



Efecto del compostaje de desechos orgánicos municipales en la enmendación del drenaje ácido de mina

Effect of municipal organic waste composting on acid mine drainage amendment

Efeito da compostagem de resíduos orgânicos municipais na melhoria da drenagem ácida de minas

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i19.201>

Anibal Sucari León^{1,4}
asucari@unap.edu.pe

Wilber Pastor Contreras¹
wpastor@unap.edu.pe

Reynaldo Sucari León²
rsucari@unah.edu.pe

Yolanda Aroquipa Duran³
yaroquipa@unaat.edu.pe

Nancy Chambi Condori^{1,4}
nchambi@unap.edu.pe

Haydee Clady Ticona Arapa^{1,4}
hcticona@unap.edu.pe

¹Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

²Universidad Nacional Autónoma de Huanta. Huanta, Perú

³Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma. Tarma, Perú

⁴Instituto de Investigación y Desarrollo Andino Amazónico-IIDEAA. Puno, Perú

Artículo recibido el 16 de noviembre 2022 / Arbitrado el 20 de diciembre 2022 / Publicado el 19 de abril 2023

RESUMEN

La responsabilidad ambiental de las empresas mineras es una preocupación nacional ya que contaminan las aguas subterráneas y superficiales debido a la generación de drenaje ácido de mina que contiene metales pesados afectando la salud de los seres vivos. El objetivo de la investigación fue conocer el impacto del compostaje de desechos orgánicos municipales en la enmendación de drenaje ácido de mina. Se desarrolló bajo la guía metodológica del enfoque cuantitativos, ya que se manipularon las variables independientes, utilizando un diseño experimental realizando mediciones en los grupos experimental y control a las 0, 24, 48 y 72 horas. Los resultados mostraron que el compostaje tuvo un efecto positivo en la enmendación de drenaje ácido de mina, logrando una disminución de la acidez (pH = 2,52 a 6,2) por otra parte, se eliminó en su totalidad la concentración de los metales pesados como el arsénico, mercurio y plomo, sin embargo en el caso del cadmio la concentración bajó de 3,0 a 0,8. Concluyendo que el compostaje de residuos orgánicos domiciliarios tiene un efecto positivo en la enmendación de drenajes ácidos de mina, ya que incrementa el valor del pH y reduce la concentración de metales pesados.

Palabras clave: Compostaje; Desechos orgánicos; Drenaje ácido de mina; Remediación

ABSTRACT

The environmental responsibility of mining companies is a national concern since they contaminate ground and surface waters due to the generation of acid mine drainage that contains heavy metals affecting the health of living beings. The objective of the research was to know the impact of municipal organic waste composting in the amendment of acid mine drainage. It was developed under the methodological guide of the quantitative approach, since the independent variables were manipulated, using an experimental design with measurements in the experimental and control groups at 0, 24, 48 and 72 hours. The results showed that composting had a positive effect on the amendment of acid mine drainage, achieving a decrease in acidity (pH = 2.52 to 6.2) on the other hand, the concentration of heavy metals such as arsenic, mercury and lead was completely eliminated, however in the case of cadmium the concentration decreased from 3.0 to 0.8. In conclusion, the composting of household organic wastes has a positive effect on the amendment of acid mine drainage, since it increases the pH value and reduces the concentration of heavy metals.

Key words: Composting; Organic waste; Acid mine drainage; Remediation

RESUMO

A responsabilidade ambiental das empresas de mineração é uma preocupação nacional, pois poluem as águas subterráneas e superficiais devido à geração de drenagem ácida de minas contendo metais pesados que afetam a saúde dos seres vivos. O objetivo da pesquisa era conhecer o impacto da compostagem de resíduos orgânicos municipais sobre a alteração da drenagem ácida de minas. Foi desenvolvido sob o guia metodológico de métodos quantitativos, uma vez que as variáveis independentes foram manipuladas, utilizando um projeto experimental com medições nos grupos experimental e de controle em 0, 24, 48 e 72 horas. Os resultados mostraram que a compostagem teve um efeito positivo na emenda da drenagem ácida de minas, conseguindo uma diminuição da acidez (pH = 2,52 a 6,2), por outro lado eliminando em sua totalidade a concentração de metais pesados como arsênico, mercúrio e chumbo, porém no caso da concentração de cádmio caiu de 3,0 para 0,8. Pode-se concluir que a compostagem de resíduos domésticos orgânicos tem um efeito positivo sobre a alteração da drenagem ácida de minas, pois aumenta o valor do pH e reduz a concentração de metais pesados.

Palavras-chave: Compostagem; Resíduos orgânicos; Drenagem ácida de minas; Remediação

INTRODUCCIÓN

La minería se asocia cada vez más con el problema del agua, ya sea en términos de extracción de agua y calidad del agua, los impactos directos en el agua son considerados como raíz del problema en los conflictos sociales entre las comunidades y empresas mineras (1). Por consiguiente, el drenaje ácido de mina es un origen de contaminación de agua dulce a nivel del planeta tierra, por lo que, el drenaje ácido de mina y los metales pesados afectan significativamente a la biota, así mismo a grandes cantidades de la biodiversidad y la biorremediación natural que ocurre en el tiempo (2).

