

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR EN LA ELABORACIÓN DE COMPOST DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS URBANOS A TRAVÉS DE UN SISTEMA CON COLECTORES SOLARES EN CONDICIONES ALTOANDINAS

Use of solar energy in the composting of urban organic solid waste using solar collectors in high Andean conditions

Yojan Jaime LLAVE-CIPRIAN, Sulema CALLASI-CHOQUEPUMA
y Juan Eduardo VIGO-RIVERA*

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Carretera Salida a Arequipa km 6, Chullun-quiani, San Román, 21100, Perú.

*Autor para correspondencia: eduardo.vigo@upeu.edu.pe

(Recibido: octubre 2023; aceptado: julio 2024)

Palabras clave: temperaturas bajas, composteras, calentamiento solar.

RESUMEN

El compostaje es una forma sostenible de gestionar los residuos sólidos orgánicos. Este estudio evaluó el uso de energía solar para aumentar la temperatura en las composteras durante la elaboración de compost de residuos orgánicos urbanos en condiciones altoandinas. Se instalaron ocho composteras de 0.098 m^3 cada una: cuatro con calentamiento solar usando colectores planos de HDPE ($\varnothing=3/4"$) y agua como fluido caloportador y cuatro sin calentamiento solar. El periodo experimental fue de 45 días para las composteras con calentamiento solar y de 60 días para las sin calentamiento solar. Cada composter contenía 52.5 kg de residuos orgánicos, 2.5 kg de estiércol de ovino y 100 mL de microorganismos eficientes. Se monitorearon el pH, la humedad y la temperatura del compostaje, así como la temperatura ambiental, del fluido caloportador y del invernadero mediante sensores Arduino. Se evaluaron la materia orgánica, el nitrógeno, el fósforo, el potasio, la relación C/N y la conductividad eléctrica del compost producido. Las composteras con calentamiento solar alcanzaron la madurez del compost en 45 días, mientras que las sin calentamiento lo hicieron en 60 días, presentando características similares en cuanto a nitrógeno, fósforo y potasio. El invernadero cubierto de agrofilm de 180 micras mantuvo el compost a una temperatura media de 28.9 °C durante los 45 días, en comparación con una temperatura media ambiental de 5.2 °C. Los colectores solares proporcionaron calor al sistema, alcanzando temperaturas de hasta 39.83 °C y ganancias de calor de 86.5 cal. Estos resultados demuestran la viabilidad del uso de energía solar para la producción de compost en condiciones altoandinas.

Key words: low temperatures, composting, solar heating.

ABSTRACT

Composting is a sustainable way to manage organic solid waste. This study evaluated the use of solar energy to increase the temperature in compost bins during the composting process of urban organic waste under high Andean conditions. Eight compost bins of 0.098 m^3 each were installed: four with solar heating using flat HDPE collectors ($\varnothing=3/4"$)

and water as the heat transfer fluid, and four without solar heating. The experimental period was 45 days for the solar-heated bins and 60 days for the non-solar-heated bins. Each bin contained 52.5 kg of organic waste, 2.5 kg of sheep manure, and 100 mL of effective microorganisms. The pH, humidity, and temperature of the composting process were monitored, along with the ambient temperature, the temperature of the heat transfer fluid, and the greenhouse temperature using Arduino sensors. Organic matter, nitrogen, phosphorus, potassium, C/N ratio, and electrical conductivity of the produced compost were evaluated. The solar-heated compost bins reached compost maturity in 45 days, while the non-solar-heated bins did so in 60 days, with similar characteristics in terms of nitrogen, phosphorus, and potassium. The greenhouse covered with 180-micron agrofilm maintained the compost at an average temperature of 28.9 °C during the 45 days, compared to an average ambient temperature of 5.2 °C. The solar collectors provided heat to the system, reaching temperatures of up to 39.83 °C and heat gains of 86.5 cal. These results demonstrate the feasibility of using solar energy for compost production in high Andean conditions.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la cantidad de residuos sólidos generados ha aumentado exponencialmente en todo el mundo. Este incremento se debe principalmente al crecimiento demográfico, que junto con el desarrollo económico, la urbanización, los estilos de vida y los estándares modernos han acelerado enormemente la generación de basura (Sayara et al. 2020). En los países en vías de desarrollo, el mal manejo y gestión de residuos sólidos sigue siendo un problema, ya que estos terminan en vertederos o son incinerados, lo que ocasiona la generación de gases de efecto invernadero y lixiviados, resultando en impactos sanitarios y ambientales (Vergara y Tchobanoglous 2012). Si se realiza un buen tratamiento de estos desperdicios se pueden obtener grandes beneficios que favorecen al entorno ambiental, social y económico (Ortiz y González 2015).

En el Perú, es crucial optimizar el proceso de disposición final de los desechos, ya que representa un problema crítico a nivel nacional en términos de salud y contaminación ambiental, derivado de actividades individuales, colectivas, urbanas y rurales (Blas 2020). Ante esta situación, es de suma importancia promover un manejo adecuado y desarrollar una gestión sostenible para la correcta disposición y aprovechamiento de los residuos sólidos. Esto implica transparentar las medidas y técnicas de mejora, como el reciclaje y el compostaje, entre otras, que permitan disminuir los problemas de contaminación, preservar la biodiversidad y los ecosistemas naturales y brindar mejores condiciones de vida a la población (Castañeda y Rodríguez 2017).

Además, un alto porcentaje de los residuos sólidos generados está compuesto por desechos

orgánicos; esta fracción biodegradable podría reciclarse y utilizarse como fuente potencial de nutrientes para las plantas, en lugar de perderse por descarte o tratamiento inadecuado (Zhang y Sun 2016). Por ello, uno de los tratamientos óptimos para aprovechar los residuos sólidos orgánicos es el compostaje, ya que proporciona nutrientes al suelo y reduce el impacto ambiental negativo (Medina y Paricaguan 2013).

No obstante, el compostaje requiere condiciones climáticas favorables, como climas cálidos. Según Román et al. (2015), la temperatura adecuada oscila entre 45 y 60 °C, rango en el cual la degradación de residuos sólidos es más rápida. Sin embargo, en las zonas altiplánicas, las temperaturas ambiente varían entre 7 y -10 °C (MINAM 2013), lo que hace que la degradación de residuos sólidos orgánicos sea más lenta, impidiendo un desarrollo bacteriano adecuado para el compostaje.

Según Rodrigo y Larico (2018), las zonas altoandinas, como la ciudad de Juliaca en Puno, presentan una alta incidencia de radiación solar, alcanzando 6.632 kWh/m²/día. Algunos ejemplos de la aplicación de energía solar en estas áreas incluyen el uso de bombas hidráulicas solares, sistemas de transferencia de calor, colectores solares térmicos, módulos fotovoltaicos y viviendas bioclimatizadas (Quispe y Sotomayor 2022). Considerando los índices de radiación solar, este estudio tuvo como objetivo evaluar el uso de energía solar para la elaboración de compost de residuos sólidos orgánicos urbanos mediante un sistema con colectores solares en zonas altoandinas. La implementación de sistemas de compostaje que utilicen energía solar en regiones de gran altitud podría ser una solución efectiva para mejorar la gestión de residuos sólidos orgánicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio de investigación se llevó a cabo en Villa Chullunquiani, Juliaca, Puno, Perú, a una altitud de 3850 m snm. La ejecución se realizó entre los meses de junio y agosto de 2023, época del año caracterizada por bajas temperaturas en la zona (SENAMHI 2023). Las dimensiones del área experimental fueron de 6.5×3.5 m (22.75 m 2) y tuvo una orientación de este a oeste. Además, se destinó un área de 2×2 m para la recepción y deshidratación de los residuos sólidos orgánicos frescos, así como una poza para la recolección de lixiviados.

Diseño experimental de la investigación

Se llevaron a cabo dos tratamientos: T1, compostera con calentamiento solar (CCS) y T2, compostera sin calentamiento solar (SCS) (Fig. 1). El diseño experimental fue un arreglo factorial de un solo factor con cuatro repeticiones, sumando un total de ocho unidades experimentales. Las unidades de T1 fueron denominadas CCS1, CCS2, CCS3 y CCS4, mientras que las de T2 fueron denominadas SCS1, SCS2, SCS3 y SCS4. Para analizar la calidad del compost se aplicó un análisis estadístico utilizando un análisis de varianza (Andeva) y la prueba de Tukey, empleando el programa Statistica v.14.0. Se consideró un *p*-valor ≤ 0.05 y un nivel de significancia del 95 %.



