

Evaluación del co-compostaje de lodos cloacales con pulpa de café, para su aprovechamiento en Costa Rica

Assessment of sewage sludge co-composted with coffee pulp to take advantage in Costa Rica

Daylin Vega Mojica

Universidad Técnica Nacional, Vicerrectoría de Extensión y Acción Social, Sede del Pacífico, Costa Rica.

dvega@utn.ac.cr

<https://orcid.org/0000-0001-6444-0089>

Marina González-Polo

Universidad Nacional del Comahue, INIBIOMA, CONICET, Río Negro, Argentina

marina.gonzalezpolo@comahue-conicet.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-5525-3836>

María Eugenia Beily

Instituto de Microbiología y zoología Agrícola, Laboratorio de transformación de residuos e Instituto

Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, Argentina

beily.maria@inta.gob.ar

<https://orcid.org/0000-0002-9212-0530>

Referencia/ reference:

Vega, D., González-Polo, M. y Beily, M. (2023). Evaluación del co-compostaje de lodos cloacales con pulpa de café, para su aprovechamiento en Costa Rica. *Yulök Revista de Innovación Académica*, Vol.7 (2), 13-29. <https://doi.org/10.47633/yulk.v7i2.595>

Recibido: 26 de abril 2023

Aceptado: 5 de junio 2023

13

Resumen

Con el fin de dar un aprovechamiento a los lodos cloacales en Costa Rica y realizar un primer co-compostaje de su clase en el país, se realizó un ensayo de co-compostaje por 150 días en la provincia de Heredia. **Objetivo:** Comparar el tratamiento de una mezcla de lodos cloacales con dos tipos de estructurantes, con y sin pulpa de café, evaluando las diferencias en el proceso y la calidad del producto final. **Metodología:** Los tratamientos con pilas aireadas aeróbicas consistieron en tres pilas testigo compostando lodo cloacal y restos de poda triturado como estructurante (T, % v/v 35% de lodo cloacal y 65% material estructurante) y tres pilas con un tratamiento de co-compostaje con pulpa de café (PL, % v/v 25% de lodo cloacal, material estructurante con 35% de pulpa de café y 40% de restos de poda triturado), creadas con un volumen aproximado de 3 m³; a las que se le realizaron ensayos físico-químicos (T, %H, pH, metales), microbiológicos (coliformes fecales, salmonella y helmintos), pruebas de madurez y estabilidad. **Resultados:** Muestran que ambos tratamientos logran un biosólido estable para su posterior uso agrícola. El co-compostaje de lodos cloacales en mezcla con pulpa de café cumple parámetros de calidad para su uso como enmiendas siendo clasificado como clase A según los parámetros de la U.S.EPA, sin encontrar diferencia en el análisis estadístico al comparar la evolución del proceso y ni en la calidad del producto final entre tratamientos (T y PL).

Palabras clave: Tratamiento de aguas residuales, lodos activados, residuo, pulpa de café, biosólidos, suelo.

Abstract

In order to make use of sewage sludge in Costa Rica and to carry out the first co-composting of its kind in the country, a 150-day co-composting trial was carried out in the province of Heredia. **Objective:** to compare the treatment of a mixture of sewage sludge with two types of structuring agents, with and without coffee pulp, evaluating the differences in the process and the quality of the final product. **Methodology:** The treatments with aerobic aerated piles consisted of three control piles composting sewage sludge and shredded pruning remains as structuring material (T, % v/v 35% sewage sludge and 65% structuring material) and three piles with a co-composting treatment with coffee pulp (PL, % v/v 25% sewage sludge, structuring material with 35% coffee pulp and 40% shredded pruning remains), created with an approximate volume of 3 m³; These were subjected to physicochemical (T, %H, pH, metals), microbiological (fecal coliforms, salmonella and helminths), maturity and stability tests. **Results:** Show that both treatments achieve a stable biosolid for subsequent agricultural use. The co-composting of sewage sludge mixed with coffee pulp meets quality parameters for use as amendments, being classified as class A according to U.S.EPA parameters, with no difference found in the statistical analysis when comparing the evolution of the process and the quality of the final product between treatments (T and PL).

Keywords: sludge, co-composting, coffee pulp, soil amendment, biosolids.

Introducción

El tratamiento de las aguas residuales y la gestión de los lodos producidos durante el proceso son problemas globales, que implican un gran desafío (OMS & ONU, 2018). En Costa Rica, junto con inversiones consideradas dentro de la agenda de saneamiento al 2030, se denota la evidente necesidad de tratamiento de volúmenes cada vez más grandes de los lodos cloacales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del tipo domiciliar.

En las mejoras hacia una economía circular se busca dar valor a los productos, los materiales o los recursos, de modo que se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, para reducir así al mínimo la generación de residuos. A nivel mundial, la disposición en relleno sanitario de lodos cloacales ha disminuido, destinando los biosólidos a incineración, uso agrícola o como mejorador de suelos (Mazzarino & Satti, 2012). Los administradores de la PTAR en estudio pagan por el transporte y disposición final en un relleno sanitario de los lodos cloacales, lo cual implica un costo monetario, además de disminuir la vida útil de éstos, aumentando las externalidades asociadas al tratamiento de las aguas residuales.

Por otro lado, la producción de café continúa siendo una de las actividades agroindustriales más desarrolladas en Costa Rica. En la cosecha 2019-2020 se produjeron en C.R. unas 1.915.959 fanegas de café (1 fanega= 248 kg de café en grano). Aproximadamente, el 40% del peso del fruto es pulpa, por lo que es el subproducto más voluminoso de esa industria (Hafner et al., 2018). Conforme a lo expuesto, esta investigación tiene una componente de innovación ambiental, principalmente en condiciones climáticas de Costa Rica al ser el primer co-compostaje de lodos cloacales que se realiza en el país. Además, se contó con el apoyo de investigadoras argentinas que han desarrollado experiencias de co-compostaje en esa nación.

El co-compostaje es un proceso biotecnológico que degrada aerobiamente residuos orgánicos, usando más de una materia prima. Uno de los ejemplos de co-compostaje más utilizados en otros países es el del co-compostaje de lodos cloacales con la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Riera, 2019); en cambio el compostaje tradicional solo procesa un tipo de materia prima como por ejemplo el compostaje de residuo sólidos urbanos. En el presente trabajo se utilizaron dos tratamientos: 1) Testigo (T) y 2) co-compostaje de lodos cloacales con pulpa de café (PL); en donde se utilizó para T un 35% (% v/v) de lodo cloacal y 65% material estructurante con restos de poda triturados y, para PL un 25% de lodo cloacal, material estructurante con 35% de pulpa de café y 40% de restos de poda triturados. Con el fin de evaluar la calidad

final de los dos productos finales y determinar si cumplen con los requerimientos normativos para ser aplicados a suelos.

Metodología

Generalidades

El sitio de estudio se ubica en Costa Rica, en la provincia de Heredia. La localización de la PTAR donde se procesaron los lodos para su estabilización, se observa en la Figura 2.1.1. El proyecto se desarrolló en conjunto con la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH). La PTAR se localiza cerca de un polo industrial (Figura 2.1.1), bajo el régimen de zona franca. Sin embargo, la zona franca tiene su propio sistema de tratamiento de aguas, por lo que la PTAR de estudio no recibe aguas del tipo industrial (Navarro, 2020).

Las pilas de co-compostaje se conformaron para conseguir realizar los dos objetivos del proyecto, los cuales se detallan a continuación.

Ensayo de compostaje

Para llevar a cabo los ensayos de compostaje y co-compostaje, las etapas de montaje, control y análisis se detallan a continuación:

Montaje de las pilas

Los ensayos fueron planteados con dos tratamientos, cada uno con tres réplicas (n=3), conformando un total de 6 pilas con forma de pirámide cuadrangular. Los tratamientos planteados fueron:

- Tratamiento testigo (T): Con 35% de lodo cloacal y 65% material estructurante (restos de poda triturados).
- Tratamiento de co-compostaje (PL): 25% de lodo cloacal, 35% de pulpa de café y 40% de restos de poda triturados.

El montaje de las pilas de compostaje y co-compostaje se realizó de manera manual con lodos cloacales de seis días de secados, pulpa de café recién chancado y restos de poda triturado. La humedad que tenían las pilas al momento de armado rondaba el orden de 50-60 %. Las pilas fueron realizadas con las medidas de 2 m de largo, por 1,6 m de ancho y que tuvieran una altura mínima de 1 m (buscando un volumen final mínimo de 3 m³).

