

## Calidad del compost a base de residuos orgánicos urbanos en Leoncio Prado, Perú<sup>1</sup>

Lorena Raquel Garrido-Acosta<sup>2</sup>, Nelino Florida-Rofner<sup>3</sup>, Javier Nazar- Cipriano<sup>4</sup>, Alex Rengifo-Rojas<sup>5</sup>

### Resumen

**Introducción.** Los residuos sólidos municipales en Perú alcanzaron las 8.215.355,9 t en 2021 y solo el 61,28 % fue dispuesto en rellenos sanitarios para ser tratado a través del compostaje, no obstante, la implementación del proceso es deficiente y requiere de estudios para obtener un producto aprovechable como sustrato o enmienda y disminuir la contaminación ambiental. **Objetivo.** El trabajo determinó los niveles de nutrientes, metales pesados, microorganismos fecales y la calidad del compost a base de residuos sólidos orgánicos urbanos producidas en la planta de valorización Shapajilla, en la provincia Leoncio Prado de Perú. **Materiales y métodos.**

Se sometieron a compostaje cuatro pilas de residuos sólidos orgánicos y se evaluaron nutrientes, metales pesados, microorganismos fecales y calidad en base a la norma chilena 2880 y española 824. **Resultados.** 95 % de los materiales compostados son residuos de comida, frutas y cáscaras, y no presentan diferencias entre pilas evaluadas. Durante el procesamiento la temperatura alcanzó las diferentes etapas y el pH se incrementó. Se encontraron elevados niveles de pH (> 7,50) y bajos en Ca, Mg y K (< 1 %); los metales pesados presentaron diferencias y niveles bajos, con ausencia de microorganismos de origen fecal, y los compost son de calidad intermedia (B). **Conclusiones.** El compost producido es

- 1 Artículo original derivado del proyecto de investigación: Metales pesados, microorganismos patógenos y calidad en compost a base de residuos sólidos urbanos en Tingo María – Leoncio Prado (Perú), de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ejecutado entre enero y Julio de 2022, financiado por los autores.
- 2 Ingeniera de Conservación de Suelos y Agua por la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Correo: lorena.garrido@unas.edu.pe / Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8604-5984>.
- 3 Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible por la Universidad Nacional Hermilio Valdizán. Correo: nelinof@hotmail.com / Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8751-4367>.
- 4 Magíster en Gestión Ambiental por la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Correo: javier.nazar@unas.edu.pe Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6683-5607>.
- 5 Magíster en Proyectos de Inversión por la Universidad Nacional Agraria de la Selva. Correo: alex.rengifo@unas.edu.pe Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7103-6903>.

**Autor para Correspondencia:** Correo: nelinof@hotmail.com; nelino.florida@unas.edu.pe  
Recibido: 28/09/2022      Aceptado: 13/06/2023

\*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

de calidad intermedia, libre de metales y microorganismos patógenos y puede ser utilizado como sustrato o enmienda con

algunas limitaciones por los elevados niveles de pH y los bajos niveles de Ca, Mg y K.

**Palabras clave:** caracterización, compostaje, metal pesado, norma técnica.

---

### Quality of compost based on urban organic waste in Leoncio Prado-Peru

#### Abstract

**Introduction.** In Peru, municipal solid waste in 2021 reached 8,215,355.9 tons and only 61.28 % is disposed of in sanitary landfills to be treated through composting; however, its implementation is deficient and requires studies to obtain a usable product as a substrate or amendment and reduce environmental pollution. **Objective.** The study determined the levels of nutrients, heavy metals, fecal microorganisms, and the quality of compost based on solid urban organic waste produced at the Shapajilla Valorization Plant in the Leoncio Prado province of Peru. **Materials and methods.** Four piles of organic solid waste were composted and evaluated for nutrients,

heavy metals, fecal microorganisms, and quality based on Chilean Standard 2880 and Spanish Standard 824. **Results.** 95 % of the composted materials were food waste, fruit and peelings, and there were no differences between the piles evaluated. During processing, the temperature reached the different stages and the pH increased. High pH levels (>7.50) and low levels of Ca, Mg and K (<1 %) were found; heavy metals presented differences and low levels, with absence of microorganisms of fecal origin, and the composts were of intermediate quality (B). **Conclusions.** The compost produced is of intermediate quality, free of metals and pathogenic microorganisms, and can be used as a substrate or amendment with some limitations, due to the high pH levels and low levels of Ca, Mg and K.

**Keywords:** Characterization, Composting, Heavy Metal, Technical Standard.

---

### Qualidade do composto à base de resíduos orgânicos urbanos em Leoncio Prado-Peru

#### Resumo

**Introdução.** No Peru, os resíduos sólidos urbanos em 2021 atingiram 8.215.355,9 t e apenas 61,28 % são descartados em aterros sanitários para serem tratados

por meio da compostagem; no entanto, sua implementação é deficiente e requer estudos para obter um produto utilizável como substrato ou emenda e para reduzir a poluição ambiental. **Objetivo.** O estudo determinou os níveis de nutrientes, metais pesados, microrganismos fecais e a qualidade do composto com base em resíduos sólidos orgânicos urbanos produzidos na planta

de valorização de Shapajilla, na província de Leoncio Prado-Peru. **Materiais e métodos.** Foram compostadas 04 pilhas de resíduos sólidos orgânicos e avaliadas quanto a nutrientes, metais pesados, microrganismos fecais e qualidade com base na Norma Chilena 2880 e na Norma Espanhola 824. **Resultados.** 95 % dos materiais compostados eram resíduos de alimentos, frutas e cascas, e não houve diferenças entre as pilhas avaliadas. Durante o processamento, a temperatura atingiu os diferentes estágios e o pH aumentou. Foram

encontrados altos níveis de pH (>7,50) e baixos níveis de Ca, Mg e K (<1 %); os metais pesados apresentam diferenças e baixos níveis, com ausência de microrganismos fecais, e os compostos são de qualidade intermediária (B). **Conclusões.** O composto produzido é de qualidade intermediária, livre de metais e microrganismos patogênicos, e pode ser usado como substrato ou emenda com algumas limitações, devido aos altos níveis de pH e aos baixos níveis de Ca, Mg e K.

**Palavras-chave:** caracterização, compostagem, metal pesado, norma técnica.

---

## Introducción

El Ministerio del Ambiente de Perú (Minam, 2023), como ente rector en materia ambiental, reporta que la generación total de residuos sólidos municipales (RSM) al 2021 alcanzó la cifra de 8.215.355 t y solo 5.034.337 t fueron dispuestas en rellenos sanitarios, lo representa el 61,28 % del total. La disposición final en rellenos está aumentando, probablemente no por mejoras en la gestión de los residuos, sino por el incremento en la generación per cápita del país que pasó de 0,55 a 0,58 kg día<sup>-1</sup> entre 2018 y 2021, incremento que resulta poco favorable.

