

Caracterización del compostaje de residuos de palma canaria en la Ciudad de México

Characterization of composting of Canary island date palm waste in Mexico City

Alvarado, D.^a, Saavedra, L.L.^{a*}, Mares, S.^b, Mares, O.^b, Rodríguez, O.^b, Maldonado, J.^b

^a Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Programa de Fitosanidad-Fitopatología. km. 36.5 Carr. México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56264.

^b Terra Mulch, S. A. de C. V. Canal de Chalco s/n, Ciénega Grande, Alcaldía Xochimilco, Ciudad de México. C.P. 16036.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30-08-2024

Accepted 24-10-2024

Keywords:

Germination index

Lactuca sativa

Phytotoxicity

Maturity

Aqueous extracts

Original Research,

Plant Science

*Corresponding author:

Saavedra, L.L.

E-mail address:

saavedra.luz@colpos.mx

ABSTRACT

The biggest problem facing Mexico City is the huge amount of organic waste it produces daily, which has recently increased with the decline and death of hundreds of Canary Island palms. As an alternative to reduce this, there is composting, a process whose final product, compost, must guarantee safety for plants and humans. The objective of the study was to determine the maturity of Canary Island date palm (*Phoenix canariensis* L.) compost through phytotoxicity tests and other physical and chemical parameters. During the composting process, five samplings were performed, and phytotoxicity bioassays were carried out with lettuce seeds in aqueous extracts of the compost, and the Germination Index (GI) was determined. At the beginning and at the end of the process, the physical and chemical analyses indicated by the Mexican Composting Standard 2018 (NMC) were accomplished. There was an increase in germination from 39% in May to 96% in September, the same occurred with the GI value. After 124 days of composting, the product reached maturity and stability, i.e., free of phytotoxicity, reaching a GI of 135.1 and adequate organoleptic properties. 89.7% of the compost volume had Type 1 quality (particle size ≤ 10 mm), free of impurities, heavy metals and pathogens. Except for the C/N ratio, and percentage of P and K, the rest of the parameters were within the limits reported in the NMC. This research explores for the first time the composting of *P. canariensis* waste in Mexico.

RESUMEN

El mayor problema que enfrenta la Ciudad de México, es la enorme cantidad de residuos orgánicos que produce diariamente, y que se ha incrementado recientemente con la declinación y muerte de cientos de palmas canarias. Como alternativa para disminuirlos, está el compostaje, un proceso cuyo producto final, la composta, debe garantizar inocuidad para plantas y humanos. El objetivo del estudio fue determinar la madurez de la composta de palma canaria (*Phoenix canariensis* L.) mediante pruebas de fitotoxicidad y otros parámetros físicos y químicos. Durante el proceso de compostaje se realizaron cinco muestreos y bioensayos de fitotoxicidad con semillas de lechuga en extractos acuosos de la composta y se determinó el Índice de Germinación (IG). Al inicio y al final del proceso se realizaron los análisis físicos y químicos que indica la Norma Mexicana de Compostaje 2018 (NMC). Hubo un incremento en la germinación de 39% en mayo a 96% en septiembre, lo mismo ocurrió con el valor del IG. Después de 124 días de compostaje, el producto alcanzó madurez y estabilidad, es decir, libre de fitotoxicidad, alcanzando un IG de 135.1 y propiedades organolépticas adecuadas. El 89.27 % del volumen de composta tuvo calidad Tipo 1 (tamaño de partícula ≤ 10 mm), libre de impurezas, metales pesados y patógenos. A excepción de la relación C/N, y porcentaje de P y K, el resto de los parámetros se encontraron dentro de los límites reportados en la NMC. Esta investigación explora por primera vez el compostaje de residuos de *P. canariensis* en México.

Palabras clave: Índice de germinación, *Lactuca sativa*, fitotoxicidad, madurez, extractos acuosos.

INTRODUCCIÓN

Entre los graves problemas ecológicos que imperan en el planeta, destaca la enorme producción de residuos sólidos urbanos; de acuerdo con la ONU (2023), se generan más de 2,000 millones de toneladas cada año, de los que 45 % se gestionan inadecuadamente.

Ante este escenario, el 30 de marzo de 2023, se celebró el Día Internacional de Cero Desechos, para concientizar y comprometer a las naciones sobre la importancia de abordar y resarcir esta problemática (ONU 2023). En la Ciudad de México (CDMX), una de las megalópolis más pobladas de América con más de 9 millones de habitantes, se producen 12,355 toneladas día⁻¹ (SEDEMA,

2021), sin embargo, a partir de 2022, la fracción orgánica se incrementó de forma drástica con el fenómeno de la declinación y muerte de la palma canaria (*Phoenix canariensis* L.) (Alvarado-Rosales et al., 2024; Quezada-Salinas et al., 2023), es por ello, que ante la enorme cantidad de desechos vegetales desaprovechados, es obligado adoptar lineamientos específicos para su tratamiento y reducir el impacto sanitario y visual de su acumulación (Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

La transformación de materias primas provenientes de residuos de origen vegetal, animal e industrial a través del compostaje es un proceso productivo/reductivo que, en términos económicos, confiere un valor agregado al bien transformado (Lim y Wu, 2016; Vanegas-Escudero, 2019). El compostaje, es un proceso dinámico de descomposición mediado por la interacción de consorcios microbianos en condiciones aerobias, de humedad y temperatura idóneas para la producción de un material maduro, estable e inocuo denominado composta (Oviedo-Ocaña et al., 2015). Por ser un recurso renovable, la producción de compostas puede disminuir el impacto de la extracción masiva de tierra de monte (suelo mineral superficial) y de tierra de hoja (horizontes orgánicos), que, en conjunto, representan el mayor volumen de productos no maderables (Alexander, 2001; Mantero-García et al., 2019). La alta demanda de estos recursos en la producción de plantas ornamentales, en el paisajismo y en la creación de jardines instantáneos, ha contribuido a generar daños irreversibles a los ecosistemas boscosos en muchos países (González y Cooperband 2002).

