

Evaluación del compostaje a diferentes composiciones para aprovechar los residuos orgánicos domiciliarios de la ciudad de Puno para contribuir en contrarrestar el cambio climático

Evaluation of composting a different compositions to take advantage of organic waste domestic Puno city as a measure to contribute in counter climate change

Yury Hamilton Huapaya Cruz^{1,2,*}

Resumen

Se evaluó 3 pilas de compostaje a diferente composición y 1 celda de lombricultura sin lombrices, con la finalidad de determinar qué condiciones generan un abono orgánico de mayor calidad, aprovechando Residuos Orgánicos Domiciliarios (ROD), Poda de Parques y Jardines de la ciudad (PPJ) y Estiércol de Ganado Ovino (EGO), las tres pilas con un volumen de 4.5 m³; P4 tiene 100% de ROD de 0.8 m³ colocado en una celda de lombricultura y P5 tiene 100% de ROD de 2.6 m³ que se ubicó en el exterior de la planta. Para acelerar la descomposición se diseñó una infraestructura de invernadero. Después de tres meses se extrajo tres muestras de P1, P2, P3 y P4 y se llevaron a laboratorio. Los parámetros de cada pila se compararon con el análisis de varianza con tres repeticiones existiendo diferencia significativa, la pila que produce más Nitrógeno, %Materia Orgánica y Solido Totales es P4. A P4 se agregó azufre al 1% para neutralizar el pH. En cuanto al %Humedad no existe diferencia significativa de las 4 pilas analizadas, debido a que fue controlada durante el proceso. Si se utiliza el compost obtenido en la agricultura, será en grandes cantidades por ejemplo para un requerimiento de N de 160Kg/Ha, se necesita 4.38 Tn/Ha de compost, lo cual es viable, ya que al día, en la ciudad de Puno, se genera 50 Tn/día de ROD que es 37.5 Tn/día de compost y al año es 13687.5 Tn de compost, suficiente para cubrir 3125 has/año.

Palabras claves: Abono, basura, contaminación, suelo cultivable, nutriente y Agricultura.

Abstract

Compost piles were evaluated at different compositions to take advantage of household organic waste from the city of Puno in the period from June to September 2015. Three compost piles were evaluated at different composition and one cell vermiculture without worms, in order to determine what conditions produce an organic fertilizer higher quality, using organic waste Domiciliarios (ROD), Poda of Parks and Gardens of the city (PPJ) and sheep Dung (EGO), the three compost piles with a volume of 4.5 m³; P4 has 100% of 0.8 m³ ROD placed in a cell vermiculture and P5 has 100% ROD 2.6 m³ which was located on the outside of the plant. To accelerate decomposition, an infrastructure greenhouse conditions. After three months, three samples of P1, P2, P3 and P4 was removed and taken to the laboratory. The parameters were compared with the analysis of variance, the pile contains more Nitrogen, %Organic Matter and Solido Totals is P4. P4, sulfur is added to 1% weight, to neutralize the pH. As for the %humidity, no significant difference of the four piles. For agriculture, will have to be used in large quantities for example for request of N of 160Kg/Ha, you have to use 4.38tons/ha of compost to cover this need, which it is feasible, since, in the city of Puno, it is generated 50 tons/day of ROD, which is 37.5 tons/day of compost and a year is 13687.5 tons of compost, enough to cover 3125 ha/year of farmland.

Keywords: Fertilizer, Garbage, Pollution, Arable Soil, Nutrient and Agriculture

Recibido: 15/09/2023

Aceptado: 12/12/2023

Publicado: 31/01/2024

Sección: Artículo original

*Autor correspondiente: yurhamilton@gmail.com

Introducción

El cambio climático es un problema ambiental global, que a medida exista grandes concentraciones de gases de efecto invernadero como el CH₄ (7 veces más incidente que el CO₂), CO₂, etc. (Alcolea, 2000), será más letal y generará fenómenos adversos que afectaran gravemente la vida del planeta, ocasionando la extinción de varias especies, etc. El cambio climático a afectado los rendimientos de los cultivos en el altiplano Puneño como es el caso de la quinua cuyo rendimiento de 2700 kg/ha bajo a 1439 kg/ha (Benique, 2021). Es por ello que los gobernantes del mundo se han reunido para analizar y plantear políticas e incentivos para contrarrestar el

cambio climático (Organización Panamericana de la Salud, 2003). La investigación busca cambiar los hábitos de manejo de los residuos sólidos que son vertidos en rellenos sanitarios, etc. que generan grandes cantidades

¹ IASECON H&R SRL.

² Docente de la Escuela de Posgrado UNA-Puno. Doctor en Ciencias y Tecnologías Medioambientales. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0660-3799>

Como citar: Huapaya Cruz, Y. H. (2024). Evaluación del compostaje a diferentes composiciones para aprovechar los residuos orgánicos domiciliarios de la ciudad de Puno para contribuir en contrarrestar el cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(1), 24-35. <https://doi.org/10.18271/ria.2024.577>.



de metano, es por ello se debe buscar otra forma de manejo, tal como lo sugieren 11000 científicos: “Para asegurar un futuro sostenible, debemos cambiar la forma en que vivimos. [Esto] implica grandes transformaciones en las formas en que nuestra sociedad global funciona e interactúa con los ecosistemas” (Escobar, 2019, p. 246).