Los RSU constituyen un problema de larga data en Perú. En respuesta, en el 2006 se creó el Concejo Nacional del Ambiente (CONAM) que implementó las primeras medidas técnico-administrativas para regular y promover la gestión a través de la *Guía para la certificación de municipalidades con gestión ambiental local para el desarrollo sostenible*

(certificación GALDS) (Minam, 2021b), institución que luego fue sustituida por el actual Ministerio del Ambiente (Minam) que ha establecido una categorización de las ciudades peruanas en función de su población y generación total de residuos, clasificándolas en ciudades tipo A, B, C, D y E. La gestión está en cabeza de la Dirección General de Residuos Sólidos (DGRS) como ente técnico. Además, para fortalecer y promover la gestión, la DGRS y el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), sostienen el fondo *Incentivos a la mejora de la gestión municipal* (GALS), que asigna recursos a las municipalidades que implementen y cumplan metas anuales en la administración de sus RSU (Minam, 2021a). En el marco de esta política estatal de incentivos la planta de valorización Shapajilla —provincia Leoncio Prado— se encuentra en actividad desde el año 2011 y evita la disposición de residuos en el río Huallaga, principal fuente hídrica de la región (Florida y Reategui, 2019).

Los residuos sólidos orgánicos (RSO) representan el 57,64 % del total, estos pueden someterse al compostaje (Minam, 2021a), tecnología ampliamente utilizada como técnica para tratar los RSO urbanos, en un contexto en el que los rellenos sanitarios en el país están en situación de colapso (Minam, 2023), el compostaje se perfila como alternativa para descongestionar estos rellenos sanitarios y valorizar los residuos urbanos en un producto aprovechable como el compost, útil como sustrato y como enmienda (Bailón y Florida, 2020), sin embargo, el procesamiento del compost, a pesar de ofrecer múltiples beneficios económicos y ambientales (Florida y Reategui, 2019; Huamaní *et al.*, 2020), presenta un nivel de implementación aún deficiente en las diferentes comunas (Oviedo-Ocaña *et al.*, 2017).

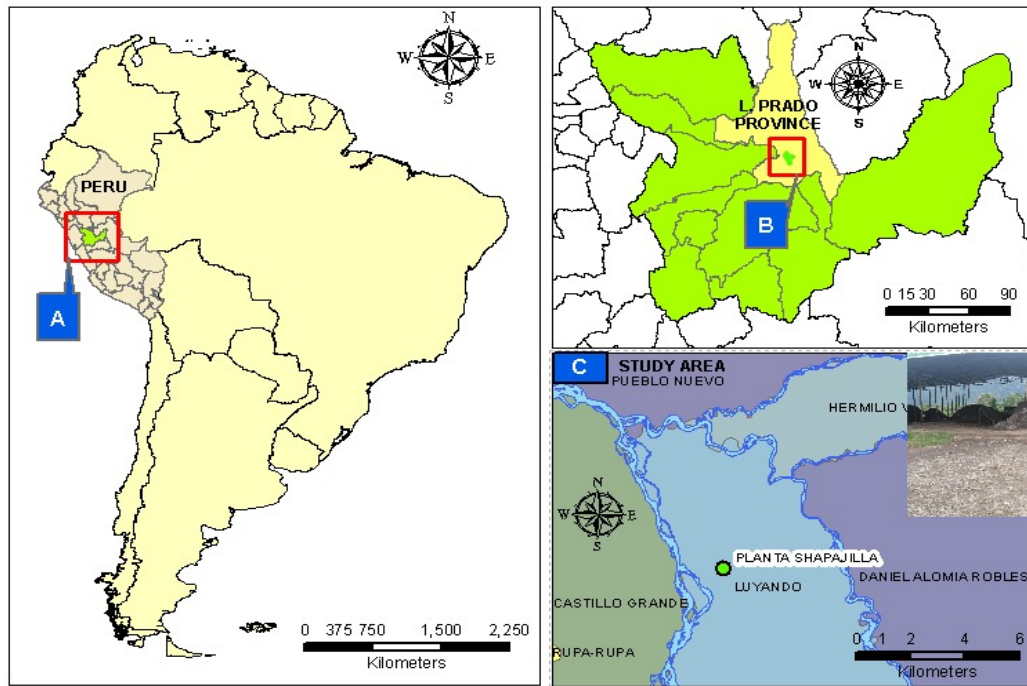
Es una tecnología viable en los rellenos sanitarios para tratar los RSO (Rivas-Nichorzon y Silva-Acuña, 2020), para convertir residuos con potencial contaminante en biofertilizantes (Bohórquez *et al.*, 2015) y reducir su disposición en espacios informales (Muscolo *et al.*, 2018). Además, su uso como sustrato (Bárbaro *et al.*, 2019) o enmienda tiene múltiples beneficios para las plantas, por la lenta y progresiva incorporación de nutrientes al suelo (Florida-Rofner *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2017), en cualquier caso, está demostrada su capacidad como mejorador del suelo y de la nutrición vegetal (Peralta-Antonio *et al.*, 2019; Cabrera y Rossi, 2016; Bohórquez *et al.*, 2015). Sin embargo, el compost de residuos urbanos genera debate en la comunidad por el potencial

riesgo de presentar componentes fitotóxicos y contaminantes que pueden producir daños a la salud (Rosal *et al.*, 2007). En este contexto, el trabajo determinó, a través de la norma chilena 2880 y española 824, los niveles de nutrientes, metales pesados, microorganismos fecales y calidad del compost a base de RSO urbanos producido en la planta de valorización Shapajilla, en la provincia Leoncio Prado, Perú.

## Materiales y métodos

### Ubicación

Los trabajos se ejecutaron en la planta de valorización Shapajilla, instalación encargada del procesar los RSO generados por la ciudad capital de la provincia de Leoncio Prado (**figura 1**), que políticamente pertenecen a la región Huánuco, Perú, ubicada en las coordenadas geográficas 09°14'00" latitud sur y 75°59'30" de longitud oeste, a una altitud aproximada de 670 msnm.



**Figura 1.** Ubicación de la planta de valorización Shapajilla (C) Leoncio Prado (B) región Huánuco-Perú (A)

**Nota:** elaboración de los autores.

### Área de estudio

Se encuentra dentro del trópico, con un clima cálido y húmedo con medias de 24,5 °C de temperatura, 84 % de humedad relativa y 3.340 mm de precipitación, con temporada seca de junio a septiembre y lluviosa de octubre a mayo (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2021). Además, ecológicamente corresponde a bosque muy húmedo, premontano subtropical (Holdridge, 2000) y a la ecorregión Rupa Rupa (Pulgar, 2014).