Para mantener la seguridad alimentaria el suelo es considerado muy importante, por otra parte, el impacto negativo de la contaminación por metales pesados en la calidad de los cultivos ha colocado en riesgo la salud humana, por lo que es necesario prestar atención a la seguridad alimentaria y la contaminación del suelo agrícola (3). Consecuentemente el suelo contaminado con metales pesados requiere remediación ecológica, sin embargo, recientemente se ha prestado mucha atención a las posibles soluciones para limpiar los desechos o el suelo que presenta contaminación, con la finalidad de promover el crecimiento de las plantas (4,5).

Los desechos de la mina en la presa de relaves se han erosionado, creando una sobrecarga a su alrededor, además, este proceso produce aguas residuales altamente ácidas con altas concentraciones en Pb, Fe, Cu y Zn, así

mismo la calidad del agua en los arroyos se vio afectada con pH bajo ($\text{pH} < 4$) encontrándose presencia de metales pesados que superaron los límites máximos permisibles del agua potable (6). Por otra parte, el drenaje ácido de mina es menos probable cuando el CaCO_3 es alto ya que neutraliza la presencia de los sulfuros en el suelo (7).

La interacción del agua de lluvia con la pirita da como resultado altas concentraciones de arsénico en los drenajes ácidos de mina, particularmente en el lago ácido de Podwiśniówka (8). Sin embargo, el agua proveniente de una mina no es ácida debido al efecto amortiguador de las rocas carbonatadas, así mismo las concentraciones de Fe y Zn se disuelven por el impacto amortiguador (9).

El tratamiento con bario y piedra caliza de manera combinada dispersos en una matriz inerte y porosa de astillas de madera, puede neutralizar la acidez, los metales y los sulfatos de drenaje ácido de mina, con un tiempo de residencia de 30 h, la caliza eliminó Fe (III), Al, Cu, Pb, elevó el pH a 6, así mismo eliminó en un 70 % de sulfato (10). En otra investigación, una sola aplicación de cal compostada estabilizó el pH durante seis años en comparación con los seis años posteriores a la enmienda, reduciendo la materia orgánica y permaneciendo aún en suelo sin enmiendas (11).

La utilización de extractos de vermicompost y compostaje de residuos orgánicos urbanos a partir de muestras grandes demostraron una gran capacidad de remoción de contaminantes

metalíferos reduciendo el ingreso de contaminantes al suelo (12). Por otra parte, el compost de estiércol orgánico de residuos sólidos urbanos es un material adsorbente prometedor, especialmente para metales de relaves mineros, en este caso Cd, Pb y Zn así mismo la estabilidad, adsorción y potencial de desorción, tienen un comportamiento a largo plazo y riesgos ambientales de estos materiales (13).

El compost y el biocarbón se consideran como buenas propuestas para la fitoestabilización de suelos mineros que presentan contaminación con elementos potencialmente tóxicos, como los metales pesados Zn, Cd y Pb ya que el compost y el bioarbón mejoran los nutrientes en el suelo generando un crecimiento sano de las plantas (14). Por otro lado, el uso de zeolita y vermicompost produjo la mayor capacidad de retención de metal con un el 20% del contenido de metal (15).

El compost orgánico obtenido en el proceso de compostaje tiene una alta capacidad de detener a los metales pesados que son considerados elementos potencialmente tóxicos [PTE] (13). Cabe considerar que, el compost de biocarbón (*Brassica juncea L.*) es la mejor combinación para disminuir las concentraciones de los metales pesados en dichos suelos (16).

En la función ecológica del suelo afecta directamente la contaminación por los metales pesados, sin embargo, el compost mejora la conversión de nitrógeno del suelo más que el

biochar, eliminando de manera eficiente los metales pesados al aumentar los nutrientes del suelo (17). El proceso de compostaje puede reducir significativamente la cantidad de zinc y cobre, en similar caso la aplicación de cal puede incrementar significativamente la proporción de la fracción de zinc biodisponible respecto al control, sin embargo, el cobre casi no se ve afectado, concluyendo que la cal es posible utilizar como un recurso ideal con el estiércol de cerdo, acelerando el ciclo de compostaje y promoviendo el uso de la materia orgánica (18).

La adición de 7,5 % de biocarbón de cáscara de coco al compost de estiércol avícola pudo minimizar significativamente las características fisicoquímicas de las bacterias resistentes a los metales pesados Zn y Cu, al cambiar los importantes huéspedes bacterianos potenciales, como firmicutes [52,88 - 14,32 %], bacterias [35,20 - 4,99], bacteroides [0,05 - 15,07] y proteínas [0,01 - 14,32%] (19). El compostaje por adsorción húmeda con zeolita tiene un efecto de pasivación sobre los metales pesados durante el compostaje aeróbico, resultando que el Cu disminuyó un 45,13 %, el Cd en 16,11 % y el Pb en 25,49 % (20).