El ensayo fue montado en un sitio techado. El mismo, fue iniciado durante la época seca (febrero) y culminó en

Tabla 1. Objetivos del proyecto

| Objetivo | Acciones | Técnica |
|---|--|--|
| -Contrastar el tratamiento de lodos cloacales en pilas aeróbicas con co-compostaje de restos de poda triturados y pulpa de café como co-sustrato, respecto al compostaje únicamente con restos de poda y lodo cloacal, sin mezcla para la definición del tratamiento más eficiente. | -Realizar las pilas de compostaje con los 2 tratamientos planteados. -Seguimiento del proceso de compostaje mediante la medición de diferentes parámetros, tanto in situ como mediante el análisis fisicoquímico y microbiológico en laboratorio. | -Análisis de Coliformes Fecales, salmonella y huevos de helmintos en abonos orgánicos sólidos. -Prueba de estabilidad con el índice respirométrico estático. -Análisis químico completo para abonos orgánicos (C,N,CN,P,-Ca,Mg,K,Cu,Fe,Zn,Mn,B,S,pH,-CE y %H). |
| Objetivo | Acciones | Técnica |
| - Evaluar la calidad final de los biosólidos obtenidos, para corroborar si el lodo cloacal tratado logra la calidad adecuada para ser utilizados como acondicionadores de suelos en la región. | -Revisión y evaluación de los resultados fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos en el producto final, para compararlos con los requisitos de calidad de biosólidos que indica la legislación costarricense. | -Revisión de la legislación vigente. -Prueba índice de germinación (ensayo de madurez del compost). |

época lluviosa (agosto) del año 2020. Durante ese periodo la temperatura ambiente osciló entre los 301,15 – 311,75 K (decir 18,1 - 28,6 °C). La precipitación media mensual osciló entre 16,8 y 251 mm.

Variables medidas con sensores in situ

En las pilas de compostaje, se evaluaron diariamente la humedad y la temperatura. En base a los valores obtenidos de estas dos variables se tomaron las decisiones de manejo de las pilas como el volteo, el riego (para mantener la humedad) y la toma de muestras para la determinación de la evolución del proceso.

Las mediciones de temperatura y humedad se realizaron con un sensor que fue instalado con en una placa de Arduino®, que reportaba las mediciones diarias por medio de mensajes de texto a un celular. Todos los sensores fueron cableados dentro de un tubo de PVC (con el fin de protegerlos de la intemperie). Los sensores fueron colocados a 0.20 m de profundidad en una pila por cada tratamiento. Además, los mismos fueron programados previamente para remitir mediciones cada cuatro horas.

El sensor de humedad seleccionado fue el FC-28 de Tx Hang electronics, un sensor accesible y de fácil implementación, que mide la humedad del suelo por la variación de su conductividad eléctrica. No tiene la precisión suficiente para realizar una medida absoluta de la humedad del suelo, pero si un procedimiento de medida aceptado (para evaluar la veracidad de los valores medidos con el sensor ver sección 2.4), ya que sólo se requirió

para controlar la necesidad de humedecimiento de pilas. El sensor no reportaba, vía mensaje de texto, el porcentaje de humedad al enviar los mensajes al teléfono, sino que enviaba un dato en ohmios que fue registrado manualmente. Los valores de la resistencia van desde 0 sumergido en agua, a 1023 ohm en el aire (o en un suelo muy seco). En un suelo ligeramente húmedo sus valores oscilan de los 600 a 700 ohm. Luego de registrar manualmente el dato en Excell, se realizó el cálculo de los porcentajes de humedad según la señal reportada por el sensor y extrapolación de valores.

Por otro lado, el sensor de temperatura elegido fue el DS18B20. Este sensor toma medidas en el rango de los 223,15 – 398,15 K (entre -55 – 125 °C). Este dispositivo tiene una incertidumbre de $\pm 273,65$ K ($\pm 0,50$ °C) entre los 263,15 – 358,15 K (rango de -10 – 85 °C). Además, al sensor se le instaló una alarma. En este ensayo la alarma fue instalada para que indicara cuando la temperatura alcanzaba los 223,15 K (60 °C).

El volteo y humedecimiento de las pilas se realizó respecto al aumento de temperatura por encima de 343,15 K (70 °C) en la fase termofílica, manteniendo el mismo humedecimiento a todas las pilas.

Entre la segunda y quinta semana se buscó que las pilas mantuvieran una humedad del 40 – 50 % y después de esa quinta semana mantener una humedad en el rango de 30 – 40 %. El volteo fue de forma manual, se empleó el uso de palas y se mantuvo debajo del espacio techado.

Tabla 2. Métodos de análisis utilizados en el laboratorio durante el desarrollo de la investigación.

| Tipo de análisis | Método | Descripción | Momento de muestreo | Referencia |
|------------------------------------|--|---|---------------------|--|
| pH | Método potenciométrico | Se pesa 0,004 kg de muestra y realiza un extracto 1:10, se utiliza electrodo electroquímico de vidrio marca HANNA Instruments modelo HI10 530 | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 001. |
| CE | Método electrométrico. | Mismo extracto para medir pH, con medidor de conductividad. | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 001. |
| %H | Método gravimétrico con pérdida de masa por secado. | Se pesa aproximadamente 0,0010 kg del material, se registra el dato de peso fresco y se ingresa a la estufa a 383,15 K (110°C) por al menos 24 horas (hasta alcanzar peso constante). | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 002. <i>Técnicas para análisis de compost.</i> Universidad Nacional del Comahue. * sensores de humedad para abono orgánico |
| C, N. | Relación Carbono: Nitrógeno | Método de Dumas Método 4 500-N | Semana 1, 10 y 20. | Método 4 500-N del <i>Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| P, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Zn, Mn, B, S | Digestión húmeda con H ₂ N ₂ y espectrofotometría de emisión óptica. | Con espectrofotómetro de emisión óptica ICP-Plasma | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 002. Lachat Instruments. 2008. |
| Coliformes Fecales | NMP | Determinación de coliformes fecales por la técnica de tubos múltiples. | Semana 10 y 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Salmonella | Método 9 260-B | Medio comercial de la marca "Biomérieux" | Semana 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Huevos de helmintos | Técnica de Telemann. | Con 0,004 kg de muestra en peso seco. | Semana 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Test de madurez | Técnica de Telemann. | Con 0,004 kg de muestra en peso seco. | Semana 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Test respirométrico | Ensayo de germinación | Según adaptación de M.C. Leconte (2 011) utilizando semillas de pepino. | Semana 20. | <i>Técnicas para análisis de compost.</i> Universidad Nacional del Comahue. |

Muestreo de las pilas

El tipo de muestreo seleccionado fue de muestra compuesta. Para ello, se tomaron muestras superficiales (en las cuatro esquinas de la pila piramidal) y en profundidad (a los 0,40 m) de cada pila para obtener una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg, la cuales fueron guardadas en bolsas de polietileno y transportadas en un tiempo no superior a una hora hasta el laboratorio seleccionado para su análisis. Además, una submuestra de 0,200 kg de muestra fue separada y guardada en otra bolsa para la determinación en el laboratorio del pH y la CE.

Variables medidas en el laboratorio

Las muestras tomadas de las pilas y el lodo cloacal fueron analizadas en el laboratorio del Centro de Investigaciones Agroalimentarias (CIA), de la Universidad de Costa Rica (UCR), sede Rodrigo Facio en San Pedro de Montes de Oca, San José. En el Cuadro 2.4.1., se muestran los tiempos de muestro y las determinaciones realizadas en el laboratorio. El muestreo de la semana 1 se corresponde con el estado inicial. En la semana 10, la etapa termófila había finalizado por lo que se muestreó para el análisis de coliformes fecales y de parámetros físico-químicos para evaluar estabilidad del compost. Finalmente, se muestreó a la semana 20 para verificar la madurez del compost en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la UTN Sede Pacífico.

Por otro lado, semanalmente se muestreó cada pila para análisis de pH y conductividad eléctrica en el laboratorio, y se tomaron las dimensiones de la pila para estimar su volumen. Este muestreo estaba planificado realizarse durante doce semanas, pero se realizó únicamente las dos primeras semanas debido al cierre de ingreso a la PTAR y el laboratorio por la pandemia COVID-19 ocurrida durante el periodo del ensayo. Y se logró resolver con las muestras enviadas al CIA, que incluyeron estos parámetros, para así finalmente tener cuatro datos de momentos distintos del proceso.

Pruebas microbiológicas

Las pruebas microbiológicas se realizaron según lo establecido en el Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos en Costa Rica y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (U.S.E.P.A.).

Para el análisis de coliformes fecales, helmintos y *Salmonella* spp., se utilizó el Standard Methods para análisis de aguas residuales (Baird & Bridgewater, 2017). El contenido de coliformes fecales se evaluó en la semana diez, luego el análisis de *Salmonella* y los huevos de helmintos se realizaron una vez terminada la etapa de maduración del compost.

Pruebas de estabilidad y madurez

Se evaluó la estabilidad con el índice respirométrico estático (Busquets et al. 2011) y para madurez se utilizó el índice de germinación según Mazzarino et al. (2015).