Las estadísticas de la SEMARNAT (2016) indican que la extracción de tierra de monte fue del orden de 144,015 toneladas, siendo Coahuila, Guerrero, Jalisco, Guanajuato, Hidalgo, Zacatecas, Estado de México y Morelos, los estados donde esta práctica es mayor, mientras que los dos últimos son responsables de la extracción del 95.6% de este recurso del total nacional. La turba de musgo (peat moss) y el musgo Sphagnum (*Sphagnum* moss) también son recursos sobreexplotados en bosques húmedos, pantanos y páramos altos (Gaudig et al., 2018; Kain et al., 2021), y aunque al presente existen “granjas” que los cultivan (~ 6 Ton ha⁻¹ al año), el impacto previo de la explotación de las turberas naturales y de los suelos forestales queda sin subsanar. En este contexto de deterioro ambiental, agotamiento de recursos no renovables y el precio excesivo de los sustratos de crecimiento y fertilizantes ha favorecido el uso de materiales alternos (Benito et al., 2005; Abad et al., 2001). En un esfuerzo por reciclar, reducir y recuperar residuos orgánicos, la producción de compostas como producto final y para diversos usos se ha convertido en un producto útil y con alto valor agregado, no obstante, deben garantizar seguridad, es decir, ser productos inocuos, sobre todo en sistemas

de producción hortícola (Alexander 2001; Abad et al., 2001), debido a ello, los criterios de calidad se enfocan principalmente en determinar el mínimo contenido de patógenos (humanos, animales y vegetales), elementos traza (metales pesados, plástico, vidrio, roca y arena), así como, un excelente contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes, estabilidad y madurez al final del proceso (Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018; de Bertoldi et al., 1983; Wang et al., 2004).

Con el fin de introducir nuevas ideas de productos con alto valor agregado para la producción de bienes hortícolas y forestales, este estudio tuvo como objetivos: (a) determinar la madurez del compostaje de palma canaria (*Phoenix canariensis*) mediante bioensayos de fitotoxicidad empleando semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. Parrish), y (b) caracterizar la composta de palma canaria con base en la Norma Mexicana de compostaje vigente (NMX-AA-180-SCFI-2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en las instalaciones de TERRAMULCH, S.A. de C.V., ubicadas en la Alcaldía Xochimilco, CDMX, México, en las coordenadas UTM 491253.61 E y 2133817.13 N, empresa de compostaje a gran escala con un volumen de tratamiento de residuos equivalente a 97 Ton día⁻¹ y una producción de 25,220 Ton año⁻¹, además de ser una de las principales productoras de mulch y composta de la CDMX.

Método de compostaje

La materia prima utilizada en el presente estudio procedió de la poda y derribo de cientos de palmas canarias en diferentes puntos de la CDMX (Alvarado-Rosales et al., 2024). Una vez que los residuos (frondas, troncos, frutos, raíces, espadas, etc.) se encontraron en el patio de tareas, se empleó una trituradora marca Vermeer (modelo TG 5000), con capacidad de triturar el material fibroso y duro de la palma, procesar grandes volúmenes y tallas en tiempos más cortos (Figura 1ABC). Con la biomasa triturada, se estableció una pila trapezoidal en hilera (Awasthi et al., 2014) con dimensiones de 120 m x 4.2 m x 1.2 m (largo x ancho x alto) (Figura 1F), en sistema abierto, de entre los más simples (pilas dispuestas a voluntad, con menor costo de inversión, aptas para procesar grandes volúmenes y materiales diversos) (Stoffella y Kahn 2005). El volteo y riego de la pila se realizó en dos ocasiones con una volteadora Vermeer (modelo CT-612) (Figura 1DE), el primero, cinco días después del establecimiento de la pila, y el segundo, dos semanas después, basado en los criterios de Azim et al. (2018) y Lal Meena et al. (2021). Se realizaron cinco muestreos de forma mensual, iniciando el 9 de mayo, para finalizar el 5 de septiembre

de 2022. En cada fecha, se colectaron cinco muestras de 2 kg a 60 cm sobre el nivel del suelo, con una distancia de separación de 20 m una de la otra, aproximadamente. Lo anterior, basándose en un método de muestreo similar utilizado por Benito *et al.* (2006). La primera y última muestra se tomó 2 m al interior de la pila para evadir el efecto de borde.

Bioensayos de fitotoxicidad

Para monitorear el proceso de maduración de la composta de palma canaria, se realizaron pruebas de fitotoxicidad empleando extractos acuosos de composta (Gasser, 1985; Zucconi *et al.*, 1985, 1981), las cuales se repitieron para cada muestreo. El pro-



Figura 1. Desarrollo del proceso de compostaje en las instalaciones. A. Trozas de *Phoenix canariensis* (materia prima). BC. Trituradora Vermeer TG 5000 y material triturado. D. Volteadora Vermeer CT-612. E. Actividades de volteo mecanizado y riego. F. Pila de composta de dos meses de edad en forma de hilera sobre suelo desnudo.

Figure 1. Development of the composting process at the facilities of TERRA MULCH, S.A. de C.V. A. *Phoenix canariensis* logs (raw material). BC. Vermeer TG 5000 shredder and shredded material. D. Vermeer CT-612 turner. E. Mechanized turning and irrigation activities. F. Two-month-old compost pile in the form of a windrow on bare soil.

cedimiento inicial, consistió en secar el material a temperatura ambiente y tamizarlo en malla con abertura de 2 mm (tamiz marca Alcon), posteriormente, se pesaron 25 g del material tamizado y se mezclaron con 100 mL de agua destilada en matraces Erlenmeyer de 250 mL (relación 2.5:10 peso/volumen), los cuales se mantuvieron en agitación orbital a 90 rpm, durante tres horas. El sobrenadante fue filtrado para clarificarlo y obtener el extracto.

Los bioensayos se establecieron *in vitro* con una especie indicadora y de germinación rápida, *Lactuca sativa* var. Parrish. Se implementaron cámaras de germinación en cajas Petri de vidrio de 15 cm de diámetro previamente esterilizadas con papel filtro de marca comercial Br® como soporte; se adicionaron 5 mL del extracto crudo y sin diluir por caja (Jagadabhi et al., 2019; Abad et al., 2001; Xu et al., 2012) y 20 semillas de lechuga equidistantemente colocadas, con cinco repeticiones (100 semillas) (Figura 2). Los estudios de Cabañas et al. (2005), sugieren el uso de papel filtro Whatman No. 1, sin embargo, en pruebas iniciales realizadas en el presente estudio con esta marca comercial no se obtuvieron resultados satisfactorios. Se utilizó un control, empleando agua destilada y el mismo número de repeticiones. Las cajas fueron incubadas (25 °C ±2) por 48 h en oscuridad, terminado el tiempo de incubación, se contabilizaron las semillas germinadas y se midió la longitud radicular por plántula con un Vernier digital (IP-54, resolución ± 0.01 mm).