En una prueba de campo a nivel experimental con cuatro materiales orgánicos que incluyeron compostaje, compostaje de hongos, aserrín y paja, los sustratos mixtos mostraron eficiencia en la remoción de metales pesados Al [100 %] > Fe [92 %] > Mn [61 %] (21). La capacidad de adsorción del abono de estiércol de vaca lechera para metales pesados

utilizando la isoterma de Langmuir resulta para el Pb [0,460 mmol/g], Cu [0,428 mmol/g], Zn [0,237 mmol/g], y el valor de pH [4,0] por lo que, se puede utilizar para el tratamiento de drenaje ácido de mina (22).

Motivo por el cual el objetivo principal del estudio fue conocer el efecto del compostaje de desechos orgánicos municipales en la enmendación de 500 ml de drenaje ácido de mina. Así mismo se planteó objetivos específicos como conocer el comportamiento de los metales pesados y el valor de pH después de aplicar el compostaje de desechos orgánicos municipales al drenaje ácido de mina; además establecer el tiempo y la cantidad óptima de compostaje de desechos orgánicos municipales en contacto con 500 ml de drenaje ácido de mina.

La importancia del estudio radica en una alternativa para disminuir la aplicación de cal por parte de los proyectos mineros en el proceso de neutralización de drenajes ácidos de mina, ya que para obtener la cal se debe hornear la caliza a altas temperaturas, lo que resulta en una alta combustión en el horno, que produce mucho monóxido, que es dañino para nuestro medio ambiente, cuando el calor de combustión de la piedra caliza promedia los 1000 grados centígrados incrementando al calentamiento global, mientras que la producción de compost ayuda a reciclar los desechos ecológicos domésticos, creando empleos indirectos ayudando a restaurar el drenaje ácido de las minas y protegiendo el medio ambiente.

Es necesario abordar la responsabilidad ambiental de la minería en la región altiplánica de Puno, como caso específico el drenaje ácido de mina, que afecta la calidad del agua, suelo y la biodiversidad ambiental. Así mismo, en los hogares que se generan desechos orgánicos todos los días sin ningún tratamiento; facilitando la obtención de compost a partir de residuos orgánicos domiciliarios y utilizarlo como una alternativa para la remediación ecológica de aguas ácidas de mina sin dañar nuestro medio ambiente.

El estudio permite una alternativa a las empresas mineras para la remediación de las aguas ácidas de mina y así evitar los conflictos sociales con las áreas de influencia de proyecto minero.

MATERIALES Y MÉTODOS

La pesquisa se ejecutó en ciudad altiplánica de Puno-Perú, la investigación siguió los pasos de un enfoque cuantitativo e investigación aplicada con un diseño experimental; dado que se realizó maniobras en las variables independientes, asimismo, se tuvo un grupo control y diez grupos experimentales. La población de estudio fue 15.3 m³ de acumulación de drenaje ácido de mina (AMD) en el proyecto minero identificado como Aladino VI ubicado en las coordenadas E357701 y N8248437, la muestra consideró 10 litros de drenaje ácido de mina obtenido mediante muestreo probabilístico. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Calidad

Ambiental de la Universidad Nacional Mayor de San Andrés de Bolivia. Para el proceso de determinación de elementos metálicos como: cadmio, arsénico, mercurio y plomo, así como el valor de pH se concretó empleando los métodos estándares proporcionados por la Agencia de Protección Ambiental.

Las variables que se evaluaron fueron el compostaje de desechos municipales como variable independiente, la remoción de contaminación del drenaje ácido de mina; como variable dependiente y como variable interviniente se consideró el tiempo.

Entre los equipos, materiales e instrumentos se tiene un vehículo como móvil para transporte, algunos recipientes de plástico, cordel, ventilador para el traslado de muestras, medidor de pH digital, balanza, vasos, reloj, compostaje de desechos orgánicos municipales con agregado de estiércol de ovino que presentaron la siguiente información:

- pH 8,42
- %M.O. 51,52
- C.E. dS/m 7,74
- %C 28,62
- C/N 15,8
- %N 1,81
- %K₂O 2,06
- %P₂O₅ 2,66
- Coliformes totales NMP = Mayor a 2400/100ml
- Coliformes fecales NMP = Negativo
- Cantidad total de bacterias aerobias mesófilas = 1185200 UFC/g

El estudio experimental fue orientado por un DCA (diseño completamente aleatorizado), y la prueba ANOVA (análisis de Varianza) se realizó mediante la prueba "F" de Snedecor que sigue una distribución de probabilidad F de Fisher, cuyos cálculos fueron obtenidos empleando la herramienta estadística Statgraphics 19 Centurión.

