

Importancia de la estabilización de lodos residuales para su valorización agrícola en el acondicionamiento del suelo

Importance of sewage sludge stabilization for agricultural valorization in soil conditioning

Teofilo Eustedio Meneses Solis¹, Carlos Francisco Cabrera Carranza²

Recibido: 30/01/2021 - Aprobado: 09/12/2021 – Publicado: 30/06/2022

RESUMEN

Se estudió la influencia de la adición de materia alcalina en el proceso de estabilización de dos lodos de aguas residuales. El incremento del PH del lodo, llevándolo a valores cercanos de doce, se debe al aumento de las adiciones de materia alcalina durante la estabilización del lodo residual. Esta técnica se utilizó para estabilizar el lodo y se le pueda dar una valorización agrícola al lodo residual. En este contexto, las características problemáticas presentes en los lodos nos conducirán a un tratamiento preliminar de los lodos residuales.

Palabras claves: Adiciones de materia alcalina; estabilización; lodo; tratamiento de lodos; valorización de lodos.

ABSTRACT

The influence of the addition of alkaline mass in the stabilization process of two waste water sludges was studied. The increase in the PH of the sludge, carrying it to values near to twelve, is due to the increase of alkaline mass additions during the stabilization of the residual sludge. This technique was used to stabilize the sludge and to give an agricultural valorization to the residual sludge. In this context, the problematic characteristics present in the sludge will lead us to a preliminary treatment of the sewage sludge.

Keywords: Alkaline mass additions; stabilization ;sludge; sludge treatment; sludge valorization.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Unidad de Posgrado. Lima, Perú.

Egresado. E-mail: teofilo.meneses@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3209-1464>

2 Profesor principal-Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Lima, Perú.

Docente. E-mail: ccabrera@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5821-5886>

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo con estrictas regulaciones ambientales, la producción de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) ha aumentado continuamente en todo el mundo durante varios años (Vesilind 2007), (Miranda 2014), (Méndez et al. 2017), (Nizama & Cabrera 2018), (Quipuzco 2004). Igualmente según las leyes de la velocidad, leyes de los fenómenos de transporte en los mecanismos de transporte molecular, ecuaciones definidos por Fick, 1855; Fourier, 1827 y Newton, 1687 (Ibarz & Barbosa-Canovas, 2005) para los principios de transferencia de masa, calor y transporte de cantidad de movimiento respectivamente, podemos observar en los andes de Huántar y Chavín, que las leyes de la velocidad se podrían aplicar y verificar que están en equilibrio con la naturaleza, y ningún impacto significativo debido a la contaminación ambiental han sido observados. Luego, por analogía referido al intercambio de una propiedad de transferencia, y según resultados obtenidos podemos afirmar que los lodos estabilizados no generan ningún impacto medioambiental (Figuras 1 y 2, la laguna azul y de Tishguyoj, lugares donde las leyes de la velocidad están en equilibrio con la naturaleza). Prevalcen dos opciones principales para la destinación de lodos después de la deshidratación mecánica: valorización energética y esparcimiento agrícola. Se ha establecido que una operación de secado térmico, después de la deshidratación, es un paso esencial. Para tal fin se les dará una valorización agrícola a los lodos residuales y ser destinados hacia las estaciones de valorización, si las características lo permiten, los lodos son valorizados en la agricultura mediante el esparcido agrícola del lodo estabilizado como acondicionador o para

la rehabilitación de suelos. La adición de materia alcalina aumenta el contenido de sólidos secos (DS) de los lodos tratados, gracias al aporte de materias secas. La materia alcalina adicionada completa la estabilización de los lodos, eliminando riesgos de fermentación y desprendimiento de olores durante el almacenamiento y del esparcido agrícola en los suelos.

La adición de lodo residual estabilizado mejora las propiedades químicas y físicas del suelo arenoso y lo transforma en apropiado para usos agrícolas. Se determinó que el rendimiento en maíz se incrementa gradualmente con la adición de lodo residual al terreno arenoso (Reyes Lázaro, 2008).

Los altos niveles de Fosforo y Nitrógeno en los lodos aeróbicos sugieren que los lodos biológicamente estabilizados tienen el potencial de ser un buen fertilizante.

Así también la adición de materia alcalina aumenta el P^H de los lodos, los organismos patógenos eventualmente todavía presentes en los lodos son destruidos, siendo los lodos estabilizados e higienizados. De esta manera los lodos estabilizados, permite su almacenamiento en el borde de los campos fuera de los periodos de fertilización de los terrenos agrícolas. Si bien el número de publicaciones relacionadas con el secado de lodos residuales ha ido creciendo progresivamente desde 1990 (Gruter 1990), (Chen et al. 2002), (Espinoza & Santos 2021), existe muy poca información de estudios que trate sobre la estabilización de lodos mediante adiciones de materia alcalina a los lodos residuales. El presente trabajo



Figura 1. Puna del distrito de Huántar, se observa la laguna azul, lugares donde las leyes de la velocidad están en equilibrio con la naturaleza.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Puna del distrito de Chavín, se observa la laguna de Tishguyoj, lugares donde las leyes de la naturaleza están en equilibrio con la naturaleza.