Fig. 1. Instalación experimental in situ de las composteras.

Proceso de elaboración del compostaje

La figura 2 muestra el proceso de elaboración del compostaje. Primero, se recolectaron residuos orgánicos del comedor y cafetín de la Universidad Peruana Unión (UPeU) en el campus Juliaca. Estos

residuos estaban conformados por restos de fruta, vegetales y cáscara de papa, fueron transportados al área experimental para su acondicionamiento y deshidratación, dejándolos en reposo por dos días. El tamaño de partícula de los residuos orgánicos se redujo manualmente con un machete hasta alcanzar dimensiones de 4 a 6 cm, para luego ser pesados y agregados a las composteras. Se agregaron 55 kg a cada compostera (52.5 kg de residuos orgánicos, 2.5 kg de estiércol de ovino y 100 mL de microorganismos eficaces), formando seis capas delgadas de 5 cm de manera intercalada. El estiércol de ovino fue obtenido del rebaño de ovejas de la UPeU.

Respecto a los microorganismos eficaces (EM, por su sigla en inglés), estos requieren una activación. Para ello, en un recipiente de 20 L se mezclaron 1 kg de melaza de caña de azúcar con 1 L de microorganismos eficaces en 19 L de agua sin cloro. Luego, se tapó herméticamente el recipiente, favoreciendo la fermentación por un periodo de siete días. Transcurrido este tiempo, se percibe un olor agridulce, indicativo de que los microorganismos están activados. La relación de carbono y nitrógeno (C/N) inicial fue de 30:1, obtenida mediante un cálculo de proporcionalidad. Según Bohórquez (2013), el rango óptimo de este parámetro está entre 25 y 35, lo cual afecta la velocidad del proceso y la pérdida de amoníaco durante el compostaje.

El volteo y la aireación se realizaron cada tres días con una pala. Para mantener la humedad del compost entre el 40 y 60 %, se aplicaron 1.5 L de agua en las composteras CCS y SCS cuando la humedad era inferior al 40 %. Finalmente, se agregaron 50 g de óxido de calcio en las composteras SCS para regular el pH durante el proceso.

Para el monitoreo de la humedad y pH se utilizó un medidor digital modelo Smart Sensor pH-328. La temperatura del compostaje se midió con sensores Arduino de coeficiente de temperatura negativo (NTC) con un tiempo de registro de dos minutos. La temperatura ambiental y la radiación solar se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Para determinar la concentración de nitrógeno, fósforo, potasio, relación C/N, conductividad eléctrica y materia orgánica, se recolectaron 1 kg de muestras del compost, que al finalizar el proceso fueron enviadas y analizadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Agraria La Molina.

El análisis del nitrógeno total se realizó mediante el método Kjeldahl (FEA 1993), el cual consiste en utilizar una muestra de entre 0.25 a 1 g, que se somete a digestión con ácido sulfúrico y una mezcla de sales

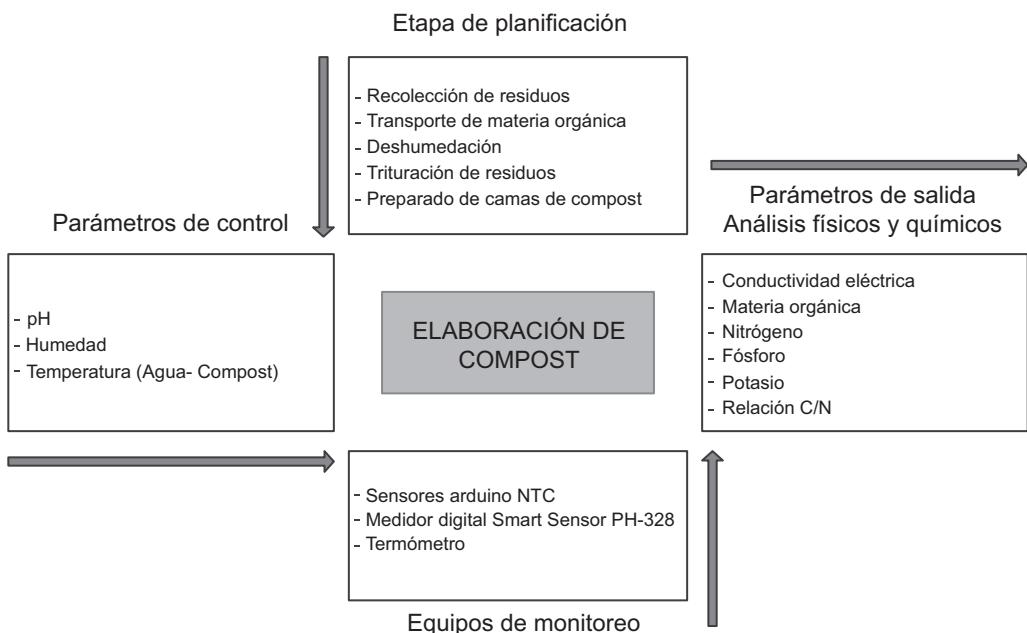


Fig. 2. Diagrama del proceso de elaboración de compostaje.

para facilitar la oxidación de la materia orgánica y la conversión de todas las formas de nitrógeno a N^{+3} . Luego, esta mezcla se transforma en NH_4^+ y se destila con una base fuerte (hidróxido de sodio) para formar hidróxido de amonio, que se descompone en amoniaco y agua. El amoniaco colectado se valora y se titula con ácido sulfúrico para determinar la concentración de nitrógeno.

El fósforo y el potasio se determinaron con un fotómetro, utilizando diferentes concentraciones y factores de dilución. La relación C/N se calculó dividiendo la concentración de carbono total, obtenida por calcinación de la muestra a 550 °C durante cinco horas, entre el nitrógeno total determinado por el método ya mencionado anteriormente. La conductividad eléctrica (CE) se midió siguiendo las indicaciones del manual de laboratorio (TMECC 2002), que consiste en mezclar la muestra en una dilución de 1:10 en agua destilada, agitarla por 15 min dejarla en reposo por 15 min y luego medir la conductividad con un conductímetro. Finalmente, la materia orgánica se determinó a través de oxidación.

Determinación de la transferencia de calor del sistema de calentamiento solar en la compostera

La transferencia de calor del sistema se determina mediante la ecuación de transferencia de calor:

$$Q = m \times C_e \times \Delta T \quad (1)$$

Donde Q es la tasa de transferencia de calor, m representa la masa, C_e es el calor específico del agua, y ΔT es la diferencia de temperatura.

Instalación de las composteras rectangulares

La figura 3 muestra el diseño de las composteras CCS y SCS, elaboradas con melamina de 70 × 40 × 35 cm (largo, ancho y altura). Las composteras CCS cuentan con una base de aluminio de 14 L y 5 cm de espesor, a través de la cual se realiza la transferencia de calor utilizando agua como fluido caloportador proveniente de los colectores solares. Se eligió el aluminio por su alta conductividad térmica de 237 W/m·K (Gabriel 2019), así como por su resistencia

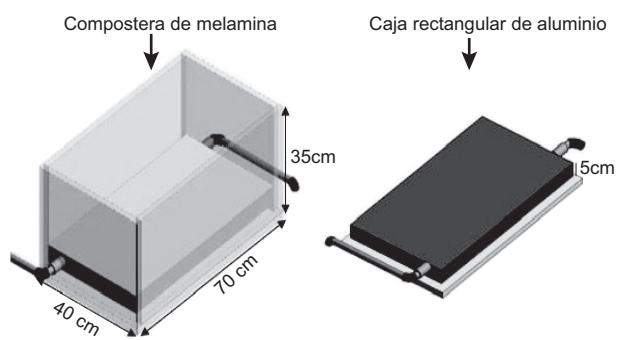


Fig. 3. Diseño de la compostera y contenedor de aluminio.

a la corrosión, bajo costo, baja densidad, durabilidad y maleabilidad (Calderon y Morillo 2019).