Índice de germinación (IG)

Se determinó un índice de germinación en función del porcentaje de semillas germinadas y la longitud radicular (mm) de las plántulas en el extracto acuoso de composta, así como en el control. Como criterio de germinación, se consideró la aparición visible de la

radícula. Para calcular el IG, se empleó la ecuación de Yang et al. (2021).

$$IG(\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas en el extracto}}{\text{Número de semillas germinadas en el control}} \times \frac{\text{Longitud de radícula en el extracto}}{\text{Longitud de radícula en el control}} \times 100$$

Análisis físicos, químicos y biológicos

Tres días después de la construcción de la pila, se tomaron cinco muestras del material crudo para formar una muestra compuesta, la cual fue sometida a los análisis físicos y químicos indicados en la Norma Mexicana de Compostaje (NMX-AA-180-SCFI-2018). Los análisis fueron realizados por la empresa GISENA, (Grupo Integral de Servicios Fitosanitarios), empleando los métodos de análisis de suelos en México, cuyos lineamientos están establecidos en la norma mexicana, NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2000), mismos que se repitieron al final del proceso, para evaluar la evolución del compostaje y determinar la calidad de la composta (COTEMARNAT, 2018; Said-Pullicino et al., 2007).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron con un diseño completamente al azar; previamente se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov (n>50) con un α = 0.05 para comprobar si los datos tenían una distribución normal (Romero-Saldaña et al., 2016), finalmente, y debido a que los datos no fueron normales, se empleó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para determinar diferencias estadísticas en la longitud de la radícula de los bioensayos de fitotoxicidad. El software estadístico empleado fue InfoStat versión 2020 (Di Rienzo et al., 2008).

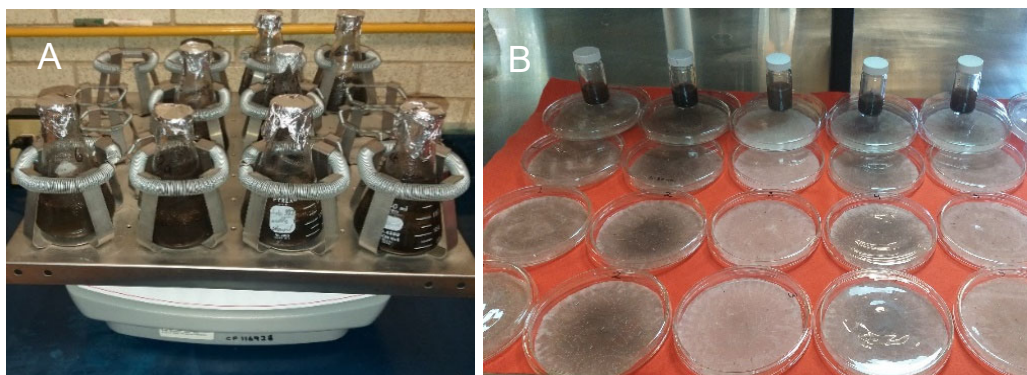


Figura 2. A. Obtención de los extractos acuosos de compostas, mediante agitación orbital. B. Panorámica de los extractos empleados en las pruebas de germinación/fitotoxicidad con lechuga.

Figure 2. A. Obtaining aqueous extracts from compost by orbital agitation. B. Overview of the extracts used in germination/phytotoxicity tests with lettuce.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los bioensayos con *L. sativa* mostraron que la composta de palma canaria no indujo efectos fitotóxicos al final del compostaje (septiembre 05, 2023). De mayo a agosto, el porcentaje de germinación aumentó (Figura 3), indicando evolución en el proceso de maduración.

El control presentó porcentajes similares a lo encontrado durante los dos últimos muestreos (Figuras 3, 4). Las plántulas de lechuga presentaron buen desarrollo sobre el papel filtro empleado, el cual mostró retención de humedad pese a su textura lisa, mientras que la anatomía de las plántulas se visualizó perfectamente. La radícula creció superficialmente sin dañar el papel, lo cual favoreció que las plántulas pudieran ser removidas para su medición sin ser dañadas (Figura 4) (Sobrero y Ronco, 2004). Ninguna plántula presentó

desarrollo de hongos saprófitos o patógenos que pudieran relacionarse con los bajos porcentajes de germinación en los primeros muestreos; estos resultados indican que la composta de *P. canariensis* presentó cierto grado de fitotoxicidad al inicio, disminuyendo en la fase final.

En relación a la producción de biomasa, expresada como longitud promedio de radícula, se obtuvieron diferencias significativas mediante la prueba de Kuskall-Wallis (estadístico H: 172.71; $p < 0.0001$). En mayo, la longitud radicular fue menor (Figura 5A) y mayor en el extracto de composta (P), comparado con el control (H=41.68 y $p < 0.0001$) (Figura 5B).

