

# DESHIDRATACIÓN DE LODO RESIDUAL A ESCALA PILOTO EN UN SECADOR CONVECTIVO ROTACIONAL, CASO: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS SANTA CLARA, PROVINCIA DE LIMA, PERÚ

## PILOT-SCALE RESIDUAL SLUDGE DEHYDRATION IN A CONVECTIVE ROTARY DRYER, CASE: SANTA CLARA WASTEWATER TREATMENT PLANT, LIMA, PERÚ

Alfonso Gil-Villanueva<sup>1</sup> , Leynard Natividad-Marín<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

<sup>2</sup>College of Science and Engineering, James Cook University, Townsville, Australia

Recibido (Received): 08 / 09 / 2022 Aceptado (Accepted): 22 / 05 / 2023

### RESUMEN

Esta investigación tuvo como finalidad mejorar la gestión de lodo residual obtenido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Santa Clara (Lima, Perú), mediante la disminución de su volumen por medio de secado térmico. La reducción de volumen de lodo permitiría reducir sus costos de transporte al relleno sanitario y su posible reutilización como fertilizante. Este estudio fue desarrollado en laboratorio y en un secador a escala piloto dentro de la planta. Dentro de las pruebas iniciales realizadas en laboratorio se determinó las características proximales del lodo, como su contenido de agua (85.90%), sólidos fijos (4.93%) y sólidos volátiles (9.17%). Asimismo, se determinó que el porcentaje óptimo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  que se debe adicionar al lodo húmedo es del 9.09% para poder estabilizar la muestra a un  $\text{pH}$  12. La deshidratación del lodo a escala piloto se realizó mediante un proceso constituido por un secador convectivo de rotación continua, tanque de agitación, tornillo de alimentación, sistema de calentamiento de aire, colector ciclónico y un lavador de gases. Las variables de proceso analizadas fueron las temperaturas del secador (120°C, 150°C y 200°C) y el tiempo de permanencia del lodo dentro del tambor de secado (20, 40, y 60 minutos). Las pruebas de secado se realizaron con lodo alimentado al tanque de agitación en cantidades de 20 kg, 40 kg y 200 kg. El secado a 200°C y 60 minutos de permanencia del lodo permitió obtener una humedad mínima promedio de 17.74%. En cada corrida se analizó la presencia de *Escherichia Coli* y *Huevo de Helmintos* en muestras de lodo antes y después del secado. No se detectó presencia de *Huevos de Helmintos* ni antes ni después del secado. Las muestras con adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mostraron una reducción en la concentración de *Escherichia Coli* desde un rango de  $2.4 \times 10^3$  NMP/1g ST -  $1.6 \times 10^5$  NMP/1g ST hasta valores por debajo de 18 NMP/100g ST. Asimismo, el análisis químico en el lodo deshidratado muestra presencia de nutrientes (*N, P, C*, etc.), sugiriendo su posible uso como fertilizante, pero se recomienda una mayor investigación, debido a la presencia de metales en la muestra.

*Palabras Clave:* Lodo residual, deshidratación convectiva, fertilizante, *Escherichia Coli*, higienización de lodos

### ABSTRACT

This research aims to improve sludge management at Santa Clara wastewater treatment plant (Lima, Peru) by decreasing the sludge volume using a heating dryer. Sludge volume decrease could reduce transport cost to sanitary landfill, and its reuse as fertilizer. This study was developed in laboratory and in a pilot scale heating dryer setup within the wastewater treatment plant. Preliminary tests measured the approximate sludge composition: water (85.90%), non-volatilised solids (4.93%), and volatilised solids (9.17%). Moreover, the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  optimum quantity to be added to the sludge was determined as 9.09% to stabilise the sample at 12  $\text{pH}$ . The pilot scale sludge dehydration was accomplished by a continuous rotational convective dryer, a mixing tank, a screw feeder, an air heating system, a cyclone collector, and a gas scrubber. The assessed process variables were the drying temperature (120°C, 150°C and 200°C) and the sludge retaining time within the dryer drum (20, 40, and 60 minutes). The drying tests were performed by feeding the sludge to the mixing tank, using 20Kg, 40 kg and 200 kg of wet sludge. The drying at 200°C and 60 minutes of sludge retaining time achieved 17.74% average sludge moisture. In each experiment, *Escherichia Coli* and *Helminth* eggs were measured before and after drying. No *Helminths* Eggs in sludge samples before and after drying were detected. Sludge samples containing  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  showed a reduction in *Escherichia Coli* concentration from  $2.4 \times 10^3$  NMP/1g ST -  $1.6 \times 10^5$  NMP/1 g ST range to values lower than 18 NMP/100 g ST. Additionally, chemical analysis in the dehydrated sludge showed presence of nutrients (*N, P, C*, etc.), suggesting its possible use as a fertilizer, however, it is recommended further research due to metal presence in the sample.

*Keywords:* Residual sludge, convective dehydration, fertilizer, *Escherichia Coli*, sludge hygienization

\* Corresponding author.:

E-mail: ynard.natividadmarin@my.jcu.edu.au

## 1. INTRODUCCIÓN

La planta de tratamiento de agua residuales (PTAR) Santa Clara produce lodo residual junto con el efluente tratado en su operación ininterrumpida. El lodo producido debe disponerse fuera de la planta debido a que ocupa espacio considerable. Este servicio es realizado por Empresas Operadoras de Residuos Sólidos que disponen de dicho residuo, originando costos adicionales para la planta. El costo de transporte del lodo es proporcional al volumen que este ocupa, por lo cual su reducción podría disminuir dichos gastos, la cual podría darse mediante la eliminación parcial o total de la cantidad de agua. La eliminación del contenido de humedad en el lodo mediante un proceso de secado a condiciones ambientales (energía solar) en Lima no es factible por el contenido de humedad relativa en la ciudad cercanos al 100% [1]. A lo anterior se suma que el espacio de almacenamiento de lodos en la ciudad de Lima va escaseando cada año [2]. Por consiguiente, el uso de un secador térmico dentro de la planta podría disminuir el problema.

La deshidratación de lodos residuales se ha venido realizando en distintas industrias con la posibilidad de su reutilización como fuente de nutrientes, dependiendo del nivel de higienización, contenido de metales y tipo de plantación donde se utilice [3]. El secado de lodos se realiza generalmente en plantas de tratamiento de agua de una forma pasiva mediante la simple exposición del lodo a los rayos solares en un lecho extenso cuando las condiciones ambientales son favorables [4] en caso contrario el secado mediante una fuente generadora de calor [5] es la alternativa viable para la realidad climática de la costa peruana por lo expuesto. La reutilización de lodo deshidratado para cultivos requiere que la carga microbiológica sea la menor posible y que no sobrepase lo especificado por la normativa ambiental. Por este motivo, también se requiere una cuidadosa selección de condiciones operativas en el secado como el tiempo de residencia, cantidad de carga de lodo suministrado al equipo, temperatura de operación y sistemas de transferencia de calor que puedan favorecer una eliminación óptima de contenido de humedad y disminución de *Escherichia Coli* y Huevos de *Helminthos*.