Además, las composteras CCS fueron forradas con poliestireno expandido (EPS) de 2 cm de espesor en la parte inferior y en los laterales, para reducir las pérdidas de calor generadas por el sistema con calentamiento solar. De manera similar, las composteras SCS fueron cubiertas con EPS para mitigar el impacto directo de las bajas temperaturas.

Circuito de transferencia de calor dentro del sistema

La transferencia de calor comienza en la bandeja amarilla, ubicada en la parte central del circuito (**Fig. 4**). Desde ese punto, el agua es distribuida uniformemente hacia los cuatro colectores mediante una bomba de 45 W con un caudal de 0.53 L/s. Se instaló un interruptor digital automático para controlar el sistema de circulación del fluido caloportador, que operaba cada 30 min con intervalos de 4 min, con el propósito de transferir el calor de los colectores a las composteras. La transferencia de calor se realiza por convección (fluido caloportador), conducción (tubo y caja rectangular de aluminio) y nuevamente convección (agua de la bandeja). Asimismo, se controló la temperatura del fluido caloportador a través de una plataforma Arduino, que integraba cuatro sensores tipo NTC

para registrar la temperatura inicial y final del agua, ubicados en el circuito final del sistema.

Instalación experimental del sistema con calentamiento solar

La **figura 5** muestra el sistema final implementado en campo, el cual consta de cuatro colectores solares. Dos de estos colectores están hechos de manguera HDPE de $\frac{3}{4}$ " de color negro, con una longitud de 47.2 m, denominados colector 1 y colector 2 a lo largo del texto. Los otros dos colectores tienen una longitud de 32.6 m y se denominan colector 3 y colector 4. Los colectores fueron enrollados concéntricamente y colocados sobre una superficie de calamina negra para maximizar la absorción de la radiación solar (Moreno 2017). La diferencia de longitudes se implementó para observar si el tamaño de los colectores influye en el aporte de calor hacia las composteras.

Además, se construyó un invernadero para el sistema con calentamiento solar de 1.5 x 3.5 m, con una altura de 60 cm, cubierto con plástico Agrofilm de 180 micras de color amarillo, con el fin de evitar daños climáticos (lluvia y viento) y conservar la temperatura interna. Por otro lado, el sistema sin calentamiento solar fue cubierto con Agrofilm, pero no se construyó un invernadero, como se muestra en la **figura 1**.

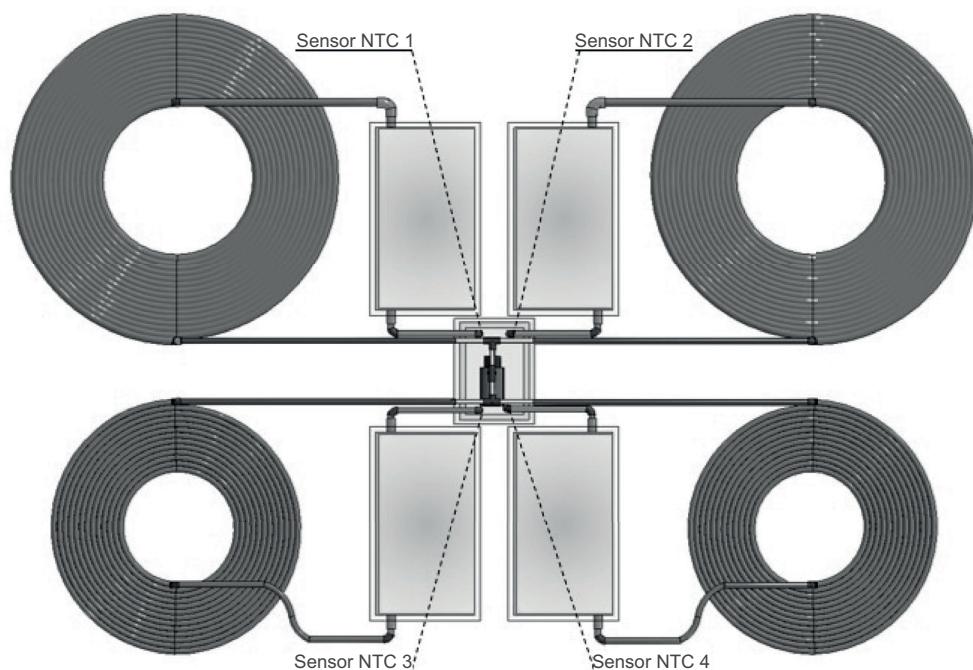


Fig. 4. Distribución de la transferencia de calor en el sistema controlado a través de sensores de coeficiente de temperatura baja (NTC).

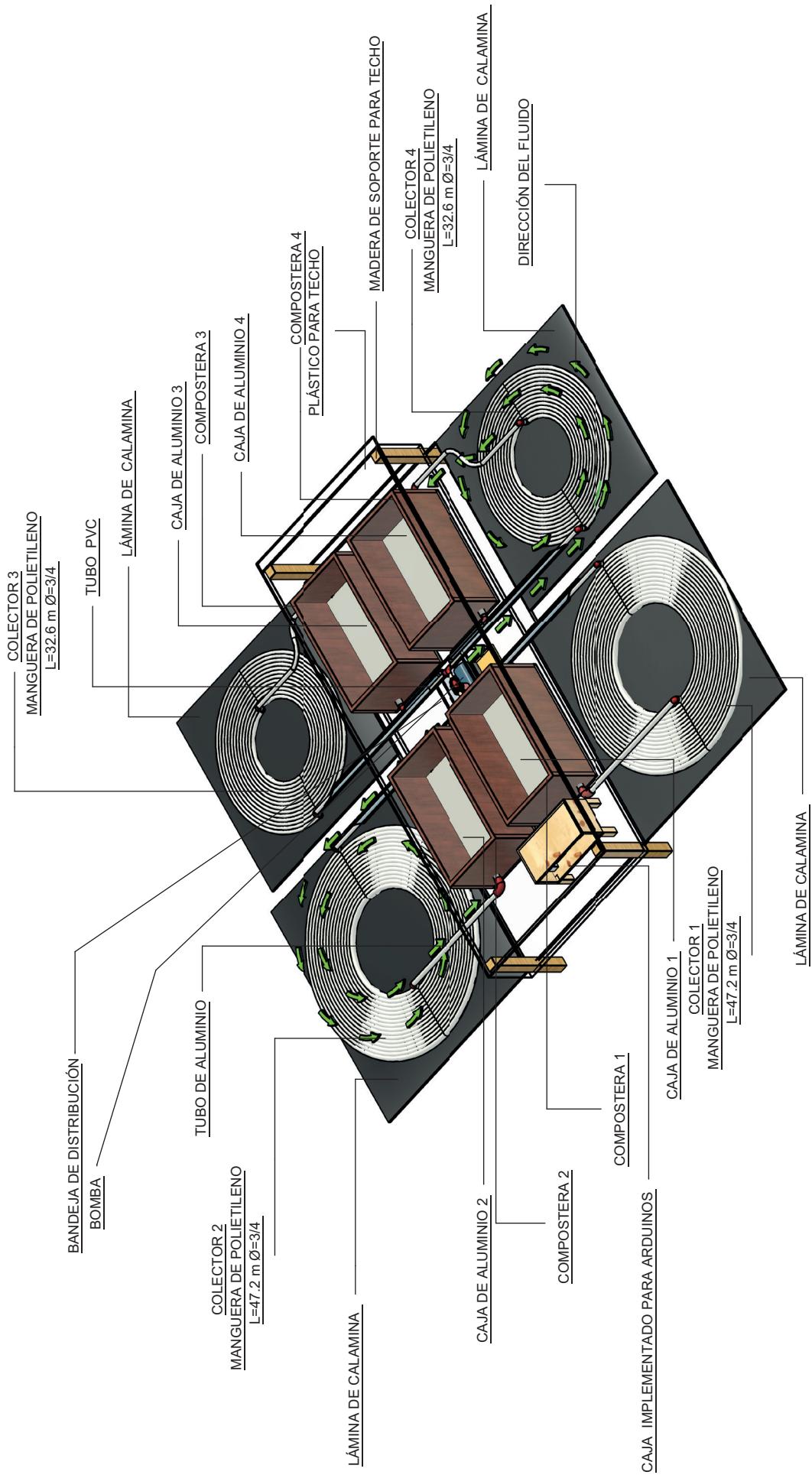


Fig. 5. Instalación del sistema de calentamiento solar.