Fuente: Elaboración propia

tiene como objetivo subsanar esta falta de conocimiento determinando el efecto de la adición de materia alcalina durante la estabilización de lodos residuales y darle una valorización agrícola al lodo residual.

II. MÉTODOS

2.1. Muestras de lodos

Todas las experimentaciones han sido realizadas con el lodo de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En la figura 3 se muestra el local de la estación de depuración de aguas residuales, San Antonio de Carapongo. Los lodos de depuración de aguas residuales domésticas utilizados para la valorización agrícola del lodo fueron tomados de la estación de depuración citada, los lodos denominados A y B han sido recogidos después de la etapa de deshidratación mecánica en la PTAR. El producto húmedo, se acondicionaron en recipientes de 10 litros y se recogieron en promedio cada quince días a razón de dos o tres recipientes a la vez. Estos fueron colocados en el refrigerador para que se conservaran lo mejor posible. Sin embargo, la pérdida de agua y el envejecimiento del sólido húmedo son casi inevitables durante un periodo largo.

Debido al suministro periódico, los lodos eran diferentes de un momento a otro. En efecto, la variación de las características del agua residual en la entrada de la planta repercute sobre la biomasa. Las experimentaciones fueron por lo tanto dependientes de las muestras a nuestra

disposición. Las pruebas para la serie 2C y 2D se realizaron agregando masas crecientes de materia alcalina con la finalidad de determinar los valores de las relaciones de estabilización del lodo, y para la serie 3A no se realiza pruebas de estabilización, solo se agregan masas crecientes de lodos secos.

La tabla 1 presenta las diferentes muestras. Cada línea de la primera columna se refiere a una serie de secados realizados en condiciones específicas. Las series con el mismo número (1, 2 o 3) corresponden a lodos que provienen del mismo punto de descarga. La segunda columna indica un número referido al recipiente de lodo utilizado. La tercera columna da información sobre el contenido de materia alcalina. Por último, la cuarta columna presenta el nombre dado a las pruebas de secado.

El contenido de materia seca (MS o MS_p) y materias volátiles, también denominadas materias secas volátiles o sólidos volátiles (MSV) se determinó según métodos estándar (ASAE, 1996). Antes del secado, las muestras de lodo se extruyeron utilizando una matriz circular de 12 mm.

Las características de la PTAR San Antonio de Carapongo se indican en la Tabla 2. La PTAR consta de un sistema de tratamiento de lodos activados con aeración prolongada, recibe las aguas residuales por medio de una estación elevadora ubicada en la parte más baja del sistema de alcantarillado de la urbanización San Antonio de Carapongo.



Figura 3. Imagen del local de la estación de depuración de aguas residuales, San Antonio de Carapongo.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Diferentes tipos de muestras utilizadas en las pruebas de secado

	N° Muestra	Tipo	Nombre de las pruebas
Serie 1A	1	Sin materia alcalina	satems1-4
Serie 1B	2 y 2'	Con materia alcalina	atemsh3-8
Serie 2A	3	Con materia alcalina	atems2-5
Serie 2B	4	Con materia alcalina	atems7-22
Serie 2C	5	Con materia alcalina	atems8-14
Serie 2D	5	Con materia alcalina	atems4-13
Serie 3A	6	Sin materia alcalina	satemsh1-5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Características principales de la PTAR San Antonio de Carapongo

Características	Descripción
Área Total (ha)	1.69
Entorno	Urbano
Tipo de Desagüe	Doméstico
Caudal de Diseño (L/s)	134
Caudal Actual (L/s)	124,31*
Sistema de Tratamiento	Lodos Activados
Número de Procesos	5
Destino del Efluente	Vertimiento

Nota: * Dato Referencial, registro de promedio del caudal de tratamiento de enero a septiembre de 2019

Fuente: Actualización del EIA del proyecto de SEDAPAL.

La PTAR, está ubicada en el margen derecho del río Rímac, distrito de Lurigancho-Chosica. Se encuentra en la cuenca del río Rímac. Las tablas 3 y 4, detallan la ubicación:

En el presente artículo, se dan a conocer los resultados obtenidos a temperaturas y velocidades del aire cercanas a 105°C y 1,1m/s. No se llevó a cabo ninguna humidificación de aire adicional.

El presente estudio trata de dar a conocer la influencia de la adición de materia seca sobre el comportamiento al secado y a la estabilización del lodo de depuración de aguas residuales domésticas. Para este estudio se añadieron a estos lodos cantidades crecientes de materia seca en forma de materias alcalinas o de lodos previamente secados y molidos. En resumen, utilizamos la cantidad referencial 1kg de lodos frescos, añadiendo cantidades crecientes de lodos secos o de materias alcalinas. Se determinaron a continuación los contenidos en materias secas iniciales y finales, las materias volátiles, y los valores de las relaciones de estabilización del lodo.