Estudios de secado térmico a nivel escala piloto e industrial son más escasos comparado con los de lecho de secado convencionales de estabilización [6], lo cual hace necesario la realización de estudios de campo a nivel piloto que permitan responder dichas inquietudes e incrementar la confiabilidad para futuros procesos a nivel industrial. En este contexto, la Agencia de Cooperación Internacional del Japón

(JICA) instaló un equipo de secado convectivo a escala piloto para deshidratar lodos residuales salidos del proceso de centrifugado en la PTAR Santa Clara. Esta planta se localiza en el Puente Santa Clara, en el distrito de Ate Vitarte, en la ciudad de Lima, departamento de Lima - Perú. Pruebas experimentales en este secador piloto respondería la interrogante de su posible reutilización del lodo deshidratado en campos agrícolas siempre y cuando se garantice un contenido de *Escherichia Coli* y metales pesados según normativa nacional peruana [7].

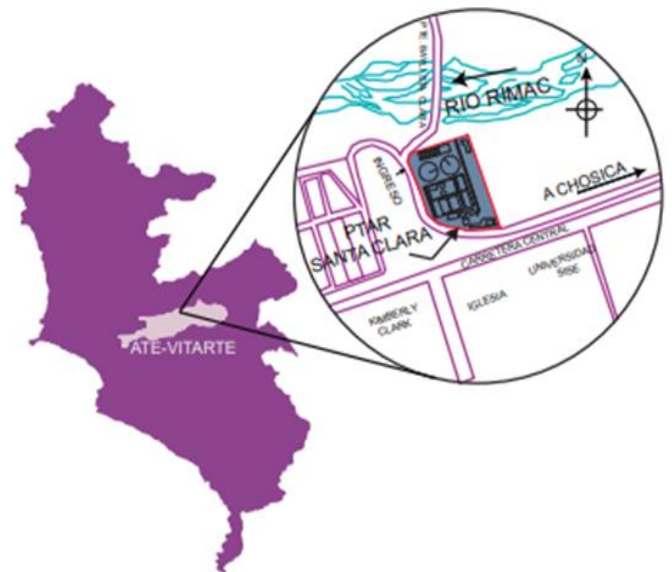


Fig. 1. Ubicación geográfica de la PTAR Santa Clara

## 2. ANTECEDENTES

La producción continua de lodos residuales es un foco infeccioso si no es tratado adecuadamente debido a la alta carga microbiana y olores fuertes. Esta realidad está en contra el derecho irrenunciable de la persona a vivir en un ambiente saludable según normativa peruana [8] y lineamientos dados por la Organización de las Naciones Unidas [9]. Adicionalmente, cada año se incrementan la cantidad de residuos sólidos en rellenos sanitarios en Lima y Callao [10], lo cual es alarmante y motivo para que se reutilicen nutrientes según políticas de economía circular [11]. A pesar de la problemática expuesta, el uso de tecnologías intensivas de deshidratación de lodos en plantas de tratamiento de aguas es de uso poco frecuente posiblemente por los costos energéticos asociados.

Es ampliamente conocido que la estabilización o higienización de lodos residuales puede ser realizada por digestión aeróbica o digestión anaeróbica con producción de metano [12]. El último sistema podría ser fácilmente confundido con un proceso térmico de secado de lodo, siendo numerosa la información al

respecto tanto en investigaciones redactadas en inglés como en español. Este trabajo, sin embargo, analiza el uso de una tecnología de secado donde se abastece calor al lodo por medio de aire caliente, mediante transferencia de calor por convección dentro de un secador de tambor rotatorio en las condiciones operativas de la PTAR Santa Clara.

Estudios de secado convectivo de lodos residuales están siendo recientemente evaluados a escala laboratorio [13] y piloto [14]. El primer trabajo se enfocó tanto en la parte de análisis de la cinética de secado utilizando ecuaciones semiempíricas en un rango de temperatura entre 65°C y 80°C y velocidad de aire de 0.53 m/s y 0.83 m/s; mientras que la segunda investigación enfatizó en el efecto de la cantidad de carga de lodo en las características del lodo deshidratado. El segundo trabajo de investigación resalta las dificultades asociadas a la baja eficiencia en el mezclado del lodo dentro del equipo. Además, una revisión bibliográfica de distintos tipos de secados en lodo residual [15], explica el efecto positivo del adicionamiento de cal en el lodo antes o después del paso del lodo por el secador.

### 3. METODOLOGÍA

En esta investigación se realizaron experimentos a escala piloto dentro de la PTAR Santa Clara, siendo parte de los análisis realizados in-situ mientras que otros fueron analizados en laboratorios externos. Los resultados recolectados de análisis de laboratorio fueron comparados con la normativa nacional [7]. Las condiciones operativas del proceso fueron analizadas mediante un diseño experimental del tipo factorial simple, considerando temperatura y tiempo de secado a tres niveles por cada variable (32 tratamientos). Las variables, niveles y cantidad de tratamientos propuestos se presentan en la Tabla I, siendo la variable respuesta de estudio la humedad final a la cual llega el lodo. La elección de niveles de temperatura y tiempo fueron basados en pruebas preliminares a escala piloto. Pruebas preliminares también mostraron que a pesar de reducir el volumen del lodo considerablemente entre 20% y 30% de humedad, el contenido de *Escherichia Coli* prevalecía, las corridas sombreadas en la tabla anterior fueron realizadas mediante la adición de cal el cual subió el pH hasta valores de 12, evitando la presencia de *Escherichia Coli*. Si bien es cierto que la cal puede añadirse antes o después de ingresar el lodo al secador convectivo, esta investigación consideró más factible la adición de cal en el lodo antes de su ingreso al secador convectivo para así facilitar su mezcla en la tolva de mezclado antes de su ingreso al horno rotativo.

TABLA I  
Esquema experimental factorial de las corridas realizadas en el secador piloto de la PTAR Santa Clara

Tratamiento	Temperatura (T) [°C]	Tiempo del proceso ( $t_p$ ) [minutos]	Variable de respuesta (Y)	Cantidad de carga inicial [kg]	Repeticiones realizadas
1 *	120	20	$Y_1$	20, 20, 20	<b>Triplicado</b>
2	120	40	$Y_2$	200, 20, 20	<b>Triplicado</b>
3	120	60	$Y_3$	200	Una medición
4 *	150	20	$Y_4$	20	Una medición
5	150	40	$Y_5$	200	Una medición
6 *	150	60	$Y_6$	40	Una medición
7	200	20	$Y_7$	200	Una medición
8 *	200	40	$Y_8$	40, 20	<b>Duplicado</b>
9 *	200	60	$Y_8$	20	Una medición

\*: Tratamientos experimentales donde se adicionó  $Ca(OH)_2$  en el lodo residual antes de su ingreso al secador

Inicialmente se consideró realizar un solo experimento por cada tratamiento experimental; sin embargo, tres repeticiones fueron realizadas en tres experimentos para mostrar la repetibilidad de la data recolectada. Aunque las repeticiones experimentales no fueron realizadas en todos los tratamientos debido al consumo energético por cada corrida, las repeticiones en algunos experimentos pueden considerarse suficientes para tener un rango de variabilidad en los demás tratamientos. Las cantidades de carga inicial de lodo añadido al secador

que era alimentando continuamente al horno fue de 20kg, 40kg y 200 kg.