RESULTADOS

En esta sección es destacado el proceso para determinar el comportamiento de metales pesados y también determinar su valor de pH luego de aplicar el compostaje de desechos orgánicos municipales al drenaje ácido de mina.

En el estudio se consideraron como variables dependientes a los valores del pH, la concentración de algunos metales pesados; ya sean como el cadmio, arsénico, plomo y mercurio los cuales fueron sometidos a una variación de factores para cada tratamiento; sometidos a 03 tiempos diferentes (72, 48 y 24 horas) y 03 cantidades diferenciadas (60g, 40g y 20g). 30 fue la cantidad total de observaciones que fueron analizadas. Como método estadístico se empleó la técnica del ANOVA DCA de un factor ya sea para el valor del pH, así como para la concentración de metales pesados en estudio, realizando múltiples pruebas y realizando gráficos que permitieron contrastar los valores promedio de pH para distintos valores sobre cada tratamiento aplicado. La prueba estadística F en la tabla ANOVA permitió determinar la presencia de diferencias y si ellas fueron significativas respecto a las medias.

La técnica del ANOVA permitió analizar el valor de pH, así como los valores de las concentraciones de los metales pesados, la razón-F, en el caso de pH es igual a 52,7987; para el Arsénico es 3915, de forma similar para el Cadmio es 15,9811 de igual manera se determinó para el Mercurio igual a 18,2514 y finalmente para el Plomo es 343,795; ello como cociente del valor presente entre grupos

y el valor dentro de cada grupo. Puesto que el valor de probabilidad de la prueba F fue menor a 0,05 permite sostener que existe suficiente evidencia estadística para indicar la diferencia estadística entre el promedio de las variables dependientes a las que fueron aplicadas diferentes tratamientos con un 95% de nivel de confianza en el estudio experimental como se muestra en la Figura1.