En lo que respecta al Índice de Germinación (IG), se observó un incremento conforme los materiales maduraban (Cuadro 1); la norma mexicana establece los umbrales de IG con los siguientes intervalos: a) composta

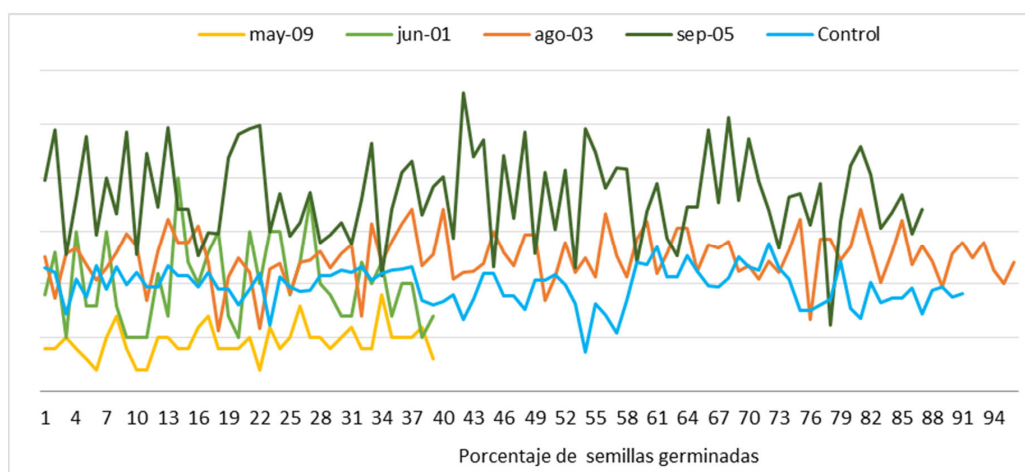


Figura 3. Porcentajes de germinación en *Lactuca sativa* en extractos acuosos de composta de palma canaria por fecha de muestreo, incluido el control.

Figure 3. Germination percentages in lettuce by using aqueous extracts of palm compost by sampling date, including the control.



Figura 4. Cámaras de germinación con lechuga en extracto de composta de palma (izq.) y Testigo (der.), 48 h después de la siembra.

Figure 4. Germination chambers with lettuce in palm compost extract (left) and control (right), 48 h after sowing.

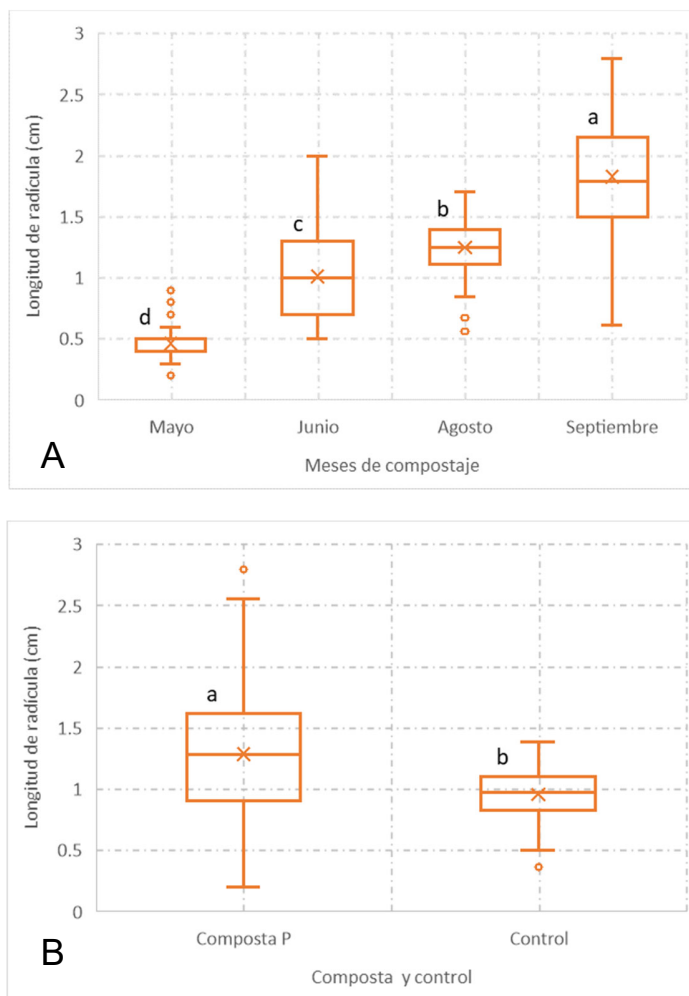


Figura 5. Diagrama de cajas para longitud de radícula de *Lactuca sativa* en extractos acuosos de composta de palma. A. Por mes de muestreo. B. En composta y control. Letras diferentes sobre cada caja indican diferencias significativas ($p < 0.0001$).

Figure 5. Box plot for lettuce radicle length in aqueous extracts of palm compost. A. By sampling date. B. By compost and control. Different letters on each box indicate significant differences ($p < 0.0001$).

Cuadro 1. Índice de germinación (IG) en extractos acuosos de composta de palma durante los cinco muestreos realizados en 2023.

Table 1. Germination index (GI) in aqueous extracts of palm compost during the five samplings performed during 2023.

	Fechas de muestreo				
	Mayo 09	Junio 01	Julio 04	Agosto 09	Septiembre 05
Edad (días)	7	29	61	91	124
IG (%)	4.48	41.73	0	127	135

Tipo I con IG > 90%; b) composta Tipo II con IG de 85 a 90%, y c) composta Tipo III, entre 80 y 85% (CONTE-MARNAT, 2018), en este contexto, Huang *et al.* (2006) y Tiquia, (2005), mencionan que valores de IG > 80% indican ausencia de toxicidad, mientras que valores de IG >100% se clasifican como fitoestimulantes o fitonutrientes, según Emino y Warman (2004).

De acuerdo con especificaciones técnicas para el compostaje de estiércol en la industria agrícola de China y la norma más reciente sobre fertilizantes orgánicos, mencionan que una composta madura debe tener un IG superior a 70% (Kong *et al.*, 2023), mientras que a partir del análisis de 63 sustratos de cultivo en España donde emplearon extractos crudos de residuos

orgánicos provenientes de actividades productivas, industriales y de consumo, se obtuvieron bajos valores de IG (<60%) en plantas indicadoras como lechuga y berro (*Lepidium sativum* L.) (Abad *et al.*, 2001), sin embargo, cuando los extractos fueron diluidos, algunos sustratos aumentaron el IG \geq 120%. Para el compostaje de palma datilera, Ou-Zine *et al.* (2020) reportaron valores de IG de 34% utilizando extractos crudos, pero, cuando fueron diluidos al 5%, el IG mostró un incremento a 83.7%. Resultados similares fueron obtenidos por Kong *et al.* (2023).