El índice respirométrico evalúa la evolución de CO₂ en las muestras de compost. Se pesan 0,0010 kg de muestra ajustadas a 50-60% de humedad gravimétrica y se colocan dentro de frascos herméticos de 1,5 L. Dentro de estos frascos también se colocan un recipiente con 0,010 L de NaOH 1 N (trampa de CO₂) y otro con 0,010 L de agua destilada (con el objetivo de mantener el ambiente húmedo). Los frascos se sellaron con cinta de embalar y se incubaron a 298,15 K (25 °C) durante 72 horas. También se realiza un blanco, pero sin agregado de muestra de compost. A las 24h, 48h y 72h la solución gastada de NaOH se retira de cada frasco y el exceso de NaOH se titula con HCl 0,5 N, previo precipitado de carbonatos con BaCl₂ 3N. Los frascos herméticos con las muestras de compost se airean durante 30 minutos antes de reponer la trampa de CO₂, sellar y volver a incubar.

El cálculo de la cantidad de CO₂ producida se calcula a partir de la diferencia de gasto de HCl de la muestra y el blanco. La tasa respiratoria (mg CO₂ kg⁻² h⁻¹), corregida por humedad se calcula a partir del promedio de la producción de CO₂ de los últimos dos días de incubación. Para el ensayo de germinación, se utilizaron 0,005 L de un extracto 1:10 y semillas de rabanito, incubadas 120 horas a una temperatura que osciló entre los 291,15 – 296,15 K (18-23 °C).

Pruebas fisicoquímicas

La caracterización fisicoquímica se realizó con las pruebas de caracterización de suelos y material vegetal. Los análisis realizados a las muestras de compostaje incluyeron porcentaje de humedad, pH, conductividad eléctrica, relación C/N, y análisis químico completo (incluyendo elementos traza). Todos los ensayos en el CIA se realizan con dos réplicas por muestra de pila.

Determinación de humedad

Se pesan aproximadamente 0,010 kg del material, se registra el dato de peso fresco y se ingresa a la estufa a 283,15 K (110°C) por al menos 24 horas (hasta alcanzar peso constante), posteriormente se retira de la estufa, se deja enfriar en desecadores (con gel de sílice como indicador higrométrico) por unas 3 horas, para luego volver a pesar y registrar el dato de peso seco.

Procesamiento de las muestras de compost para análisis químico

Las muestras son ingresadas a una estufa a 353,15 K (80°C) hasta alcanzar peso constante (la duración de esta etapa estará en función del grado de humedad que contenga la muestra), posteriormente son molidas y cribadas por un equipo con un tamaño de partícula de 1mm.

Determinación de pH

Se pesan 4 g de muestra seca y se realiza un extracto 1:10 al agregar 0,040 L de agua desionizada, se agita la muestra por quince minutos, se deja reposar y luego se determina el valor de pH.

Determinación de Conductividad Eléctrica

Se pesan 0,010 kg de muestra seca y molida, se agrega H₂O desionizada hasta obtener una pasta saturada. Se agita vigorosamente por 5 minutos y se deja en reposo por 30 minutos. Luego se filtra al vacío y se extrae la fase líquida. Se calibra el conductímetro y se realizan las mediciones.

Determinación de N y C total

La cuantificación de nitrógeno y carbono total se realizó por medio de un autoanalizador (marca Elementar, Analysensysteme GmbH), que opera bajo el principio analítico de la combustión seca por el método de Dumas. El procedimiento consta en la colocación dentro del equipo, para el que se debe pesar una muestra secada a 353,15 K (80°C) y molida (peso aproximado entre 85-95 mg).

Nitrógeno amoniacal, nítrico y ureico

Las determinaciones de nitrógeno amoniacal, nítrico y ureico, se preparan con muestras por extracción acuosa que pasan por medio de un analizador de Inyección de Flujo Continuo (FIA) que utiliza técnicas de análisis colorimétricas. Se utilizó el Método 4500-N del Standard Methods para análisis de aguas residuales (Baird & Bridgewater, (2017).

Determinación de P, Ca, Mg, K, S, Fe, Cu, Zn, Mn y B

Se pesan 0,005 kg de muestra seca y molida, y se coloca dentro de un envase de teflón junto con el agregado de 0,10 L de ácido nítrico concentrado. El envase se cierra herméticamente y se coloca en el rotor que será introducido en el horno digestor de microondas. Para este proceso se utiliza una secuencia que incluye tres etapas con una duración de 55 min y una temperatura máxima de 273,15 K (200 °C). Una vez terminada la digestión, el rotor se deja enfriar, se abre el envase y el contenido digerido se trasvasa cuantitativamente a un balón aforado de 0,100

L, se lleva a volumen con agua desionizada y se agita. Posteriormente, se determina la concentración de los elementos presentes en el extracto por medio de un espectrofotómetro de emisión óptica ICP- Plasma. Los resultados finales se expresan en porcentaje masa-masa (Ca, Mg, P, K, S) o en mg kg⁻¹ (Fe, Cu, Zn, Mn y B).

Análisis de datos

Los datos fueron recopilados en una bitácora de campo y digitalmente en Microsoft Excel. Los datos diarios emitidos por los sensores se ordenaron por variable según los máximos, mínimos y promedio para el ajuste de datos e implementar la prueba de significancia de la tendencia en cada tratamiento. Se realizó una curva con la variación en la temperatura y la humedad en el tiempo de la estabilización. Los datos del laboratorio del CIA se emplearon para realizar una curva con los tres puntos en el tiempo para los distintos parámetros medidos, se realizaron comparaciones entre las medias en cada tiempo de toma de muestra, usando la prueba de T Student. La prueba T de Student se utilizó como estadístico de prueba para comparar a los dos tratamientos en las pilas. El estadístico de prueba se aplicó para comprar la reducción del volumen de las pilas a lo largo del proceso de compostaje, las características fisicoquímicas de las medias de los tratamientos de pilas de lodo con y sin pulpa de café, los indicadores de patógenos de las medias de ambos tratamientos, los ensayos de estabilidad y madurez de las medias de los dos compost. Por último, se utilizó el coeficiente de variación (CV) para encontrar diferencia entre las muestras de parámetros porcentuales (porcentaje de reducción del volumen en las pilas, humedad, porcentaje de carbono). Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron los programas computacionales minitab y RStudio.

Resultados y análisis

Comparación de tratamientos de los lodos cloacales en pilas aeróbicas

En la tabla 3 se observan las diferencias de tamaño en las dimensiones de las pilas que demuestran la reducción de volumen durante los procesos de compostaje y co-compostaje. Como puede observarse, la mayor reducción de tamaño se dio en las dos primeras semanas del proceso.

En la tabla 4, muestra los porcentajes de reducción de todas las pilas de tratamiento, los cuales tienen un coeficiente de variación cercano a cero en todas las comparaciones, demostrando baja variabilidad entre los tratamientos evaluados. La reducción del volumen en las pilas durante los periodos 1-13 y 1-150, no difirió entre los tra-

tamientos. Contrariamente, los porcentajes de reducción del tratamiento T y PL difirieron significativamente entre los días 1-75. Esta situación puede explicarse, debido a que aún se mantenía materia orgánica compostable en el tratamiento PL, durante esta etapa del proceso. Sin embargo, la reducción final del volumen fue alta (87%) y similar entre los dos tratamientos.

La Figura 1 muestra el perfil de temperatura obtenido durante el tiempo ensayado para los dos tratamientos planeados. El seguimiento de este parámetro es fundamental ya que marca el inicio y finalización de las distintas etapas del proceso de compostaje. El tratamiento T presentó un comportamiento esperado, según lo reportado por otros autores (Mazzarino et al, 2015; Riera, 2019). Sin embargo, el tratamiento PL presentó un rápido ascenso de la temperatura en el tercer día (que provocó se encendiera la alarma de los 60°C) por lo cual se procedió a realizar un volteo de todas las pilas, con el fin de bajar la temperatura y así evitar la pérdida de microorganismos por exceso de temperatura. Luego de mezclar el material de las pilas, pudo verificarse una abrupta caída de la temperatura, que se recuperó rápidamente (Figura 3.1.1, Figuras 1 y 2 del anexo A) debido a la descomposición de la materia orgánica biodegradable presente en las pilas de tratamiento. Las temperaturas máximas promedio obtenidas fueron 341,15 K (68 °C) para T y de 343,15 K (70 °C) para PL, pudiendo verificar que ambos tratamientos alcanzaron la fase termofílica, logrando la higienización del material original. La fase termofílica es alcanzada más rápidamente por el tratamiento PL.

En el día 75 del proceso, ambos tratamientos parecían estables. Sin embargo, al día 90, el tratamiento PL, mostró un aumento de la temperatura, demostrando que aún quedaba materia orgánica biodegradable presente. Cuando se generaron condiciones de humedad óptimas, debido a los volteos, los microorganismos aumentaron su actividad metabólica, y se produjo el aumento de la temperatura en las pilas. El análisis estadístico mostró que la media de temperatura para T fue menor que para el tratamiento PL (Figura 3 Anexo A).