Los experimentos de referencia correspondieron al secado de 1 kg de cada tipo de lodo. Se realizó una mezcla manual suave del lodo fresco y seco hasta la homogeneización visual de la muestra.

2.2. Materiales y métodos

2.2.1 contenido de materias secas (MS)

Una masa conocida de sólido húmedo colocada en un recipiente de aluminio es situada en un horno a 105°C hasta

que la masa alcance un valor constante. Se necesitan de 24 a 48 horas para alcanzar la sequedad. Sea M_0 , la masa de la muestra húmeda y M_f su masa después del secado.

Materiales utilizados: Recipientes resistentes a 105°C (aluminio); Horno termostático a 105°C; Balanza.

Método: Pesada y tara del recipiente; Pesada del lodo (entre 15 y 70g) = M_0 ; Puesta en el horno; Pesada cada 24 horas hasta que la masa sea constante (generalmente dos días son suficientes), se deduce M_f con el conocimiento de la masa del recipiente. Conociendo la masa inicial y la masa final después de la pérdida de agua, el contenido de materias secas es calculada.

2.2.2 contenido de materias volátiles (MSV)

Una cantidad conocida de sólido seco colocado en un crisol se pone al horno, previamente calentado y termostático a 550°C, durante al menos dos horas. Sea M_0 , la masa inicial de la muestra y M_f su masa después de la calcinación.

Materiales utilizados: Crisoles; Horno de mufla precalentado a 550°C; Pinzas para horno, guantes; Balanza.

Método: Pesada y tara de los crisoles; Pesada de la materia seca dispuesta en los crisoles (10 a 20 g) = M_0 ; Puesta en el horno durante al menos dos horas; Enfriamiento de los crisoles (asegurarse que la muestra esté bien calcinada hasta el fondo del crisol, para lograrlo preferir crisoles de amplia abertura); Pesada de los crisoles, se deduce M_f con el conocimiento de la masa del crisol. Conociendo la masa

Tabla 3. Ubicación de PTAR San Antonio de Carapongo

Vértices	Coordenadas	
	Este (m)	Norte (m)
1	296,156.98	8,671,990.88
2	296,161.34	8,671,905.64
3	296,059.98	8,671,892.23
4	296 051	8,671,882.50
5	295,979.40	8,671,877.61
6	295,958.27	8,671,964.09
7	295,973.34	8,671,965.96
8	296,017.98	8,671,972.62
9	296,088.23	8,671,983.10
10	296,124.00	8,671,988.44
11	296,137.75	8,671,989.65
12	296,147.45	8,671,990.94

Fue nte: Actualización del EIA del proyecto de SEDAPAL

Tabla 4. Ubicación de punto de descarga de PTAR San Antonio de Carapongo

Punto	Descripción del Punto	Coordenadas	
		Este (m)	Norte (m)
CR-SAC-03	Río Rímac	295 982	8 671 836

Fuente: Actualización del EIA del proyecto de SEDAPAL

inicial y la masa final, el contenido de materias volátiles referidos a la materia seca es calculada.

2.3. Caracterización de los lodos

Para alcanzar resultados favorables fue necesario caracterizar el lodo, que permitió conocer los parámetros de los lodos, luego evaluar y comparar los resultados de las pruebas realizadas a lodos con y sin adición de materias alcalinas. Las pruebas realizadas para calcular los contenidos de materias secas y materias volátiles de los lodos de depuración son los siguientes:

2.3.1 Contenido de materia seca

Una masa conocida de sólido húmedo, lodo fresco, colocado en un recipiente de aluminio fue llevado a una estufa a 105°C hasta que la masa alcance un valor constante. Es necesario realizar la operación entre 24 a 48 horas para alcanzar el secado de la muestra. Se realizó la pesada y tara del recipiente, se pesó el lodo (entre 15 a 70 g) = M_0 , es la masa de la muestra húmeda que se coloca en la estufa para el secado hasta que la masa alcance valores constantes. Se deduce la masa final después del secado con el peso conocido de la masa del recipiente. Conociendo la masa inicial y la masa final después del secado, el contenido de materias secas es calculada.

2.3.2 Contenido de materia seca volátil

Se determinó por calcinación de la muestra seca a una temperatura de 550°C. Una cantidad de sólido seco es colocado en un recipiente y llevado a un horno, previamente calentado a 550°C.

Se realizó la pesada y tara de los recipientes a utilizar; pesada de la materia seca colocado en el recipiente (entre 10 a 20g) = M_0 , sería la masa inicial de la muestra, llevándolo al horno para su calcinación durante 2 horas por lo menos. Siendo M_f su masa final después de la calcinación. Luego, se procedió al enfriamiento del recipiente con las muestras (asegurándose que la muestra este bien calcinada). Pesada de los recipientes, se deduce la masa final de la muestra con el dato conocido del recipiente. Conociendo la masa inicial y la masa final, el contenido de materias volátiles referidos a la materia seca es calculada. El contenido de materias volátiles sobre materia seca se expresó en porcentaje.