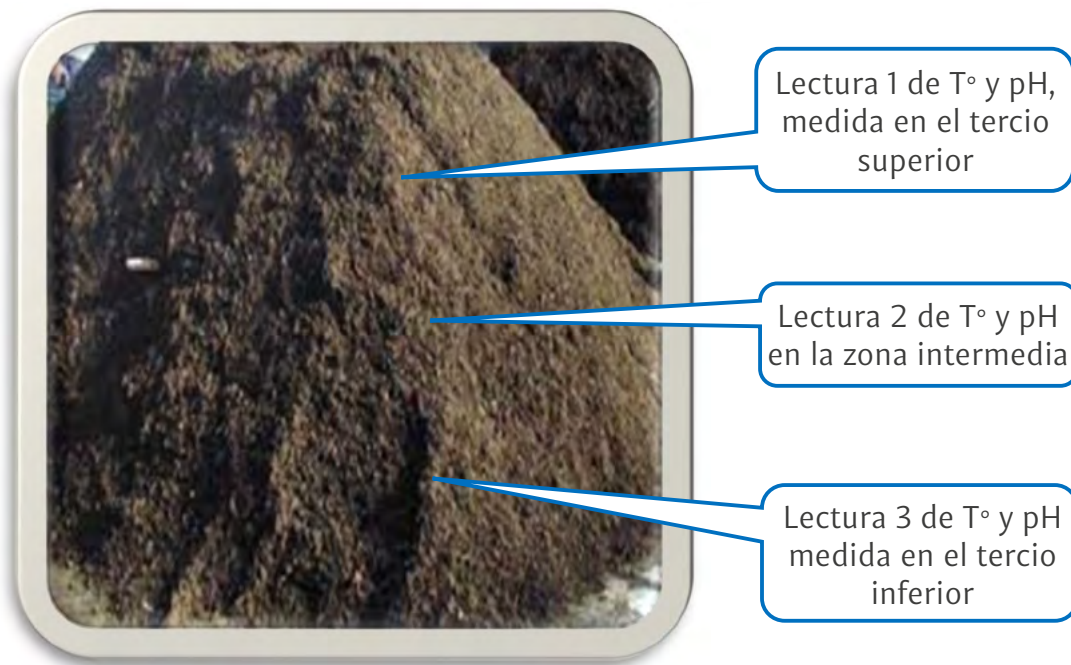
### Caracterización de los residuos procesados

La clasificación de los residuos compostados se realizó al inicio del proceso en cada pila, para ello se extrajeron tres muestras por pila con volumen definido por un valde de 6 L. Todo el contenido del recipiente fue sometido a selección y clasificación de los diferentes residuos orgánicos y pesados según el tipo de residuo, y fueron tabulados de acuerdo con la normativa vigente. La caracterización fue realizada siguiendo la guía para estudios de caracterización de RSU (Resolución Ministerial 457-2018 de Minam), específicamente se tomó como referencia la tabla 23, numeral 1.1 que corresponde a residuos orgánicos (Minam, 2018).

## Control de parámetros de procesamiento

Respecto a los indicadores del procesamiento, se ha realizado la evaluación de la temperatura y el pH de acuerdo con las recomendaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2013) e Iglesias (2020) a lo largo del procesamiento para asegurar la calidad del producto final. Los detalles de tiempo y periodos de evaluaciones se muestran en la **tabla 1**.

Las lecturas de temperatura se realizaron a través de un geotermómetro digital Soil Meter, y el pH con pH-metro Three Way Meter, ambos con varillas de 0,30 m. Las lecturas de T° y pH fueron realizadas cada tres días y en tres posiciones diferentes para cada pila procesada como se muestra en la **figura 2**.



**Figura 2.** Evaluación de T° y pH durante el procesamiento

**Nota:** elaboración de los autores.

**Tabla 1.** Tiempo de procesamiento de las pilas evaluadas

Pila	Periodo de compostaje			Evaluaciones
	Inicio (2021)	Terminación (2022)	Periodo (días)	
Pila 1	15 noviembre	16 marzo	118	40
Pila 2	29 noviembre	28 marzo	118	40
Pila 3	13 diciembre	07 abril	115	39
Pila 4	27 diciembre	13 mayo	136	46

**Nota:** elaboración de los autores.

### Muestreo y análisis de compost final

El compost final fue debidamente tamizado y de allí se realizó el muestreo correspondiente, extrayendo cinco muestras al azar en cada pila, estas se colocaron en bolsas debidamente rotuladas y se trasladaron al laboratorio para el análisis correspondiente.

Se determinó el pH por el método electrométrico en dilución 1:2,5. Contenido de MO en base seca por digestión ácido (Walkley y Black) y el  $P_2O_5$  por metavanadato y lectura en espectro UV-Visible,  $N_2$  con el método Kjendhal. El Ca, Mg, K y Na fueron extraídos con acetato de amonio y lectura en espectrofotómetro de absorción atómica (EAA) además, los metales pesados Pb, Cd, Cu, Fe, Mn y Zn fueron extraídos con solución nítrico-perclórico 4:1 y lectura en EAA (método EPA 2007-1994), protocolos descritos en Bazán (2017).

El análisis para la detección de microorganismos de origen fecal se realizó con el método de recuento en placa con caldo *E. coli* para *Escherichia coli* y salmonela a

través de presencia y ausencia con pruebas bioquímicas desarrolladas en tres etapas, la primera con medio no selectivo de caldo lactosado (*Lactose Broth*), la segunda con medio enriquecido selectivo en tubos de ensayo con tetraciónato según Mueller Kauffmann y selenito de cistina, y en la tercera etapa de aislamiento selectivo en placas con agar *Salmonella-Shigella (S-S)*, para confirmar su presencia.

### Análisis estadístico

El trabajo se ajustó estadísticamente al diseño completamente aleatorizado (DCA), teniendo como tratamientos las diferentes pilas compostadas (cuatro), con tamaño muestral  $n = 20$ . Los datos se analizaron a través del modelo lineal general univariado, y la prueba *post-hoc* de Tukey con nivel de significancia  $P < 0,05$  para establecer los subgrupos y la comparación de medias de los indicadores entre los compost evaluados. Para el procesamiento se utilizó el *software* IBM-SPSS 25.

## Resultados y discusión

### Caracterización de RSU procesados

La **tabla 2** muestra que los residuos de alimentos representan un 95 % del total de los residuos compostados. La composición de este tipo de residuos está sujeta a diversos factores, como estacionalidad, clima, ubicación geográfica, etc., y está constituido principalmente por 30 a 69 % de carbohidratos (almidón, celulosa y hemicelulosas), 5 a 10 % de proteínas y

10 a 40 % de lípidos, aproximadamente (Núñez *et al.*, 2023), por ello resulta un material altamente biodegradable y adecuado para el compostaje (López *et al.*, 2017) pues incluye restos de cocina, estiércol, poda, barrido de calles, ramas, paja y otros (Hernández *et al.*, 2018). Por lo que es necesario identificar y establecer las proporciones de los diferentes materiales para optimizar su tratamiento a través del compostaje y obtener fertilizantes orgánicos de buena calidad (Cerdeña *et al.*, 2019).