#### 3.1. SELECCIÓN DE LA CANTIDAD DE CAL ADICIONADA

La determinación de la cantidad de cal hidratada se realizó mediante la adición de distintas cantidades de cal al lodo residual. Durante estas pruebas, las variables de temperatura [°C] y pH fueron medidas en todas las muestras a distintos tiempos hasta un tiempo bastante largo de varios días para corroborar

estabilidad de dicha variable en la muestra y garantizar la ausencia de fermentación orgánica. Las pruebas experimentales se realizaron en dos etapas: primero en 9 vasos de precipitado de 250 mL (200 g de lodo) para decidir un primer rango de concentración, y una segunda etapa en 5 vasos de precipitado de 2 L (1.5 kg de masa total de muestra incluyendo cal hidratada) para decidir la mínima cantidad necesaria en la cual el *pH* se mantiene a un valor constante, utilizando un mayor tiempo de monitoreo. En la primera prueba realizada a pequeña escala, en la muestra 1 no se colocó la cal hidratada (blanco), mientras que las demás muestras se utilizaron 2.5%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% y 35% (porcentaje en peso de cal/peso de lodo). En la segunda prueba se analizó una muestra en blanco (sin cal) y cuatro muestras adicionales con 2.5%, 5%, 10% y 15% de cal con respecto al peso del lodo usado. La medición de *pH* y temperatura fue realizada durante distintos intervalos de tiempos con un sensor *HACH Hq40* multiparámetro calibrado con soluciones de *pH* conocidos de 7, 4.01 y 10.01 de la misma compañía *HACH*.

### 3.2. PROCEDIMIENTO DE SECADO DE LODO EN PLANTA PILOTO

La Fig. 2 muestra el sistema de secado conformado por diversas subpartes que operan de forma semicontinua, en el que el sólido húmedo procedente de las centrifugas es alimentado. El tiempo de permanencia de la muestra durante el secado se reguló mediante la velocidad de giro del tornillo de alimentación (20 min, 40 min, y 60 min). El secador piloto está conformado por (1) Dosificador de lodos, (2) EL cilindro secador, (3) El caldero de calor, (4) El aspirador ciclónico y la cadena de extracción del producto, (5) El extractor de gases, (6) Filtro de agua. En este sistema el horno de calentamiento y secador, en el primero transfiere calor por convección al segundo, que mantiene una temperatura promedio de 275 °C. El colector de polvo ciclónico es un cono ciclónico donde las partículas más pesadas caen a una tolva, cilindro de recolección de lodo tratado, y las partículas más livianas, así como el aire caliente son succionados por el ciclón. Los lodos tipo polvo más pesados caen a un tornillo sin fin, que luego transporta los lodos secos hasta un recipiente para su almacenamiento temporal (cilindro).

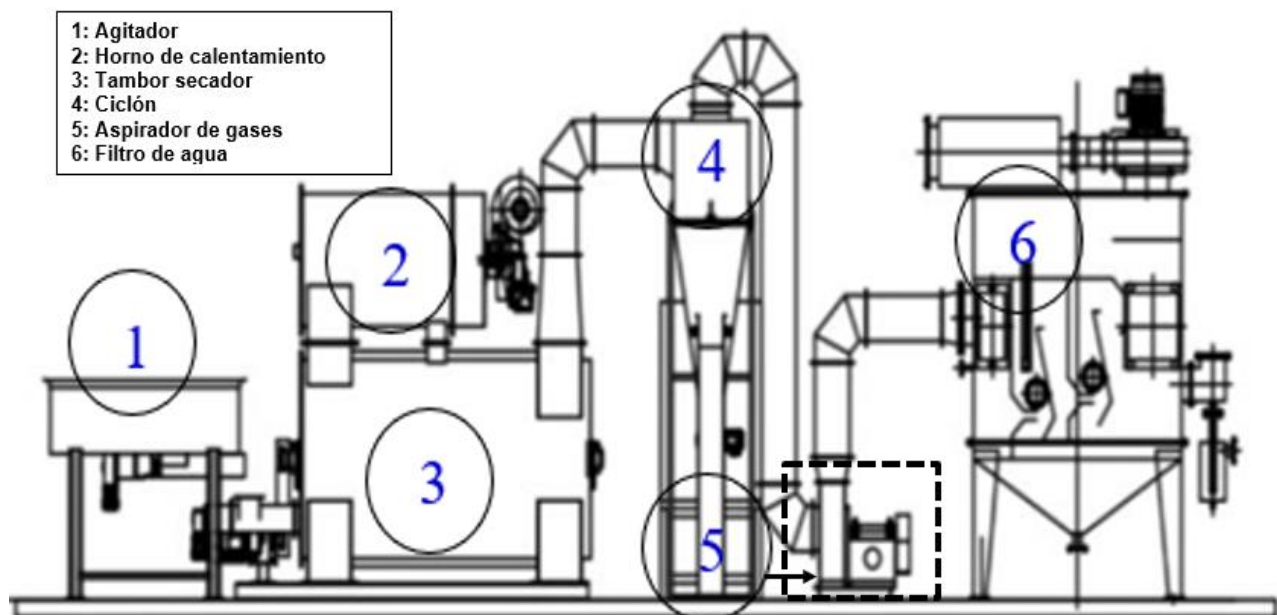


Fig. 2. Esquema de planta piloto de secado de lodo residual

### 3.3. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS

La data experimental fue obtenida dentro de la planta en el caso de monitoreo del lodo utilizado durante las pruebas de secado, y en laboratorios externos donde análisis instrumentales avanzados fueron necesarios. Dentro de los análisis realizados en planta tenemos la medición de *pH*, humedad, y contenido de volátiles; mientras que los análisis de metales, nutrientes y microbiológicos fueron

realizados por laboratorio externo *ALAB* (Analytical Laboratory E.I.R.L). Las muestras de lodo húmedo fueron tomadas en cuatro puntos distintos del agitador durante el mezclado del lodo húmedo previo a su ingreso al secador. Las muestras de lodo deshidratado eran recolectadas de la salida del tornillo sin fin. La muestra de lodo húmedo deshidratado era recolectada 10 minutos después el producto empezaba a salir del equipo. Las muestras se recolectaron con guantes de látex utilizando

frascos de vidrio de 500 mL sellados y debidamente rotulados.