2.4. La estabilización

Para la valorización agrícola de los lodos de depuración producidos como resultado del tratamiento de aguas residuales domésticas, fue necesario determinar el tratamiento para la estabilización del lodo y también la reducción del contenido de agua en el lodo, que va a permitir modificar las características físicas, químicas o biológicas del lodo, con el fin de reducir o eliminar daños al ambiente y a la salud, de esa manera prepararlo para su valorización agrícola.

Las pruebas a realizar para la estabilización del lodo van a conducir a la modificación de la composición, estructura y las propiedades del lodo necesarios para su valorización agrícola. Así también los cambios que experimenta el lodo cuando se le agrega materia seca.

La estabilización se realizó agregando materia inorgánica (materia alcalina), para completar la estabilización de los lodos, y lograr elevar el P^H hasta 12 a una temperatura de 25°C. Después, sin agregar más materia alcalina, se mantuvo por 2 horas. Luego, sin agregar materia alcalina, 22 horas más manteniendo un P^H de por lo menos 11.5

El proceso se realizó con la finalidad de eliminar los riesgos de fermentación de la materia orgánica contenido en el lodo y desprendimiento de olores durante su almacenamiento y esparcido en los campos. También aumentar el P^H de los lodos, para que los organismos patógenos sean destruidos.

El contenido en hidróxido de calcio, con adición de material alcalino, de los lodos aumenta sus valores agrícola y económico.

Después de las operaciones preliminares realizadas y si las características lo permiten, los lodos son valorizados en la agricultura como acondicionador del suelo o rehabilitación de suelos industriales.

III. RESULTADOS

3.1 Interpretación

3.1.1 Contenido de materia seca (Tabla 5)

Todas estas muestras han sido recogidas el mismo día en el punto de descarga de la PTAR. En primer lugar, podemos constatar que el porcentaje de materia seca obtenida para la prueba de secado, sin adición de materia alcalina, es alrededor de 25%. La adición de materia alcalina tiene como consecuencia aumentar el contenido de materias secas del lodo. En efecto, si consideramos la adición de 45% (sobre materia seca) de materia alcalina a 90% de sequedad, el nuevo contenido de materia seca es el siguiente:

$$MS = \frac{24,763 + 0,45 \cdot 24,763 \cdot 0,9}{100 + 0,45 \cdot 24,763} = 31,30\%$$

Este valor es del mismo orden de magnitud que los obtenidos con adición de materia alcalina. En el caso de las muestras con materia alcalina, con un contenido de materia seca ligeramente superior a 31%, notamos una ligera diferencia entre dos recipientes del mismo lodo. Podemos sin embargo afirmar que las características de los lodos recogidos el mismo día son prácticamente las mismas (ver Tabla 6).

Los lodos de la serie 2 son un poco más húmedos. Este aumento de la humedad es sin duda relacionado a un contenido de materia alcalina menor que la anterior. Podemos de nuevo constatar una diferencia muy ligera entre los dos recipientes de muestras.

3.2. Contenido de materias volátiles

La muestra sin materia alcalina contienen 10% más de materias volátiles que las muestras con materia alcalina. En efecto, por naturaleza, las materias alcalinas no deberían contener materias volátiles, puesto que es el producto

de la calcinación a alta temperatura. Por lo tanto, la adición de estos disminuye globalmente el contenido de materias volátiles. Podemos de nuevo constatar que las características de los dos recipientes con materia alcalina son prácticamente las mismas (ver Tabla 7).

La muestra 3 contiene aproximadamente la misma cantidad de materias volátiles que las muestras 2 y 2'. La naturaleza del lodo no ha cambiado mucho entre dos suministros de lodos. Si consideramos que el segundo

recipiente debería tener características cercanas al primero, la prueba 1 sobre la muestra 4 da un valor un poco bajo. Esto puede tratarse de un error experimental o de una heterogeneidad local del lodo (ver Tabla 8).

Las muestras realmente sometidas al secado, es decir que contienen materias alcalinas han sido evaluados. De nuevo, las características del lodo varían poco entre dos recipientes de un mismo suministro.

Tabla 5. Pruebas de secado para obtener el contenido de materia seca, realizados en muestras de la serie 1

$\sigma^2 = 0,020 \%$ $\sigma = \pm 0,14 \%$

Serie 1		M_0 (g)	M_f (g)	MS (%)	MS promedio (%)
Muestra n° 1	Test 1	64.5	15.94	24.7	24,76±0,14
	Test 2	66.05	16.39	24.8	
	Test 1	39.36	12.32	31.3	
Muestra n° 2	Test 2	51.89	16.38	31.6	31,38±0,14
	Test 3	49.45	15.42	31.2	
	Test 1	30.12	9.37	31.1	
Muestra n° 2'	Test 2	46.1	14.34	31.1	31,03±0,14
	Test 3	41.58	12.83	30.9	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Pruebas de secado para obtener el contenido de materia seca, realizados en muestras de la serie 2