**Tabla 2.** Caracterización de las pilas compostadas

Tipo de residuo (%)	Pilas compostadas				Estadísticos		
	P1	P2	P3	P4	Media total	F	Sig.
De Alimentos							
Comidas	43,86 ± 25,33	31,74 ± 11,47	21,29 ± 13,68	21,7 ± 10,06	29,65 ± 17,40	1,71	0,219 <sup>ns</sup>
Frutas	17,80 ± 8,17	29,64 ± 24,34	36,51 ± 22,27	34,31 ± 12,85	29,56 ± 17,88	0,85	0,495 <sup>ns</sup>
Cáscaras	32,23 ± 22,74	27,8 ± 17,18	28,61 ± 9,92	34,75 ± 16,98	30,85 ± 15,75	0,14	0,934 <sup>ns</sup>
<b>Otros similares</b>							
Pepas	4,72 ± 3,23	6,45 ± 5,21	10,92 ± 5,15	6,42 ± 5,90	7,13 ± 5,04	1,14	0,373 <sup>ns</sup>
<b>Otros orgánicos</b>							
Estiércol, huesos, similares	1,39 ± 1,80	4,38 ± 4,65	2,68 ± 4,63	2,83 ± 3,37	2,82 ± 3,57	0,42	0,745 <sup>ns</sup>
Peso muestra (kg)	4,33 ± 1,06	3,61 ± 1,09	3,81 ± 0,54	4,08 ± 0,58	3,95 ± 0,82	0,54	0,663 <sup>ns</sup>

**Nota:** elaboración de los autores.

Estudios similares se han desarrollado en el Cercado de Lima, los restos de comida, cáscaras, frutas, verduras, hortalizas y otros similares fue de 57,58 % (Minam, 2019), también Boggiano (2021), en Trujillo, encontró media de 70,65 % para los residuos orgánicos compostables. En este

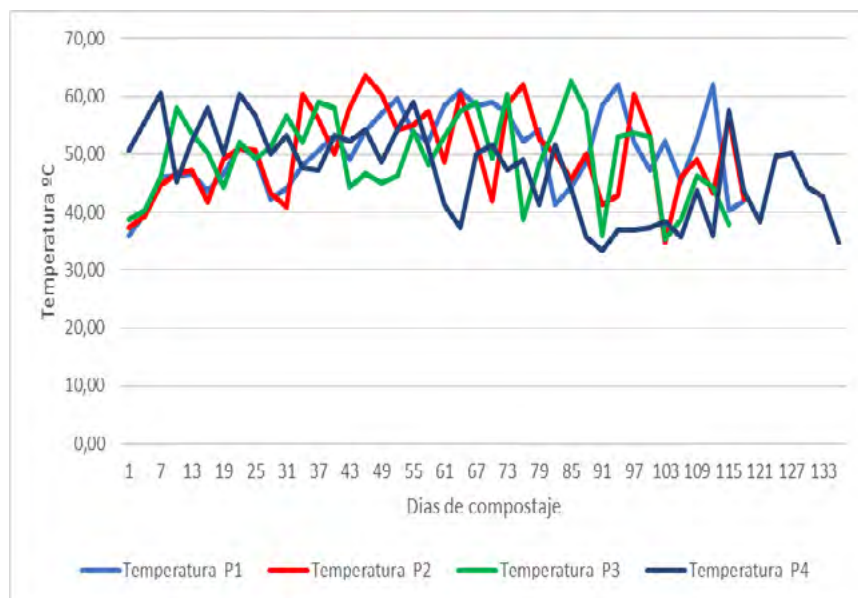
contexto, los tipos de residuos orgánicos incorporados a cada pila son similares pues no presentan diferencias en los residuos de mayor proporción, por lo que es de esperarse homogeneidad en la calidad del compost final para todas las pilas



## Temperatura como indicador del proceso

La **figura 3** muestra las evaluaciones de la temperatura durante el procesamiento de las pilas, los valores medios demuestran que se alcanzaron las diferentes fases (FAO, 2013),

esto asegura una adecuada higienización del compost. Los procesos de biooxidación generados por el metabolismo microbiano provocan los cambios de temperatura y determinan las etapas y en cierta medida el tiempo de compostaje (Florida y Reategui, 2019; Iglesias, 2020).



**Figura 3.** Variaciones de la temperatura durante el procesamiento

**Nota:** elaboración de los autores.

La **figura 3** muestra que en los primeros cinco días se superaron los 45 °C, esto porque las pilas ya tenían un periodo mínimo de una semana de acopio para tener un volumen apropiado, también, la etapa termofílica alcanzó medias mayores a 65 °C y se extendió entre 90 y 105 días y a partir de allí inició el enfriamiento de las pilas. Los resultados se encuentran dentro de los periodos de cada fase señaladas por la FAO (2013), sin embargo, las pilas no pasaron por la fase de maduración, este

aspecto es contrario a los criterios técnicos establecidos para un procesamiento óptimo, y probablemente afecte algunos indicadores de calidad del compost final, como el pH (Florida y Reategui, 2019).

Algunas investigaciones contrastan con los resultados de este trabajo, entre ellos, La Cruz (2019), en Chilca Huancayo quien encontró temperatura promedio de 62,63 °C (entre 43 a 85 días), contrario a esta referencia el trabajo alcanzó estos

niveles de temperatura antes de diez días de procesamiento. Atribuimos este comportamiento a factores climáticos locales, a las características de las pilas y a los EM aplicados durante el proceso. Los cambios de T° tienen el mismo patrón comparado con otros residuos compostados en el ámbito local, entre ellos compost de estiércol de bovino y plumas de pollo (Florida y Reategui, 2019) y en compost de diversos residuos orgánicos locales (Florida *et al.*, 2016). Por tanto, los resultados de temperatura durante el procesamiento son coherentes con las normas y las referencias citadas.

### **El pH como indicador del proceso**

La **figura 4** muestra el pH en las pilas durante el procesamiento, se observa que desde la primera evaluación los valores medios son muy bajos (4,50 a 4,87 de pH), sin embargo, a medida que las pilas van alcanzando las diferentes etapas tienden a incrementar hasta los días 70 a 75, a partir de allí, los valores medios de todas las pilas se estabilizan en niveles de neutralidad hasta el final del proceso.

La figura muestra que el pH en todas las pilas al primer día de evaluación son valores bajos (4,50 a 4,87), contrario a lo señalado por Dalzell *et al.* (1981) los valores de pH al inicio son relativamente altos y descienden rápidamente en la etapa mesofílica, para elevarse a medida que la pila incrementa su temperatura y pasa a la fase termofílica, luego se estabiliza en pH altos en la fase de enfriamiento y finalmente desciende ligeramente en la última fase de madurez.