El estudio tuvo la finalidad de evaluar las condiciones más adecuadas para realizar el compostaje de la basura orgánica domiciliar de la ciudad de Puno en una planta piloto de compostaje ubicada en Jayllihuaya, considerando que la descomposición de dichos residuos es muy lenta debido a que la zona es fría y seca requiriendo más de 12 meses la elaboración de compost, por lo que en la presente investigación se buscó elaborar compost en 3 meses, de tal forma incentivar la elaboración de compost a nivel municipal para contrarrestar el calentamiento global (Pedreño, 2005); resolver el problema que ocasiona los residuos sólidos orgánicos en los rellenos sanitarios los cuales son: Ocupa grandes volúmenes, genera CH₄, lixiviados con alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y ocasiona explosiones (Jaramillo, 2002); e incentivar la agricultura orgánica en la región (Caballero, 1999) ya que solo la ciudad de Puno genera al día cerca de 50 Tn de basura orgánica (Municipalidad Provincial de Puno, 2015), los cuales pueden ser 37.5 Tn diarios de compost para ser aprovechado en la agricultura después de 3 meses. Se realizaron varios estudios similares cuyos resultados se resumen a continuación:

Huerta *et al* (2008) recoge los resultados y conclusiones de diversos estudios realizados de la Escuela Superior de Agricultura de Barcelona (ESAB) examina la calidad de producto y materiales orgánicos obtenidos mediante el tratamiento biológico procedente de diversos residuos municipales, como afecta en la calidad del compost la eficiencia en la separación de los impropios, la contaminación asociada por metales pesados procedente de las bolsas de plásticos, el mercado de compost y compostaje de estiércol. Los resultados de los diversos estudios se resumen a continuación: Compost comercial hecho en 1992 de: La planta Vilafranca tuvo un pH = 7.07, CE = 7.81 dS/m, %H = 46.41, %MO = 68.64, C/N = 22 y N = 1.48%; La planta Mataró tuvo un pH = 6.78, CE = 7.45 dS/m, %H = 43.2, %MO = 46.19, C/N = 20.6 y N = 1.17%; La planta Gava tuvo un pH = 7.11, CE = 8.34 dS/m, %H = 39.97, %MO = 56.98, C/N = 17.9 y N = 1.66%. Las diferencias de objetivos y de proceso de cada una de ellas se evidencian en algunos de los resultados. Si se observan los contenidos de MO y de N se puede ver que Mataró tiene los valores más bajos. En esta planta se hacía una selección de papel mucho más intensa, que, además de provocar una elevada producción de lixiviados, bajaba el contenido en MO y la relación C/N;

en consecuencia, se perdía N en forma amoniacal, dando como resultado un compost con niveles de N y MO más bajos que los de Vilafranca o Gavà. En otro estudio de la características del compost de diferentes procedencias se tiene los siguientes resultados: Planta Torrelles con selección en el origen (1997) tuvo un pH = 5.62, CE = 2.58 dS/m, %H = 79.58, %MO = 76.64, C/N = 15.39 y N = 2.53%, con referencia a los metales pesados (en ppm) Zn = 82, Mn = 71, Cu = 24, Ni = 27, Cr = 37, Pb = 14, Cd = 0.2 y % Fe = 0.17; Planta Mataró sin selección en el origen (1997) tuvo un pH = 5.83, CE = 6.58 dS/m, %H = 48.42, %MO = 51.39, C/N = 15.73 y N = 1.70%, con referencia a los metales pesados (en ppm) Zn = 219, Cu = 202, Ni = 100, Cr = 64, Pb = 152, Cd = 1.1 y %Fe = 1.00; Planta Varias con selección en el origen (2006) tuvo un pH = 5.32, CE = 2.93 dS/m, %H = 71.96, %MO = 86.71, C/N = 16.90 y N = 2.67%, con referencia a los metales pesados (en ppm) Zn = 45, Mn = 32, Cu = 14, Ni = 2, Cr = 3, Pb = 7, Cd = 0.3 y % Fe = 0.11; Planta Varias sin selección en el origen (2006) tuvo un pH = 6.52, CE = 6.23 dS/m, %H = 56.21, %MO = 62.55, C/N = 18.21 y N = 1.78%, con referencia a los metales pesados (en ppm) Zn = 422, Mn = 108, Cu = 122, Ni = 30, Cr = 42, Pb = 43, Cd = 0.9 y % Fe = 0.69; La baja calidad del material de entrada de los RSU condicionará negativamente el desarrollo del proceso y también repercutirá inevitablemente en una mayor presencia de impurezas y en contenidos de metales pesados superiores a los que se pueden encontrar en el compost elaborado a partir de fracción orgánica recogida selectivamente.

Madrid (1998) realizó la tesis doctoral titulado: “Caracterización y utilización del compost de Residuos Sólidos Urbano de la planta de Villarrasa (Huelva)” siendo unos de sus objetivos caracterizar los compost de la planta de Villarrasa de los periodos de 1995 a 1998, se tomaron 48 muestras de granulometría de 10 mm, el cual se obtuvo los siguientes valores promedio: pH = 7.04, CE = 5.96 dS/m, %H = 28, %MO = 34.36, C/N = 20.6, N = 0.93%, P₂O₅ = 0.93%, K₂O = 0.62% con referencia a los metales pesados (en mg/kg) Zn = 393, Mn = 192, Cu = 211, Ni = 37, Cr = 103, Pb = 160, % Fe = 0.97, %Ca = 4.70, % Mg = 0.30 y %Na = 0.47. El P, K, Ca y Mg, son suficientemente elevados para suponer aportes considerables a las plantas, el N se encuentra por debajo de 1% por la facilidad que puede perderse este nutriente. En cuanto a los metales pesados Cu, Zn, Cr, Ni y Cd estuvieron por debajo de los límites permitidos, en cuanto al Pb el valor medio está por debajo del límite permitido (300 ppm), existe 2 muestras que lo superan debido a que los residuos corresponden a municipios de gran población.

García *et al* (2007), realizaron el ensayo con el objeto de valorar, agronómicamente, los efectos de seis

sustratos: Sustrato comercial de referencia “Prohumín” (PH); compost agotado de champiñón (CAC); humus de lombriz (HL); compost ecológico “Jumilla” (CEC); mezclas de HL y de CEC con CAC, sobre tres especies hortícolas: brócoli (B), cebolla (CE) y lechuga (L). Se establecieron 3 repeticiones, para las 18 combinaciones especie-sustrato. La toma de datos consistió en el seguimiento de la nascencia y de los estados fenológicos. Se efectuaron 3 muestreos de plántulas en distintos estados. Para el análisis de varianza y regresión no lineal, se empleó el programa informático Statgraphics Plus v. 4.1.0. Se concluyó que el CAC podría generar deficiencias en la nascencia y crecimiento, siendo mucho más favorable su mezcla con HL, que mostró excelentes resultados. El CEC ensayado no resultaría adecuado para su uso en semilleros hortícolas, y tampoco en combinación con CAC, por mostrar manifestar notables dificultades en el crecimiento.