$\sigma^2 = 0,020 \%$ $\sigma = \pm 0,14 \%$

Serie 2		M_0 (g)	M_f (g)	MS (%)	MS promedio (%)
Muestra n° 3	Test 1	32.15	9.07	28.2	28,17±0,14
	Test 2	42.46	11.97	28.19	
	Test 3	18.03	5.07	28.12	
Muestra n° 4	Test 1	40.46	11.61	28.7	28,56±0,14
	Test 2	46.91	13.33	28.42	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Pruebas de secado para obtener el contenido de materias volátiles, realizados en muestras de la serie 1

$\sigma^2 = 1,53 \%$ si se tiene en cuenta la muestra 4, de lo contrario $\sigma^2 = 0,04\%$

$\sigma = \pm 1,24 \%$ si se tiene en cuenta la muestra 4, de lo contrario $\sigma = \pm 0,21 \%$

Serie 1		M_0 (g)	M_f (g)	MSV (%)	MSV promedio (%)
Muestra n° 1	Test 1	15.57	7.26	53.37	53.34
	Test 2	16.21	7.57	53.3	
	Test 1	12.18	6.87	43.6	
Muestra n° 2	Test 2	12.79	7.2	43.7	43.49
	Test 3	14.94	8.49	43.17	
	Test 1	9.11	5.19	42.96	
Muestra n° 2'	Test 2	13.09	7.47	42.94	43.04
	Test 3	10.64	6.04	43.23	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Pruebas de secado para obtener el contenido de materias volátiles, realizados en muestras de la serie 2

$\sigma^2 = 1,53 \%$ si se tiene en cuenta la muestra 4, de lo contrario $\sigma^2 = 0,04\%$
 $\sigma = \pm 1,24 \%$ si se tiene en cuenta la muestra 4, de lo contrario $\sigma = \pm 0,21 \%$

Serie 2		M_0 (g)	M_f (g)	MSV (%)	MSV promedio (%)
Muestra n° 3	Test 1	10.19	5.75	43.57	43.57
Muestra n° 4	Test 1	12.95	7.88	39.15	41.27
	Test 2	11.25	6.37	43.38	