Los resultados de pH no son incoherentes ya que las pilas se reúnen progresivamente durante una o dos semanas para alcanzar el volumen adecuado y recién se iniciaron las evaluaciones la pila ya había pasado la fase inicial o fase mesófila, por ello los niveles bajos de pH en todos los casos. La explicación a este descenso del pH es resultado de procesos biooxidativos de compuestos solubles (azúcares) al inicio del proceso, produciendo ácidos orgánicos que provocan reducción del pH (4,0 a 4,5), sin embargo, esta rápida utilización de los compuestos solubles genera la fase termogénica (FAO, 2013), muy importante tanto para la degradación como para la higienización (FAO, 2013; Florida y Reategui, 2019). La variación de los resultados coincide con la presencia de las diferentes fases y contrastan con la afirmación de la FAO (2013), que se presentan al inicio bajos niveles de pH, para incrementarse a medida que la pila alcanza las diferentes fases. Los resultados son similares a lo encontrado por La Cruz (2019) en Chilca-Huancayo, encontró medias menores a 7 de pH al inicio e incrementos hasta los 85 días de procesamiento.

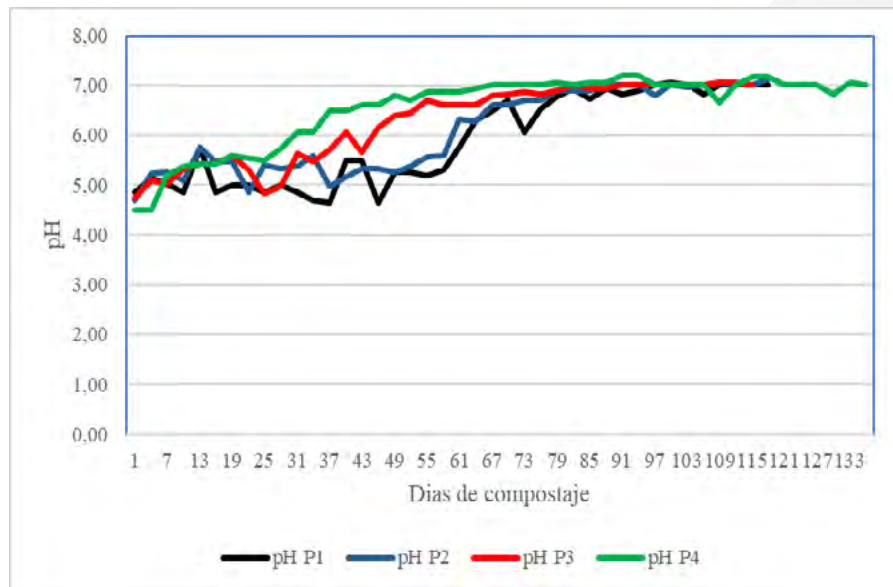


Figura 4. Variación del pH durante el procesamiento

Nota: elaboración de los autores.

### Metales y microorganismos de origen fecal

Cualquier elemento metálico con densidad mayor a  $5 \text{ g cm}^{-3}$  o número atómico  $> 20$  es considerado metal pesado (Environmental Protection Agency [EPA], 2017), excepto Ca, Mg, K y Na. Estos elementos son requeridos en proporciones trazas y son muy necesarios

para la nutrición vegetal, sin embargo, niveles altos pueden dañar a los organismos por bioacumulación y biomagnificación (Vargas, 2017; Núñez *et al.*, 2023). Los resultados de la **tabla 3** muestran medias de  $\text{Pb} < 100 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $\text{Cd} < 2 \text{ mg kg}^{-1}$ ,  $\text{Cu} < 100 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $\text{Zn} < 200$ , en todos los casos las medias cumplen con la norma chilena 2880.

Tabla 3. Concentración media de metales pesados y microorganismos patógenos después de 130 días de compostaje de residuos sólidos urbanos

Indicador	Pilas compostadas				Estadísticos	
	P1	P2	P3	P4	F	Sig.
Pb	$1,30 \pm 0,04^c$	$1,28 \pm 0,07^c$	$1,13 \pm 0,06^b$	$0,93 \pm 0,05^a$	42,89	$<0,001^{**}$
Cd	$0,14 \pm 0,01^b$	$0,14 \pm 0,01^b$	$0,14 \pm 0,005^b$	$0,12 \pm 0,008^a$	8,71	$0,001^{**}$
Cu	$15,73 \pm 1,09^a$	$21,83 \pm 1,27^b$	$23,57 \pm 1,08^c$	$20,04 \pm 1,12^b$	43,34	$<0,001^{**}$
Fe	$3666 \pm 90,63^a$	$3624 \pm 102^a$	$4266 \pm 183,06^b$	$4645 \pm 91,93^c$	80,32	$<0,001^{**}$
Zn	$93,96 \pm 3,33^b$	$106,79 \pm 3,90^c$	$123,37 \pm 2,21^d$	$77,614 \pm 8,53^a$	72,44	$<0,001^{**}$

Indicador	Pilas compostadas				Estadísticos	
	P1	P2	P3	P4	F	Sig.
Mn	126,61 ± 4,73 <sup>a</sup>	131,53 ± 6,53 <sup>a</sup>	148,48 ± 4,9 <sup>b</sup>	184,55 ± 9,41 <sup>c</sup>	77,48	<0,001**
Salmonela	A	A	A	A	—	—
<i>Escherichia coli</i>	A	A	A	A	—	—

Letras distintas en la misma fila difieren estadísticamente ( $p > 0,05$ ); A ausente en 25 g de compost base seca; \*\* significativo a  $p \leq 0,01$ .

**Nota:** elaboración de los autores.

En general, los valores bajos en Pb, Cd, Cu y Zn pueden deberse a la naturaleza de los residuos compostados o a un adecuado procesamiento; para Wang *et al.* (2021) después que el compost alcanza la madurez los niveles de metales pesados y otros microelementos es bajo. Además, todas las pilas compostadas en este trabajo presentan adición de microorganismos eficientes (EM), para Lalas *et al.* (2017) la adición de agentes microbianos (tipo EM) contribuye a la pasivación de metales pesados acelerando la degradación y formación de ácidos húmicos y fúlvicos, estos ácidos tienen gran capacidad para unirse a los iones metálicos. La inactivación de metales pesados en compost se debe a factores fisicoquímicos, microbianos (Nuñez *et al.*, 2023) y componentes orgánicos (Song *et al.*, 2021). La combinación de los componentes húmicos y metales pesados es fuerte e irreversible, existiendo una correlación positiva para la inmovilización de metales pesados (Cao *et al.*, 2021). Esto explicaría los bajos niveles encontrados.