Las pilas de lodos cloacales tratados con y sin pulpa de café mostraron variaciones de humedad a lo largo del proceso, en las que influyó la humedad relativa ambiental de las condiciones climatológicas tropicales típicas del país dado que, a pesar de que el ensayo fue realizado bajo techo, las elevadas temperaturas desecan rápidamente la superficie de las pilas (Figura 4 del anexo A). Cuando la humedad descendió a menos de 40 % se debió agregar agua y voltear las pilas (ver Figura 2). Se observó que la humedad, medida con sensores, del tratamiento T fue menor que la del tratamiento PL, lo cual sugeriría que la

Tabla 3. Mediciones de tamaño en el tiempo por pila.

| Día | Dimensión | T1 | T2 | T3 | PL1 | PL2 | PL3 |
|-----|---------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| 1 | Alto (m) | 0,105 | 1,02 | 1,00 | 0,93 | 0,94 | 0,93 |
| | Ancho (m) | 0,160 | 1,65 | 1,57 | 1,60 | 1,68 | 1,66 |
| | Largo (m) | 0,220 | 2,15 | 2,05 | 2,00 | 1,90 | 1,90 |
| | Volumen (m ³) | 3,69 | 3,62 | 3,22 | 2,93 | 3,00 | 2,93 |
| 13 | Alto (m) | 0,62 | 0,63 | 0,62 | 0,58 | 0,66 | 0,57 |
| | Ancho (m) | 1,55 | 1,55 | 1,32 | 1,30 | 1,16 | 1,07 |
| | Largo (m) | 1,62 | 1,60 | 1,37 | 1,60 | 1,53 | 1,58 |
| | Volumen (m ³) | 1,56 | 1,56 | 1,12 | 1,21 | 1,17 | 0,96 |
| 75 | Alto (m) | 0,40 | 0,40 | 0,33 | 0,48 | 0,44 | 0,45 |
| | Ancho (m) | 0,94 | 1,02 | 0,99 | 0,93 | 0,91 | 0,90 |
| | Largo (m) | 1,70 | 1,80 | 1,49 | 1,63 | 1,60 | 1,64 |
| | Volumen (m ³) | 0,64 | 0,73 | 0,49 | 0,73 | 0,64 | 0,66 |
| 150 | Alto (m) | 0,43 | 0,47 | 0,48 | 0,45 | 0,44 | 0,43 |
| | Ancho (m) | 0,90 | 0,99 | 0,94 | 0,90 | 0,88 | 0,90 |
| | Largo (m) | 0,90 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,90 | 0,90 |
| | Volumen (m ³) | 0,35 | 0,47 | 0,45 | 0,41 | 0,35 | 0,35 |

Nota: T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda; PL: Tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-digestión con pulpa de café. T1, T2, T3, PL1, PL2, PL3 son la repetición de la pila según el tipo de tratamiento.

Tabla 4. Media y desviación estándar de porcentajes de reducción de volumen por tratamiento en las pilas.

| Comparación | T % | PL % | T Student |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| D1-D13 | 60,0±4,6 | 62,3±4,4 | NS |
| D1-D75 | 82,4±2,5 | 77,1%±1,8 | * |
| D1-D150 | 87,8±2,4 | 87,2%±1,6 | NS |

Nota: D1-D13 corresponde a la relación día uno con día trece, D1-D75 corresponde a la relación día uno con día setenta y cinco, D1-D13 corresponde a la relación día uno con día ciento cincuenta. T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda.; PL: tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-digestión con pulpa de café. Se indican diferencias significativas entre tratamientos para una misma fecha (*= p<0,05), NS: no significativo.

mezcla con pulpa de café conservaría mejor la humedad. Este hecho es importante, sobre todo en climas tropicales, ya que implica menos uso de agua para el humedecimiento y menos horas de trabajo en los volteos.

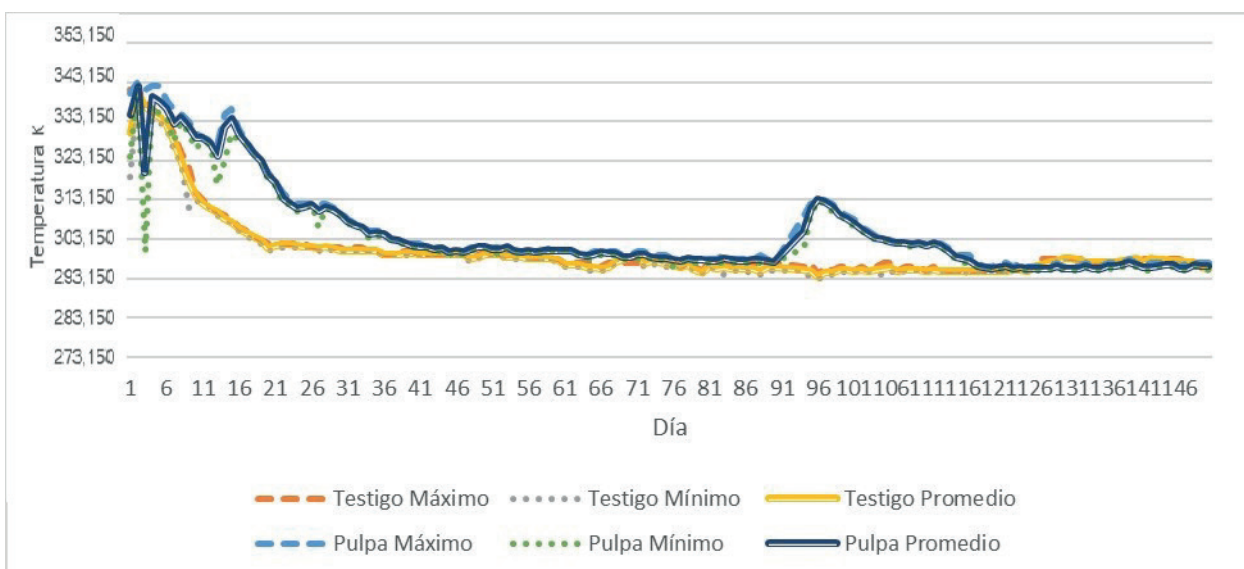
Evaluación de los lodos cloacales tratados

La velocidad a la que se logra la estabilización, y la calidad del producto final dependen de la naturaleza del material inicial y las condiciones del proceso de compostaje. La tabla 5 muestra las características físico - químicas de

se observó que el pH no se modificó en ninguno de los tratamientos a lo largo del tiempo y, se mantuvo en el rango de la neutralidad (T Student; T: $p > 0,05$ al comparar los tiempos 1 y 3).

Así mismo, se pudo verificar que el agregado de material ácido, como la pulpa de café (Hafner et al, 2018), no modificó el pH de la mezcla. El proceso de compostaje de T y co-compostaje de PL no fue afectado por variaciones en el pH y estuvo en el rango de la mayor actividad bacteriana (pH entre 6,0-7,5) y de hongos (pH entre 5,5-8,0)

Figura 1. Temperatura promedio diaria del proceso de compostaje de lodos cloacales con y sin pulpa de café.



Nota: *Las flechas color naranja indican los días de volteo y humedecimiento de las pilas.