Álvarez et al (2011), evaluaron la respuesta del cultivo de cebolla “criolla” a la aplicación de fertilizantes químicos y orgánicos en Apatzingán, Michoacán (México). El almácigo se estableció en diciembre de 2009 y el trasplante se realizó a los 70 días posteriores, el marco de plantación fue a tres hileras (12.5 cm entre plantas y 15 cm entre hileras). Los tratamientos fueron: I. Fertilización química común en una dosis de 305 y 130 kg/ha (fuente: urea simple y superfosfato de calcio triple); II. Fertilización química compleja en una dosis de 588 kg/ha (fuente: triple 17); III. Abono orgánico en una dosis de 12 l/ha (fuente líquida con base en guano de murciélago), y IV. Testigo. Las aplicaciones se efectuaron a los 15, 35 y 55 días después del trasplante (ddt). Se evaluó: el desarrollo fenológico, las características productivas y físico-químicas. El análisis de varianza no mostró diferencia estadística significativa ($P>0.05$) entre tratamientos. Los niveles y fuentes de fertilización empleadas no influyeron en la respuesta fenológica, productiva y características físico-químicas del cultivo de cebolla en las condiciones ambientales de Apatzingán. La altura alcanzada fue 42 cm, el diámetro del pseudotallo fue de 1 cm, el número de hojas alcanzadas fueron 8, el diámetro de bulbo 4.7 cm y el peso fue de 78 gr todos estos valores en promedio a los 55 días.

Castillo (2006), realizó un ensayo demostrativo para obtener compost con base en residuos urbanos bajo las condiciones climáticas locales; en dicho experimento se aplicó la técnica de biodegradación natural bajo la forma de remoción de dunas. Para comparar el tiempo de maduración del compost con relación a la pluviosidad, se destinaron dos áreas para la preparación del abono, una bajo cubierta de invernadero y otra, a la intemperie.

En cada área se compararon dos acelerantes con un testigo. Los acelerantes fueron: Agroplus (2 L/pila) y estiércol de bovino (3kg/pila) el volumen de la pila fue 1 m³; también se utilizaron dos fuentes de residuos: la plaza de mercado y los restaurantes. El experimento se inició en septiembre de 1995 y finalizó en enero de 1996. En estos cinco meses se obtuvo abono a la intemperie, mientras bajo cubierta de invernadero el tiempo de maduración en promedio fue de 2 meses (50 días); el efecto de los acelerantes en el tiempo de maduración no fue significativo. Los resultados de laboratorio indican altos contenidos de materia orgánica, calcio, magnesio y potasio, además de poseer un pH neutro; estas características permiten recomendar el compost para la fertilización orgánica de los cultivos y para corregir el pH y las enmiendas de calcio y magnesio.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo: Evaluar el compostaje a diferentes composiciones para aprovechar los residuos orgánicos domiciliarios de la ciudad de Puno como medida para contribuir en contrarrestar el cambio climático-2015, para ello se pretende:

Describir las condiciones y el manejo adecuado para realizar compost con residuos orgánicos domiciliarios a diferentes composiciones iniciales en las condiciones de la ciudad de Puno.

Analizar el comportamiento de la temperatura y humedad de las pilas de compostaría.

Comparar la calidad del producto final de las diferentes pilas de compostaría.

Métodos y materiales

Ámbito de estudio

El experimento se realizó en el centro poblado de Jayllihuaya ubicado a 7 km al sur del centro de la ciudad de Puno, en las inmediaciones del vivero forestal de la municipalidad Provincial de Puno a 3,900 m.s.n.m.

Clima: La temperatura del C.P. Jayllihuaya es muy variable, con oscilaciones entre una temperatura promedio máxima de 22 °C y una mínima de 1.4 °C. Las precipitaciones pluviales son anuales y duran generalmente entre los meses de diciembre a abril, aunque suelen variar en ciclos anuales, originando inundaciones y sequías, generalmente las precipitaciones son menores a 700 mm.



Figura 1. Vista satelital de Jayllihuaya ubicación del experimento vivero forestal

Técnicas: Para el manejo de la compostaría y lombricultura la municipalidad de Puno, dispondrá de un ambiente que permita el control del clima de tal manera la temperatura oscile entre 14 a 35°C, tipo invernadero controlándose la temperatura de dicho ambiente en

condiciones óptimas. Se diseñó una infraestructura (ver figura 2) a base de rollizos, madera (proveniente de la construcción), alambres y clavos y Agrofild en un área de 6 x15 m² y una altura que varía de 3.50 a 2.00m (del centro hacia sus lados).



Figura 2. Infraestructura para hacer compost interior y exterior

Se escogió un lote de residuos orgánicos urbanos de la ciudad de Puno, así también estiércol de ganado restos vegetales de Jayllihuaya. Se conformó 5 tipos de pilas de compostajes cuya variación es el siguiente:

- La primera pila (P1) se hizo con una composición de residuos orgánicos urbanos de la ciudad de Puno;
- La segunda pila (P2) tuvo el 75% de los residuos orgánicos urbanos (ROU), el 15% de Poda de Parques y Jardines (PPJ) y el otro 20% de estiércol de ganado ovino (EGO) y
- La tercera pila (P3) tuvo 69% de los residuos orgánicos urbanos, 26% de Poda de Parques y Jardines y 5% de estiércol ganado ovino.

- Además se incluyó una celda en la que se colocó la misma composición de P1, pero crudos y desmenuzados a este tratamiento se denominara P⁴ y P⁵ que es un testigo que se coloca en el exterior de la planta con dimensiones de 2.50 x 2.50 x 1.25 m a base de 100% ROD. (ver figura 3)

El manejo de cada pila de compostaría los principales parámetros que se controlará son la temperatura del ambiente controlado, la frecuencia de riego, la humedad y temperatura de los sustratos (Ortiz, 1994).