Los resultados demuestran que los compost cumplen las normativas y son similares a los niveles reportados para compost a base de residuos sólidos

orgánicos urbanos (Vargas, 2017; La Cruz, 2019; Bailón y Florida, 2020; Castillo, 2020) y a otros residuos compostados (Bohórquez *et al.*, 2015; Jacobo *et al.*, 2017; Álvarez-Vera *et al.*, 2019; Florida y Reategui, 2019). Sin embargo, los niveles de Fe y Mn no se pueden clasificar, pues las normas chilenas 2880 y española 824 no contemplan rangos para estos elementos. Como referente previo está el trabajo de Jacobo *et al.* (2017) en compost de estiércol de bovino y residuos de maíz quienes encontraron medias de 1.541 mg kg<sup>-1</sup> de Fe y 266 mg kg<sup>-1</sup> de Mn; por su parte, Florida y Reategui (2019) en compost de estiércol de vacuno y plumas de pollo encontraron 3.738 a 5.290 de Fe y 239 a 303 mg kg<sup>-1</sup> de Mn. Los resultados cumplen con las normas técnicas y con las referencias, y podemos afirmar que se trata de un compost libre de contaminación por metales pesados y con valores normalmente encontrados en compost independientemente de los materiales compostados.

La norma chilena no establece rangos para la presencia de microorganismos patógenos, por ello, se aplicaron los criterios de la norma española 824, para determinar la inocuidad o contaminación por presencia

de microorganismos de origen fecal. Los resultados de recuento en placa no mostraron crecimiento de *Escherichia coli* y salmonela, por lo que, de acuerdo a la norma española es compost libre de patógenos y permite garantizar la inocuidad de los alimentos producidos a base de esta enmienda orgánica (Rivera-Jacinto *et al.*, 2009). Si bien los residuos orgánicos urbanos son muy diversos y están expuestas a contaminación microbiológica (Nuñez *et al.*, 2023), el procesamiento es fundamental y este debe presentar adecuadamente las diferentes etapas del proceso: mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración (FAO, 2013) para obtener un producto de alta calidad. La ausencia de microorganismos patógenos puede explicarse teniendo en cuenta que las pilas alcanzaron valores medios mayores a

65 °C durante la fase termogénica, superior a lo señalado por la FAO (2013) medias de 60 °C y a lo encontrado por otros autores, entre ellos La Cruz (2019), temperatura máxima media de 62,63 °C y Florida y Reategui (2019) temperaturas máximas de 63 °C. Esto explicaría la ausencia de estos microorganismos y concuerdan con otros trabajos de compost con residuos orgánicos urbanos como el de Vargas (2017) y La Cruz (2019), por tanto, los resultados garantizan la inocuidad del producto compost producido.

### Calidad del compost

La **tabla 4**, muestra la media general de los diferentes indicadores evaluados y el contraste con la norma chilena 2880 y la española 824, para clasificar la calidad según el indicador y la pila procesada.

**Tabla 4.** Contraste normativo para determinar la calidad del compost producido en la planta de valorización Shapajilla

Indicador	Norma chilena 2880		Tratamientos					
	Clase A	Clase B	Calidad P1	Calidad P2	Calidad P3	Calidad P4		
pH	5-7,5	< 5 y > 7,5	8,89 B	8,88 B	9,07 B	8,75 B		
Humedad	< 25	25-40	13,66 A	14,16 A	14,99 A	14,21 A		
MO	> 45 %	25-45 %	44,11 B	47,7 A	51,67 A	46,75 A		
Cenizas*	Max. 60 %		55,89 A	52,3 A	48,33 A	53,25 A		
N	> 0,8 %		2,59 A	2,03 A	2,92 A	1,95 A		
P2O5	< 5 %		0,94 A	1,05 A	1,33 A	0,96 A		
Ca	>1 %		0,86 B	0,94 B	0,98 B	0,81 B		
Mg	>1 %		0,23 B	0,24 B	0,26 B	0,27 B		
K	>1 %		0,38 B	0,40 B	0,41 B	0,34 B		
Pb (mg/kg)	< 100	100-300	1,3 A	1,28 A	1,13 A	0,93 A		
Cd (mg/kg)	< 2	2 a 8	0,14 A	0,14 A	0,14 A	0,12 A		
Cu (mg/kg)	< 100	100-1.000	15,73 A	21,83 A	23,57 A	20,04 A		

Indicador	Norma chilena 2880		Tratamientos			
	Clase A	Clase B	Calidad P1	Calidad P2	Calidad P3	Calidad P4
Zn (mg/kg)	< 200	200-2.000	93,96 A	106,79 A	123,37 A	77,614 A
Salmonela**	Ausente en 25 g		Ausente A	Ausente A	Ausente A	Ausente A
<i>Escherichia coli</i> **	< 1.000 NMP/g		0,00 A	0,00 A	0,00 A	0,00 A
Calidad de la pila			B	B	B	B

P1,P4 pilas compostadas, A alta calidad del compost, B calidad intermedia, \*Norma Técnica Colombiana NTC 5167 (2011); \*\* Real Decreto 824 (2005); Norma Oficial Chilena 2880 (2004)

**Nota:** elaboración de los autores.

Al final del compostaje se obtiene un producto orgánico de color oscuro, olor agradable a tierra y con una composición rica en materia orgánica y niveles bajos pero equilibrados en N, P, CA, Mg, K y otros micronutrientes (Ramos y Terry, 2014). Sin embargo, estos atributos requieren un control de calidad a través de normas técnicas como la norma chilena 2880 (Instituto Nacional de Normalización, 2004), norma rigurosa que establece tres niveles de calidad (Bailón y Florida, 2020), complementariamente la Norma Técnica Colombiana 5167 (Icontec, 2011) y el Real Decreto 824 (2005) para establecer los niveles de cenizas y la presencia de microorganismos patógenos respectivamente.

La calidad final se estableció en base a la norma chilena, entendiendo que las normas colombiana y española se usaron complementariamente para algunos parámetros, en ese sentido, se determinó a todos los compost evaluados como clase B, compost de calidad intermedia, que presentaría restricciones para su uso como sustrato o enmienda. Esta clasificación obedece a los siguientes criterios:

- Niveles altos de pH, que superan los 7,5 señalados en la norma (8,75 a 9,07). Este resultado se debe a que los residuos orgánicos urbanos tienen alto contenido de proteínas que al descomponerse incrementan el pH (Chang y Hsu, 2008); además, es independiente del periodo de volteo y del tiempo de compostaje, responde a los materiales sometidos al proceso (García *et al.*, 2014; Florida y Reategui, 2019) y los valores tienden a ser bajos al inicio e incrementar hacia el final del proceso, variando entre 4 a 9 (FAO, 2013). Los valores medios corresponden a pH alcalino en todas las pilas evaluadas, probablemente por una concentración baja de iones de hidrógeno y elevada en calcio, magnesio y sodio (Carrión *et al.*, 2008). En este caso, se advierten potenciales riesgos sobre la disponibilidad de los nutrientes, por ello, para alcanzar los valores recomendado por las principales normas de calidad es necesario aplicar técnicas para corregir el pH (Bárbaro *et al.*, 2019).