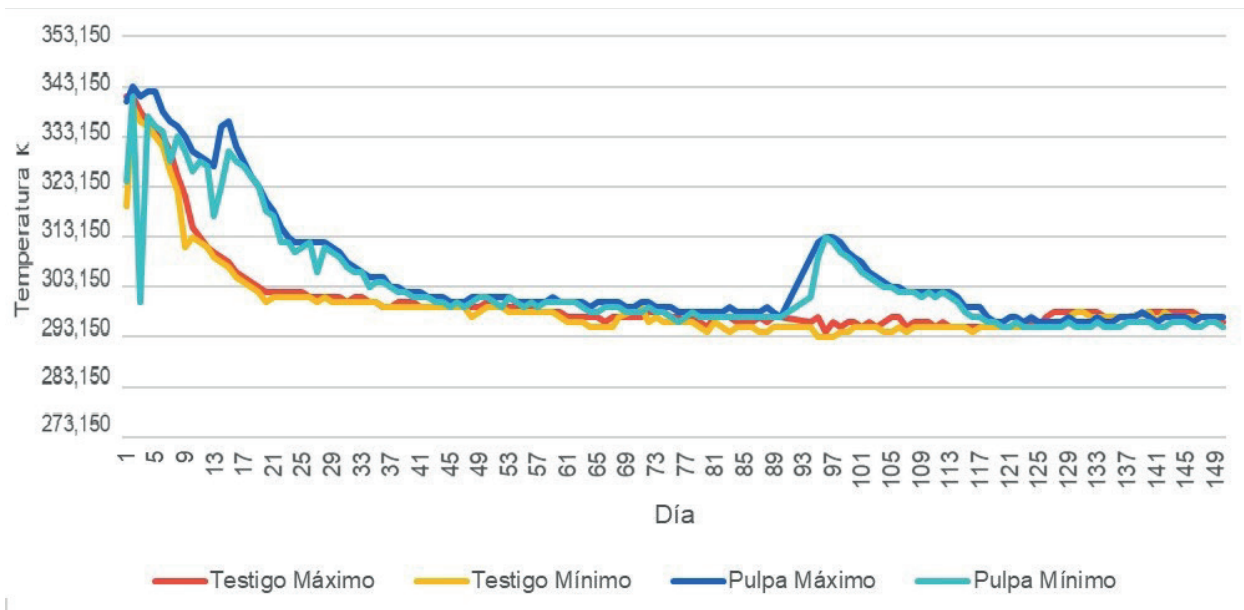
los tratamientos T y PL a lo largo del proceso; medidas en el laboratorio. Se puede observar que, solamente el coeficiente de variación del porcentaje de carbono, se acercó al valor de 1, demostrando que el primer muestreo en PL tiene la mayor dispersión de datos. Así mismo, se observó que no existieron diferencias significativas entre los tratamientos T y PL para ninguno de los parámetros evaluados durante los dos primeros muestreos. Sin embargo, en el tercer muestreo el tratamiento con pulpa presentó mayor porcentaje de humedad y de carbono (Ver tabla 5). Los procesos de compostaje de T y co-compostaje de PL iniciaron con pH cercano a 7 (muestreo 1), lo cual hace creer que la población microbiana era variada. Durante el compostaje de lodos el pH, generalmente cambia de ligeramente básico a ligeramente ácido (Banegas et al., 2007; Li et al., 2001). Sin embargo, en el presente estudio

(Román, 2013). Por lo cual, se pudo verificar que ambos tratamientos se encontraron dentro del rango recomendado para el proceso. Los tratamientos T y PL no presentaron diferencias significativas entre sí para este parámetro (ver Tabla 5).

La conductividad eléctrica (CE) aumentó ligeramente en el tiempo entre un muestreo y otro (existiendo diferencia significativa entre el muestreo 1 y 3 entre el mismo tratamiento). Esta situación podría deberse a que, durante la degradación de la materia orgánica disminuye la cantidad de agua, aumentando la concentración de sales (Li et al, 2001).

En los datos puntuales del laboratorio se encontró mayor conductividad eléctrica en las muestras finales, existiendo diferencia significativa entre el muestreo 1 y 3 (T Student, T: $p > 0,05$), esto se debe a la concentración de sales

Figura 2. Humedad promedio diaria del proceso de compostaje de lodos cloacales (T) y lodos cloacales con pulpa de café (PL).



Nota: *Las flechas color naranja indican los días de volteo y humedecimiento de las pilas.

que se produce en las pilas debido a la disminución de la masa durante el proceso de compostaje (indica tabla 4 la reducción de volumen).

La conductividad elevada se asocia a fenómenos de fitotoxicidad en el compost por altas concentraciones de sales, las cuales disminuyen la presión osmótica entre las raíces de las plantas y el sustrato de crecimiento, por lo que se ve afectada la disponibilidad de agua para la planta (Bewley & Black, 1994 en Himanen & Hänninen, 2011). La conductividad eléctrica de este producto debe de tomarse en consideración, en conjunto con la composición salina del suelo donde se aplicará la enmienda.

Varios autores discuten la validez de la relación C/N como indicador de madurez, ya que ésta depende de la relación inicial de la mezcla a compostar (Li et al., 2001). En cuanto a la relación C/N inicial de la mezcla, se estimó una relación cercana a 19 : 1, tomando en consideración la relación del lodo (C/N = 6 : 1), el dato de bibliografía para la pulpa de café (C/N = 29 : 1 en Cervantes et al. 2014) y el dato de bibliografía de restos de poda (C/N = 44 : 1 en Román et al. 2013). Por lo que se esperaba que la relación C/N inicial determinada en laboratorio fuera más alta, principalmente para el tratamiento de co-compostaje PL (ver tabla 5).

Los valores de relación C/N recomendados al inicio del compostaje se encuentran en el rango de 25: 1 – 35: 1, los valores iniciales de la relación C/N de este estudio no se encuentran en este rango. Esto puede deberse a que

las muestras fueron tamizadas en una malla n.8 (0,00238 m) previamente a la determinación de C y N en el laboratorio. Dado que el estructurante es el que mayor aporte de C realiza y, por su tamaño es excluido al someterse a tamizado, la relación C/N de la muestra puede ser menor a la esperada.

La relación C/N menor a un rango de 20: 1 - 25: 1 en el producto final es requerida, para evitar la inmovilización del nitrógeno en el suelo al que se aplique. Los valores de relación C/N en ambos productos (T y PL) cumplen este requisito, ya que en ambos tratamientos la relación fue de 7,5: 1.

Es de destacar, además, que la relación C/N pudo haberse alterado en este estudio debido a que las muestras fueron secadas a una temperatura superior (353,15 K) a la recomendada por protocolo (313,15 K). Pero esto subiría la relación C/N, por lo que haber llevado mayor trazabilidad al nitrógeno con sensores, o bien mayor cantidad de análisis de laboratorio, es una oportunidad de mejora.

En las Tablas 6 y 7 se observan los datos de los análisis de nutrientes y cationes mayoritarios en los tratamientos analizados a lo largo de los procesos de compostaje y co-compostaje. Los nutrientes más importantes, nitrógeno y fósforo, se encuentran entre los valores aceptados para enmiendas estabilizadas (según el Reglamento Técnico RTCR 485:2016. Sustancias químicas, fertilizantes y enmiendas para uso agrícola).

Tabla 5. Características fisicoquímicas de los diferentes tipos de tratamientos de pilas de lodo con y sin pulpa de café a lo largo de los procesos de compostaje y co-compostaje.

| Muestreo | Tratamiento | % | | H ₂ O | mS cm ⁻¹ | % | | Relación |
|----------|-------------|------------|------|------------------|---------------------|------------|------|-----------|
| | | HUM | | pH | CE | C | CV | C/N |
| | | Prom | CV | | | | | |
| 1 | PL | 51,6±19,6a | 0,38 | 7,4±0,3 a | 6,7±2,2 a | 17,8±10,4a | 0,58 | 9,4±0,7a |
| | T | 63,6±7,9a | 0,12 | 7,1±0,2 a | 4,8±0,4 a | 17,9±2,4a | 0,13 | 8,4±0,6 a |
| 2 | PL | 39,7±15,3a | 0,38 | 7,4±0,4 a | 9,3±2,3 a | 13,9±4,6a | 0,33 | 7,9±0,8 a |
| | T | 43,7±3,4a | 0,08 | 6,2±0,1 a | 9,9±0,2 a | 12,9±4,3a | 0,33 | 7,5±0,1 a |
| 3 | PL | 43,1±9,4a | 0,22 | 6,0±1,1 a | 11,2±0,5 a | 14,2±1,3a | 0,09 | 7,5±0,2 a |
| | T | 30,9±2,2b | 0,07 | 6,6±0,4 a | 12,9±1,7 a | 11,2±2,0b | 0,18 | 7,5±0,1 a |

Nota: T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda; PL: Tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-compostaje con pulpa de café. El ensayo uno corresponde a la semana uno, el ensayo 2 corresponde a la semana diez y el ensayo 3 corresponde a la semana veinte del proceso de tratamiento. Se indican medias y desvío estándar, y diferencias significativas entre tratamientos (T Student $p > 0,05$ para CE y pH, comparación de coeficiente de variación para humedad y C) con letras minúsculas.

La transformación del nitrógeno durante el compostaje es compleja y ocurre principalmente a través de procesos tales como la mineralización, volatilización, nitrificación, inmovilización y desnitrificación (Haug, R. 1995). El amonio se puede volatilizar como amoníaco debido a altas temperaturas, a un pH mayor a 7,5; o inmovilizarse en los cuerpos de los microorganismos evitando la pérdida de nitrógeno. Por lo general, el contenido de nitrógeno suele disminuir a lo largo del proceso de compostaje, ya que prevalece la volatilización de los compuestos del ciclo del nitrógeno, facilitado por las altas temperaturas ambientales del sitio de ensayo. En todas las pilas se observó una disminución de nitrógeno total (método Dumas) en el tiempo, (ver tabla 6 al comparar los porcentajes entre el muestreo 1 y 3, T Student; $p < 0,05$).