Fuente: Elaboración propia

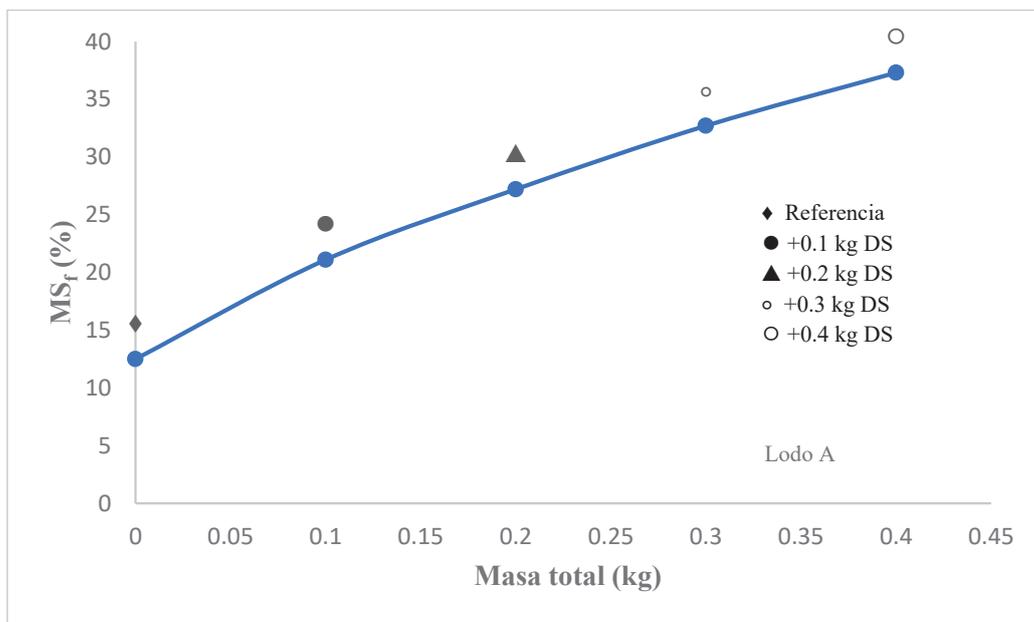


Figura 4. Contenido de masa seca final vs masa de muestra agregada-(a) Lodo A

Fuente: Elaboración propia

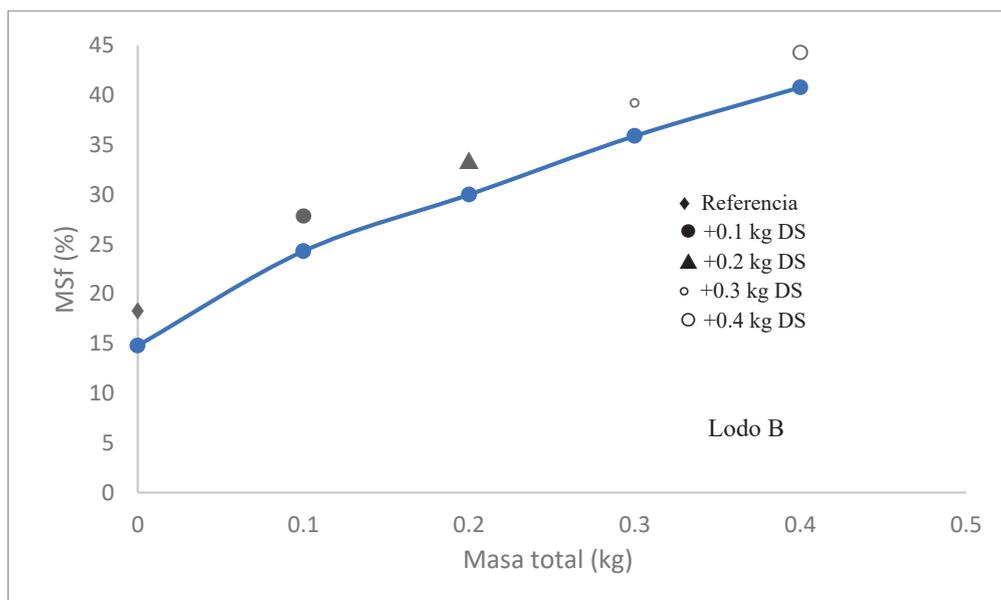


Figura 5. Contenido de masa seca final vs. masa de muestra agregada-(b) Lodo B

Fuente: Elaboración propia

3.3. Comportamiento de la estabilización

Las Figuras 4a; 5b y 6 muestran el incremento del contenido de la materia seca final, para cantidades crecientes de masa seca agregada a la muestra húmeda del lodo referencial.

Para el lodo A, la remoción de agua correspondiente a una adición de 0.1 kg de DS fue anormalmente lenta debido a problemas de regulación de la velocidad del aire, dando una velocidad efectiva del aire inferior a la configuración. El efecto positivo del retromezclado se observa claramente para ambos lodos, la estabilización del lodo residual aumenta globalmente al aumentar la adición de producto seco, notándose una mejor relación de estabilización para el lodo B.

En las Tablas 9 y 10, se tienen los resultados de las relaciones de estabilización para el lodo A sin estabilizar y para el lodo B estabilizado respectivamente, así también el efecto positivo del retromezclado se pueden observar al comparar los valores de la estabilización para ambos lodos,

notándose un efecto positivo del retromezclado para el lodo B y el aumento de la velocidad de secado con el grado de retromezclado (puede ser debido al refuerzo de la textura de lodo, dando un lecho de permeabilidad más elevado, y una superficie de intercambio más grande), que favorece a la estabilización del lodo.

En la tabla 9, al considerar los experimentos de referencia (sin adición de materia alcalina), observamos que en las pruebas para el lodo A, no se obtiene un valor menor o igual a 0,60 para ser considerado como lodos estabilizados, valor establecido según normas ambientales; pero para el lodo B pruebas con adición de materia alcalina (tabla 10) si se llega a la estabilización del lodo residual, que se caracteriza por un menor contenido de agua inicial. Además, el beneficio de la operación de retromezclado es más importante para el lodo B. Los valores de la relación de estabilización, correspondiente al experimento es igual a 0.65 para lodo A, mientras que desciende de 0,60 a 0.213 para el lodo B, valores que nos indican una

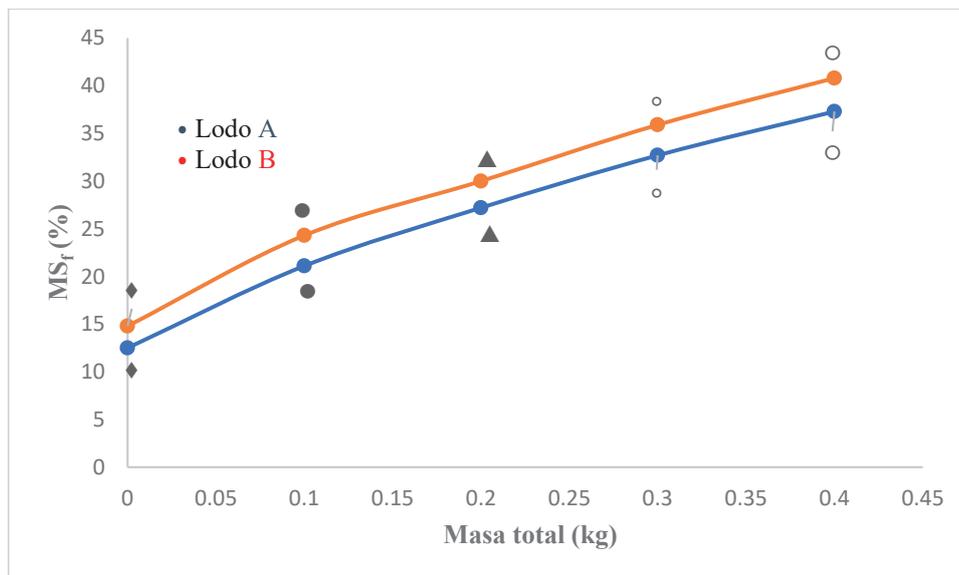


Figura 6. Contenido de masa seca final vs. masa de muestra agregada-Lodo A y Lodo B.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Lodo sin estabilizar-Lodo A