### 3.3.1 Medición de pH

Un medidor multiparámetro HACH HQ40d, y calibrado el mismo día antes de cada medición con soluciones tampón de la empresa HACH de pH 7.00 ± 0.02, 4.01 ± 0.02, y 10.01 ± 0.02 fue utilizado. La medición de pH fue realizada en el lodo inicial antes de ingresar al sistema de secado y en el lodo final que sale del secador. La metodología de medición utilizada se basó en trabajos similares en biosólidos [18], donde se disolvió en cada medición un gramo de muestra en 20 mL de agua destilada, hasta obtener una dispersión homogénea.

### 3.3.2 DETERMINACIÓN DE HUMEDAD EN EL LODO

El contenido de agua fue determinado en el lodo antes y después del proceso de secado que consistió en ingresar la muestra en un horno a 103°C – 105°C hasta alcanzar un peso constante [19]. La estufa utilizada fue uno convectivo de marca Quimis® y la muestra fue pesada a distintos tiempos en una balanza analítica marca KERN, modelo: ABJ 220-4NM de 0.1 mg de precisión hasta llegar a una temperatura constante. Muestras de 5 gramos llegan a peso constante en tres horas aproximadamente.

### 3.3.3 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS VOLÁTILES

El contenido de sólidos suspendidos volátiles se determinó a una temperatura de 550°C (SMEWW, 1999), en la cual se consideró un tiempo 30 minutos en vez del rango entre 15 minutos a 20 minutos para garantizar una completa eliminación de contenido orgánico en todas las muestras. Esta operación fue realizada en una mufla de programación automática de marca QUIMIS®. Las muestras sacadas del equipo fueron colocadas en una campana de desecación para evitar que adsorban humedad, y finalmente fueron pesadas a temperatura del medio ambiente.

### 3.3.4 ANÁLISIS DE NUTRIENTES Y METALES

El contenido de nutrientes y metales fue realizado en una muestra compósito proveniente de todas las muestras de lodo deshidratadas sacadas de las corridas experimentales realizadas. Estos análisis fueron realizados en laboratorio externo, ALAB (Analytical Laboratory E.I.R.L.) con la finalidad de analizar las ventajas y desventajas del uso del lodo deshidratado en el cultivo. La cuantificación de Nitrógeno total fue realizada mediante la Norma Mexicana 021-AS 08 y Métodos Standard para la Examinación de Agua y Efluente: Parte 4500 NH<sub>3</sub> -D,

4500 NO<sub>2</sub> B y 4500 NO<sub>3</sub> -E [19], cloruro mediante normativa NTE INEN y los metales junto los otros nutrientes distintos al nitrógeno fueron considerados analizados mediante normativa EPA (Inductive Coupled Plasma).

### 3.3.5 Análisis microbiológico

La determinación de *Escherichia Coli* y la cantidad de Huevos de Helmintos se determinaron recolectando la muestra y enviando a laboratorio externo el mismo día de procesado de la muestra en planta piloto. La determinación de *Escherichia Coli* fue realizada según la normativa standard [19], mientras que los Huevos de Helmintos se realizó según la Norma Oficial Mexicana 004 - SEMARNAT [20]. La recolección de la muestra fue realizada siguiendo el protocolo y materiales brindados por el laboratorio de análisis externo ALAB Analytical Laboratory, recolectando muestras de lodo residual en la entrada y salida del secador piloto. Este protocolo consistió en recolectar las muestras usando guantes estériles brindados por el laboratorio, uso de recipientes de tapa hermética, almacenamiento de las muestras en refrigeración a 4°C, y envío de las mismas al centro de análisis durante el mismo día de recolección.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. CARACTERÍSTICAS DEL LODO RESIDUAL

La Fig. 3 muestra una composición proximal promedio de muestras tomadas de cada uno de los tratamientos realizados en planta piloto. Esta figura muestra claramente que el lodo entrante al secador contiene una humedad de 85.90% a pesar del espesamiento realizado previamente en la centrifuga. La cantidad de sólidos no volátiles, representando las sustancias inorgánicas como metales no puede considerarse despreciable, y sugiere un análisis de metales en caso de la reutilización del lodo deshidratado para cultivo. Estos valores presentados son promedios obtenidos en cada corrida experimental, indicando una desviación estándar menor al 2.50% y, por ende, una comparación confiable entre experimentos realizados en distintos días. La presencia de material fermentable podría estar relacionada directamente a la cantidad de sólido suspendidos volátiles, sugiriendo una mayor probabilidad de proliferación de *Escherichia Coli* u otro tipo de microorganismos. Esta investigación no realizó una cuantificación en laboratorio del contenido de material fermentable en la muestra, sin embargo, se conoce que su descomposición a temperaturas elevadas (digestión anaeróbica) está asociada a la presencia de moléculas orgánicas [6].

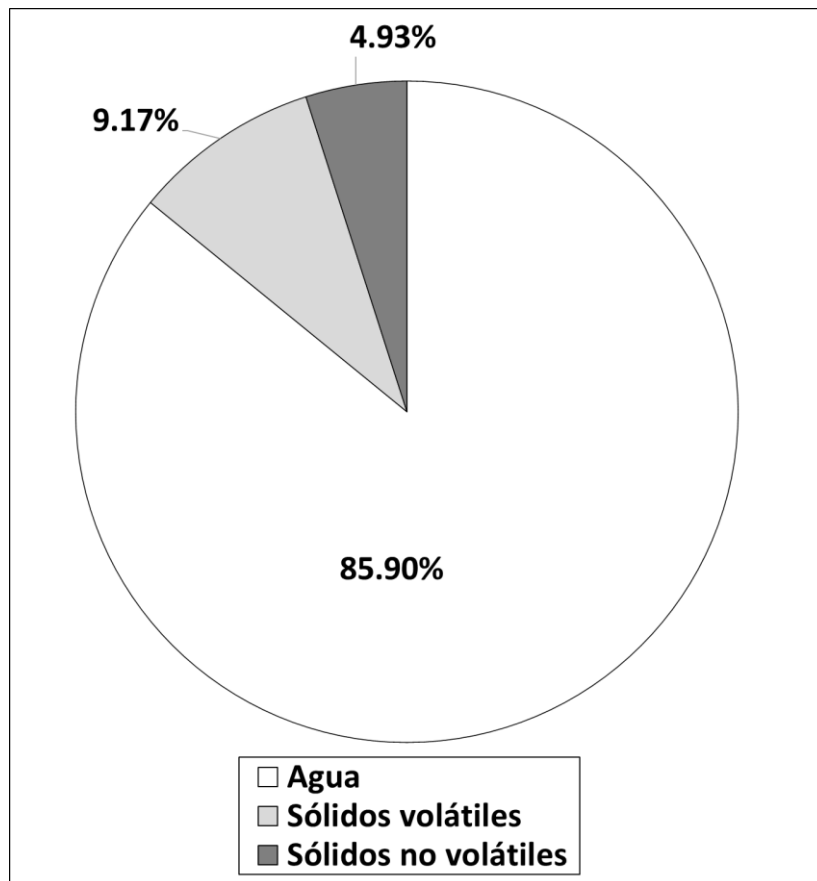


Fig. 3. Composición promedio del lodo calculado de los datos promedios de humedad y contenido de volátiles

El contenido de humedad promedio es muy parecido a lo citado en estudios donde inclusive el porcentaje de humedad puede llegar a 94% después de pasar el lodo residual por los espesadores [21]. El porcentaje promedio obtenido en esta investigación es similar a 67.06% citado en un estudio de deshidratación de lodo residual [21].