El sistema funcionó de manera intermitente durante siete horas diarias, comenzando a las 9 de la mañana y finalizando a las 4 de la tarde, aprovechando así la radiación solar para proporcionar condiciones óptimas al compost, permitiendo su adecuado desarrollo dentro del sistema.

RESULTADOS

Comportamiento de la temperatura

La figura 6 muestra la temperatura del sistema de calentamiento solar propuesto en este estudio. En la fase mesofílica, la temperatura tuvo un incremento gradual en las cuatro composteras, alcanzando un promedio de 28 °C. En la fase termofílica, que se registró el día 8, se alcanzaron temperaturas máximas de 40.5 °C en la CCS2, seguido por la CCS1 con 38.3 °C, la CCS4 con 35.9 °C y, finalmente, la CCS3 con 34.6 °C.

Después de alcanzar la temperatura máxima de 40.5 °C, se observa un descenso gradual, indicando que el compost entra nuevamente en la fase mesofílica. A partir del día 20, el compost entra en la fase de maduración o enfriamiento. Se observa que la CCS2 alcanzó los 25 °C, mientras que la CCS1 presentó temperaturas inferiores, a pesar de que ambos colectores tenían el mismo tamaño. Esta diferencia en el comportamiento de la temperatura se debe a que el colector CCS2 aprovechaba directamente la radiación solar durante la mañana, mientras que en

los colectores CCS1 y CCS3 la radiación era limitada por una sombra generada por el invernadero. Los colectores de las composteras CCS3 y CCS4 muestran un comportamiento similar; sin embargo, la composter CCS4 fue más eficiente que la CCS3 debido al problema de sombra mencionado anteriormente.

En cuanto a las temperaturas de las composteras SCS, en la fase mesofílica se observa un incremento similar al sistema CCS, con un promedio de 26 °C. Sin embargo, al entrar en la fase termofílica, no alcanzan los 40 °C. Las temperaturas máximas se registraron el día 5, donde la composter SCS2 alcanzó 28.9 °C, seguida por la SCS1 con 28.4 °C y, finalmente, la SCS3 y SCS4 con 27.9 °C. Despues de alcanzar su valor máximo de temperatura, se observa un descenso rápido, no desarrollando eficientemente las fases termofílica y mesofílica.

En los días 24 y 25, ya en la fase de maduración, se registraron las temperaturas más bajas con un promedio de 5 °C debido a las bajas temperaturas nocturnas. Por ello, el producto final se obtuvo en 60 días, cuando se observó que el compost presentó un color café oscuro, sin aroma y sin restos orgánicos. Como se muestra en la figura 6, la diferencia de temperaturas en las composteras sin calentamiento solar no varía significativamente; todas son muy similares durante el proceso de compostaje, a diferencia de las temperaturas con calentamiento solar, donde predominan las composteras CCS2 y CCS1.

Con respecto a la temperatura ambiental, durante la investigación se mantuvo por debajo de 10 °C, con

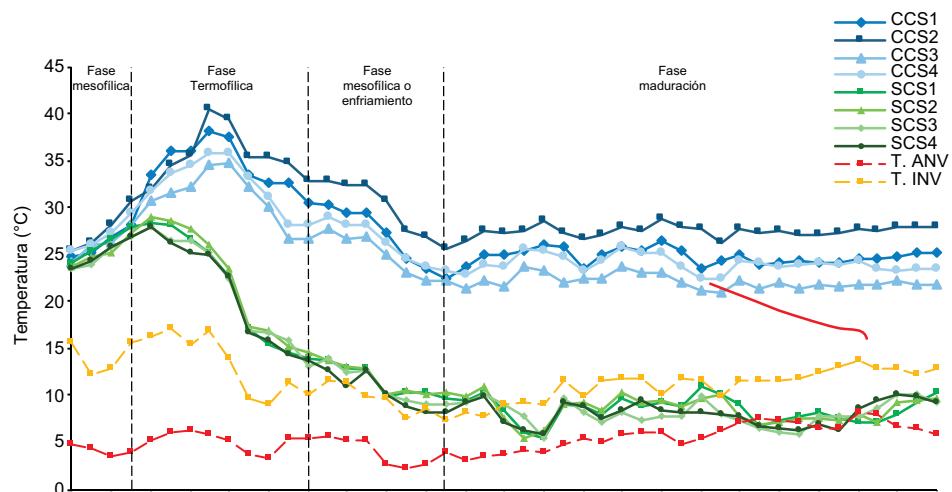


Fig. 6. Comportamiento de la temperatura del compost (CCS: con calentamiento solar; SCS: sin calentamiento solar; T.AMB: temperatura ambiental; T.INV: temperatura del invernadero).

una temperatura media de 5.2 °C durante los primeros 45 días. Para mitigar este efecto, se construyó un invernadero, que evita las bajas temperaturas nocturnas en inviernos fríos, proporcionando aislamiento térmico y almacenamiento de calor interno Wan et al. (2023). De esta manera, se logró mantener las temperaturas por encima de 10 °C, con una temperatura media de 11.6 °C, lo cual permitió mantener una temperatura media del compost de 28.9 °C en las composteras CCS.

Evolución del pH en el proceso de compostaje

En la **figura 7** se observa la evolución del pH en las composteras CCS y SCS. Durante la primera semana, los valores de pH en las compoteras CCS disminuyeron gradualmente hasta llegar a un pH de 4.5. Posteriormente, el pH aumentó de manera gradual, alcanzando valores neutros. A partir del día 30, el pH se volvió alcalino, llegando hasta 8.5 en las cuatro compoteras. Finalmente, a partir del día 40, el pH disminuyó y se estabilizó en un rango de 6.5 a 7.5.

En cuanto a las compoteras SCS, el pH también disminuyó a 4.5 durante la primera semana, indicando un proceso de acidificación de los residuos. Despues los valores de pH aumentaron rápidamente hasta el día 10. Sin embargo, se redujeron nuevamente, lo que implica una baja actividad microbiana debido a las bajas temperaturas, manteniendo los ácidos orgánicos en la compotería a pesar de la salida de lixiviados. Tras la adición de óxido de calcio, los valores de pH aumentaron gradualmente a partir del día 20, alcanzando un pH máximo de 7.4. En comparación con las compoteras CCS, estas no lograron alcanzar un pH de 8.5.

Este comportamiento sugiere que el sistema con calentamiento solar, proporciona un ambiente más favorable para la actividad microbiana, facilitando un proceso de compostaje más eficiente y estable. En cambio, las bajas temperaturas en las compoteras sin calentamiento solar limitan la actividad microbiana y la estabilización del pH.

Evolución de la humedad en el proceso de compostaje

La **figura 8** muestra la evolución de la humedad en los dos tratamientos. La humedad inicial en ambos tratamientos fue superior al 70 %. En las compoteras CCS, la humedad disminuye gradualmente, ya que el sistema genera calor, reduciendo rápidamente la humedad en forma de vapor durante el día y la noche. Sin embargo, la compotería CCS2 experimentó una disminución más rápida debido a las temperaturas más altas registradas (**Fig. 6**). Para el día 30, la humedad se redujo aproximadamente al 45 %, lo que requirió la aplicación de 1.5 litros de agua a cada compotería. La humedad aumentó gradualmente hasta el día 36, para luego disminuir nuevamente hasta el día 42, donde se registró la humedad más baja, con un aproximado del 40 %.