Experimento	Ref.	+0,1kg	+0,2kg	+0,3kg	+0,4kg
MSf (%)	12,5	21,1	27,4	32,69	37,28
Ratio de estabilización (adimensional)	0,648	0,65	0,65	0,653	0,65

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Lodo estabilizado-Lodo B

Experimento	Ref.	+0,1kg	+0,2kg	+0,3kg	+0,4kg
MSf (%)	14,8	24,3	30	35,9	40,8
Ratio de estabilización (adimensional)	0,60	0,406	0,308	0,253	0,213

Fuente: Elaboración propia

buena estabilización del lodo residual B (los valores de estabilización de ambos lodos son mostrados en las Tablas 9 y 10).

3.4. Relación de estabilización

Se realizó una comparación rigurosa de la influencia de la adición de materias secas sobre el comportamiento a la estabilización del lodo. De hecho, la adición de producto seco conduce a una expansión del lecho de extruidos y, en consecuencia, aumenta el área de intercambio, así también se llegó a obtener una buena estabilización del lodo residual.

Las Tablas 9 y 10, indican los contenidos de materia seca final (MS_f) de las muestras experimentales para los lodos A y B, respectivamente, y la correspondiente relación de estabilización del lodo. Esto está de acuerdo con el mayor efecto de retromezclado observado sobre la estabilización obtenida con los lodos B.

IV. DISCUSIÓN

En la figura 6 se constata la evolución de los lodos A y B frente a la masa de muestra agregada en ambos lodos. También se grafican el efecto de agregar masas crecientes en el lodo A, utilizado para el experimento de referencia. Esto explica los diferentes contenidos de materia seca final del lodo MS_f (los valores del contenido de materia seca final son mostrados en las Tablas 9 y 10) y áreas de intercambio que se observaron para el experimento de referencia. El refuerzo de la textura de los lodos confiere un lecho con mayor permeabilidad y de una mejor estabilización del lodo. A medida que el refuerzo de la textura del lodo conduce a un aumento de la porosidad del lecho, evoluciona la permeabilidad y la estabilización del lodo. De la Figura 6, parece que la mejora del área de intercambio, es decir la expansión del lecho y la estabilización del lodo, solo se produce para la adición de DS superior a 0,1 kg.

Durante el denominado período de flujo constante que se produce justo después de la zona de precalentamiento, el flujo de secado es independiente de la naturaleza del lodo, pero solo depende de la temperatura, la velocidad y la humedad del aire. En las Tablas 9 y 10; y Figuras 4; 5 y 6, para contenidos de materia seca final (MS_f) superiores a 21.1 % y 24.3 %, las curvas de estabilización se pueden dividir en dos grupos, según el nivel de retromezclado. Para el lodo A, las pruebas correspondientes a un retromezclado igual o superior a 0,1 kg de DS se caracterizan por una menor estabilización del lodo residual en esta zona de mayor contenido de agua. La misma observación se puede hacer para el lodo B, con menor contenido de agua, para adiciones de producto seco iguales o superiores a 0,1 kg de DS, se observa una mayor estabilización del lodo residual. Dentro de esta zona, se pueden asumir limitaciones de transferencia intragranular. La transición entre las limitaciones de transferencia extragranular e intragranular ocurre cuando el flujo de difusión de agua desde el núcleo al lado externo del extruido se vuelve menor que la cantidad que puede eliminarse mediante transferencia convectiva. Para el lodo B a partir de este punto la estabilización

aumenta, lográndose estabilizar el lodo, y para el lodo A disminuye, no lográndose estabilizar el lodo. De las Tablas 9 y 10, parece que las limitaciones a la estabilización del lodo aumentan con bajos niveles de retromezclado y alto contenido de agua en la muestra del lodo residual, observándose valores de relaciones de estabilización altos para el lodo A, y para el lodo B los valores de estabilización disminuyen, mostrando una buena estabilización del lodo residual B.

V. CONCLUSIONES

Verificamos, según resultados de las relaciones de estabilización, que existe un efecto positivo en la estabilización del lodo residual como consecuencia de la adición creciente de materia alcalina que favorece la estabilización del lodo. Por lo tanto, la materia alcalina completa la estabilización del lodo. La relación de estabilización tiene un valor de 0.65 para lodo A, y desciende hasta 0.213 para el lodo B, obteniéndose valores que verifican la estabilización del lodo B. Las limitaciones a la estabilización del lodo aumentan con bajos niveles de retromezclado y alto contenido de agua en el lodo, observándose que los valores de las relaciones de estabilización son superiores a 0,60 para el lodo A, y para el lodo B los valores de estabilización disminuyen, resultados que nos indican el efecto positivo de la estabilización del lodo B, y poder darle una valorización agrícola al lodo residual.