Posteriormente se analizará en laboratorio el compost obtenido de cada tipo de pila (P1, P2, P3, P⁴ y P⁵) para realizar una comparación entre ellas se tomará tres muestras de cada uno en bolsas esterilizadas

donde se indicará a qué tipo de pila corresponde. Del laboratorio se extraerá cantidad de macro nutrientes (N,

P, K), materia orgánica, pH, CE, C/N y % Humedad.



Figura 3. Izquierda superior P1; derecha superior P1, P2 y P3; izquierda inferior P4 y derecha inferior P5

Materiales y equipos

- Equipo de cómputo
- Cámara fotográfica o filmadora.
- 03 palas.
- 01 rastrillo.
- 01 pico.
- 01 carretilla.
- 03 baldes de 10 litros.
- 01 manguera de 20 m.
- Estacas de madera.

Tamaño de muestras

Para realizar la evaluación se tendrá 4 tipos de pilas de compostaje de las cuales se obtendrán 4 tipos de valores de compost, cada uno con tres repeticiones que darán un total de 12 muestras, que se llevara a laboratorio para su análisis químico.

Modelo estadístico

Se realizará un análisis de varianza para cada uno de los siguientes valores de nitrógeno, fósforo, potasio, % materia orgánica, % sales totales, % conductividad

eléctrica, relación C/N, pH cada componente corresponde a un análisis de varianza con 4 tratamientos y 3 repeticiones por lo que el diseño será un diseño randomizado (Sarmiento, 2003).

La expresión matemática de este modelo es:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \tau_j + e_{ijk}$$

Donde μ es un efecto común de todas las observaciones; β_i , la contribución del bloque i ; τ_j , el efecto del tratamiento j ; e_{ijk} , el error de las características en estudio.

Procedimiento

1. Se construyó una infraestructura en un área de 15 X 6 m² y una altura que varía de 2 a 3.50m, a base de rollizos, madera (proveniente de la construcción), clavos, alambres y Agrofild, con 2 ventanas de 1 x 1m y una puerta de ingreso de 1.50m de ancho. Esta infraestructura contendrá las pilas de compostera, controlando el calor favoreciendo la descomposición de los residuos.

2. Se trasladaron los residuos orgánicos de los mercados central y dignidad, así también se trasladan las podas de parques y jardines y estiércol de ganado ovino del Centro Experimental Carolina de la Universidad Nacional del Altiplano desde el 22 de mayo hasta 08 de junio del 2015.
3. Se conformó las pilas de compostera en forma piramidal con las siguientes características: (ver Figura 4)
 - Pila De Compostería 1 - P1
 - 100% Residuos Sólidos Orgánicos
 - Fecha De Inicio Traslado: 22/05/2015
 - Fecha De Inoculación: 02/06/2015
 - Tiempo De Conformación: 8 Días
 - Cantidad (Fresco): 4.5 M3
 - (3 m de base y 1.5m de alto forma piramidal)
 - Peso: 1221.75 Kg

 - Pila De Compostería 2 - P2
 - 20% De Estiércol De Ganado Ovino, 15% De Poda Y 65% Ro
 - Fecha De Inicio Traslado: 03/06/2015
 - Fecha De Inoculación: 07/06/2015
 - Tiempo De Conformación: 4 Días
 - Cantidad: 4.5 M3
 - (3 m de base y 1.5m de alto forma piramidal)
 - Peso: 1800 Kg

 - Pilas De Compostería 3 - P3
 - 5% De Estiércol De Ganado Ovino, 26% Pastos Y 69% Ro
 - Fecha De Inicio Traslado: 06/06/2015
 - Fecha De Inoculación: 07/06/2015
 - Tiempo De Conformación: 4 Días
 - Cantidad: 4.5 M3
 - (3 m de base y 1.5m de alto forma piramidal)
 - Peso: 1800 Kg

 - Celda De Lombricultura 4 - P4
 - 100% Residuo Orgánico
 - Fecha De Inicio Traslado: 06/06/2015
 - Tiempo Para La Conformación: 2 Días
 - Cantidad: 0.8 M3
 - (1.6 x 1.2 x 0.40 m)
 - Peso: 217.2 Kg

 - Pila De Compostería 5 - P5
 - 100% Residuo Orgánico
 - Fecha De Inoculación: 12/06/2015
 - Tiempo De Conformación: 1 Dia
 - Cantidad: 1.33 M3
 - (2.50 De Base X 1.25m De Altura)
 - Peso: 361.095 Kg
4. Se inoculó tierra negra para proveerle de microorganismos y de tal forma se favorezca la descomposición de los RO.
5. Se controló la temperatura y humedad de las pilas en forma interdiaria, de tal forma realizar la aireación y el volteo de forma oportuna garantizando la adecuada descomposición del material.
6. Se hizo una limpieza de las pilas recogiendo los elementos inertes tales como: los plásticos, cucharillas de plástico, huesos, chapas, sorbetes, etc. que fueron en grandes cantidades por la falta de conciencia ambiental.
7. Se midió el pH y la CE de las pilas de compostera.
8. A los tres meses de instalado las pilas se procedió a llevar las muestras a laboratorio.
9. Los resultados de laboratorio son analizados con estadística.

Resultados

Condiciones y manejo de las pilas de compostera

El manejo consistió en dar condiciones adecuadas para que la descomposición sea en condiciones aeróbicas y que la temperatura sea superior a 20°C (Czechaid, 2004) lográndose con la infraestructura construida permitiendo que los residuos se descompongan en 3 meses es el caso de P1, P2, P3 y P4, sin embargo en las condiciones ambientales de Puno la descomposición es muy lenta, correspondiendo el grado de descomposición de los 3 meses de P5 a 1/2 mes de descomposición de P1 en la infraestructura construida (ver figura 4).