En las compoteras SCS, la humedad disminuye paulatinamente, principalmente debido a las bajas temperaturas registradas durante la noche (**Fig. 6**). Esta pérdida de humedad afecta las actividades metabólicas microbianas y la transformación del material durante el compostaje. Hasta el día 20, la humedad en las compoteras SCS se mantuvo por encima del 70 %. A pesar del proceso de volteo realizado, la humedad no disminuyó como se esperaba. A partir del día 37, la humedad comienza a disminuir gradualmente,

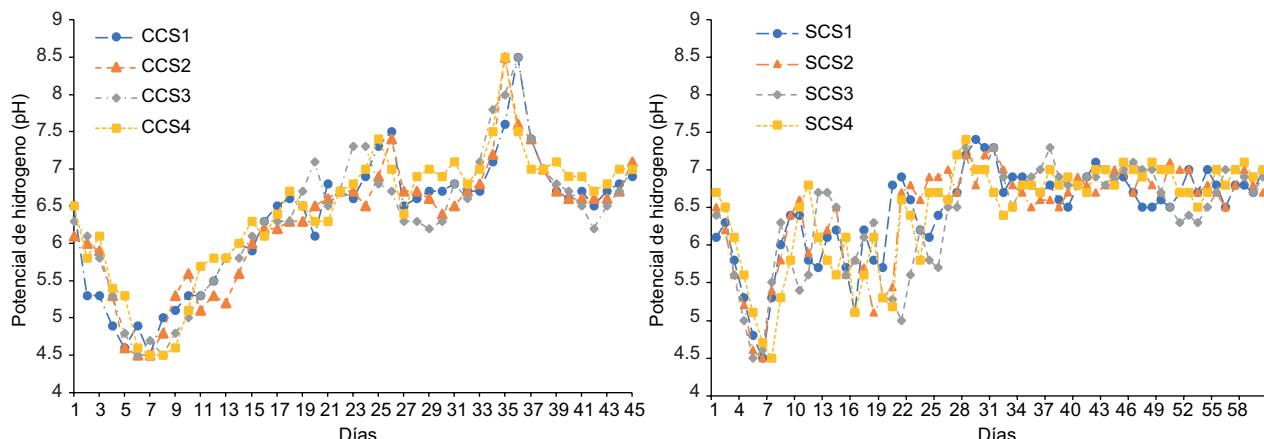


Fig. 7. Comportamiento del pH del compost (CCS: con calentamiento solar; SCS: sin calentamiento solar).

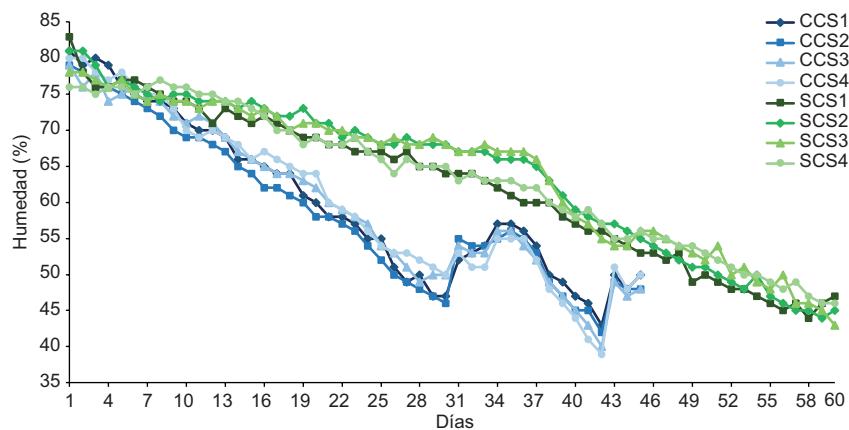


Fig. 8. Comportamiento de la humedad del compost (CCS: con calentamiento solar; SCS: sin calentamiento solar).

permitiendo que el compost se desarrolle de manera más eficiente.

Este comportamiento sugiere que el sistema de calentamiento solar (CCS) facilita una reducción más controlada de la humedad, lo que optimiza las condiciones para la actividad microbiana y el proceso de compostaje. En contraste, las bajas temperaturas en las composteras sin calentamiento solar (SCS) ralentizan la disminución de la humedad, afectando negativamente la eficiencia del compostaje.

Análisis estadístico y calidad del compost

Al realizar el Andeva de los promedios entre los grupos, se observó que existe una diferencia significativa entre las muestras (**Cuadro I**). A excepción de la relación de C/N, la cual no mostró diferencia

significativa entre las composteras CCS y SCS.

La calidad del compost obtenido en la investigación se comparó con la normativa chilena de calidad de compost (NCh2880 2004). En el **Cuadro II**, se observan los parámetros analizados de las ocho composteras, de las cuales la materia orgánica, el nitrógeno y la relación C/N cumplen con dicha normativa tanto en las compoteras CCS como en las SCS. Sin embargo, el fósforo y la conductividad eléctrica no cumplen con la normativa, ya que los resultados obtenidos superan el 0.1 % y los 3 dS/m, respectivamente.

La conductividad eléctrica (CE) del compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, principalmente por su concentración de sales y, en menor medida, por la presencia

CUADRO I. ANDEVA DE LAS COMPOSTERAS UTILIZADAS

Fuente de variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Valor-P	Valor crítico para F
Entre grupos	19033.52289	6	3172.253816	351.71275	1.69E-38	2.2904318
Dentro de los grupos	441.9528121	49	9.019445144			
Total	19475.47571	55				

CUADRO II. CALIDAD DE COMPOST EN COMPARACIÓN CON ALGUNOS PARAMETROS EVALUADOS DE LA NORMATIVA CHILENA.

Composteras	C.E.	M.O. %	N %	P %	K %	Relación C/N
CCS	13.5 ± 0.6^a	50.5 ± 3.7^a	3.1 ± 0.1^a	1.2 ± 0.1^a	3.9 ± 0.3^a	14.4 ± 0.8^a
SCS	10.2 ± 0.61^b	62.9 ± 4.44^b	2.7 ± 0.19^b	1.0 ± 0.07^b	3.1 ± 0.27^b	14.2 ± 1.33^a
Norma Chilena (2880)	<8 dS/m	>25%	>0.8%	<0.1%	-	10-25

CCS: con calentamiento solar. SCS: sin calentamiento solar. CE: conductividad eléctrica. M.O: materia orgánica. N: nitrógeno. P: fósforo. K: potasio.

de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Roig et al. 2001). El valor de la CE difiere estadísticamente entre las composteras, siendo ligeramente más alta en las CCS que en las SCS. Aunque no se cumple con la normativa chilena, no se observó un exceso de salinidad en el compost obtenido. Por otro lado, los contenidos de materia orgánica en las composteras CCS y SCS cumplen con la normativa, situándose dentro del rango de 50.5 % a 62.9 %. Esto se debe a la baja actividad microbiana, principalmente en las composteras SCS, como se muestra en la **figura 6**.

En cuanto al nitrógeno, en promedio se obtuvo un 3.1 % en las composteras CCS y un 2.7 % en las composteras SCS, siendo estos últimos valores inferiores debido a una mayor salida de lixiviados observada durante la experimentación. Ambos valores cumplen con la normativa chilena. Los contenidos de fósforo y potasio presentaron valores similares, con un promedio de 1.2 % de fósforo y 3.9 % de potasio en las composteras CCS, y 1 % de fósforo y 3.1 % de potasio en las composteras SCS. No hubo una diferencia estadísticamente significativa entre los tipos de composteras (CCS y SCS). Además, la relación C/N en las composteras CCS y SCS estuvo dentro del rango de 10 a 25, como lo indica la normativa chilena.

Pérdidas y ganancias de calor en el sistema de compostaje

Durante el funcionamiento del sistema, se presentaron pérdidas y ganancias de calor. En la **figura 9** se observa que, entre las 9:00 y las 9:30 h, hubo

pérdidas de calor en las cuatro composteras CCS: CCS2 con -79.9 cal, seguida de CCS1 con -70.2 cal, CCS3 con -60 cal y, finalmente, CCS4 con -55.3 cal. Esto se debe a que la temperatura del agua disminuye gradualmente durante la noche, afectando el agua de los colectores solares, que al inicio del sistema ingresa a las placas rectangulares de aluminio, provocando un enfriamiento y pérdida de calor en las composteras.

Sin embargo, a partir de las 10:00 h, el sistema comienza a mostrar ganancias de calor, principalmente en las composteras CCS2 y CCS1 con 106.5 y 105.4 cal, respectivamente, seguidas por CCS4 con 87 cal y CCS3 con 86.5 cal, alcanzando la máxima ganancia de calor entre las 13:00 y las 16:00 h. Este comportamiento sugiere que, a medida que el sol calienta los colectores solares durante la mañana, el sistema es capaz de compensar las pérdidas de calor iniciales y proporcionar un ambiente más cálido y favorable para el proceso de compostaje durante las horas pico de radiación solar.