#### 4.2. SELECCIÓN EXPERIMENTAL DEL CONTENIDO DE $\text{Ca}(\text{OH})_2$

La Fig. 4 demuestra que poca cantidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  es necesaria para aumentar el nivel de  $\text{pH}$  a

niveles mayores a 12 en las pruebas realizadas en vasos de precipitado de 250 mL, obteniéndose que la adición del 2.44% de este compuesto químico con respecto a la masa total es suficiente para sobrepasar el  $\text{pH}$  12. Estas mediciones se realizaron durante el intervalo de una hora mostrando valores cercanos a  $\text{pH}$  13. Es también visible que el  $\text{pH}$  medido mediante disolución del lodo en agua destilada es mucho mayor que el medido directamente, debiéndose posiblemente a la dispersión de sustancias básicas en la disolución provenientes de la muestra.

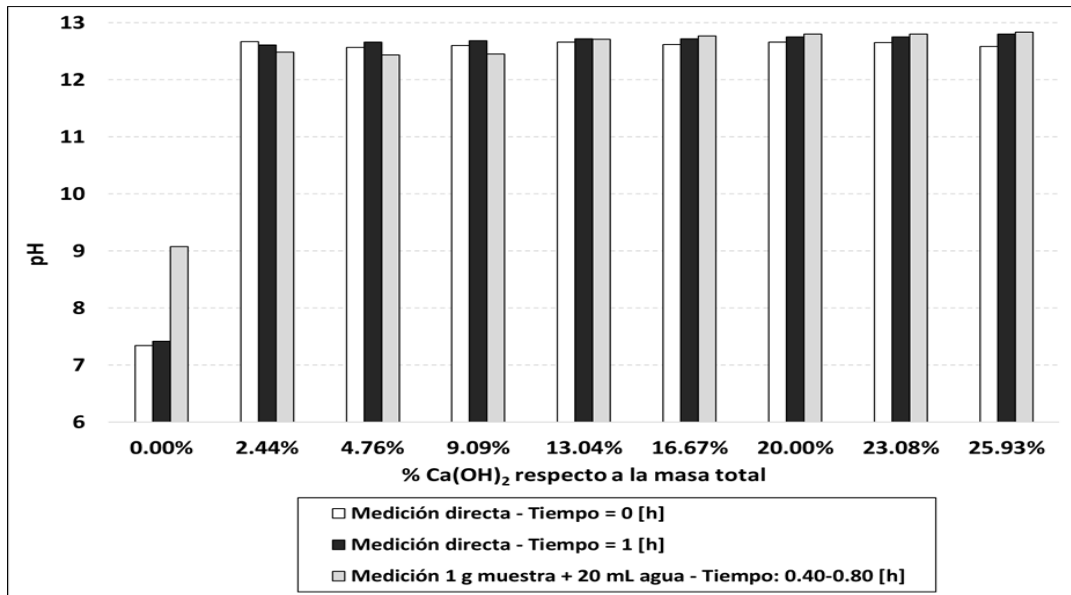


Fig. 4. Medición de pH del lodo residual utilizando distintas cantidades de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en vasos de 250 mL, considerando un tiempo de hasta una hora

Los primeros cinco casos presentados en la Fig.4 se usaron en pruebas con mayor contenido de lodo expuestas al ambiente durante intervalos de tiempo de hasta 17 horas, lo cual se muestra en Fig. 5. En este experimento 6 mediciones de  $pH$  fueron realizadas y la desviación estándar de dichas mediciones es representado en las barras de error. La muestra sin adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (blanco) no es mostrada en el Fig. 5, pero su  $pH$  se mantuvo alrededor de 7.36 y 8.25 ( $24^\circ\text{C}$  a  $27.5^\circ\text{C}$ ). La adición de 2.44% y 4.76% de la cal hidratada en el lodo residual aún resulta insuficiente debido a la variabilidad de la data representada en las barras de error, siendo la concentración de 9.09% la primera en la que el  $pH$  se mantiene más estable.

Asimismo, las mediciones directas (inmersión de la probeta en el lodo) y aquellas mezcladas con agua destilada son similares siendo la segunda la que proporciona menos desviación estándar. Las mediciones realizadas con esta segunda metodología permitieron corroborar que el  $pH$  de lodo inicial encalado llegó a valores entre 12.24-12.76 ( $26.3^\circ\text{C}$ - $28.5^\circ\text{C}$ ), mientras que las muestras deshidratadas tuvieron un  $pH$  en un rango de valores parecido entre 12.21 y 12.38 de  $pH$  ( $26.8^\circ\text{C}$ - $28.4^\circ\text{C}$ ). El porcentaje de cal hidratada con respecto a la masa total de alimentación es parecido a la de 10% de  $\text{CaO}$  citada en trabajos anteriores [6].