Cabe destacar, la baja germinación de *L. sativa* en el muestreo de julio. Aunque las causas de fitotoxicidad pueden ser numerosas, se asocian en su mayoría a las etapas iniciales del compostaje (Kasemi *et al.*, 2016) donde diversos consorcios microbianos se in-

crementan exponencialmente agotando parcialmente la materia prima inicial; la síntesis de compuestos que inhiben la germinación también es común (alcoholes, compuestos fenólicos y ácidos orgánicos). Simultáneamente, algunos consorcios microbianos disminuyen, mientras que nuevos tienden a desarrollarse; estas biofluctuaciones pueden ocasionar un “retorno de la fitotoxicidad” en las compostas, pero rara vez se percibe (Carballo *et al.*, 2009). Este fenómeno, pudo estar activo en el muestreo de julio, de ahí los resultados negativos. A partir de los cinco ensayos realizados con los extractos de composta de palma canaria, se observó que la fitotoxicidad desapareció después de 91 días de iniciado el compostaje obteniendo un IG de 127% en agosto y 135% en septiembre (Cuadro 1; Figura 5). Después de 124 días, la composta presentó las propiedades organo-

Cuadro 2. Especificaciones para una composta madura, según la Norma Mexicana de Compostaje (NMX-AA-180-SCFI-2018), y los resultados obtenidos para la composta de palma canaria.

Table 2. Specifications for mature compost, according to the Mexican Composting Standard, and the results obtained for Canary Island palm compost.

Variable	Especificación de la Norma Mexicana (2018)	Materia Prima	Composta de palma después de 124 d
Color	Marrón o pardo oscuro (similar al café o chocolate oscuro).	Pardo grisáceo	Cumple
Olor	Agradable a tierra de monte; sin olores amoniacales, de pudrición, H ₂ S, ácidos grasos volátiles y excremento.	Cumple	Cumple
Granulometría	Tipo 1: \leq 10 mm Tipo 2 y 3: $10 \leq$ 30 mm	Tipo 1= 62.3 %, Tipo 2 = 37.7%	Tipo 1= \leq 10 (89.27%) Tipo 2 y 3= $10 \leq$ 30 mm (10.73%)
Humedad	25 a 45% en peso	---	29.8- 32.3%
pH	6.5-8.5	5.24	7.57
Conductividad Eléctrica (CE)	0.5-12 dS m ⁻¹	4.31	3.93 (Tipo I)
Materia orgánica (MO)	\geq 20%	49.4	34.12 (Tipo II)
Carbono orgánico total	Mínimo 10%	28.65	19.6
Nitrógeno total (Nt)	1-3%	2.47	1.71
Relación C/N	15-25	11.59	11.46
Fósforo (P)	1-3 %	0.03%	0.015%
Potasio (K)	1-3%	1.1%	0.52%
Cadmio (Cd)	0.7-2 mg kg ⁻¹	ND	0.05
Níquel (Ni)	25-90 mg kg ⁻¹	10.29	18.68
Plomo (Pb)	45-150 mg kg ⁻¹	16.94	33.94
Coliformes fecales	<1000 NMP/g	<3	<3
Coliformes totales	<1000 NMP/g	<3	<3
<i>Salmonella</i> sp.	<1000 NMP/ g	Ausencia en 25 g	Ausencia en 25 g
<i>Escherichia coli</i>	\leq 1000 NMP/ g	<3	<3

lépticas requeridas por la norma mexicana (Cuadro 2), sin olores pútridos, de color oscura (semejante al color del chocolate y tierra de monte) (Figura 6). El pH y conductividad eléctrica (CE) se ubicaron dentro del intervalo requerido al final del proceso con 7.57 y 3.93 dS m⁻¹, respectivamente, y un valor de pH de 5.24 para la materia prima bruta (Cuadro 2).

Estudios de compostaje en palma datilera de seis meses, presentaron un pH=7.6 y de conductividad eléctrica (CE) de 3.2 dS m⁻¹ (Benabderrahim et al. 2018), similares a los de palma canaria. De acuerdo con distintos estudios, los sustratos y las compostas empleadas como medio de cultivo en contenedor deben tener baja salinidad. Un sustrato ideal según Abad et al. (2001), debe tener un CE ≤ 0.5 dS m⁻¹ y un intervalo de pH de 5.3 a 6.5. La composta de palma canaria evaluada en el presente estudio presentó valores de CE que cumplen con los criterios para nuestro país.

En lo que respecta a la distribución del tamaño de partícula (análisis granulométrico), la composta de palma canaria presentó un tamaño aceptable; con base en la Norma Mexicana, el 89.27% presentó una calidad Tipo 1 con un tamaño ≤10 mm; mientras que el 10.73% fue del tipo 2 y 3 con tamaño de > 10 mm ≤ 30 mm (Figura 6; Cuadro 2). Los estudios de Abad et al. (2001) sugieren un tamaño de partícula ideal entre 0.25-2.0 mm; una talla superior a la óptima puede afectar la aireación y la capacidad de retención de agua, mientras que una partícula pequeña aumentará la densidad del material y reducirá el espacio poroso, en este sentido, es indispensable tomar en cuenta esta propiedad cuando se desea emplear compostas para la recuperación de suelos, o en la producción de ornamentales, horticolas y especies forestales (López-Clemente et al., 2015).

La relación C:N describe la descomposición de desechos orgánicos y la calidad de la composta. La ma-

teria prima debería estar entre 25 y 35 (Alkokaik et al., 2020; Céspedes, 2004). Si la relación es baja, el nitrógeno se volatiliza en forma de amoniaco originando olores desagradables, pero si es alta (>30), el compostaje se ralentiza. En el presente, la composta de palma de 124 días, presentó una relación C:N de 11.46, el cual, de acuerdo con la Norma Mexicana (Cuadro 2) se considera baja, no obstante, también proporciona información sobre los niveles potenciales de nutrientes, es decir, valores de C:N de 10:1 en compostas, pueden ser una fuente lábil de nutrientes (Landis y Khadduri, 2008), aunado a ello, contienen poblaciones elevadas de microorganismos supresores de enfermedades, que pueden incrementar el vigor de las plantas (Barthod et al., 2018; Mihajlovic et al., 2017). En estudios previos, Benabderrahim et al. (2008) reportaron una C:N de 27.1 en la materia prima de *Phoenix dactylifera*, valor alto, comparado con la materia prima de *P. canariensis* (11.59), mientras que Ghouili et al. (2022) encontraron un valor de 15.36 para C:N, y valores de C, N y K, muy cercanos a los obtenidos en el presente estudio.