Si se consideran los lodos obtenidos después del secado, se observa que tienen composiciones relativamente homogéneas. El secado de estos lodos no debería por lo tanto ser influenciado por su naturaleza.

Si no consideramos que los lodos realmente sometidos al secado, es decir adicionados de materia alcalina, se puede estimar que estos poseen características relativamente homogéneas, en relación de los resultados obtenidos. El secado de estos lodos no debería entonces ser influenciado por su naturaleza. Por lo tanto, haremos abstracción de las propiedades químicas de los lodos en el contexto del secado. Por otra parte, si se realiza una comparación entre los lodos con y sin adición de materia alcalina, se observan diferencias a nivel de la materia seca y de las materias volátiles.

Se puede constatar que los lodos frescos, es decir, sin adición de materia alcalina presentan un menor contenido de materias secas en relación a lodos con adición de materia alcalina. La adición de materia alcalina tiene como consecuencia aumentar el contenido de materias secas del lodo, y de favorecer a la estabilización del lodo.

VI. AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica-Unidad de Posgrado (UNMSM) por darme la oportunidad de realizar el Doctorado y también un agradecimiento a Carlos Francisco Cabrera Carranza por su asesoría.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Chen, G., Yue, P. L., & Mujumdar, A. S. (2002). Sludge dewatering and drying. *Drying Technology*, 20(4–5), 883–916. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/DRT-120003768>
- Espinoza Eche, J. J., & Santos de la Cruz, E. G. (2021). Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Perú. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias geográficas*, 24(48), 205–215. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.21773>
- Gruter, H., M. M., O. K. H., H. M. D. (1990). Drying of Sewage Sludge – An Important Step in Waste Disposal. *Water Science & Technology*, 22(12), 57–63. <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/22/12/57/23791/Drying-of-Sewage-Sludge-An-Important-Step-in-Waste?redirectedFrom=fulltext>
- Ibarz, A., V., & Barbosa-Canovas, G. (2005). Texto: *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Ediciones Mundi-Prensa. España. [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=daoSAQAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PA25&dq=Ibarz,A.,+V.Barbosa-Canovas,+G.\(2005\).+Operaciones+Unitarias+en+la+Ingenier%C3%ADa+de+Alimentos.+\(pp.65-83\).+Ediciones+Mundi-Prensa.+Espa%C3%B1a.++++&ots=AKnehIf1a3&sig=VWoHnfrbTfaTxfx-zBMsmMm9gYM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=daoSAQAQAQBAJ&oi=fnd&pg=PA25&dq=Ibarz,A.,+V.Barbosa-Canovas,+G.(2005).+Operaciones+Unitarias+en+la+Ingenier%C3%ADa+de+Alimentos.+(pp.65-83).+Ediciones+Mundi-Prensa.+Espa%C3%B1a.++++&ots=AKnehIf1a3&sig=VWoHnfrbTfaTxfx-zBMsmMm9gYM#v=onepage&q&f=false)
- Méndez Quincho Leonor Carmen, Pedro Melitón Ramos Matías, & Oscar Felipe Arce Cruzado. (2017). Diagnóstico del uso del agua y vertimientos de efluentes líquidos en el Perú (2013-2015). *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 20(39), 123–136. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v20i39.14175>
- Miranda, M. (2014). Relima, 8vo encuentro técnico Interamericano de alto nivel, Trujillo. <http://www.relima.com.pe/>
- Nizama Pacheco Lizveth Karín, & Carlos Francisco Cabrera Carranza. (2018). Impacto del Dren 4000 al Ecosistema Marino de la Caleta Santa Rosa, Lambayeque y Alternativas de Recuperación. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 21(41), 45–52. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v21i41.14992>
- Quipezco Ushñahua Lawrence Enrique. (2004). Valoración de las aguas residuales en Israel como un recurso agrícola: consideraciones a tomar en cuenta para la gestión del agua en el Perú. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 7(13), 64–72. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v7i13.694>
- Reyes Lázaro, W. (2008). Mejoramiento de suelos arenosos del sector santo domingo del valle santa catalina mediante el uso de lodo residual municipal estabilizado. *Universidad Nacional de Trujillo*. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/6018>
- Vesilind, P. A., S. L. (2007). Sludge into Biosolids - Processing, Disposal, Utilization. *Biological Wastewater Treatment Series*, 6. <https://iwaponline.com/ebooks/book/87/Sludge-into-Biosolids-Processing-Disposal>

Contribución de autoría:

Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Software, Validación, Visualización, Redacción-revisión y edición: (Teofilo Eustedio Meneses Solís). Supervisión, Redacción-borrador original: (Teofilo Eustedio Meneses Solís y Carlos Francisco Cabrera Carranza)