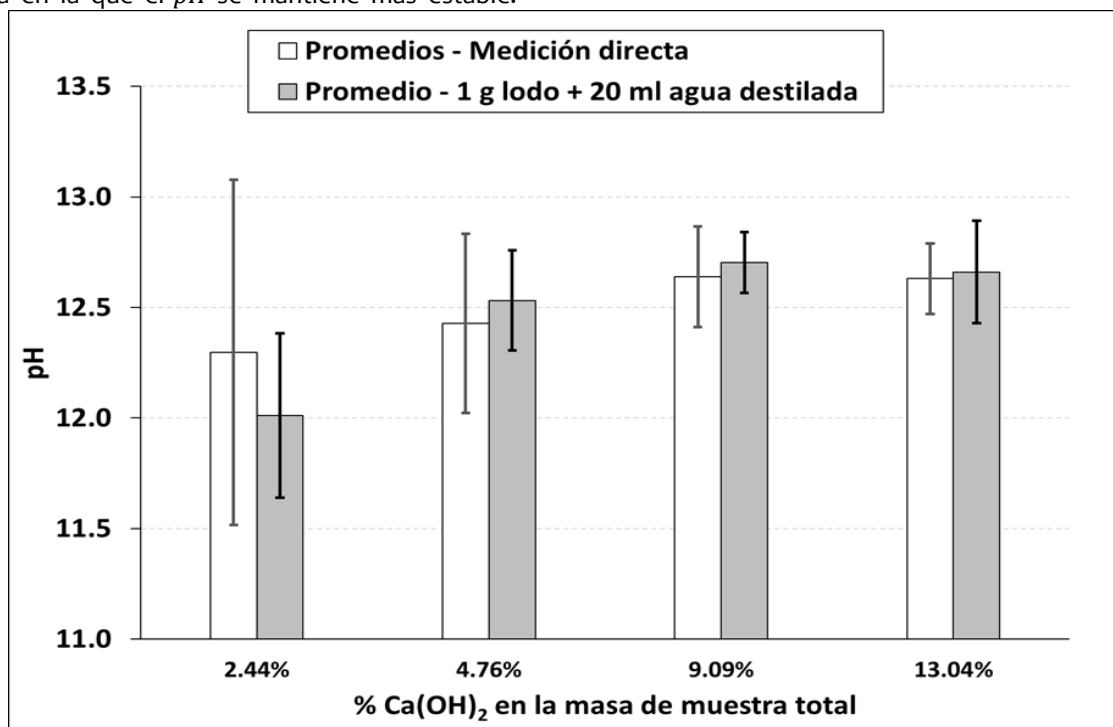


Fig. 5. Medición de pH de muestras encaladas en vasos de precipitado de 2L, mostrando los promedios de las mediciones en un rango de 17 horas y barras de errores equivalentes a la desviación estándar



### 4.3. Contenido de humedad alcanzado después de la deshidratación

La Fig. 6 muestra que la humedad final de la muestra deshidratada alcanzó un nivel mínimo de 17.74%, siendo las muestras no encaladas deshidratadas a menor temperatura (120°C) las que presentaron menores niveles de deshidratación. En esta figura se aprecia que el encalado inicial del lodo antes de su ingreso al horno permite obtener mayores niveles de deshidratación inclusive operando a menores temperaturas y tiempos de permanencia del lodo residual dentro del equipo (120°C, 20 min y 40 min ). Asimismo, la mayor

variabilidad se obtuvo en la muestra no encalada que fue procesada a 120°C y 40 minutos, pudiéndose explicar en parte a las distintas cantidades de carga inicial que fueron alimentadas al horno, los cuales fueron 200 kg (46.65% humedad final), 20 kg (30.97%) y 20 kg (30.04%). Esta observación es importante porque indica que la cantidad de carga inicial alimentada al horno podría disminuir la eficiencia del secador, explicándose por el aumento de espesor de capa dentro de las paredes del horno y subsecuente disminución de la eficiencia de transferencia de calor. Por otro lado, los tiempos de permanencia del lodo dentro del equipo tuvieron un efecto menos relevante que las temperaturas de operación seleccionadas en la TABLA I.

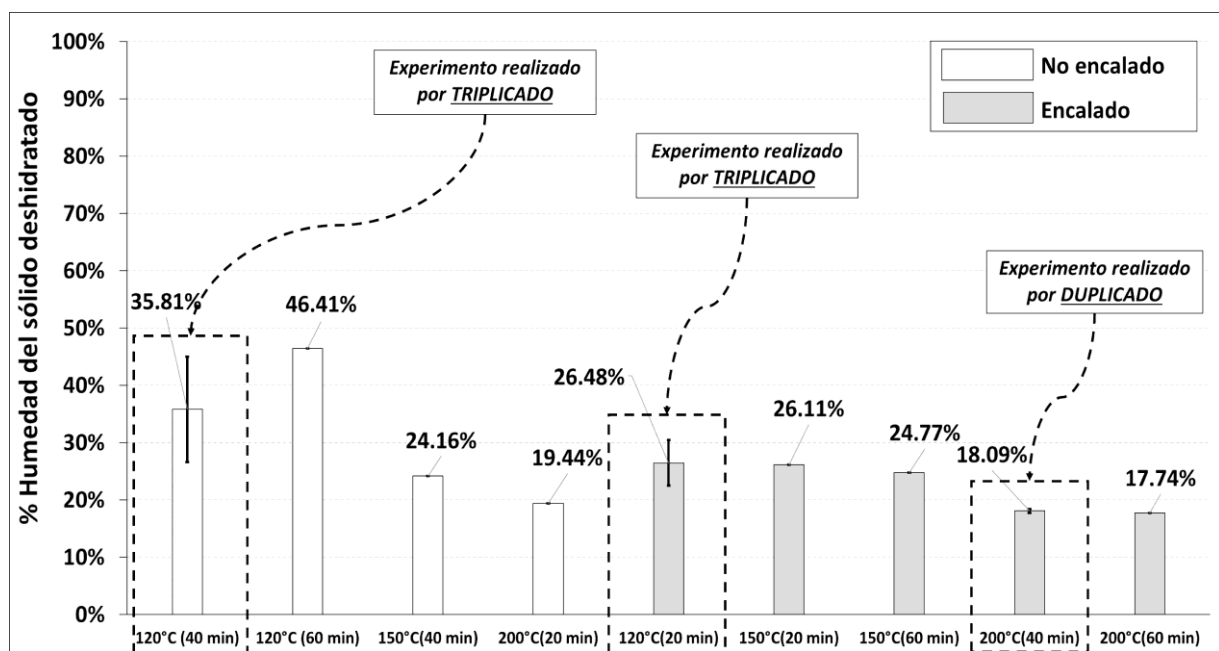


Fig. 6. Porcentaje de humedad final alcanzada en cada una de las condiciones operativas (temperatura y tiempo) del secador, indicando la cantidad de réplicas experimentales utilizadas.

El contenido máximo de sólidos alcanzado después de la deshidratación fue de 82.26% según la Fig.6, el cual es cercano al alcanzado en estudios similares donde se reporta un contenido de sólidos entre 88% y el 96% [16]. Adicionalmente otra investigación reporta que la obtención de un contenido de sólidos secos puede ser mayor a 95% cuando el rango de temperatura se encuentra entre 420°C y 650°C en un tambor rotacional, utilizando una retención típica entre 10 y 30 minutos [21]. Es importante mencionar que la cantidad de carga inicial en cada tratamiento podría afectar el contenido de humedad alcanzada. Sin embargo, en esta investigación se consideró que dicha variable no afectaba significativamente debido a que el ingreso del lodo desde la tolva de alimentación hacia el horno y su salida desde el horno al ciclón se realizaban como un flujo continuo. Asimismo, la adición aleatoria de cal en distintos experimentos podría considerarse como un factor adicional en futuras investigaciones.