Hubo incremento de los malos olores los primeros días hasta el mes y medio de P1, P2, P3 y P4 a excepción de P5, esto se debió al exceso de humedad proporcionado los primeros días, dicho exceso no se podía eliminar debido a que la infraestructura no permitía el secado del compost. Los malos olores se generaron los 15 últimos días del primer mes hasta los 15 días del segundo mes.

Evaluación de parámetros durante el proceso

A los 2 meses de conformación del compost (23 de julio 2015) se llevaron 2 muestras por pila de compostaje al laboratorio para determinar el pH, %H y la CE, los resultados se presenta en la tabla 1.

Después de 15 días de haberse aplicado el S (fecha de aplicación 20/08/2015) se midió el pH y la CE de las 4 pilas cuyos resultados se muestran en la Tabla 2.



Figura 4. A la izquierda descomposición de P1, P2 y P3; a la derecha de P5 después de los 3 meses de conformación.

Tabla 1. Resultados de laboratorio de las pilas a los 2 meses de conformación

COD	PLRV	PMH	PMS +PLRV	PMS	pH	CE (mS/cm)	%HUMEDAD
P1-M1	43.216	53.9	62.241	19.025	9.61	6.2	65%
P1-M2	45.202	66.985	73.67	28.468	9.9	5.2	58%
P2-M1	43.284	27.744	55.176	11.892	9.99	0.29	57%
P2-M2	44.843	28.647	59.634	14.791	10.33	4.25	48%
P3-M1	43.112	42.482	60.735	17.623	9.8	1.38	59%
P3-M2	38.877	79.779	55.176	16.299	9.93	8.59	80%
P4-M1	44.829	60.307	62.111	17.282	10.4	5.86	71%
P4-M2	44.959	64.771	59.634	14.675	10.38	4.85	77%
P5-M1	32.327	11.616	38.796	6.469			44%
P5-M2	42.498	8.309	47.512	5.014			40%

Nota: Resultados de laboratorio UNA Facultad de Ingeniería Química.

Tabla 2. Valores de pH y CE 15 días después de aplicado el S

DESCRIPCIÓN	PESO	INICIO 08/09	
		pH	CE
P1	20.0003	9.24	6.84
P2	20.0039	8.22	8.268
P3	20.0021	8.62	10.81
P4	20.0024	6.9	10.98

Nota: Elaboración propia

Comportamiento de la temperatura y humedad de las pilas

El comportamiento de la temperatura de las 5 pilas es presentado en la figura 5, de ella extraemos que la temperatura de P1, P2 y P3 llegaron hasta 55° C durante el primer mes, en el segundo mes disminuyó y se mantuvo en promedio de 40°C y el tercer mes la temperatura bajó hasta 30°C, esto debido a que la actividad microbiana descendió porque la mayoría de los residuos se biodegradaron. En cuanto a P4 la temperatura descendió de 50°C alrededor de 20°C y se mantuvo durante los tres meses, debido a que la

humedad del compost estuvo por encima de los 60% y la altura de compostaje fue de 25cm, haciendo que el calor no se concentre en el compostaje. P5 se encuentra en el exterior, la temperatura durante el primer y segundo mes estuvo alrededor de 10°C, el cual subió a 20 °C el 12 de agosto y el 25 de agosto descendió por realizar el volteo y el riego lo que hizo que la temperatura bajara alrededor de 10°C, esto debido a las condiciones frías del ambiente de Puno, el cual fue reprimida por la aireación y riego efectuado, los residuos no muestran descomposición debido a que la actividad microbiana es reprimida por efectos del clima frígido de Puno.

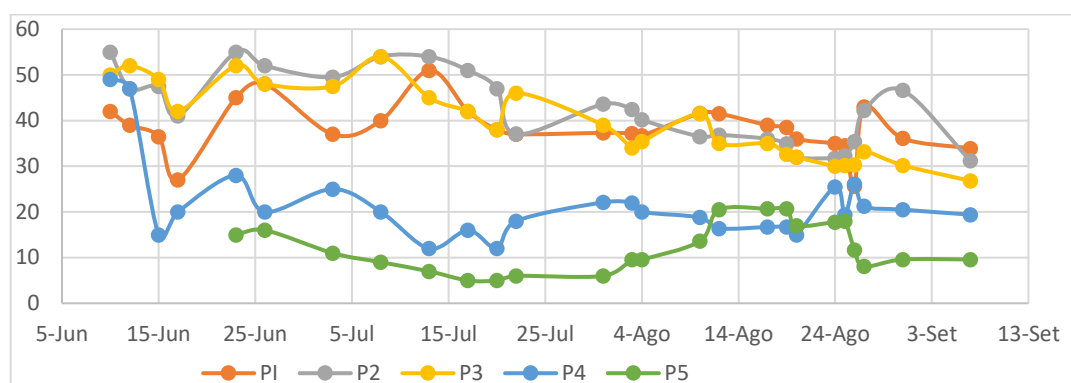


Figura 5. Comportamiento de la temperatura de las 5 pilas de compostería
Nota: En las abscisas el tiempo

Composición de las pilas de compostería

Se extrajo 3 muestras de P1, P2, P3 y P4, pero no de P5 por que hasta la fecha no se descompuso, dichas

muestras se llevaron a laboratorio y se determinó % N, % P, %K, %C, % de materia orgánica, % de sales totales, relación C/N, pH, conductividad eléctrica y % humedad, los resultados se muestra en el Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de laboratorio de las 4 pilas de compostería con tres repeticiones cada uno