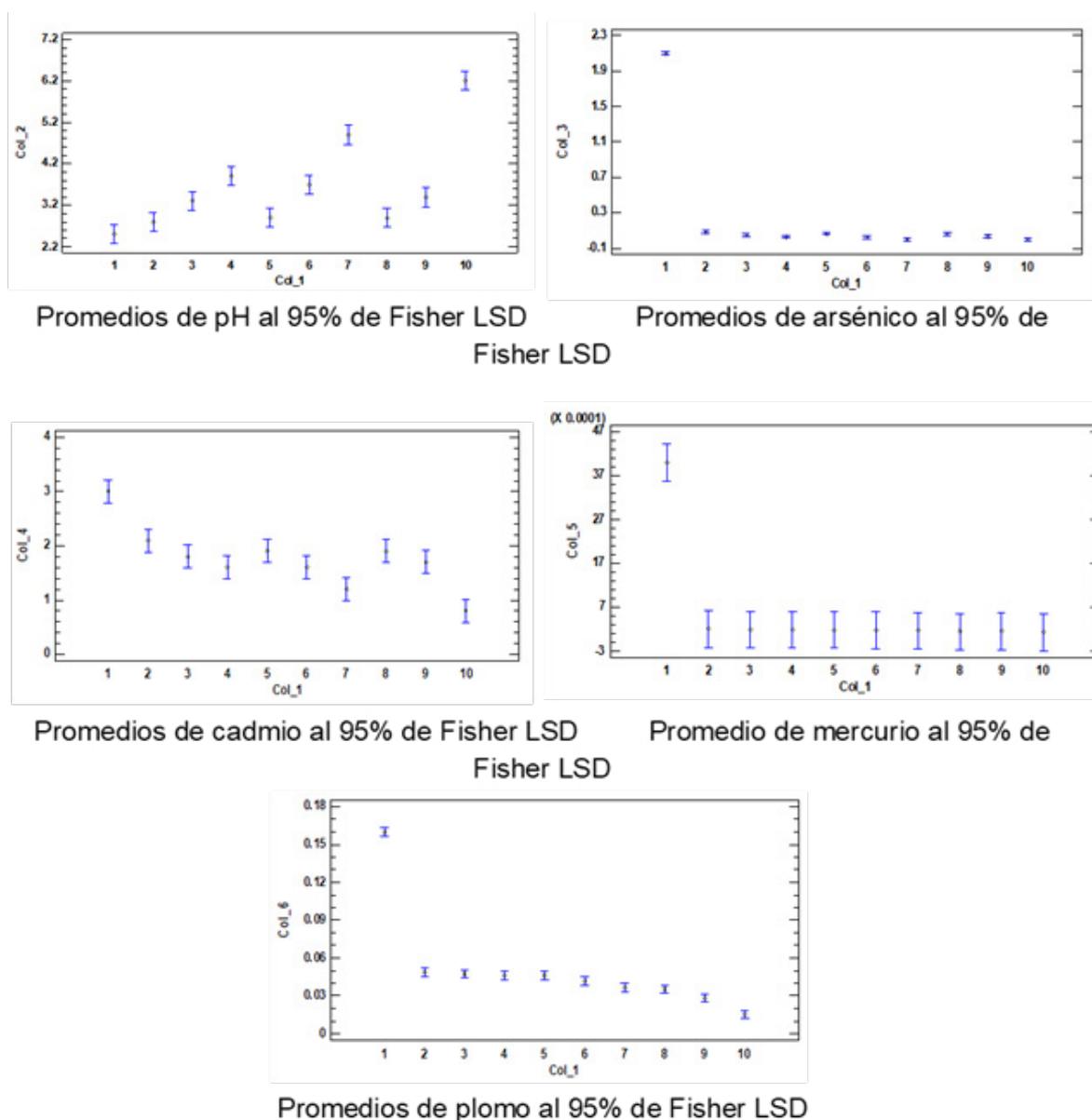


Figura 1. Medias al 95% de Fisher LSD para cada variable.

Comparando los valores estándar de calidad ambiental, referido al agua de subclase D del D.S. N° 004-2017-MINAM en el grupo control así como los resultados experimentales, se muestra que el resultado más cercano fue el tratamiento con 60 g de compost en 72 horas, alcanzando un pH 6.2 siendo este valor menor respecto al grupo control, mientras que los elementos como

el mercurio, plomo y arsénico se hallan entre los límites que establece el estándar de calidad ambiental, pero no se pudo reducir el cadmio a un valor mínimo, dado que aún supera los límites en el agua comparando con los estándares de calidad ambiental, así como se evidencia en la Figura 2.

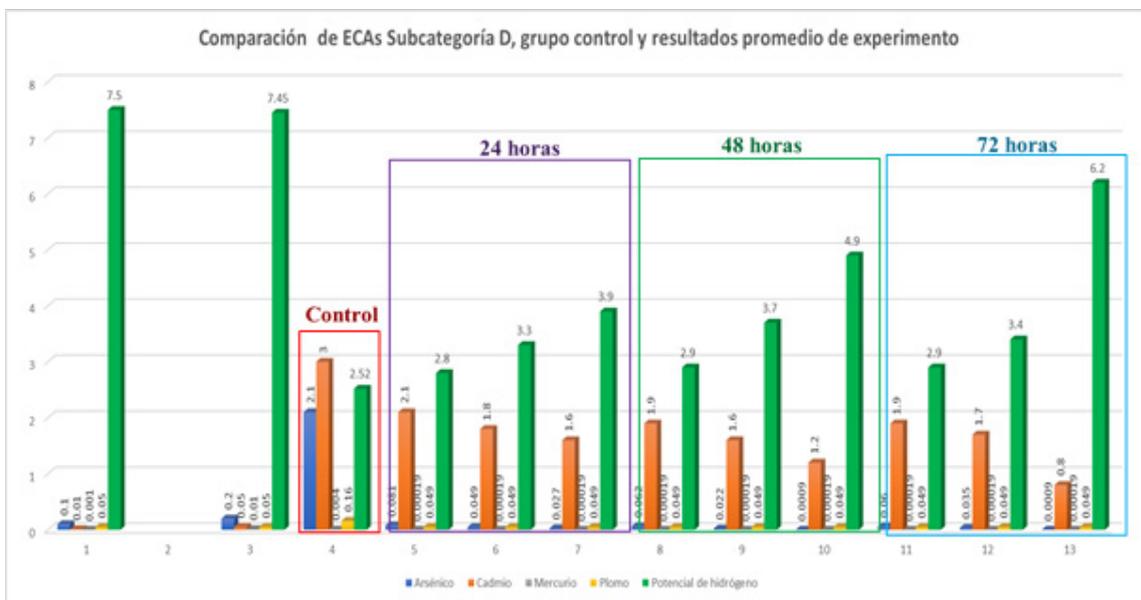


Figura 2. Comportamiento del pH y concentraciones de los metales pesados.

Respecto al tiempo, para establecer la cantidad óptima de compostaje de desechos orgánicos municipales en contacto con 500 ml de drenaje ácido de mina, en los cuales fueron

aplicadas ciertas cantidades de compostaje como: 60g, 40g y 20g, también para el tiempo se consideraron 72h, 48h y 24h, logrando obtener la siguiente información:

Tabla 1. Resultados de los tratamientos de remediación.