### 4.4. REDUCCIÓN DE ESCHERICHIA COLI

Inicialmente se supuso que las altas temperaturas utilizadas dentro del secador y la eliminación de aproximadamente el 80% de contenido de humedad podrían ser suficientes para disminuir el contenido de *Escherichia Coli* presentes en la muestra inicial sin la necesidad de adicionar cal hidratada. Sin embargo, todos los experimentos no encalados no presentaron ninguna disminución en el contenido de *Escherichia Coli* como se muestra en la Fig. 7. Estos resultados sugirieron durante el desarrollo experimental que el encalado en las muestras de lodo residual es necesario para disminuir el contenido de *E. Coli* por debajo de lo requerido por la normativa nacional peruana (1000 Número más probable/1g de materia seca) como se muestra en la Fig. 8. Adicionalmente, la presencia de Huevos de Helmintos no fue detectada en ninguna de las



muestras de lodos húmedos ni deshidratados. Por otro lado, aunque la presencia de *Huevos de Helminto* no fue detectada antes del secado térmico, se decidió medir su presencia también en la muestra deshidratada para corroborar resultados. La ausencia

de *Huevos de Helminto* deberse a que la composición inicial del lodo residual no cumple con las condiciones favorable para la aparición de este microorganismo específicamente.

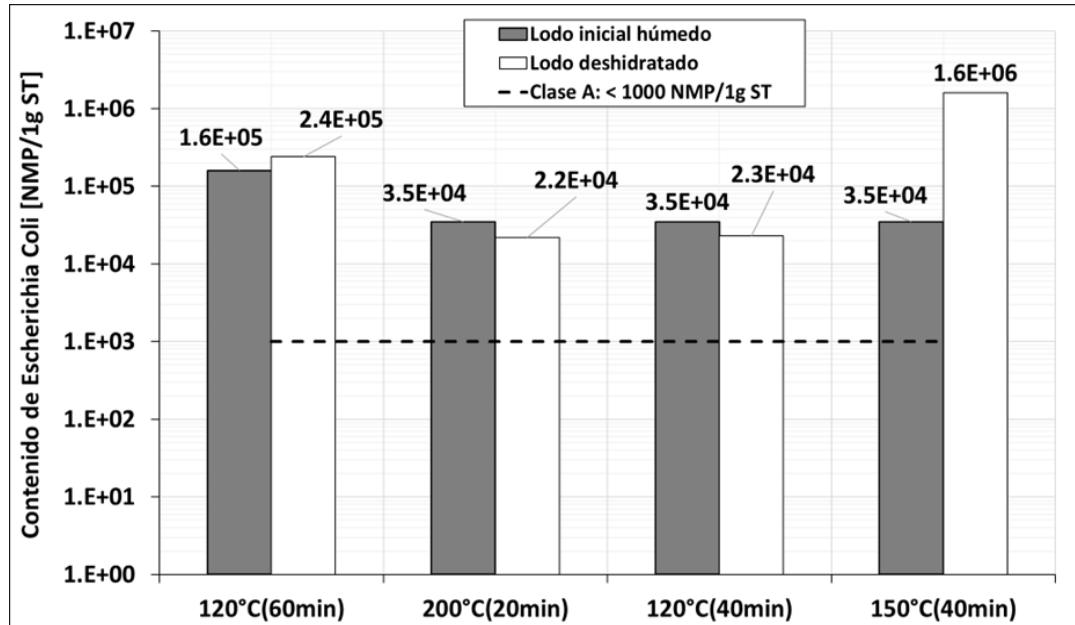


Fig. 7. Contenido de Escherichia Coli en el lodo húmedo y deshidratado, sin adición de cal al inicio de la operación, comparado con Clase A del DS 015 – 2017

Nota: El término NMP/1g ST se refiere a: Número más probable/ 1 gramo de Materia seca (ST)

La Fig. 8 indica claramente que ni la temperatura o el tiempo de residencia presentan un efecto en la disminución del contenido de *E. Coli*, mientras

que la adición de  $Ca(OH)_2$  en el lodo residual húmedo en el tanque de agitación es clave para la higienización de éste.

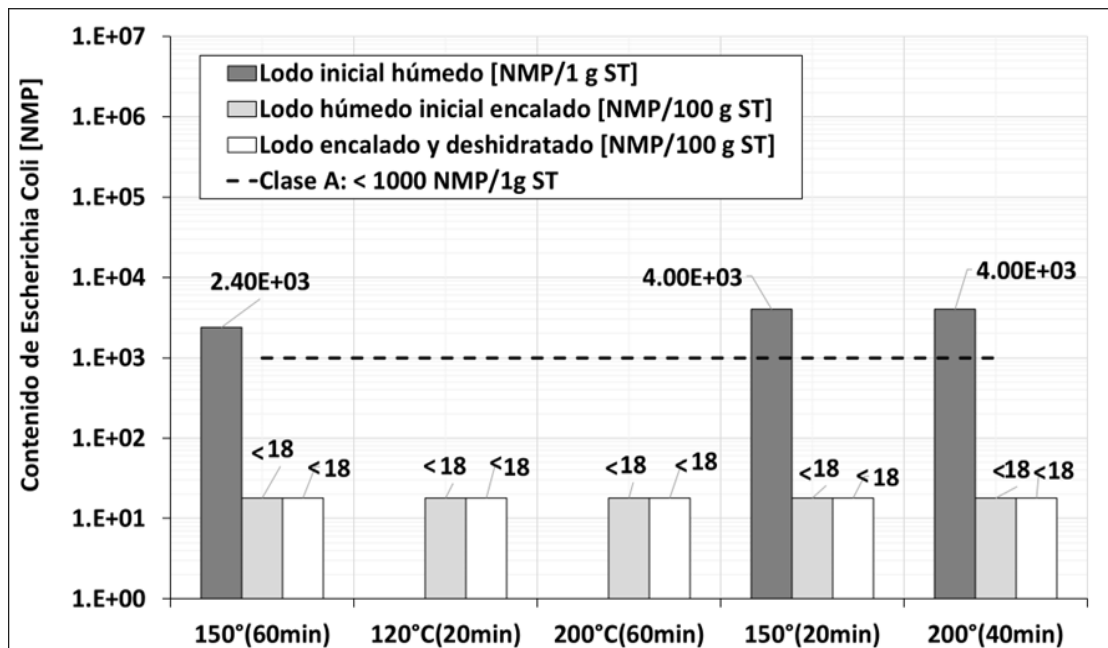


Fig. 8. Contenido de Escherichia Coli en muestras de lodo húmedo, lodo húmedo con cal y lodo deshidratado, comparado con Clase A del DS 015 – 2017

Nota: El término NMP/1g ST se refiere a: Número más probable/ 1 gramo de Materia seca (ST)

#### 4.5. CONTENIDO DE NUTRIENTES PRESENTES EN EL LODO DESHIDRATADO

La TABLA II muestra la composición de nutrientes en el lodo deshidratado (encalado), con cantidades significativas de la mayoría de nutriente a excepción

del contenido de cloruro. El contenido elevado de calcio se relaciona con la adición de cal hidratado durante el procesamiento. En esta tabla la concentración del Carbono Orgánico Total obtenido se encuentra dentro del rango entre 408.87 *g/kg* a 447.66 *g/kg* en muestras con contenidos de humedad entre 36% y 10%, respectivamente [4].