- **B.** Niveles bajos de Ca, Mg y K que no superan el 1 % exigidos por la norma chilena 2880, aspecto que comprometen negativamente la calidad de los compost evaluados, ya que son macronutrientes esenciales y componentes estructurales de las células vegetales, relacionadas directamente con el crecimiento de la raíz y la calidad de los frutos (FAO, 2013), además, son bases intercambiables esenciales con capacidad para controlar la solubilidad de elementos tóxicos como Al en suelos ácidos (Bohn *et al.*, 1993).

En general, los resultados de pH no son los adecuados, sin embargo, son similares a los resultados de Vargas (2017) en Concepción, Huancayo, encontró medias de 8,85 a 8,95 para pH. Sin embargo, estos valores no solo se observan en compost a base de residuos municipales, también se reportan en compost a base de otros residuos, entre ellos, Bailón y Florida (2020) en compost a base de cáscara de cacao (8,1), residuo municipal (8,13) y estiércol de vacuno (8,33); también, Florida y Reategui (2019) encontraron valores entre 7,79 a 8,32 en compost de plumas de pollo y estiércol de vacuno. Respecto al Ca, Mg y K presentan resultados similares a lo encontrado por Castillo (2020) en Huacachi, Huancayo, reportan niveles medios de 0,57 % de K; García *et al.* (2019) en la Habana, Cuba valores de 0,10 a 0,47 % de Mg. Vargas (2017) en residuos orgánicos de la ciudad de Concepción, Huancayo, Ca de 0,27 a 0,25 %, Mg de 0,114 y 0,115 % en el cuarto y quinto mes de compostaje.

Los compost producidos pueden ser utilizados como enmienda o sustrato, previamente es necesario aplicar técnicas de corrección del pH mediante la adición de azufre, sulfato ferroso, sulfato de aluminio u otros compuestos azufrados (Bárbaro *et al.*, 2019); también pueden mejorarse los niveles de Ca, Mg y K incorporando otros residuos de cosecha local (residuos de café, cacao, palma y plátano) como lo sugieren Florida *et al.* (2021).

## Conclusiones

Los residuos compostados no presentan diferencias entre pilas evaluadas lo que les da condiciones homogéneas a las pilas. Los indicadores del proceso (T° y pH) evidencian que las pilas alcanzaron todas las etapas señaladas por la FAO (2013). Los metales pesados Pb, Cd, Mn, Zn, Fe y Cu presentan diferencias entre pilas y son valores bajos según normas técnicas, además, no se encontraron microorganismos de origen fecal, por lo que el compost producido por la planta de valorización Shapajilla en Leoncio Prado es de clase B o calidad intermedia, por presentar altos niveles de pH y bajos niveles de Ca, Mg y K.

## Referencias

Álvarez-Vera, M., Largo, A., Iglesias-Abad, S. y Castillo, J. (2019). Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos. *Scientia Agropecuaria*, 10(3), 353-361. <https://n9.cl/wbpch>.

- Bailón, M. R. y Florida, N. (2020). Caracterización y calidad de los compost producidos y comercializados en Rupa Rupa, Huánuco. *Enfoque UTE*, 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.644>.
- Bárbaro, L., Karlanian, M., Rizzo, P. y Riera, N. (2019). Caracterización de diferentes compost para su uso como componente de sustratos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 35(2), 126-136. <https://n9.cl/wloto>.
- Bazán, R. (2017). *Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. <https://n9.cl/xyp21>.
- Bohórquez, A., Puentes, Y. y Menjivar, J. C. (2015). Evaluación de la calidad del compost producido a partir de subproductos agroindustriales de caña de azúcar. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(01), 73-81. <https://n9.cl/ww7l3>.
- Bohn, H. L., McNeal, B. L. y O'Connor, G. A. (1993). *Química del suelo*. Limusa.
- Boggiano, M. L. (2021). Diagnóstico y caracterización de los residuos sólidos domiciliarios de la ciudad de Trujillo, Perú, 2019-2020. *Ciencia y Tecnología*, 17(3), 61-72. <http://dx.doi.org/10.17268/rev.cyt.2021.03.05>.
- Cabrera, V. y Rossi, M. (2016). *Propuesta para la elaboración de compost a partir de los residuos vegetales provenientes del mantenimiento de las áreas verdes públicas del distrito de Miraflores* [Trabajo de Grado]. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2251>.
- Cao, Y., Wang, X., Zhang, X., Misselbrook, T., Bai, Z. and Ma, L. (2021). An electric field immobilizes heavy metals through promoting combination with humic substances during composting. *Bioresource Technology*, 330. <https://n9.cl/5igan>.
- Carrión, C., Abad, M., Fornes, F., Noguera, V., Puchades, R., Maquieira, A., Botella, S. and García, R. (2008). Acidification of composts from agricultural wastes to prepare nursery potting mixtures. En J. C. Michel (ed.), *Memories of the International Symposium on Growing Media* (pp. 333-340). International Society for Horticultural Science. <https://n9.cl/xegls>.
- Castillo, L. (2020). *Evaluación de la calidad del compost obtenido a partir de residuos orgánicos y microorganismos eficaces (EM) en el distrito de Huayucachi, Huancayo, 2019* [Trabajo de Grado]. Universidad Continental. <https://n9.cl/n7c12>.
- Cerda, A., Artola, A., Barrena, R., Font, X., Gea, T. and Sánchez, A. (2019). Innovative Production of Bioproducts from Organic Waste Through Solid-State Fermentation. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3. <https://n9.cl/5co7dk>.
- Chang, J. and Hsu, T. (2008). Effects of compositions on food waste



- composting. *Bioresource Technology*, 99(17), 8068-8074.
- Dalzell, H. W., Gray, K. R. and Biddlestone, A. J. (1981). *Composting in tropical agriculture* (2ª ed.). International Institute of Biological Husbandry.
- Environmental Protection Agency -EPA. (2017). *Metales pesados*. www.epa.gov.
- Florida-Rofner, N., Levano-Crisóstomo, J. D. and Jacobo-Salinas, S. (2020). Effect of feather compost on soil chemical indicators in CCN-51 cocoa plantation (*Theobroma cacao* L.). *Producción+Limpia*, 15(1), 25-34. <https://n9.cl/96nbm>.
- Florida, N., Levano, J. D. y Trigos, D. (2021). *Plumas y residuos locales, una alternativa para mejorar la calidad del compost y suelos en el trópico peruano*. Eidec. <https://doi.org/10.34893/8pf7-7h61>.
- Florida, N. y Reategui, F. (2019). Compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*). *Livestock Research for Rural Development*, 31(11). <http://www.lrrd.org/lrrd31/1/nelin31011.html>.
- Florida, N., Reategui, D. y Pocomucha, V. (2016). Caracterización del compost a base de plumas de pollos (*Gallus domesticus*) y otros insumos. *Investigación y Amazonía*, 6(2), 1-5. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/124>.
- García, C., Arozarena, N. J., Martínez, F., Hernández, M., Pascual, J. Á. y Santana, D. (2019). Obtención de compost mediante la biotransformación de residuos de mercados agropecuarios. *Cultivos Tropicales*, 40(2). <https://n9.cl/68xfl>.
- García, D., Lima, L., Ruíz, L. y Calderón, P. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 14(26), 1-11. <https://n9.cl/gjtffh>.
- Hernández, L., Benítez, M. and Bermúdez, J. (2018). Physical-chemical characterization of the organic fraction of urban solid waste from the controlled landfill at the Abel Santamaría Urban Center in Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 38(2), 369-379.
- Holdridge, R. L. (2000). *Ecología basada en zonas de vida*. (5ª ed.). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://n9.cl/ynb28>.
- Huamaní, C., Tudela, J. W. y Huamaní, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca-Puno-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(1), 106-115. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.541>.
- Icontec. (2011). *Norma Técnica Colombiana (NTC) 5167. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Segunda actualización*. <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC5167.pdf>.