El contenido de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO) y nitrógeno total (NT) fueron adecuados tanto al inicio como al final de proceso de compostaje (Cuadro 2), mientras que el porcentaje de fósforo y potasio fueron bajos. En *P. dactylifera*, el P y K fue de 0.37% y 0.42% (Benabderrahim et al. 2018), valores mayores que los del presente estudio.

La producción eficiente de compostas depende de la temperatura y de las comunidades microbianas presentes en cada fase del proceso (Mehta et al., 2014). La actividad microbiana está directamente relacionada con el aumento de la temperatura, y con humedad suficiente (entre 45 y 60%) el proceso se optimiza (Céspedes, 2004). Es de destacar, que, en el presente estudio, no fue posible medir las temperaturas durante el

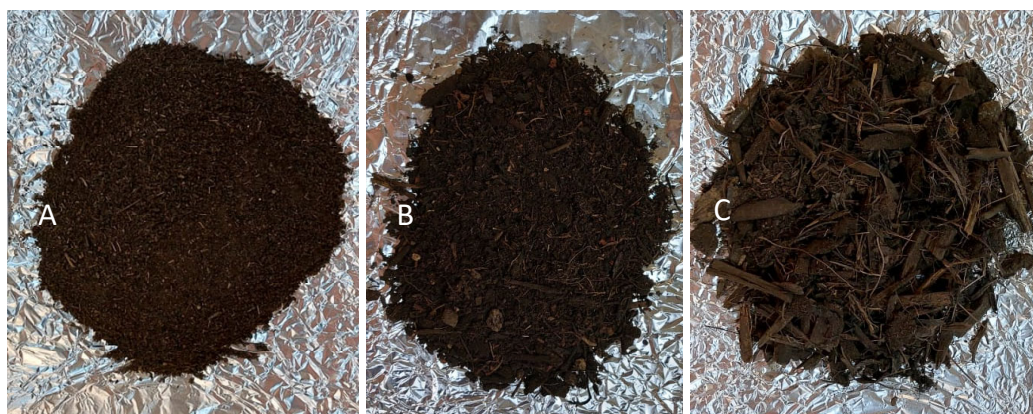


Figura 6. Granulometría de la composta de palma de 124 días de edad. A. Fracción ≤ 2 mm. AB. Composta Tipo 1 con tamaño de partícula ≤10 mm. C. Composta Tipo 2 y 3, con tamaño de partícula >10 mm ≤ 30 mm.

Figure 6. Particle size distribution of 124-day-old palm compost. A. Fraction ≤ 2 mm. AB. Compost Type 1 with particle size ≤10 mm. C. Compost Type 2 and 3, with particle size >10 mm ≤ 30 mm.

compostaje, sin embargo, de febrero a junio de 2024 se obtuvo el perfil de temperaturas de una nueva pila de composta a 20 y 60 cm de profundidad (datos no publicados), alcanzando mínimas de 32.5 °C y máximas de 56.3 °C en el centro de la pila. De acuerdo con de Bertoldi *et al.* (1983) y Mehta *et al.* (2014), las fases del compostaje, incluyen tres cotas. La fase temprana o mesofílica con temperaturas de entre 20 y 40 °C; la fase termófila, > 40°C (esta es la fase más importante para el control de patógenos termosensibles), finalmente, la fase de enfriamiento, curado, o maduración, con valores por debajo de 40°C. Podemos mencionar, que a partir de la pila prueba, las temperaturas que caracterizaron la fase termofílica tuvieron lugar entre marzo y abril, mientras que, la fase de enfriamiento, se observó al final del mes de junio. Sin embargo, aun cuando las temperaturas no alcanzaron 60°C, como lo sugieren otros estudios (Sadik *et al.* 2012) los resultados sobre el contenido de coliformes fecales, totales, *Salmonella* y *Escherichia coli*, fueron aceptables. En cuanto a la cantidad de elementos traza (cadmio, níquel y plomo), se encontraron todos, dentro de límites permisibles (Cuadro 2) (Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018), incluso, algunos no fueron detectados (Cuadro 2). Actualmente, los metales pesados son la principal preocupación en el compostaje de residuos urbanos ya que pueden contener desechos como baterías, pinturas, electrónicos, plásticos y cerámica, entre otros (Barral y Paradelo 2011) debido a ello, el compostaje de estos residuos conlleva mayor responsabilidad, toda vez que el producto final se utilice para la producción alimentaria; con estos resultados, asumimos que el compostaje de residuos de palma canaria da como resultado un producto estable, maduro, seguro e inocuo después de 124 días de compostaje (Cuadro 1)

Finalmente, ante el creciente aumento de palmas muertas en la CDMX, el volumen de residuos derivados de su derribo se ha ido acumulado, y con las actividades de manejo de las áreas verdes, los residuos de poda de árboles en las numerosas áreas verdes de la CDMX, también aumentan el stock de materiales potenciales a ser compostados.

CONCLUSIONES

El método de compostaje presentado en este estudio utilizando residuos de palma canaria permitió obtener un producto aceptable con tiempo de espera de 124 días.

Los bioensayos realizados con los extractos acuosos de palma confirmaron que después de cuatro meses de compostaje, el producto obtenido alcanzó madurez y estabilidad, es decir, libre de fitotoxicidad para las semillas de lechuga, alcanzando un IG de 135.1 al final del proceso y que clasifica a la composta obtenida como

fitoestimulante. El 89.27% del volumen de composta obtenido, presentó una calidad Tipo 1, con un tamaño de partícula ≤ 10 mm y libre de impurezas, metales pesados y patógenos. Con excepción de la relación C:N, y porcentaje de P y K, el resto de los parámetros se encontraron dentro de los límites reportados en la Norma Mexicana de Compostaje. Este estudio es pionero en el compostaje de palma canaria en la Ciudad de México.