PARAMETROS	P1-M1	P2-M1	P3-M1	P4-M1	P1-M2	P2-M2	P3-M2	P4-M2	P1-M3	P2-M3	P3-M3	P4-M3
%N	2.62	3.39	3.31	3.26	2.55	3.64	3.03	3.18	2.54	3.65	3.06	3.21
%C	25.02	31.80	28.41	38.23	24.24	32.28	29.26	38.11	24.26	31.98	29.44	38.26
C/N	9.55	9.38	8.58	11.73	9.51	8.87	9.66	11.98	9.55	8.76	9.62	11.92
%P	0.61	0.27	0.26	0.21	0.63	0.32	0.21	0.15	0.60	0.38	0.21	0.19
%K	1.62	1.72	2.06	3.28	1.59	1.56	2.40	3.50	1.61	1.54	2.28	3.45
% MO	43.04	54.70	48.95	65.83	41.69	55.52	50.33	65.55	41.72	55.00	50.69	65.80
%Sales totales	10.97	11.99	15.48	17.85	11.03	11.87	15.09	21.65	11.06	12.93	15.08	21.95
% Humedad	48.59	45.85	48.89	48.1	48.78	45.58	39.79	39.45	48.75	44.92	40.56	39.11
CE	21.93	23.84	30.82	34.86	21.70	23.73	29.80	41.31	21.92	24.01	29.21	41.00
pH	9.21	8.04	8.40	6.31	9.10	8.10	8.44	6.24	9.11	8.12	8.41	6.24

Nota: Elaboración propia

Con los resultados se compararon los parámetros con el análisis de varianza con tres repeticiones, los cuales muestran que existe diferencia significativa del % N, % P, %K, %C, % MO, % ST, C/N, pH y CE de las 4 pilas de compostería, siendo los mayores valores para el N el de P2 = 3.21%, para el P el de P1 = 0.61%, para el K el de P4 = 3.41%, para el C el de P4 = 38.2%, para el C/N el de P4 = 11.88, para la MO el de P4 = 65.72%, para las ST el de P4 = 20.48 g/l, para la CE el de P4 = 39.06 mS/cm y para el pH el de P1 = 9.14, por lo tanto la pila que produce más nitrógeno, mayor materia orgánica y mayores sales es P4. Los valores más bajos para el N son de P1 = 2.57%, para el P es de P4 = 0.18%, para el K es de P1 = 1.61%, para el C es de P1 = 24.51%, para el C/N es de P2 = 9.00, para la MO es de P1 = 42.15%, para las ST el de P1 = 11.02g/l, para la CE es de P1 = 21.85 mS/cm y para el pH es de P4 = 6.26, por lo tanto, la pila que produce menos nitrógeno, menor materia orgánica y menor sales es P1.

Del análisis de laboratorio se procesó y extrajo la Tabla 4, del cual se puede concluir que la concentración

de los macronutrientes NPK en promedio de las 4 pilas de compostería son 3.12, 0.34 y 2.22% respectivamente, a pesar que existe diferencia significativa de las 4 pilas de compostería la variación mínima y máxima de estos parámetros entre las 4 pilas es en una proporción pequeña con respecto a su promedio.

Tabla 4. Intervalo de variación y promedio de los parámetros de compostaje

PARAMETROS	Max	Min	Prom
% Humedad	48.89	39.11	44.86
%N	3.65	2.54	3.12
%P	0.63	0.15	0.34
%K	3.50	1.54	2.22
%C	38.26	24.24	30.94
C/N	11.98	8.58	9.93
% MO	65.83	41.69	53.24
%Sales totales	21.95	10.97	14.75
CE	41.31	21.70	28.68
pH	9.21	6.24	7.98

Nota: Elaboración propia

Discusión

Condiciones y manejo de las pilas de compostera

La presencia de malos olores indica que se da un proceso anaeróbico, éste es un indicador que se está produciendo contaminantes tales como: El metano (CH_4) que ocasiona el calentamiento global en una proporción 7 veces mayor al anhídrido carbónico (CO_2); Óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x) los cuales generan la lluvia ácida; lixiviados altamente ácidos y con un DBO_5 4 veces mayor al del agua residual los cuales contaminan el agua subterránea y los suelos aledaños (Fundación, 1994); se recomienda no proporcionar agua el primer mes de descomposición, ya que los residuos contienen un 75% humedad en sus tejidos, que se va consumiendo a medida se va degradando, por lo tanto tratar de mantener la humedad del compost alrededor de 30% para evitar malos olores al inicio del proceso y hacer la aireación una vez a la semana. P5 no generó malos olores a pesar que se aplicó humedad en la misma proporción de las otras pilas, debido a que su actividad microbiana era baja por las condiciones frías, por lo tanto, no consumió oxígeno como sucedió en P1, P2, P3 y P4 que la actividad microbiana era muy alta (genera temperatura alta en el núcleo), el cual consumió rápidamente el O_2 llevando el proceso al anaeróbico generando malos olores.

Para evitar que la humedad se incremente a más del 60% durante el riego, debido a que el comportamiento del agua en el compost se da saturando la parte superior y el exceso de agua ingresa lentamente, cuando se haya alcanzado la capacidad de campo del compost en la parte superior haciendo que el aire sea desplazado y menor, lo que ocasionara condiciones anaeróbicas ya que se consumirá el aire rápidamente (Sztern, 2006), el exceso de agua es difícil de ser eliminado en la planta piloto, ya que la humedad del aire es mayor que el exterior, no permitiendo que se evapore del sustrato, por lo expuesto se recomienda hacer el riego antes y durante el volteo de tal forma humedecer las partes que carecen de agua y no saturar los estratos superiores, llevando a que contengan una humedad adecuada, porque el exceso generara más adelante condiciones anaeróbicas.

Se determinó que el mejor manejo es realizando el control de la temperatura y humedad de cada pila,

realizando el volteo en el primer mes cuando se sienta malos olores sin agregar agua y los siguientes meses cuando la temperatura del núcleo baje a menos de 38°C , haciendo el riego sea antes y durante el volteo para evitar el exceso de humedad y carencia de oxígeno.