Parámetros	Grupos Tiempo Tratamiento Compost	Control	Tratamientos									
		0 horas	24 horas				48 horas			72 horas		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
		0g	20g	40g	60g	20g	40g	60g	20g	40g	60g	
pH	Repet. 1	2,44	2,85	3,42	4,2	3,3	3,9	4,7	2,7	3,7	6,5	
	Repet. 2	2,59	2,71	3,38	3,6	2,8	3,3	5,2	3,2	3,2	5,8	
	Repet. 3	2,53	2,84	3,1	3,9	2,6	3,9	4,8	2,8	3,3	6,3	
	Promedio	2,52	2,8	3,3	3,9	2,9	3,7	4,9	2,9	3,4	6,2	
Arsénico (mg/l)	Repet. 1	2,15	0,078	0,052	0,026	0,057	0,025		0,09	0,033		
	Repet. 2	2,05	0,085	0,048	0,031	0,065	0,022		0,05	0,037		
	Repet. 3	2,1	0,08	0,047	0,024	0,064	0,019		0,04	0,035		
	Promedio	2,1	0,081	0,049	0,027	0,062	0,022	< 0,0010	0,06	0,035	< 0,0010	
Cadmio (mg/l)	Repet. 1	3,2	1,7	2,08	1,38	2,12	1,77	1,3	1,8	1,9	0,7	
	Repet. 2	3	2,4	1,55	1,9	1,71	1,43	0,85	2,1	1,5	0,6	
	Repet. 3	2,8	2,2	1,77	1,52	1,87	1,6	1,45	1,8	1,7	1,1	
	Promedio	3	2,1	1,8	1,6	1,9	1,6	1,2	1,9	1,7	0,8	
Mercurio (mg/l)	Repet. 1	0,0039										
	Repet. 2	0,0025										
	Repet. 3	0,0056										
	Promedio	0,004	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,0002	< 0,0002	
Plomo (mg/l)	Repet. 1	0,15										
	Repet. 2	0,16										
	Repet. 3	0,17										
	Promedio	0,16	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	

La Tabla 1 permite apreciar resultados de los tratamientos que fueron aplicados, también ello se observa el tiempo, y cantidad más óptima para pH es de 72 horas con 60 gramos de compostaje, de forma similar para el arsénico el tiempo y la cantidad permitida fue a partir de las 48 horas con 60 gramos de compostaje; ya que el equipo del laboratorio de Calidad Ambiental no pudo precisar el valor de la presencia en el análisis realizado, en cambio para cadmio el tiempo óptimo fue de 72 horas con 60 gramos de compostaje, mientras que

para el plomo y mercurio el tiempo óptimo fue de 24 horas con 20 gramos de compostaje, posterior a este tiempo y cantidad el equipo de análisis no consigue detectar la presencia de los mencionados metales que se consideran como metales pesados.

Para determinar si el compostaje de desechos orgánicos municipales produce o no un efecto en la remediación empleando 500 ml de drenaje ácido de mina, se calculó los promedios para diferentes variaciones del tratamiento, obteniendo el siguiente resultado:

Tabla 2. Valores del efecto del compostaje respecto al drenaje ácido de mina.

Parámetros	Grupos Tiempo Tratamiento Compost	Control	Tratamientos								
		0 horas	24 horas			48 horas			72 horas		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0g	20g	40g	60g	20g	40g	60g	20g	40g	60g
pH	Media	2,52	2,8	3,3	3,9	2,9	3,7	4,9	2,9	3,4	6,2
Arsénico (mg/l)	Media	2,1	0,081	0,049	0,027	0,062	0,022	< 0,0010	0,06	0,035	< 0,0010
Cadmio (mg/l)	Media	3	2,1	1,8	1,6	1,9	1,6	1,2	1,9	1,7	0,8
Mercurio (mg/l)	Media	0,004	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020	< 0,00020
Plomo (mg/l)	Media	0,16	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050	< 0,050

La Tabla 2 muestra el efecto del compostaje en variaciones del tiempo por tratamiento, así como variaciones en cantidades de compostaje que se aplicaron a las muestras diferenciadas de drenaje ácido de mina. Según los resultados el efecto es positivo; porque se disminuye considerablemente la cantidad de metales pesados en estudio (plomo, arsénico, cadmio y mercurio), el cadmio no se puede bajar por debajo del ECA para agua; ya que persiste con una cantidad de 0.8 mg/l. En cuanto al nivel de pH el efecto también es positivo; ya que incrementa su valor a 6,2 siendo este valor menos ácido.

DISCUSIÓN

Esta investigación evidencia que la presencia de metales pesados como: mercurio, plomo y arsénico disminuyeron su valor hasta en 100% siendo muy bueno; ya que se hallan por debajo de los límites de los ECA para agua, mientras que el cadmio solo disminuyó en un 61.9% encontrándose aún fuera de los límites del ECA para agua. Por otro lado, se pudo aumentar el valor de pH a 6.2, es decir, la acidez fue menor que el grupo control, dichos resultados se lograron a las 72 horas de contacto luego de aplicar 60 g de compostaje en un drenaje ácido de mina de 500 ml. Estos hallazgos que se presentan son ratificados por (20) ya que indican que el compostaje por adsorción con humectación con zeolita tiene un efecto pasivo sobre los metales pesados, así lograron reducir el cobre (Cu) en un 45.13 %, el cadmio (Cd) en un 16.11 % y el plomo (Pb) en un 25.49 % en el periodo del compostaje de tipo aeróbico.