REFERENCIAS

- Abad, M., Noguera, P., Burés, S., 2001. National inventory of organic wastes for use as growing media for ornamental potted plant production: case study in Spain. *Bioresource Technology* 77, 197-200.
- Alexander, R., 2001. Utilización de compost en los sistemas de cultivo hortícola, in: Stoffella, P.J., Kahn, B.A. (Eds.), *Utilización de los compost en la arquitectura del paisaje*. Capítulo 7. CRC Press, USA. pp. 151-175. <https://doi.org/10.1201/9781420026221.ch7>
- Alkoiik, F., Al-Faraj, A., Al-Helal, I., Fulleros, R., Ibrahim, M., Abdel-Ghany, A.M., 2020. Toward sustainability in rural areas: composting palm tree residues in rotating bioreactors. *Sustainability* 12, 201. <https://doi.org/10.3390/su12010201>
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L.L., Quezada-Salinas, A., Almaraz-Sánchez, A., García-Díaz, S.E., Aranda-Ocampo, S., Ortiz-García, C.F., Equihua-Martínez, A., López-Buenfil, J.A., 2024. La muerte de las palmas canarias en la Ciudad de México. *Gaceta SECTEI, Con-Ciencia y Educación* 3, 10-11. https://www.sectei.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Materiales_SECTEI/Gaceta%20Sectei%20Num3%20Abril24%20vDig.pdf
- Awasthi, M.K., Pandey, A.K., Khan, J., Jagadabhi, P.S., Wong, J.W.C., Selvam, A., 2014. Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting. *Bioresource Technology* 168, 214-221. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.048>
- Bárbaro, L., Karlanian, M., Rizzo, P., Riera, N., 2019. Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 35 (2), 126-136. <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000309>
- Barral, M.T., Paradelo, R., 2011. A review on the use of phytotoxicity as a compost quality indicator. *Dynamic Soil, Dynamic Plant* 5 (2), 36-44. http://www.globalscience-books.info/journalsSup/11DSDP_5_S12.html
- Barthod, J., Rumpel, C., Dignac, M., 2018. Composting with additives to improve organic amendments. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 38, 17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-018-0491-9>
- Benabderrahim, M.A., Elfalleh, W., Belayadi, H., Haddad, M., 2018. Effect of date palm waste compost on forage alfalfa growth, yield, seed yield and minerals uptake. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 7, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0182-6>
- Benito, M., Masaguer, A., Moliner, A., De Antonio, R., 2006. Chemical and physical properties of pruning waste compost and their seasonal variability. *Bioresource Technology* 97, 2071-2076. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.011>

- Benito, M., Masaguer, A., De Antonio, R., Moliner, A., 2005. Use of pruning waste compost as a component in soilless growing media. *Bioresource Technology* 96, 597-603. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.006>
- Cabañas-Vargas, D.D., Sánchez-Monedero, M.A., Urpilainen, S.T., Kamilaki, A., Stentiford, E.I., 2005. Assessing the stability and maturity of compost at large-scale plants. *Ingeniería* 9 (2), 25-30. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46790203>
- Carballo, T., Gil, M.V., Calvo, L.F., Morán, A., 2009. The influence of aeration system, temperature and compost origin on the phytotoxicity of compost tea. *Compost Science and Utilization* 17, 127-139. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2009.10702411>
- Céspedes, C.L., 2004. Bases técnicas para la producción de compostas. *Tierra Adentro* 59, 38-41. [Bases técnicas para la producción de compost \(infor.cl\)](#)
- Comité Técnico de Normalización Nacional de Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2018. Norma Mexicana NOM-AA-180-SCFI-2018, que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. COTEMARNAT. 52 p. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>
- de Bertoldi, M., Vallini, G., Pera, A., 1983. The biology of composting: A review. *Waste Management & Research* 1, 157-176. <https://www.researchgate.net/publication/222623261>
- DOF [Diario Oficial de la Federación]. 2020. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 73 p. www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo6955.pdf
- Di Rienzo, J.A., Cassanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W., 2008. InfoStat, versión 2008. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Emino, E.R., Warman, P.R., 2004. Biological assay for compost quality. *Compost Science & Utilization* 12 (4), 342-348. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2004.10702203>
- Gasser, J.K.R., 1985. Composting of agricultural and other wastes. Commission of The European Communities. Elsevier Applied Science Publishers.
- Gaudig, G., Krebs, M., Prager, A., Wichmann, S., Barney, M., Caporn, S.J., Emmel, M., Fritz, C., Graf, M., Grobe, A., (2018). Sphagnum farming from species selection to the production of growing media: A review. *Mires Peat* 20, 1-30. <https://doi.org/10.19189/MaP.2018.OMB.340>
- Ghouili, E., Hidri, Y., M'Hamed, H.C., Somenahally, A., Xue, Q., Znaïdi, I.E.A., Jebara, M., Ouertani, R.N., Muhovski, Y., Riah, J., Abid, G., Sassi, K., 2022. Date palm waste compost promotes plant growth and nutrient transporter genes expression in barley (*Hordeum vulgare* L.). *South African Journal of Botany* 149, 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.018>
- Gomis, M.P., Pérez-Murcia, M.D., Barber, X., Martínez-Sabater, E., Moral, R., Bustamante, M.A., 2022. Development and validation of alternative palm-derived substrates for seedling production. *Agronomy* 12, 1377. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061377>
- González, R.F., Cooperband, L.R., 2013. Compost effects on soil physical properties and field nursery production. *Compost Science & Utilization* 10 (3), 226-237. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702084>
- Huang, G.F., Wu, Q.T., Wong, J.W.C., Nagar, B.B., 2006. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust. *Bioresources Technology* 97, 1834-1842. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.024>
- Jagadabhi, P.S., Wani, S.P., Kaushal, M., Patil, M., Vemula, A.K., Rathore, A., 2019. Physico-chemical, microbial and phytotoxicity evaluation of composts from sorghum, finger millet and soybean straws. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 8, 279-293. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0240-8>
- Kain, G., Morandini, M., Stamminger, A., Granig, T., Tudor, E.M., Schnabel, T., Petutschnigg, A., 2021. Production and physical-mechanical characterization of peat moss (Sphagnum) insulation panels. *Materials* 14, 6601. <https://doi.org/10.3390/ma14216601>
- Kong, Y., Zhang, J., Yang, Y., Liu, Y., Zhang, L., Wang, G., Liu, G., Dang, R., Li, G., Yuan, J., 2023. Determining the extraction conditions and phytotoxicity threshold for compost maturity evaluation using the seed germination index method. *Waste Management* 171, 502-511. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.040>
- Landis, T.D., Khadduri, N., 2008. Composting applications in forest & conservation nurseries. *Forest Nursery Notes* 28 (2), 9-18. https://rngr.net/publications/fnn/2008-summer/articles/composting_applications-in-forest-and-conservation-nurseries
- Lim, S.L., Wu, T.W., 2016. Characterization of matured vermicompost derive from valorization of palm oil mill by product. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 64 (8), 1761-1769. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00531>
- López-Clemente, X.A., Robles-Pérez, C., Velasco-Velasco, V.A., Ruiz, L.J., Enríquez-del Valle, J.R., Rodríguez-Ortiz, G., 2015. Propiedades físicas, químicas y biológicas de tres residuos agrícolas compostados. *Ciencia Ergo-sum* 22, 145-152.
- Mantero-García, H.D., Gómez-Guerrero, A., Gavi-Reyes, F., Zamora-Morales, B.P., Ramírez-Ayala, C., 2019. ¿Es sustentable el aprovechamiento de tierra de hoja en bosques de encino?. *Madera y Bosques* 25 (3), e2531807. <https://doi:10.21829/myb.2019.2531807>
- Mehta, C. M., Palni, U., Franke-Whittle, I.H., Sharma, A.K., 2014. Compost: Its role, mechanism and impact on reducing soil-borne plant diseases. *Waste Management* 34, 607-622. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.11.012>
- Mihajlović, M., Rekanović, E., Hrutić, J., Grahovac, M., Tanović, B. 2017. Methods for management of soilborne plant pathogens. *Pesticides and Phytomedicine* 32 (1), 9-24. <https://doi.org/10.2298/PIF1701009M>
- ONU., 2023. Primer día internacional de cero desechos fortalece las medidas contra la crisis mundial de contaminación. Organización de las Naciones Unidas. Programa para el Medio Ambiente. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/primer-dia-internacional-de-cero-desechos-fortalece-las>