Evaluación de parámetros durante el proceso

La Tabla 1 nos indica que la humedad de las pilas es superior al 40% lo que ocasiono condiciones anaeróbicas, el pH es superior a los 9 y siendo el de más alto valor el de P4, considerando que la segunda parte del experimento es realizar lombricultura, es necesario bajar el pH a neutro de P4 por ser muy alto, para este hecho se aplicó a P4 azufre elemental en una proporción de 1% en peso, correspondiendo un peso de 0.72 kg de S. En la tabla 2 se observa que el pH de P4 disminuyó llegando a 6.9, esto indica que el azufre elemental se oxida naturalmente llegando hacerse ácido lentamente logrando la neutralización en 15 días tal como se demuestran en otros estudios similares (Roig et al, 2004). No se aplicó el azufre a las demás pilas debido a que el pH medido en las otras pilas no supera los 10. El incremento del pH se debe a las características de los residuos los cuales contienen elementos básicos que al reaccionar elevan el pH.

Inadecuada segregación

Un problema derivado de la producción de compost a partir de los restos orgánicos se debe a la falta de conciencia ambiental en la segregación por parte de las personas (Roben, 2002) que produjeron los residuos utilizados, pues en el proceso de recolección a pesar que se hizo capacitaciones y se recaló la importancia del reciclaje de los restos orgánicos en varias ocasiones, no hubo el apoyo de las señoras que proporcionaron los residuos, por lo que en el recipiente que se entregó para hacer la segregación se encontró residuos inorgánicos tales como: Plásticos, cucharas, huesos, sorbetes, tapas de botella, etc. (ver Figura 6). Lo cual hizo que se haga limpiezas continuas en las pilas, lo que ocasiono mayor esfuerzo y disminución del volumen de las pilas de compostera. Este hecho nos hace concluir que se debe aplicar instrumentos de sensibilización con mayor intensidad aplicando multas y otros incentivos económicos, pero también generar condiciones para que la segregación sea eficiente.



Figura 6. A la derecha recipiente y residuos segregados, a la izquierda residuos inorgánicos encontrados en las pilas continuamente.

Comportamiento de la temperatura y humedad de las pilas

Los resultados de la figura 2 son diferentes a los obtenidos por Huerta *et al* (2008) al analizar la planta de compostaje de Torrelles que a partir del 5to al 10mo día la temperatura sube de 50 a 70 °C, luego disminuye a 50°C el 14vo día, nuevamente sube a 70°C el 16avo día, haciendo estas oscilaciones periódicas a lo largo de los 96 días, llegando a una temperatura de 80°C el 30avo día, estas diferencias se deben a las dimensiones de las pilas y a las condiciones climáticas, pues en Puno existe menos oxígeno y hace mucho frío. Además, el riego aplicado a las pilas producía un descenso de la temperatura en las pilas, debido a que el agua tiene una alta capacidad calorífica específica, ocasionando un descenso de calor en el núcleo por tener una temperatura inferior a 20°C.

Composición de las pilas de compostaria

La Tabla 3 tiene correlación con la composición original de las 4 pilas, pues P1, P2 y P3 tienen diferente composición, en cuanto P4 durante el manejo se midió el pH el cual estuvo en 10.4, para disminuir el pH se aplicó azufre elemental al 1% en peso de P4 para neutralizar el pH lo cual se logró, sin embargo hizo que las propiedades de los otros parámetros variaran en referencia a P1, además su forma de descomposición fue diferente, P1 fue en pilas de compostaje y P4 fue en la celda de lombricultura, lo que ocasiono menos pérdida de macronutrientes y materia orgánica, sin embargo acumulación de sales totales. En cuanto al porcentaje de humedad no existe diferencia significativa de las 4 pilas analizadas, esto debido a que la humedad fue controlada durante el proceso y se aplicó una misma cantidad de agua, de tal forma se estimule la biodegradación en forma rápida, siendo este parámetro controlable (Castillo, 2006).

Los datos obtenidos en laboratorio se asemejan a los obtenidos por Huerta *et al* (2008) y de la tesis doctoral de Madrid (1998) cuyos resultados promedios a continuación se comparan: El valor de las 4 pilas de: N es 3.12%, K es 2.22%, MO es 53.24%, CE es 28.68 mS/cm y pH es 7.98, tal como se observa en la Tabla 4, superior a los obtenidos por Madrid (1998) lo cuales son: El valor de N es 0.93 %, K es 0.93 %, MO es 34.6%, CE es 5.96 mS/cm y pH es 7.04. Con respecto a P es 0.34%, C/N es 9.93 de las 4 pilas inferior a los obtenidos por Madrid (1998) lo cuales son: P es 0.93%, C/N es 20.6. Estas variaciones se deben a que el material utilizado en planta de Villarasa es diferente al material utilizado en la presente investigación, pues la composición de los residuos sólidos orgánicos domiciliario es muy heterogéneo, pues contiene diferentes proporciones de desperdicios de cítricos, cascaras, tallos, hojas, etc.

En el caso que se requiera utilizar el compost obtenido en la agricultura, se tendrá que utilizar en grandes cantidades por ejemplo para un requerimiento de N de 160Kg/Ha (Soto, 1987), se tendrá que utilizar 4.38 Tn/Ha de compost para cubrir dicha necesidad, lo cual es viable, ya que en la ciudad de Puno se produce 50 Tn/día de ROD que sería 37.5 Tn/día de compost considerando una pérdida de 25% en su descomposición, por lo tanto se produciría al año 13687.5 Tn de compost suficiente para cubrir 3125 has/año. Si los 4.38 Tn vale S/. 300.00, la producción de compost en la ciudad de Puno generaría al año un ingreso de S/. 937500.00, el cual además de este beneficio económico contribuiría a conservar el medio ambiente y promovería la agricultura orgánica (Ramos, 2005) de productos estratégicos como la quinua.

Conclusiones

Las pilas de compostera deben tener una temperatura ambiental superior a 20°C, pues temperaturas inferiores como las que se producen en la región del altiplano de Puno no permiten la descomposición de los residuos en 3 meses, así también las pilas deben ser manejadas en condiciones aeróbicas de tal forma no genere malos olores que son indicadores de contaminantes como el CH₄, SO_x, NO_x, etc. por lo tanto no echar agua en exceso sobre todo el primer mes de descomposición, y hacer el volteo inmediatamente se sienta olores a podrido, así también en los siguientes meses realizar el volteo en base a la temperatura de su núcleo, el cual no debe estar por debajo de 40°C, en caso que esté hacer el volteo. También es importante implantar medidas para efectivizar la segregación en la fuente, ya que al no ser adecuada genera recurso el hacer limpieza de materiales inorgánicos, además de la posibilidad de contaminar el compost.