PoPor lo anterior, en el presente estudio, se debieron incluir mediciones del nitrógeno en su forma del ión amonio, pero debido a distintas situaciones causadas principalmente por la emergencia por el covid-19 no se pudo medir. Con estos datos se hubiese podido tener mayor información respecto a qué sucedió en las pilas, ya que se esperaba pérdida de amonio debido a la baja relación C/N inicial.

En la tabla 6. (también se puede ampliar detalle en la tabla 2B del anexo B), se puede observar que estadísticamente no se evidenciaron diferencias entre los tratamientos en los distintos muestreos para ninguno de los compuestos evaluados (P, N, K, Ca, Mg, S).

El proceso de compostaje puede concentrar o diluir los metales en el producto final. La disminución de las can-

tidades de metales se encuentra asociada la pérdida por lixiviación durante el proceso (por los riegos sucesivos). Así mismo, también puede darse el fenómeno de concentración vinculado a la disminución de la masa producida al final del proceso. Es por ello que, surge la necesidad de obtener más datos cuantitativos sobre la especiación de metales pesados en lodos de depuradora durante el compostaje, que hubiera representado mejor la evolución de las pilas. El contenido de los metales pesados medidos (ver tabla 6) se encuentra por debajo de los límites máximos permitidos para enmienda según el Reglamento Técnico RTCR 485:2016. Es importante destacar que los metales pesados no están dentro de los parámetros normados para el cumplimiento del reglamento para el manejo y disposición de lodos y biosólidos en CR N° 39316-S (Gobierno de la República de Costa Rica, 2015), pero sí en el Reglamento Técnico RTCR 485:2016 Sustancias Químicas, Fertilizantes y Enmiendas para uso agrícola, tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos contaminantes N° 39994-MAG (Gobierno de la República de Costa Rica, 2016).

De los metales medidos, el boro no presentó diferencias significativas entre tratamientos T y PL en el muestreo final (3). Sin embargo, para los otros metales evaluados sí se observó diferencia significativa entre los dos tratamientos evaluados (Tabla 7.). Con respecto al Boro, pudo observarse una disminución de 87% para PL y 48% para T en los muestreos finales respecto al inicial. Así mismo, el tratamiento T presentó un aumento del 6% en el Mn inicial respecto a final y PL un 13% de aumento de Zn inicial respecto a final. Al analizar las concentraciones de hierro se evidenció la presencia de altas concentraciones

Tabla 6. Medias y desviación estándar de nutrientes y cationes mayoritarios en las muestras de las pilas para los tratamientos a lo largo de los procesos de compostaje y co-compostaje.

| Muestreo | Tratamiento | (% masa/masa) | | | | | |
|----------|-------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | N | P | Ca | Mg | K | S |
| 1 | PL | 1,91±1,12a | 0,44±0,20a | 1,99±0,38a | 0,42±0,04a | 0,78±0,52a | 0,37±0,16a |
| | T | 2,13±0,14a | 0,59±0,04a | 1,64±0,60a | 0,37±0,06a | 0,28±0,03a | 0,43±0,05a |
| 2 | PL | 1,74±0,44a | 0,49±0,08a | 1,94±0,21a | 0,46±0,01a | 0,97±0,44a | 0,38±0,05a |
| | T | 1,32±0,44a | 0,34±0,02a | 1,47±0,21a | 0,38±0,05a | 0,45±0,21a | 0,32±0,02a |
| 3 | PL | 1,88±0,22a | 0,48±0,13a | 1,41±0,16a | 0,36±0,06a | 0,57±0,35a | 0,40±0,07a |
| | T | 1,48±0,26a | 0,34±0,03a | 1,58±0,05a | 0,41±0,01a | 0,68±0,21a | 0,29±0,02a |

Nota: T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda; PL: Tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-compostaje con pulpa de café. El muestreo uno corresponde a la semana uno, el muestreo 2 corresponde a la semana diez y el muestreo 3 corresponde a la semana veinte del proceso de tratamiento. Se indican las diferencias significativas (T Student $p < 0,05$) entre tratamientos para un mismo muestreo con letras.

de este compuesto en las pilas de compostaje (Tabla 7.). Esta situación, puede explicarse debido a que el hierro es utilizado como agente químico para la precipitación del lodo previo al secado en la PTAR (Himanen & Hänninen, 2011).

La tabla 8 muestra los valores de patógenos hallados durante los muestreos realizados. En la semana 10, luego de la fase termofílica, aún se evidenciaba presencia de coliformes fecales en las pilas evaluadas. Sin embargo, el rango observado se encontró por debajo del límite estipulado en la legislación nacional (Reglamento N° 39316-S para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos) para su clasificación como compost tipo A (debajo de 2000 UFC/g). El análisis se repitió a la semana 20 dando valores muy bajos de coliformes fecales. Así mismo, en la semana 20 se analizó la presencia de *Salmonella* spp. y Helminths, y los resultados demostraron ausencia de ambos organismos cumpliendo con los límites estipulados por la legislación costarricense; según la clasificación de la EPA, en lo referido a patógenos, estos lodos se encuadraban dentro de la clase A (ver tabla 9.). En el reglamento costarricense no se estipula la prueba de *Salmonella* spp., sin embargo, en la mayoría de la legislación internacional este parámetro es utilizado como requisito para poder utilizar la enmienda.

Las temperaturas en el centro de las pilas de tratamientos se mantuvieron por encima de los 318,15 K (45°C)

al menos nueve días (ver figura 1), lo que posibilitó la inactivación de patógenos presentes (Kone, et al., 2007). Se concluye, que, para ambos tratamientos, la fase termofílica fue efectiva para la higienización del material.

Ambos tratamientos muestran una tasa de liberación de CO₂ por debajo de los 120 mg CO₂ kg⁻¹ h⁻¹, límite establecido para considerar una muestra estable (ver tabla 10). Este decaimiento en la producción de CO₂ está asociado a la disminución de la actividad biológica producto del agotamiento del C fácilmente degradable. Por lo expuesto, puede observarse que ambos tratamientos alcanzaron la estabilidad biológica, sin embargo, el tratamiento PL, presentó valores de liberación de CO₂ significativamente menores que el tratamiento T. Esto sugiere que el tratamiento PL, presentó mayor estabilidad que el T, demostrando que la adición de otro co-sustrato favoreció la evolución de este parámetro.

El ensayo de respiración dió una desviación estándar de 47,9 CO₂ Kg⁻¹ d⁻¹ para las pilas del tratamiento T y, para las pilas del tratamiento PL una desviación de 12,7 mg CO₂ Kg⁻¹ d⁻¹; la cual es una desviación grande para las pilas testigo y dista de tener uniformidad en los datos, en las pilas con tratamiento por co-compostaje se encontraron datos más cercanos. Sin embargo, para encontrar mayor uniformidad en los datos se deberían de considerar sólo los datos de las pilas dos y tres.

Tabla 7. Medias y desviación estándar de nutrientes y metales pesados en las muestras de las pilas para los tratamientos a lo largo de los procesos de compostaje y co-compostaje.

| Muestreo | Tratamiento | (mg kg ⁻¹) | | | | |
|----------|-------------|---------------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-------------------|
| | | Fe | Cu | Zn | Mn | B |
| 1 | PL | 22 703,33 ±11 992,71 a | 90,67 ±10,26a | 404,00 ±201,08 a | 356,67 ±81,00 a | 90,00 ±14,42 a |
| | T | 23 151,67 ±2 279,34 b | 99,00 ±5,20 a | 562,67 ±41,00 b | 335,00 ±75,72 a | 34,33 ±46,48 b |
| 2 | PL | 24 023,67 ±3 337,35 a | 95,33 ±13,32 a | 403,00 ±103,44 a | 385,67 ±47,44 a | 26,67 ±5,69 a |
| | T | 27 034,00 ±3 723,50 b | 82,67 ±2,52 b | 295,00 ±8,54 b | 409,67 ±6,35 b | 19,33 ±4,73 a |
| 3 | PL | 21 027,33 ±4 600,93 a | 94,3 3±10,60 a | 487,33 ±177,55 a | 258,67 ±95,55 a | 11,33 ±6,66 a |
| | T | 25 684,33 ±1 891,74 b | 83,33 ±6,81 b | 295,0 ±41,58 b | 358,33 ±2,52 b | 18,00 ±1,73 a |

Nota: T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda; PL: Tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-compostaje con pulpa de café. El muestreo uno corresponde a la semana uno, el muestreo 2 corresponde a la semana diez y el muestreo 3 corresponde a la semana veinte del proceso de tratamiento. Se indican las diferencias significativas (T Student $p < 0,05$) entre tratamientos para un mismo muestreo con letras.