- Ou-Zine, M., Bouhlal, Y., El Hilali, R., Achbani, E.H., Haggoud, A., Bouamri, R., 2020. Evaluation of compost quality and bioprotection potential against Fusarium wilt of date palm. *Waste Management* 113, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.035>
- Oviedo-Ocaña, E.R., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellon, L.F., Hoyos, L.V., Gonzales, S., Barrena, R., Sánchez, A., 2015. Stability and maturity of biowaste composts derived by small municipalities: Correlation among physical, chemical and biological indices. *Waste Management* 44, 63-71. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.034>
- Quezada-Salinas, A., García-Díaz, S.E., Almaraz-Sánchez, A., Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L.L., Aranda-Ocampo, S., Fredy-Ortiz, C., Equihua-Martínez, A., 2023. Fungi associated with the decline and death of *Phoenix canariensis* in Mexico City. *Mexican Journal of Phytopathology* 41 (2), 241-256. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2302-8>
- Sadik, M.W., Ashhab, A.O., Zahran, M.K., Alsaqan, F.M., 2012. Composting mulch of date palm trees through microbial activator in Saudi Arabia. *International Journal of Biochemistry and Biotechnology* 1, 156-161. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21664.92169>
- Said-Pullicino D, Enrriquens FG, Gicliotti G. 2007. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology* 98, 1822-1831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.18>
- SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente), 2021. Inventario de residuos sólidos en la Ciudad de México 2021. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno de la Ciudad de México. 365 p. <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/residuos/Inventariode-ResiduosSolidos2021.pdf>
- SEMARNAT [Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales], 2016. Anuario Estadístico de la Producción Forestal. SEDEMA. México. 228 p. Microsoft Word - CAPITULO_1-3_081217 (www.gob.mx)
- Siles-Castellano, A.B., López, M.J., López-González, J.A., Suárez-Estrella, F., Jurado, M.M., Estrella-González, M.J., Moreno, J., 2020. Comparative analysis of phytotoxicity and compost quality in industrial composting facilities processing different organic wastes. *Journal of Cleaner Production* 252, 119820. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119820>
- Sobrero, M.C., Ronco, A., 2004. Ensayos de toxicidad aguda con semillas de lechuga, *Lactuca sativa* L. in: Castillo, G. (Ed.), Ensayos toxicológicos y métodos de evaluación de calidad de aguas. Estandarización, intercalibración, resultados y aplicaciones. IDRC, IMTA, Canadá. pp. 55-67.
- Tiquia, S.M., 2005. Microbiological parameters as indicators of compost maturity. *Journal of Applied Microbiology* 99, 816-828. <https://doi:10.1111/j.1365-2672.2005.02673x>
- Vanegas-Escudero, A.L., 2019. Alternativas ambientales para el aprovechamiento de la biomasa residual de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en procesos industriales y agrícolas. *Revista Especializada en Tecnología e Ingeniería* 13(2),77-90. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/129/1292407005/index.html>
- Vico, A., Pérez-Murcia, M.D., Bustamante, M.A., Agulló, E., Marhuenda-Egea, F.C., Sáez, J.A., Paredes, C., Pérez-Espinosa, A., Moral, R., 2018. Valorization of date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pruning biomass by co-composting with urban and agri-food sludge. *Journal of Environmental Management* 226, 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.035>
- Wang, P., Changa, C.M., Watson, M.E., Dick, W.A., Chen, Y., Hointink, H.A.J., 2004. Maturity indices for composted dairy and pig manures. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 767-776. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.12.012>
- Xu, D., Raza, W., Yu, G., Zhao, Q., Shen, Q., Huang, Q., 2012. Phytotoxicity analysis of extracts from compost and their ability to inhibit soil-borne pathogenic fungi and reduce root-knot nematodes. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 28, 1193-1201. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0922-0>
- Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., de Bertoldi, M., 1981. Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle* 22, 54-57.
- Zucconi, F., Monaco, A., Forte, M., 1985. Phytotoxins during the stabilization of organic matter, in: Gasser, J.K.R., (Ed.), *Composting of agricultural and other wastes*. pp. 73-86.