El aumento del valor de pH desde 2.5 hasta 6.2 indica que este valor es menos ácido que el grupo de control, de forma similar las concentraciones para los metales pesados se redujeron hasta en un 100%, así ocurrió para el mercurio, plomo y arsénico, pero solo se redujo en un 61,9% la concentración del cadmio, indicando que todavía persiste en todos los tratamientos, también se determinó la cantidad óptima siendo 60 g y el tiempo de contacto óptimo es de 72 horas entre el compostaje de desechos orgánicos municipales comparando con el drenaje ácido de mina. Estos resultados son corroborados con las conclusiones que arribaron (10) ya que, en su investigación de calizas y virutas metálicas de drenaje ácido de mina, determinaron que un tiempo permitido es de 30 horas, logrando elevar el pH a 6 disminuyó Pb, Fe, Cu, y Al hasta un 70% de sulfato; es decir hasta 1800 mg/l.

El efecto del compostaje de desechos orgánicos municipales frente al drenaje ácido de mina fue positivo y favorable; ya que aumentó el valor de pH (6.2 desde 2.52) resultando menos ácido a los evaluados en el grupo control. Mientras que, para los metales pesados, se ha obtenido un efecto positivo; dado que se redujo la concentración de estos metales, como: plomo, mercurio y arsénico hasta un 100%, en cambio en el cadmio se consiguió reducir hasta un 61.9%. Esto mismo lo señalan Visconti et al., (14) al indicar que biochar y compost; con ambos se logra efectos positivos para equilibrar suelos mineros que se hallan contaminados con metales pesados (P, Cd y Zn), este efecto se

produce al liberar nutrientes en el suelo, similar a ello sostienen Lima et al., (13) cuando señalan que el compostaje basado en RSU tiene también un efecto positivo; dado que proporciona adsorbentes muy prometedores en los desechos de las minas para los metales pesados como zinc, plomo y cadmio.

CONCLUSIONES

Se llega a concluir que el compostaje de desechos orgánicos municipales a nivel global tuvo un efecto favorable y positivo referido al drenaje ácido de mina; dado que se incrementó el pH a 6.2 de 2.52 indicando menos ácido en el grupo experimental que el grupo de control, con relación a la concentración de los metales pesados como el plomo, arsénico y mercurio se ha reducido hasta un 100% porque luego de ello el equipo analítico ya no pudo detectar su presencia en las muestras de estudio. Sin embargo, en el caso del cadmio su concentración se redujo, pero solo en un 61,9%.

Respecto a la comparación del ECA para el agua, con los resultados en la variedad de tratamientos para el drenaje ácido de mina, se obtiene el índice de acidez el cual no superó el valor esperado, alcanzando solo un pH de 6,2; mientras que el ECA requería que fuera un pH de 7,45; pero para algunos metales considerados como pesados; ya sean plomo, arsénico y mercurio, la concentración se redujo al 100% siendo estas concentraciones inferior a lo exigido en el ECA para agua, pero para el cadmio la concentración se reduce solo en un 61.9% que aún se halla fuera del límite exigido por el ECA para agua.

El mejor tiempo de contacto entre compostaje y 500 ml de drenaje ácido de mina fue de 72 horas, así mismo se logró determinar la cantidad óptima de compostaje de desechos orgánicos municipales; siendo ello 60 g. Por otra parte, este tratamiento ha mostrado los mejores resultados en la disminución de la presencia de metales pesados y el aumento del valor de pH logró reducir la acidez en el estudio.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. S. Thomashausen N. Maennling, and T. Mebratu-Tsegaye, "A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector," *Resour. Policy*, vol. 55, no. July, pp. 143–151, 2018, doi: 10.1016/j.resourpol.2017.11.012.
2. A. P. Dean et al., "Science of the Total Environment Metabolic adaptation of a *Chlamydomonas acidophila* strain isolated from acid mine drainage ponds with low eukaryotic diversity," *Sci. Total Environ.*, vol. 647, pp. 75–87, 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.445.
3. G. Qin, Z. Niu, J. Yu, Z. Li, J. Ma, and P. Xiang, "Soil heavy metal pollution and food safety in China: Effects, sources and removing technology," *Chemosphere*, vol. 267, p. 129205, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129205.
4. S. Jiang, L. Huang, T. A. H. Nguyen, Y. Sik, V. Rudolph, and H. Yang, "Chemosphere Copper and zinc adsorption by softwood and hardwood biochars under elevated sulphate-induced salinity and acidic pH conditions," *Chemosphere*, 2015, doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.06.079.
5. J. H. Park and G. K. Choppala, "Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals," pp. 439–451, 2011, doi: 10.1007/s11104-011-0948-y.