- Iglesias, E. (2020). *Aspectos físicoquímicos, bioquímicos y microbiológicos del proceso de compostaje. Evaluación de la calidad* [Programa de curso de Maestría]. Universidad Miguel Hernández. <https://n9.cl/1kn9e>.
- Instituto Nacional de Normalización de Chile -INN. (2004). *Norma Chilena NCh 2880 sobre calidad del compost*. <https://edoc.pub/nch2880-norma-chilena-de-calidad-de-compost-pdf-free.html>.
- Jacobo, M., Figueroa, U., Maciel, S., López, L. y Muñoz, J. (2017). Elementos menores en composta producida a partir de estiércol de engorda y rastrojo de maíz. *Agrofaz*, 17(2), 61-71.
- La Cruz, H. V. (2019). *Calidad de compost de residuos sólidos orgánicos domiciliarios utilizando aserrín de Eucalyptus globulus Labill y restos de poda jardín Chilca-Huancayo* [Trabajo de Grado]. Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://n9.cl/pys0y>.
- Lalas, S., Athanasiadis, V., & Dourtoglou, V. G. (2017). Humic and Fulvic Acids as Potentially Toxic Metal Reducing Agents in Water. Department of Food Technology, Technological Educational Institute of Thessaly, Karditsa, Department of Oenology & Beverage Technology, Technological Educational Institute of. November: 1-13
- López, B., Andrade, R., Herrera, S. M., González, C. O. y García, A. (2017). Propiedades de un compost obtenido a partir de residuos de la producción de azúcar de caña. *Centro Agrícola*, 44(3), 49-55. <https://n9.cl/initwo>.
- Ministerio del Ambiente -Minam. (2023). *Residuos. Estadística ambiental*. <https://sinia.minam.gob.pe/informacion/tematicas?tematica=08>.
- Ministerio del Ambiente -Minam. (2021a). *Guía para el cumplimiento de la Meta 3 del Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal correspondiente al año 2021*. <https://n9.cl/70h6d>.
- Ministerio del Ambiente -Minam. (2021b). *Guía para el funcionamiento de los Sistemas Locales de Gestión Ambiental (SLGA)*. <https://n9.cl/z254v>.
- Ministerio del Ambiente -Minam. (2019). *Informe nacional sobre el estado del ambiente*. <https://n9.cl/1ct4d>.
- Musco A., Papalia T., Settineri G., Mallamaci C. and Kaczanowska A. (2018). Are Raw Materials or Composting Conditions and Time That Most Influence the Maturity and/or Quality of Composts? Comparison of Obtained Composts on Soil Properties. *Journal of Cleaner Production*, 195, 93-101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.204>.
- Núñez, W. E., Sotomayor, D. A., Ballardo, C. V. y Herrera, E. (2023). Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales. *Scientia Agropecuaria*,

- 14(1), 79-91. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.008>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. FAO. <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>.
- Oviedo-Ocaña, E. R., Marmolejo-Rebellón, L. F. y Torres-Lozada, P. (2017). Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo. Lecciones desde Colombia. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 18(1), 31-42. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40449649003>.
- Peralta-Antonio, N., de Freitas, G. B., Watthier, M. y Silva, R. (2019). Compost, bokashi y microorganismos eficientes: sus beneficios en cultivos sucesivos de brócolis. *Idesia*, 37(2), 59-66. <https://lc.cx/2gddqT>.
- Pulgar, J. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis*, (3), 1-21. <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>.
- Ramos, A. y Terry, E. (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: importancia del bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 52-59.
- Real Decreto 824 de 2005 [Ministerio de la Presidencia]. Sobre productos fertilizantes. 19 de julio de 2005. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2005/07/08/824>.
- Resolución 457 de 2018 [Ministerio del Ambiente]. Por la cual se aprueba la Guía para la caracterización de residuos sólidos municipales. 31 de diciembre de 2018. <https://lc.cx/UWN4IV>.
- Rivas-Nichorzon, M. y Silva-Acuña, R. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia crassipes*). *Ciencia Unemi*, 13(32), 87-100. <https://lc.cx/gFeE7n>.
- Rivera-Jacinto, M., Rodríguez-Ulloa, C. y López-Orbegoso, J. (2009). Contaminación fecal en hortalizas que se expenden en mercados de la ciudad de Cajamarca, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1), 45-48. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v26n1/a09v26n1>.
- Rosal, A., Pérez, J., Arcos, M. y Dios, M. (2007). La incidencia de metales pesados en compost de residuos sólidos urbanos y en su uso agronómico en España. *Información Tecnológica*, 18(6), 75-82. <https://lc.cx/LotyIV>.
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional*. <https://lc.cx/NRIanC>.
- Sharma, A., Nath Saha, T., Arora, A., Shah, R. and Nain, L. (2017). Efficient Microorganism Compost Benefits Plant Growth and Improves Soil Health in Calendula and Marigold. *Horticultural Plant Journal*, 3(2),

67-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hpj.2017.07.003>.

Song, C., Zhao, Y., Pan, D., Wang, S., Wu, D., Wang, L., Hao, J. and Wel, Z. (2021). Heavy metals passivation driven by the interaction of organic fractions and functional bacteria during biochar/montmorillonite-amended composting. *Bioresource Technology*, 329. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33711715/>.

Vargas, Y. (2017). *Calidad de los compost producidos a partir de residuos sólidos orgánicos municipales en el centro de protección ambiental "Santa Cruz", ciudad de Concepción* [Tesis Doctoral]. Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4145/Ytavclerh%20Vargas.pdf?sequence=1>.

Wang, L., Liu, H., Prasher, S. O., Ou, Y., Yan, B., & Zhong, R. (2021). Effect of inorganic additives (rock phosphate, PR and boron waste, BW) on the passivation of Cu, Zn during pig manure composting. *Journal of Environmental Management*, 285: 112101