Tabla 8. Determinaciones microbiológicas en las muestras de pilas de tratadas con lodo cloacal y restos de poda con pulpa de café (PL) y sin pulpa de café (T).

| Tratamiento | Coliformes fecales 10 semanas (NMP g ⁻¹) | Coliformes fecales 20 semanas (NMP g ⁻¹) | Salmonella 20 semanas | Helmintos 20 semanas |
|-------------|--|--|--------------------------|-------------------------|
| PL | 920 | < 2 | Negativo | Negativo |
| T | 970 | < 2 | Negativo | Negativo |

Nota: * Se considera negativo en salmonella y helmintos la ausencia total de estos microorganismos.

Tabla 9. Parámetros de cumplimiento según la legislación de biosólidos.

| País | Parámetros | Tipo de biosólido | |
|------------|--|-------------------|----------------------|
| | | Clase A | Clase B |
| Costa Rica | Humedad máxima | 75% | |
| | Coliformes fecales (UFC, g ⁻¹) | 2 000 | 2 x 10 ⁶ |
| | Rango de pH | | 5 - 12, |
| | huevos de helmintos | 1 | 10 |
| Argentina | Salmonella (NMP, 4 g MS ⁻¹) | < 3 | 10 |
| | Coliformes fecales (UFC, g ⁻¹) | < 1 000 | <2 x 10 ⁶ |

La tabla 11 muestra los resultados encontrados para el ensayo de madurez. Se analizaron estadísticamente los datos de tratamientos en el programa minitab y se obtuvieron diferencias significativas con el tratamiento de co-compostaje PL al agrupar información por el método de Tukey, con intervalos de confianza del 95%. Los resultados indican que el tratamiento T posee un índice de germinación (IG) significativamente menor al tratamiento PL. Sin embargo, ambos tratamientos presentaron valores de IG superiores a 80%. Por lo que, el producto final de ambos tratamientos llegó a la madurez y se pueden usar como enmiendas de suelos.

Diversos estudios establecen que los compost con un índice de germinación (IG) superior a 80% son aptos para su uso en agricultura (Rizzo, 2020; Mazzarino et al., 2012). Así mismo, se realizó el análisis estadístico con los resultados del GRS (la germinación relativa de la semilla) y el CRS (crecimiento relativo de la raíz de la semilla). Los resultados no muestran diferencias significativas entre tratamientos para GRS y CRS.

Es importante mencionar que la legislación costarricense respecto a la evaluación de lodos tratados se encuentra desactualizada. Por lo cual debería evaluarse su actualización, con el fin de incluir más parámetros de evaluación que son de gran importancia, como son la presencia de Salmonella, la estabilidad y madurez (ver tabla 9).

Los resultados encontrados en este trabajo muestran que el agregado de un co-sustrato (la pulpa de café), además de los restos de poda triturados (el estructurante más utilizado habitualmente), mejoró en ciertos parámetros, el proceso de estabilización de lodos cloacales. Por lo que el co-compostaje se puede seguir replicando en el país y se pueden probar otros tipos de co-sustratos. Las mejoras observadas durante el proceso son: que alcanza temperaturas de etapa termofílica más rápidamente, que el contenido de algunos metales pesados es menor, y que presenta mayor estabilidad, así como mejores indicadores (IG) de madurez de la enmienda. El co-compostaje de lodos cloacales en mezcla con pulpa de café cumple parámetros de calidad para su uso como enmiendas siendo clasificado como clase A según los parámetros de la U.S.EPA, sin tener mayores diferencias con el tratamiento testigo. Finalmente, es de resaltar el beneficio ambiental del aprovechamiento de la pulpa de café en un país productor de café incentivando así la economía circular al usar estos subproductos y darles un uso beneficioso.

Tabla 10. Datos promedio y desviación estándar del ensayo de respiración en los dos tratamientos.

| Pila | Tasa promedio mg CO ₂ kg ⁻¹ h ⁻¹ | Coefficiente de variación |
|------|--|---------------------------|
| T | 117,0± 47,9 a | 0,4 |
| PL | 98,3 ± 12,7 b | 0,1 |

Nota: T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda; PL: Tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-compostaje con pulpa de café. Se indican diferencias significativas entre tratamientos.

Tabla 11. Germinación relativa, Crecimiento relativo e Índice de germinación del compost final.

| Tratamiento | GRS | CRS | IG |
|-------------|--------------|---------------|-----------------|
| PL | 96,67± 5,77 | 112,63± 15,81 | 109,47± 21,02 a |
| T | 103,70± 6,42 | 89,79± 10,52 | 93,13± 12,15 b |

Nota: Media y desvío estándar de T: tratamiento testigo con lodo cloacal y restos de poda; PL: Tratamiento de lodos cloacales y restos de poda en co-compostaje con pulpa de café. Se indican con letras distintas diferencias significativas según T Student entre tratamientos (p<0.05).

Conclusiones

- Hipótesis 1, se concluye que el co-compostaje de lodos cloacales con restos de poda solos (T) y en mezcla con pulpa de café (PL) es efectivo para estabilizar los lodos de manera que cumplan con los parámetros para una enmienda segura, con la clasificación de según biosólidos clase A, según la legislación nacional y parámetros de la US. EPA.
- Hipótesis 2, se concluye que no se encontró que el tratamiento con pulpa de café alcance mejores características del producto final que en un tratamiento sin pulpa de café. Ambos tratamientos logran un biosólido estable y maduro para su posterior uso agrícola. Respecto a la calidad en cuanto a la cantidad de nutrientes se considera una enmienda que contiene una composición aprovechable en el mejoramiento de suelos.
- Al contrastar el tratamiento de los lodos en pilas aeróbicas mezclados con pulpa de café como co-sustrato respecto al tratamiento de solo lodos con restos de poda triturados, si bien no se encontraron diferencias significativas durante la elaboración del co-compostaje se pueden destacar algunas mejoras. Por ejemplo, durante el proceso en el PL se obtuvieron mayores temperaturas y se alcanzó la fase termofílica más rápidamente que en el tratamiento T, lo cual demuestra una ventaja. Así también, las condiciones de humedad a lo largo del proceso de compostaje generaron condiciones óptimas para que los microorganismos aumentaron su actividad metabólica y hace que las pilas PL requieran de menos volteos si se considerara la toma de decisiones solamente con el monitoreo del proceso con los sensores.
- Si bien ambos compost presentan valores de IG por encima del límite establecido por la normatividad, el compost de lodos con pulpa presenta mayores valores en el índice de germinación, lo que podría significar que la calidad final de los compost obtenidos es mejor en el tratamiento PL.
- Los nutrientes como el nitrógeno y fósforo se encuentran entre los valores aceptados para enmiendas estabilizadas. Los valores para nutrientes y minerales son estadísticamente iguales entre el muestreo inicial y final, para los tratamientos T y PL; a excepción del Fe, B, Mn y Zn. El T presentó un aumento del 6% en el Mn del muestreo inicial respecto al final y PL un 13% de aumento de Zn en el muestreo inicial respecto al final, pero se tiene menos Fe y B en los muestreos finales. El contenido de metales pesados sólo se pudo evaluar para Zn y Cu, quedando por debajo de los límites permitidos por las normas. Se encontraron concentraciones altas de hierro en las pilas de compostaje (por encima de los 20 000 % m/m). Entre los

elementos medidos existen diferencias significativas entre tratamientos en el muestreo final para todos los metales medidos excepto el B.

- Por todo lo expuesto, se concluye que los lodos cloacales generados en la PTAR de la ESPH pueden considerarse un producto aprovechable. Por lo cual, co-compostar la pulpa de café con lodos cloacales y chip de poda, brinda tanto a la ESPH como a unas empresas cafeteras, la oportunidad de obtener una enmienda a partir de dos residuos por los cuales, en la actualidad, pagan para darle disposición final adecuada.
- Se recomienda que a futuro se coloquen sensores para el contenido de nutrientes y de metales pesados, para que logren generar mayor cantidad de datos, así como realizar investigaciones usando mayores porcentajes de pulpa de café que impulsen a futuro el uso de residuos agroindustriales en los procesos de co-compostaje y en la recuperación de suelos agrícolas.

Agradecimientos

Primeramente, gracias a Dios. También a los investigadores Maria Julia Mazzarino, Nicolás Riera y Ana Lorena Arias. A Don Luis Rojas y Dere Elizondo de la UTN, por su apoyo prestando el laboratorio de CB y refrescamiento del uso de minitab respectivamente.

También a personal de la ESPH, los operadores, así como a los ingenieros Luis Navarro y Ángel Hernández. A Octavio Rojas que me sugirió instalar equipo de automatización y me colaboró demasiado con ello, a las hermanas Arling y Angélica Reyes que nos ayudaron con el montaje inicial de las pilas junto al operador de la PTAR. Y por último a Jonathan Rodríguez, a quién se le ha quitado mucho tiempo de pareja en este proceso por estar en labores académicas en tiempo no laboral, gracias por todo el apoyo de siempre.