Comportamiento de la radiación solar y su impacto en la temperatura del agua

El rendimiento de la radiación solar desempeña un papel crucial en el aporte de temperatura del agua. De acuerdo con los resultados, a las 12:00 h se registró el mayor aumento de radiación, alcanzando 512.84 W/m^2 (**Fig. 10**).

En cuanto a la temperatura de los colectores, se observó que a las 14:00 el promedio más alto fue de 39.83°C en el colector 2. Esto se debe a que la

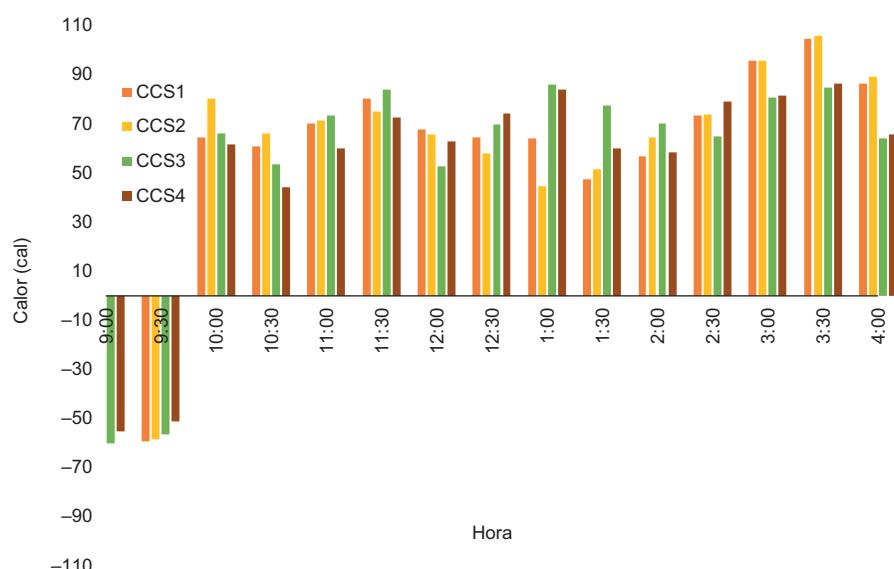


Fig. 9. Promedio de gradiente de pérdidas y ganancias de calor en el sistema con calentamiento solar.

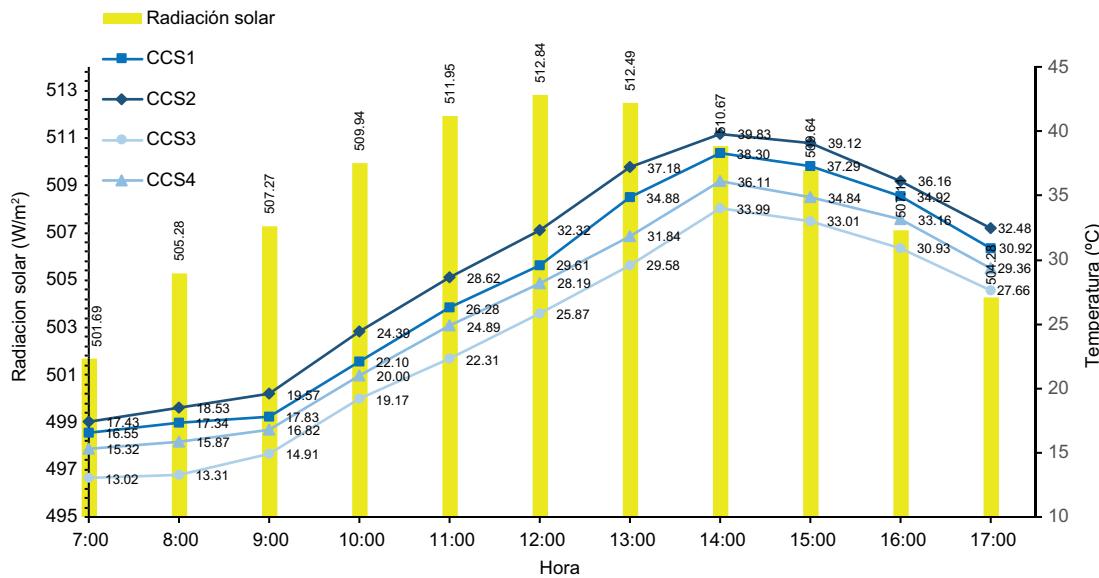


Fig. 10. Comportamiento de la radiación solar promedio y su influencia en los colectores solares.

transferencia de calor no es instantánea y la temperatura del agua aumenta gradualmente durante la tarde. Por otro lado, el promedio más bajo fue de 33.99 °C, lo cual puede explicarse por la posición de la CCS3. Durante las horas de la mañana, la radiación no llegaba completamente al colector debido a una sombra generada por el invernadero, lo que obstaculizaba y reducía la captación de radiación solar.

Estos resultados destacan la importancia de la ubicación y orientación de los colectores solares para maximizar la eficiencia de captación de radiación solar y, consecuentemente, la transferencia de calor al sistema de compostaje.

DISCUSIÓN

La temperatura es un índice crucial a controlar durante el proceso de compostaje, ya que afecta el metabolismo, la interacción microbiana y la eficiencia del proceso, lo que se refleja en la degradación orgánica (Onwosi et al., 2017, He et al. 2022). En las composteras CCS no se alcanzaron temperaturas superiores a 40.5 °C durante la fase termofílica. Mientras que estudios realizados por Awasthi et al. (2020), Hu et al. (2020) y Vargas et al. (2019) reportaron temperaturas superiores a 55 °C, debido principalmente a las condiciones climáticas y los tratamientos aplicados durante el compostaje.

Además, temperaturas superiores a 65 °C reducen muchas formas de microorganismos, incluyendo aquellos de interés, limitando la velocidad de

descomposición (Sayara et al. 2020). El consorcio microbiano responsable de la degradación de la materia orgánica en el compostaje incluye bacterias ácido-lácticas, fotosintéticas, filamentosas, levaduras y actinomicetos Gram positivos (Zhao et al. 2022). En esta investigación, los EM presentes en el compost fueron bacterias ácido-lácticas, bacterias fototróficas, levaduras y enzimas.

Las bajas temperaturas tienen un impacto negativo en el desarrollo del compost (Henry et al. 2020, como se observó en las composteras SCS. Cuando la temperatura ambiental y del compost es inferior a 20 °C, el crecimiento microbiano y el metabolismo se ralentizan o incluso se detienen, creando una fase de latencia debido a la falta de actividad microbiana (Henry et al. 2020. Esto favorece el impacto negativo de patógenos, semillas de malas hierbas y larvas de moscas (Niwagaba et al. 2009).

Es fundamental diseñar el sistema con colectores solares expuestos directamente a los rayos solares. Los autores Xu et al. (2024) sugieren emplear sensores en un panel solar que permitan seguir la dirección del sol, aprovechando al máximo la energía solar. En este estudio, los colectores de las composteras CCS1 y CCS3 no recibieron radiación solar directa debido a su posición, lo que afectó su desempeño. Durante la primera fase de compostaje, se observó un descenso en los valores de pH en las composteras CCS y SCS debido a la producción excesiva de ácidos orgánicos (Cao et al. 2022). Este comportamiento también fue reportado por otros autores (Sundberg et al. 2004, Mo et al. 2023).

Es crucial superar rápidamente la fase de pH bajo y asegurar que el compostaje se realice a un pH neutro o alcalino (Sundberg et al. 2013). En caso contrario, se recomienda la aplicación de cal para estabilizar el pH hasta valores neutros (Sasaki et al. 2003). Los valores elevados de pH registrados en las composteras CCS se atribuyen a la mineralización de proteínas, aminoácidos y péptidos, produciendo amoníaco (Jiménez-Delgadillo et al. 2018). La humedad es un aspecto clave para un compostaje eficiente, permitiendo mayor eficiencia y menor impacto ambiental (Moncks et al. 2022). El contenido de humedad favorable para la descomposición biológica suele estar entre el 50 y el 70 % (Richard et al. 2002, Liang et al. 2003).