- 6.** N. E. Nieva, L. Borgnino, and M. G. García, "Long term metal release and acid generation in abandoned mine wastes containing metal-sulphides," *Environ. Pollut.*, vol. 242, pp. 264–276, 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.067.
- 7.** F. B. Salas Urviola, P. Guadarrama Guzmán, J. J. Gutiérrez Bazán, N. García Luna, G. Fernández Villagómez, and M. T. Alarcón Herrera, "Determinación De Posible Drenaje Ácido De Mina Y Caracterización De Jales Mineros Provenientes De La Mina Cerro De Mercado, Durango, México," *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 36, no. 3, pp. 729–744, 2020, doi: 10.20937/rica.53461.
- 8.** Z. M. Migaszewski, A. Gałuszka, and S. Dołęgowska, "Arsenic in the Wiśniówka acid mine drainage area (south-central Poland) – Mineralogy, hydrogeochemistry, remediation," *Chem. Geol.*, vol. 493, pp. 491–503, 2018, doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.06.027.
- 9.** E. Pavoni et al., "Mobility and fate of Thallium and other potentially harmful elements in drainage waters from a decommissioned Zn-Pb mine (North-Eastern Italian Alps)," *J. Geochemical Explor.*, vol. 188, no. 2017, pp. 1–10, 2018, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.01.005.
- 10.** E. Torres, A. Lozano, F. Macías, A. Gomez-Arias, J. Castillo, and C. Ayora, "Passive elimination of sulfate and metals from acid mine drainage using combined limestone and barium carbonate systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 114–123, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.224.
- 11.** J. Pardo, P. Mondaca, J. L. Celis-diez, R. Ginocchio, C. Navarro-villarreal, and A. Neaman, "Geoderma Assessment of revegetation of an acidic metal (loid) -polluted soils six years after the incorporation of lime with and without compost," *Geoderma*, vol. 331, no. January, pp. 81–86, 2018, doi: 10.1016/j.geoderma.2018.06.018.
- 12.** N. Siobhan, "Graphical abstract SC," *Process Saf. Environ. Prot.*, 2018, doi: 10.1016/j.psep.2018.07.005.
- 13.** J. Z. Lima, I. M. Raimondi, V. Schalch, and V. G. S. Rodrigues, "Assessment of the use of organic composts derived from municipal solid waste for the adsorption of Pb, Zn and Cd," *J. Environ. Manage.*, vol. 226, no. August, pp. 386–399, 2018, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.047.
- 14.** D. Visconti, M. J. Álvarez-Robles, N. Fiorentino, M. Fagnano, and R. Clemente, "Use of Brassica juncea and Dactylis glomerata for the phytostabilization of mine soils amended with compost or biochar," *Chemosphere*, vol. 260, 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127661.
- 15.** M. A. Layme Choque, "Adsorción de Metales Pesados en suelos contaminados aplicando enmiendas para reducir su disponibilidad. revisión sistemática 2021," Universidad Cesar Vallejo, 2020. [Online]. Available: http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- 16.** R. Forján, B. Cerqueira, and E. F. Covelo, "Comparison of compost with biochar versus technosol with biochar in the reduction of metal pore water concentrations in a mine soil," *J. Geochemical Explor.*, no. August 2017, pp. 0–1, 2018, doi: 10.1016/j.gexplo.2018.06.007.
- 17.** M. Li et al., "Responses of ammonia-oxidizing microorganisms to biochar and compost amendments of heavy metals-polluted soil," *J. Environ. Sci. (China)*, vol. 102, pp. 263–272, 2021, doi: 10.1016/j.jes.2020.09.029.
- 18.** Z. Chen, Q. Fu, Y. Cao, Q. Wen, and Y. Wu, "Effects of lime amendment on the organic substances changes, antibiotics removal, and heavy metals speciation transformation during swine manure composting," *Chemosphere*, vol. 262, p. 128342, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128342.
- 19.** S. K. Awasthi et al., "Can biochar regulate the fate of heavy metals (Cu and Zn) resistant bacteria community during the poultry manure composting?" *J. Hazard. Mater.*, vol. 406, p. 124593, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124593.

20. H. Cui, Y. Ou, L. Wang, B. Yan, Y. Li, and M. Bao, "Critical passivation mechanisms on heavy metals during aerobic composting with different grain-size zeolite," *J. Hazard. Mater.*, vol. 406, p. 124313, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124313.

21. H. Song, G. J. Yim, S. W. Ji, C. M. Neculita, and T. Hwang, "Pilot-scale passive bioreactors for the treatment of acid mine drainage: Efficiency of mushroom compost vs. mixed substrates for metal removal," *J. Environ. Manage.*, vol. 111, pp. 150–158, 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.06.043.

22. M. Zhang, "Adsorption study of Pb(II), Cu(II) and Zn(II) from simulated acid mine drainage using dairy manure compost," *Chem. Eng. J.*, vol. 172, no. 1, pp. 361–368, 2011, doi: 10.1016/j.cej.2011.06.017.