken manures. *Waste Management*, 45, 76–90. doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.011
- Kjeldahl, J. (1982). A new method for the estimation of nitrogen in organic compounds. *Zeitschrift für Analytische Chemie*, 22, 366.
- Malinska, K., Zabochnicka-Swiatek, M., & Dach, J. (2014). Effects of biochar amendment on ammonia emission during composting of sewage sludge. *Ecological Engineering*, 71, 474–478. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.07.0

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos. México: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) & Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2014). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación. Retrieved from [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Inventario\\_Nacional\\_Plantas1.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Inventario_Nacional_Plantas1.pdf)
- Semblante, G. U., Hai, F. I., Huang, X., Ball, A. S., Price, W. E., & Nghiem, L. D. (2015). Trace organic contaminants in biosolids: Impact of conventional wastewater and sludge processing technologies and alternatives. *Journal of Hazardous Materials*, 300, 1–17. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.06.037
- Scoton, E. J., Battistelle, G. R. A., Bezerra, B. S., & Akutsu, J. (2016). A sewage sludge co-composting process using respirometric monitoring method in hermetic rotary reactor. *Journal of Cleaner Production*, 121, 169–175. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.081
- SPSS (2007). SPSS 16.0 para Windows. Chicago, IL, USA: Author.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (1999). Standards for the use or disposal of sewage sludge. 40 CFR Parts 403 and 503. Retrieved from <http://archive.nacwa.org/getfile4f66.pdf?fn=ra99-24a.pdf>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29–38.
- Yañez, R., Alonso, J. L., & Díaz, M. J. (2009). Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. *Bioresource Technology*, 100(23), 5827–5833. doi: 10.1016/j.biortech.2009.05.073
- Yuan, J., Yang, Q., Zhang, Z., Li, G., Luo, W., & Zhang, D. (2015). Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting. *JES*, 37, 83–90. doi: 10.1016/j.jes.2015.03.028
- Zhang, L., & Sun, X. (2015). Effects of earthworm casts and zeolite on the two-stage composting of green waste. *Waste Management*, 39, 119–129. doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.037