Al inicio del proceso las temperaturas del núcleo de compostera se incrementa por encima de los 50°C, lo que es un indicador de alta actividad microbiana, el exceso de humedad disminuye la temperatura lo que se recomienda mantener la humedad a 40%. Después de los 2 meses la actividad microbiana desciende por lo tanto la temperatura disminuye hasta los 20°C.

Las pilas de Compostera producen un abono orgánico de buena calidad con macronutrientes por encima de los obtenidos en otras plantas de compostaje en España, lo cual es un indicador que este abono orgánico puede ser utilizado en la agricultura orgánica en pequeñas dosis con referencia del estiércol, para un requerimiento de N de 160Kg/Ha, se tendrá que utilizar 4.38 Tn/Ha de compost para cubrir dicha necesidad comparando con la aplicación del estiércol de ganado vacuno la dotación es de 25Tn/Ha lo que es muy inferior, lo cual es viable, ya que al día en la ciudad de Puno se produce 50 Tn/día de ROD con una pérdida del 25% en el proceso, se produciría 37.5 Tn/día de compost, que al año es 13687.5 Tn de compost suficiente para cubrir 3125 has/año.

Referencias

- Albarracín, M. (2009). *Efecto bioestimulante del humus líquido de origen fluvial (terra humus sobre el cultivo del tomate (Lycopersicon esculentum Mill.), bajo ambiente protegido*. Maracay: Instituto y Departamento de Agronomía.
- Alcolea, M. (2000). *Manual de compostaje doméstico*. Barcelona.
- Alvarez Hernandez, J. C., Venegas Flores, S., Soto Ayala, C., Chavez Vargas, A., y Zavala Sanchez, L. (2011). *Uso de fertilizantes químicos y orgánicos en cebolla (Allium cepa L.) en Apatzingán, Michoacán, México*. México: Avances en Investigación Agropecuaria.
- Benique Olivera, E. (2021). Impacto económico del cambio climático en cultivo de quinua (chenopodium quinoa willd) orgánica en la región del Altiplano: un enfoque Ricardiano. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 23(4). 236-243.
- Caballero, R. (1999). *Efecto de los abonos orgánicos en la explotación de huertos intensivos*. Camaguey: Instituto de suelos.
- Castillo, C. J. (2006). *Elaboración de compost en manizales a partir de residuos orgánicos urbanos*. Colombia: Fundación Social de Manizales.
- CZECHAID. (2004). *Manual de compostaje*. Checoslovaquia: Universidad Checa de Agricultura en Praga.
- Escobar Mamani, F. (2019). Crisis climática y perspectiva de sustentabilidad ambiental de 11000 científicos. *Journal of High Andean Research*, 2019; 21(2). 245 – 248.
- Esteve, A. (2006). *Elaboración de compost y humus de lombriz*. Novelda: Mediterraneo.
- Huerta, O., Lopez, M., Soliva, M. & Zalaño, M. (2008). *Compostaje de residuos municipales: Control del proceso, rendimiento y calidad del producto*. España: Agencia de Residuos de Cataluña.
- Jaramillo, J. (2002). *Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Fudación, M. (1994). *Manual de contaminación ambiental*. Madrid: Edi Mafre.
- Garcia, M., Lozano, D., Arturo de Juan, J., Hortelano, T., Rubio, M., Guardado, R., y otros. (2007). *Valoración agronómica de diferentes sustratos para semilleros de brócoli, cebolla y lechuga*. España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete.
- Madrid D., F. (1998). *Caracterización y utilización del compost de Residuos Sólidos Urbano de la*

- planta de Villarrasa (Huelva)*. España: Instituto de Recursos Naturales y Agrobiológicos de Sevilla.
- Municipalidad Provincial de Puno. (2015). Plan integral de gestión de residuos sólidos. Puno: Municipalidad Provincial de Puno.
- Organización Panamericana de la Salud. (2003). *Gestión de residuo sólidos en situación de desastres*. Maldonado: Serie salud ambiental y desastres.
- Ortiz, J. J. (1994). *Obtención de humus de lombriz a partir de estiércol de vacuno*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Pedreño, N., Herrero, M., Lucas, G., & Beneyto, M. (1995). *Residuos orgánicos y agricultura*. España: Universidad de Alicante Secretariado de Publicaciones.
- Ramos, F. (2005). *Producción vegetal orgánica*. México: Departamento de fitotecnia.
- Roben, E. (2002). *Manual de compostaje para municipios*. Loja, Ecuador: DED Ilustre municipalidad de Loja.
- Roig, A., Cayuela, M.L., Sanchez-Monedero, M.A. *The use of elemental sulphur as organic alternative to control pH during composting of olive mil wastes*. Chemosphere. Volume 57, Issue 9, December 2004, Pages 1099-1105.
- Ruiz, C., Russian, T., & Tua, D. (2007). *Efecto de la fertilización orgánica en el cultivo de la cebolla*. Venezuela: Agronomía Trop.
- Sandobal, E. (2006). *Producción de estiércol de lombriz (Eisenia foetida) con diferentes fuentes de materia orgánica en ambiente natural controlado*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Sarmiento, M. G. (2003). *Utilización de 6; proporciones de hoja de Olivo (Olea europea L.) en la preparación de alimentos de Lombrices (Eisenia foetida)*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Soto, J. A. (1987). *Requerimientos nutricionales de la cebolla (Allium cepa) en los suelos de la región norte de Cartago. I. respuesta a N, P y K*. Agronomía Costarricense, 239-243.
- Sztern, D., & Pravia, M. (2006). *Manual para la elaboración de compost bases conceptuales y procedimientos*. Maldonado: Organización Panamericana De La Salud.