En las composteras CCS y SCS, la humedad inicial fue superior al 70 % debido a los residuos orgánicos, provocando la descarga de agua libre como lixiviado, que contiene altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, generando pérdida de nutrientes (Li et al. 2021). Sin embargo, se observó una mayor salida de lixiviados en las composteras SCS. Un contenido de humedad excesivamente alto reduce la porosidad del compost debido a la matriz fácilmente comprimida, inhibiendo la transferencia de oxígeno y provocando anoxia, lo que resulta en una desaceleración de la descomposición y un aumento de la emisión de olores (Wei et al. 2014). En las composteras CCS y SCS, la humedad inicial fue superior al 70 % debido a los residuos orgánicos, provocando la descarga de agua libre como lixiviado, que contiene altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, generando pérdida de nutrientes (Li et al. 2021).

En cuanto a las características químicas del compost, la CE estuvo entre 10.2 y 13.5 dS/m, superando la normativa chilena. Este aumento de CE puede deberse a la presencia de sales (Lin et al. 2020). Los valores de nitrógeno oscilaron entre 2.1 % y 3.7 %, y la pérdida de nitrógeno es común por la volatilización de amonio y la salida de lixiviados (Chen et al. 2014). Padilla et al. (2017) reportaron un 1.8 % de nitrógeno, similar al porcentaje obtenido en esta investigación. Los valores de fósforo y potasio fueron similares a los obtenidos por Padilla et al. (2017) y Portilla (2022), con 0.74 y 0.58 % de fósforo, y 2.2 y 0.54 % de potasio, respectivamente. Este aumento de nutrientes durante el compostaje podría deberse a la gran pérdida de carbono durante la descomposición continua de la materia orgánica y la actividad microbiana, que contribuyen a la acumulación de nutrientes (Jamaludin et al. 2017). Según Medina Lara et al. (2018), la relación C/N de un compost normal tarda en disminuir. Esto debido al exceso de

nitrógeno disponible, lo que provoca mayor pérdida de amoníaco (Pagans et al. 2006). En el estudio, la relación C/N fue de 30:1 en las ocho composteras inicialmente y disminuyó durante el proceso, hasta llegar a 14.4 y 14.2, respectivamente.

Finalmente, respecto al comportamiento de la radiación, se alcanzó 512.84 W/m². Según Oviedo (2006), las horas de mayor radiación solar son a partir de las 10:00 h, con el pico de radiación entre las 11:30 y 12:30. Sin embargo, en esta investigación, la temperatura más alta del fluido caloportador se registró a las 14:00 h, debido a la lenta transferencia de calor en el sistema. Según Çomaklı et al. (2012) and the maintenance costs are nearly zero. Using the solar energy for solar water heating (SWH, el sistema solar de calentamiento de agua es el método más popular y económico para aprovechar la energía solar con bajo costo de mantenimiento. El rendimiento de los colectores depende de varios factores: radiación solar, temperatura ambiental, temperatura del agua de entrada, velocidad del viento y caudal de circulación (Navntoft y Paz Cristófalo 2019).

CONCLUSIÓN

El sistema de compostaje con calentamiento solar mediante colectores solares demostró ser eficiente en la elaboración de compost, logrando obtener el producto final en 45 días. En comparación, el compost sin calentamiento solar, expuesto a la intemperie, se obtuvo en 60 días. Esto indica que el sistema tiene una eficacia del 75 % en la elaboración de abonos orgánicos (compost) en zonas altoandinas. La calidad del compost cumple en cuanto a materia orgánica, nitrógeno y la relación C/N de la normativa estándar utilizada.

Los colectores solares del sistema fueron eficientes en el incremento del calor dentro del sistema, alcanzando temperaturas entre 33.99 °C y 39.83 °C, con ganancias de calor de entre 86.5 y 106.5 calorías. Además, se demostró que los colectores CCS2 y CCS1 captan mayor radiación solar debido al enroamiento concéntrico del colector solar.

Conflictos de intereses:

Los autores declaran que no tienen intereses financieros ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Fuentes de financiación

El proyecto fue autofinanciado por los autores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Dios por todo lo que es y representa en nuestras vidas. Asimismo, mismo agradecemos a la Universidad Peruana Unión por la formación académica impartida y por habernos permitido hacer uso de sus instalaciones para la realización de la investigación. Finalmente, a M. en E. Claudio M. Amescua-García (Editor Ejecutivo) y a la M. en C. Irene Romero-Nájera (Editora Asistente), así como a los revisores anónimos de la RICA por su orientación y comentarios, que permitieron mejorar significativamente nuestro manuscrito.

REFERENCIAS

- Aquino Larico E. R. (2018). Determinación de la energía solar para el diseño bioclimático de viviendas en la ciudad de Juliaca región Puno. Revista de Investigaciones 7 (1), 410-421. <https://doi.org/10.26788/riegp.2018.1.66>
- Awasthi M. K., Duan Y., Awasthi S. K., Liu T., Chen H., Pandey A., Zhang Z. y Taherzadeh M. J. (2020). Emerging applications of biochar: Improving pig manure composting and attenuation of heavy metal mobility in mature compost. Journal of Hazardous Materials 389, 122116. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122116>
- Bohórquez A. (2013). Evaluación de la calidad del compost producido partir de la molienda de caña de azúcar en la compañía Riopaila Castilla, Valle del Cauca, Colombia. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia, 120 pp.
- Blas L. P. (2020). Manejo de residuos sólidos domiciliarios en la gestión municipal en la Comunidad de Tanta. Tesis de Licenciatura. Universidad Ricardo Palma. Tanta, Lima, Perú, 116 pp.
- Çomaklı K., Çakir U., Kaya M. y Bakirci K. (2012). The relation of collector and storage tank size in solar heating systems. Energy Conversion and Management 63, 112-117. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.01.031>
- Chen Y., Yu F., Liang S., Wang Z., Liu Z. y Xiong Y. (2014). Utilization of solar energy in sewage sludge composting: Fertilizer effect and application. Waste Management 34 (11), 2014-2021. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.06.029>
- Castañeda T. y Rodríguez J. P. (2017). Modelo de aprovechamiento sustentable de residuos sólidos orgánicos en Cundinamarca, Colombia. Universidad y Salud 19 (1), 116-125. <https://doi.org/10.22267/rus.171901.75>
- Calderón L. y Morillo G. (2019). Análisis de la influencia de los tratamientos térmicos (recocido y revenido), en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-t651 mediante ensayos de tracción. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito. Quito, Ecuador, 83 pp.
- Cao Y., Gu J., Zhang J., Chen B., Xu Y., Liu D., Hu H. y Huang H. (2022). Reduced pH is the primary factor promoting humic acid formation during hyperthermophilic pretreatment composting. Journal of Environmental Management 316, 115215. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115215>
- FEA (1993). Untersuchungsmethoden und güteüberwachung von komposten. Federal Environment Agency. Österreichisches Normungsinstitut. Berlin, Alemania, 16 pp.
- Gabriel C. (2019). Evaluacion de las propiedad mecanicas de la aleación de aluminio 2024 de uso comercial expuesta a fragiliación por hidrógeno. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería de Procesos. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Arequipa, Perú, 95 pp.
- Henry A., Maung C. E. H. y Kim K. Y. (2020). Metagenomic analysis reveals enhanced biodiversity and composting efficiency of lignocellulosic waste by thermoacidophilic effective microorganism (tEM). Journal of Environmental Management 276, 11252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111252>
- Hu J., Yang Z., Huang Z., Li H., Wu Z., Zhang X., Qin X., Li C., Ruan M., Zhou K., Wu X., Zhang Y., Xiang Y. y Huang J. (2020). Co-composting of sewage sludge and *Phragmites australis* using different insulating strategies. Waste Management 108, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.012>
- He J., Zhu N., Xu Y., Wang L., Zheng J. y Li X. (2022). The microbial mechanisms of enhanced humification by inoculation with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trichoderma longibrachiatum* during biogas residues composting. Bioresource Technology 351, 126973. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126973>
- Jamaludin S. N., Abdul Kadir A. y Azhari N. W. (2017). Study on NPK performance in food waste composting by using agricultural fermentation. MATEC Web of Conferences 103, 8. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710305015>
- Jiménez-Delgadillo R., Valdés-Rodríguez S. E., Olalde-Portugal V., Abraham-Juárez R. y García-Hernández J. L. (2018). Efecto del pH y temperatura sobre el crecimiento y actividad antagónica de *Bacillus subtilis* sobre *Rhizoctonia solani*. Mexican Journal of Phytopathology 36 (2), 256-275. <https://doi.org/10.18781/rmex.fit.1711-3>
- Jia X., Qin X., Tian X., Zhao Y., Yang T. y Huang J. (2021). Inoculating with the microbial agents to start up the