Referencias

- Baird, R., & Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington, D.C.: American Public Health Association.
- Busquets, A., Turet, J., & Barrena, R. (2011). Respirometric screening of several types of manure and mixtures intended composting for composting. *Bioresource Technology*, 102, 1367-1377. doi:-doi:10.1016/j.biortech.2010.09.011
- Gobierno de la República de Argentina (2018). *Norma técnica para el manejo sustentable de barros y*

biosólidos generados en plantas depuradoras de efluentes líquidos cloacales y mixtos cloacales-industriales.

- Gobierno de la República de Costa Rica (2015). *Reglamento para el Manejo y Disposición Final de Lodos y Biosólidos N° 39316-S*. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80715&nValor3=102487&strTipM=TC
- Gobierno de la República de Costa Rica (2016). *Reglamento Técnico RTCR 485:2016 Sustancias Químicas, Fertilizantes y Enmiendas para uso agrícola, tolerancias y límites permitidos para la concentración de los elementos contaminantes N° 39994-MAG*. Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=83141&nValor3=106622&strTipM=TC
- Graedel, T., & Allenby, B. (2010). *Industrial Ecology and Sustainable Engineering*. Pearson.
- Hafner, G., San Martín, M., & Reiser, M. (2018). *Proyecto de Apoyo a la NAMA Café Bajo en Emisiones Costa Rica*. GIZ. Stuttgart: GIZ.
- Haug, R., 1995. *Practical Handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Himanen, M., & Hänninen, K. (2011). Composting of bio-waste aerobic and anaerobic sludges-effect of feedstock on the process and quality of compost. *Bioresource Technology*, 2842-2852.
- Kone, D., Cofie, O., Zurbrugg, C., Gallizzia, K., Moser, D., Drescher, S., & Strauss, M. (2007). Helminth eggs inactivation efficiency by faecal sludge dewatering and co-composting in tropical climates. *Water Research*, 41, 9397-4402. doi:10.1016/j.watres.2007.06.024
- Mazzarino, M. & Kowaljaw, E. (2007). Soil restoration in semiarid Patagonia: Chemical and biological response to different compost quality. *Soil biology & biochemistry*, 39(7), 1580-1588.
- Lavado, R. S. 2012. Origen del compost, proceso de compostaje y potencialidad de uso. Pag 3-12 en M. J. Mazzarino y P. Satti, editoras. *Compostaje en la Argentina: Experiencias de producción, calidad y uso*. UNRN- Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires.
- Li, G., Sun, Y., Zhang, F., Wong, J., & Fang, M. (2001). Chemical evaluation of sewage sludge composting as a mature indicator for composting process. *Water, Air, and Soil Pollution*, 132: 333-345.
- Mazzarino, M. J. & Satti, P. (2012). *Compostaje en la Argentina: experiencias en producción, calidad y uso*. Editorial UNRN & Orientación Gráfica Editora.
- Mazzarino, M., Roselli, L., Satti, P. & Crego, M. (2015). *Técnicas para análisis de compost* (p. 25). Universidad Nacional del Comahue.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Tratamiento y recuperación de recursos* (Vol. 5th Ed.). (AECOM, Ed.) New York, USA: Mc Graw Hill.
- OMS, & ONU. (2018). *a. Progresos en el tratamiento y el uso de las aguas residuales de manera adecuada: Prueba piloto de la metodología de monitoreo y primeras constataciones sobre el indicador 6.3.1 de los ODS*. ONU-HABITAT. Ginebra: ONU. Recuperado de <http://apps.who.int/iris>.
- ONU. (2006). *Global Atlas of Wastewater Sludge and Biosolids Use and Disposal: Mpving forward the sustainable and welcome uses of a global resource*. (Second ed.). (ONU, Ed.) Moncton, Canada: ON-HABITAT.
- Programa Estado Nación. (2018). *Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2017*. ConsejoPEo Nacional de Rectores. San José: CO-NARE. Recuperado de <https://estadonacion.or.cr/informes/>
- Ramallo, R. (2016). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Riera, N. (2019). *Evaluación del manejo de residuos porcinos de un sistema intensivo y semi-intensivo. Su caracterización, estabilización y aplicación de efluente y compost sobre la matriz suelo y planta*. [Tesis de doctorado inédita]. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires: UBA.
- Rizzo, P. F. (2020). *Análisis integral para el manejo del guano de aves ponedoras: caracterización, bioestabilización y valorización de los productos generados*. [Tesis de doctorado inédita]. Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires: UBA.

Román, P., Pantoja, A., & Martínez, M. (2013). *Manual de compostaje del agricultor: Experiencias en América Latina*. Santiago, Chile: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>

Tognetti, C., Mazzarino, M.J. & Laos, F. (2007). Improving the Quality of Municipal Organic Waste Compost. *Bioresource Technology*, 98, 1067-1076. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.025>

TMECC, Test Methods for the Examination of Composting and Compost. 2002. USDA and U.S. Composting Council.

Anexos

| Tipo de análisis | Método | Descripción | Momento de muestreo | Referencia |
|------------------------------------|--|---|---------------------|---|
| pH | Método potenciométrico | Se pesa 0,004 kg de muestra y realiza un extracto 1:10, se utiliza electrodo electroquímico de vidrio marca HANNA Instruments modelo HI10 530 | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 001. |
| CE | Método electrométrico | Mismo extracto para medir pH, con medidor de conductividad. | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 001. |
| %H | Método gravimétrico con pérdida de masa por secado. | Se pesa aproximadamente 0,0010 kg del material, se registra el dato de peso fresco y se ingresa a la estufa a 383,15 K (110°C) por al menos 24 horas (hasta alcanzar peso constante). | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 002. <i>Técnicas para análisis de compost</i> . Universidad Nacional del Comahue. * sensores de humedad para abono orgánico |
| C, N. | Relación Carbono: Nitrógeno | Método de Dumas Método 4 500-N | Semana 1, 10 y 20. | Método 4 500-N <i>del Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| P, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Zn, Mn, B, S | Digestión húmeda con HN_3 y espectrofotometría de emisión óptica. | Con espectrofotómetro de emisión óptica ICP-Plasma | Semana 1, 10 y 20. | USDA, USCC, 2 002. Lachat Instruments. 2008. |
| Coliformes Fecales | NMP | Determinación de coliformes fecales por la técnica de tubos múltiples. | Semana 10 y 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| <i>Salmonella</i> | Método 9 260-B | Medio comercial de la marca "Biomérieux" | Semana 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Huevos de helmintos | Técnica de Telemann. | Con 0,004 kg de muestra en peso seco. | Semana 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Test de madurez | Técnica de Telemann. | Con 0,004 kg de muestra en peso seco. | Semana 20. | <i>Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed.</i> |
| Test respirométrico | Ensayo de germinación | <i>Según adaptación de M.C. Leconte (2 011)</i> utilizando semillas de pepino. | Semana 20. | <i>Técnicas para análisis de compost</i> . Universidad Nacional del Comahue. |

Evaluación del lodo cloacal tratado.

Tabla 1B. Análisis estadístico de metales y elementos traza en las muestras de las pilas con dos tratamientos a lo largo del proceso de compostaje.

| Muestreo | Dato | % masa/masa $\pm 0,03$ | | | | | | mg kg ⁻¹ $\pm 0,03$ | | | | |
|----------|-------|------------------------|------|------|------|------|------|--------------------------------|------|-------|-------|-------|
| | | N | P | Ca | Mg | K | S | Fe | Cu | Zn | Mn | B |
| 1 | CV PL | 0,59 | 0,45 | 0,19 | 0,08 | 0,67 | 0,42 | 0,53 | 0,11 | 0,50 | 0,23 | 0,16 |
| | CV T | 0,07 | 0,07 | 0,37 | 0,18 | 0,12 | 0,12 | 0,10 | 0,05 | 0,07 | 0,23 | 1,35 |
| | Z | 0,34 | 0,53 | 0,62 | 0,31 | 1,16 | 0,23 | 6,50 | 3,67 | 17,66 | 3,00 | 12,35 |
| 2 | CV PL | 0,25 | 0,17 | 0,11 | 0,01 | 0,46 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,26 | 0,12 | 0,21 |
| | CV T | 0,33 | 0,04 | 0,14 | 0,14 | 0,46 | 0,05 | 0,14 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,24 |
| | Z | 0,78 | 0,79 | 1,26 | 0,55 | 1,11 | 0,40 | 62,05 | 5,51 | 17,68 | 5,67 | 3,94 |
| 3 | CV PL | 0,12 | 0,27 | 0,12 | 0,16 | 0,62 | 0,17 | 0,22 | 0,11 | 0,36 | 0,37 | 0,59 |
| | CV T | 0,18 | 0,09 | 0,03 | 0,03 | 0,31 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,14 | 0,01 | 0,10 |
| | Z | 1,01 | 0,63 | 0,63 | 0,33 | 0,24 | 0,61 | 100,10 | 4,57 | 22,50 | 17,43 | 3,99 |