- aerobic composting of mushroom residue and wood chips at low temperature. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4), 105294. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105294>
- Lin H., Ye J., Sun W., Yu Q., Wang Q., Zou P., Chen Z., Ma J., Wang F. y Ma J. (2020). Solar composting greenhouse for organic waste treatment in fed-batch mode: Physicochemical and microbiological dynamics. *Waste Management* 113, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.025>
- Li M. X., He X. S., Tang J., Li X., Zhao R., Tao Y. Q., Wang C. y Qiu Z. P. (2021). Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting. *Chemosphere* 264 (111), 128549. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128549>
- MINAM (2013). Línea base ambiental de la cuenca del lago Titicaca. Ministerio del Ambiente. Informe. Lima, Perú, 85 pp.
- Medina J. y Paricaguan B. (2013). Caracterización química de tres residuos orgánicos provenientes del Hipódromo Nacional de Valencia. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Valencia, Estado de Carabobo, Venezuela, 61-69 pp.
- Moreno C. C. (2017). Radiación Térmica: construyendo la identidad entre luz y calor. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencia y Tecnología. Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia, 1-95 pp.
- Medina Lara M. S., Quintero Lizaola R., Espinosa Victoria D., Alarcón A., Etchevers Barra J. D., Trinidad Santos A. y Conde Martínez F. V. (2018). Production of a compost accelerator inoculant. *Revista Argentina de Microbiología* 50 (2), 206-210. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2017.03.010>
- Moncks P. C. S., Corrêa K. L. C., Guidoni L., Moncks R. B., Corrêa L. B., Lucia T., Araujo R. M., Yamin A. C. y Marques F. S. (2022). Moisture content monitoring in industrial-scale composting systems using low-cost sensor-based machine learning techniques. *Bioresource Technology* 359, 127456. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127456>
- Mo J., Xin L., Zhao C., Qin Y., Nan Q., Mei Q. y Wu W. (2023). Reducing nitrogen loss during kitchen waste composting using a bioaugmented mechanical process with low pH and enhanced ammonia assimilation. *Bioresource Technology* 372, 128664. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128664>
- NCh (2004). Norma Chilena Oficial NOM-2880-0F-2004. Compost - Clasificación y requisitos. Instituto Nacional de Normalización. Comisión Panamericana de Normas Técnicas. Santiago, Chile. 29 de abril de 2004.
- Niwagaba C., Nalubega M., Vinnerås B., Sundberg C., y Jönsson H. (2009). Bench-scale composting of source-separated human faeces for sanitation. *Waste Management* 29 (2), 585-589. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.022>
- Navntoft C. y Paz-Cristófalo M. (2019). Introducción a la energía solar térmica. 2a ed. Secretaría de Energía. Buenos Aires, Argentina, 64 pp.
- Oviedo M. A. C. (2006). Validación del método SODIS como alternativa para la desinfección del agua en la ciudad de Catacamas, departamento de Olancho. Tesis de Licenciatura. Universidad Zamorano. Zamorano, Honduras, 66 pp.
- Ortiz Perez D. A. y González Chávez T. P. (2015). Tratamiento de los residuos sólidos orgánicos del mercado central Virgen de Fátima Huaraz- Ancash, optimizando el proceso de compostaje. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias del Ambiente. Universidad Nacional Santiago Antúnes de Mayolo. Ancash, Perú, 212 pp.
- Onwosi C. O., Igbokwe V. C., Odimba J. N., Eke I. E., Nwankwoala M. O., Iroh I. N. y Ezeogu L. I. (2017). Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management* 190 (4), 140-157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.051>
- Pagans E., Barrena R., Font X. y Sánchez A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere* 62 (9), 1534-1542. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.06.044>
- Padilla F. M., Peña-Fleitas M. T., Fernández M. D., Moral F., Thompson R. B. y Gallardo M. (2017). Responses of soil properties, crop yield and root growth to improved irrigation and N fertilization, soil tillage and compost addition in a pepper crop. *Scientia Horticulturae* 225 (11), 422-430. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2017.07.035>
- Portilla R. (2022). Microorganismos eficientes en la producción de compost a partir de residuos orgánicos en Chuquibambilla - Grau. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. Abancay, Perú, 131 pp.
- Roig A., Paredes C. y Bernal M. P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Tecnología Bioambiental* 78 (3), 301-308. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00031-1)
- Richard T. L., Hamelers H. V. M., Veeken A. y Silva T. (2002). Moisture relationships in composting processes. *Compost Science and Utilization* 10 (4), 286-302. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702093>
- Román P., Martínez M. y Pantoja A. (2015). Manual de compostaje del agricultor. 2a ed. FAO, Santiago, Chile, 112 pp.

- Quispe Huamán L. y Sotomayor Alzamora G. (2022). Determinación y análisis temporal de la radiación solar global en el Altiplano de Puno. *Revista Chilena de Ingeniería* 30 (1), 69-81. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052022000100069>
- Sasaki N., Suehara K. I., Kohda J., Nakano Y. y Yano T. (2003). Effects of C/N ratio and pH of raw materials on oil degradation efficiency in a compost fermentation process. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 96 (1), 47-52. <https://doi.org/10.1263/jbb.96.47>
- Sundberg C., Smårs S. y Jönsson H. (2004). Low pH as an inhibiting factor in the transition from mesophilic to thermophilic phase in composting. *Bioresource Technology* 95 (2), 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.016>
- Sundberg C., Yu D., Franke-whittle I., Kauppi S., Smårs S., Insam H., Romantschuk M. y Jönsson H. (2013). Effects of pH and microbial composition on odour in food waste composting. *Waste Management* 33 (1), 204-211. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.017>
- Sayara T., Basheer-Salimia R., Hawamde F. y Sánchez A. (2020). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy* 10 (11), 1838. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111838>
- SENAMHI (2023). Comportamiento de heladas y friajes a nivel nacional 2023. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Lima, Perú, 42 pp.
- TMECC (2002). Test method for electrical conductivity. Test Methods for the Examination of Composting and Compost. US Composting Council. Virginia, EUA, 9 pp.
- Vergara S. E. y Tchobanoglous G. (2012). Municipal solid waste and the environment: A global perspective. *Annual Review of Environment and Resources* 37, 277-309. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-050511-122532>
- Vargas O., Trujillo J. y Torres M. (2019). El compostaje, una alternativa para el aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia* 23 (2), 123-129.
- Wei L., Shutao W., Jin Z. y Tong X. (2014). Biochar influences the microbial community structure during tomato stalk composting with chicken manure. *Bioresource Technology* 154, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.022>
- Wan X., Xia T., Li Y., Sun Z., Liu X. y Li T. (2023). Study on a novel water heat accumulator below the north roof in Chinese solar greenhouse: System design. *Applied Thermal Engineering* 234, 121316. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121316>
- Xu G., Nie S. y Xiong Z. (2024). Research on PV array reconstruction and full-cycle maximum power point tracking technology of space solar power station. *Space Solar Power and Wireless Transmission* 1 (2), 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.sspwt.2024.09.004>
- Zhang L. y Sun X. (2016). Improving green waste composting by addition of sugarcane bagasse and exhausted grape marc. *Bioresource Technology* 218, 335-343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.097>
- Zhao H., Li S., Jiang Y., Wang D., Wang H. y Dou X. (2022). Independent and combined effects of antibiotic stress and EM microbial agent on the nitrogen and humus transformation and bacterial community successions during the chicken manure composting. *Bioresource Technology* 354, 127237. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127237>