TABLA II  
Composición de elementos no metálicos en muestra deshidratada

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADOS	UNIDAD	RESULTADOS
Carbono Orgánico Total	%	14.96	<i>g/kg</i>	149.6 (*)
Cloruro	%	< 0.10	<i>g/kg</i>	< 1.00 (*)
Nitrógeno Total	%	1.29	<i>g/kg</i>	12.90 (*)
Azufre	<i>mg/kg</i>	5,775	-	-
Magnesio	<i>mg/kg</i>	4,914	-	-
Fósforo	<i>mg/kg</i>	4,887	-	-
Potasio	<i>mg/kg</i>	2,149	-	-
Calcio (**)	<i>mg/kg</i>	156,168.00	-	-

Nota: (\*) Los datos fueron convertidos a sus equivalentes en *g/kg* para su comparación con referencias.

#### 4.6. CONTENIDO DE METALES PRESENTES EN EL LODO DESHIDRATADO

Las Fig. 9.A, Fig. 9.B y Fig. 9.C presentan la concentración de metales presentes ordenados de mayor o menor. La concentración de metales se encuentra por debajo de los límites máximos de los parámetros de toxicidad química en biosólidos de Clase A y de Clase B [7]. Estos resultados son satisfactorios y dan luz verde para que el lodo deshidratado y previamente encalado pueda

utilizarse como fuente de nutrientes para la agricultura. Otros elementos como el molibdeno y selenio presentan valores que son menores a los límites máximos (75 *mg/Kg* y 100 *mg/kg*) permitidos para su aplicación en el campo [17]. Sin embargo, la presencia de metales podría ser disminuida si los efluentes provienen de plantas residuales industriales y domésticas fuesen clasificados antes de su tratamiento. Si bien es cierto el contenido de metales está dentro de lo que indica la norma, los riesgos potenciales de su aplicación en cultivos debe ser analizado en investigaciones posteriores para asegurar la inocuidad del producto alimentario.

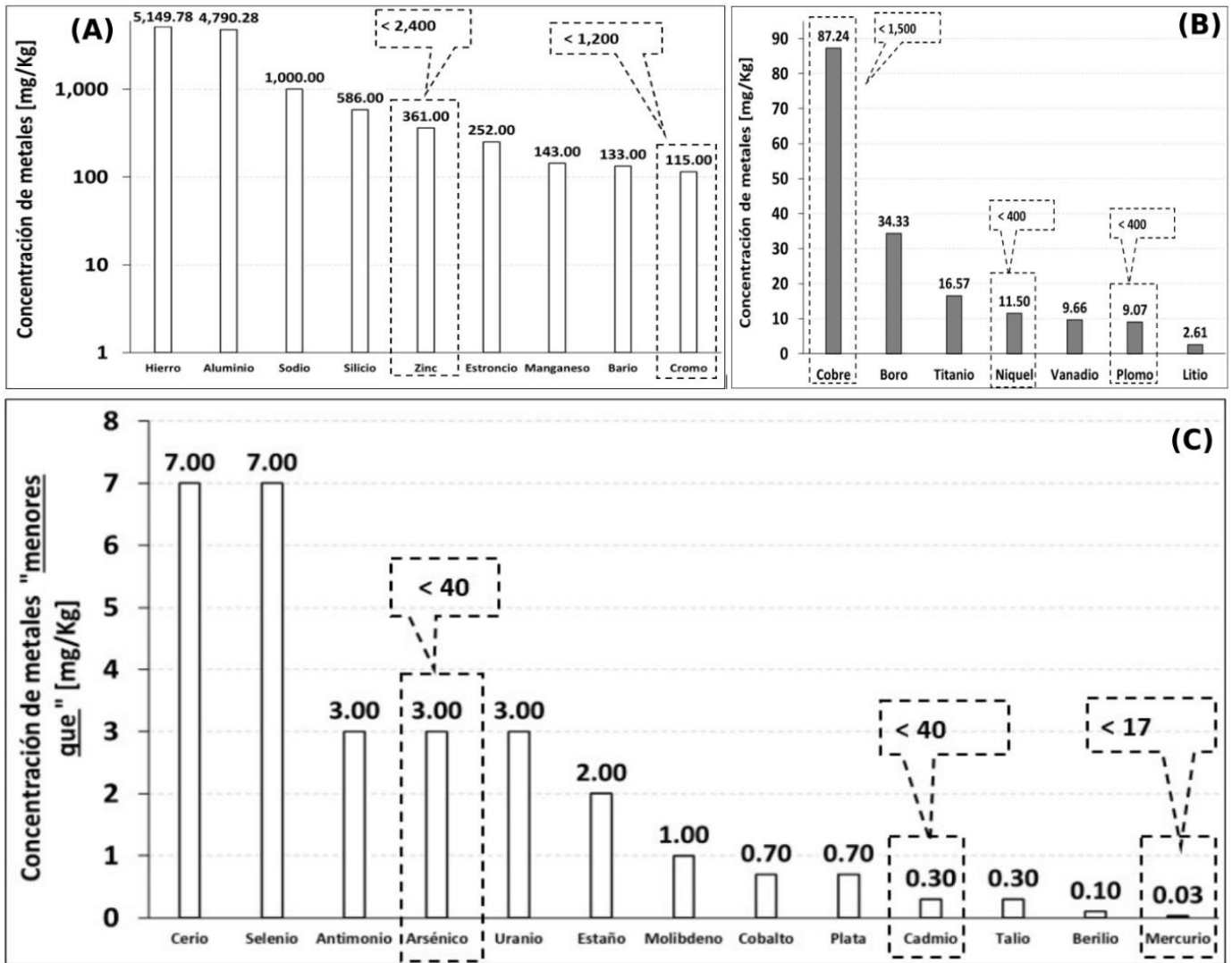


Fig. 9. Evolución del contenido de metales en el rango mayores a 100 mg/kg (A), menores que 100 mg/kg (B) y por debajo de detección del método (L.D.M.) (C)

## CONCLUSIONES

El secado del lodo residual a distintos tiempos (20 minutos, 40 minutos y 60 minutos) en cada una de las temperaturas utilizadas (120°C, 150°C y 200°C) presentaron rangos de humedad final en el lodo de 26.48% a 46.41%, 24.16% a 26.11%, y 17.74% a 19.44%, respectivamente según la Fig.6. Esto sugiere que el tiempo de permanencia del lodo dentro del secador (20 minutos a 60 minutos) tiene una menor influencia comparado a la temperatura de operación (especialmente a 150°C y 200°C) en la humedad final alcanzada en el lodo deshidratado. El secado a 120°C presenta mayor variabilidad en los porcentajes de humedad promedio alcanzado a distintos tiempos de secado, sin embargo, se puede observar en la Fig.6 que los tres valores se superponen considerando la barra de error estimada proveniente de la desviación estándar de réplicas experimentales. Por consiguiente, estudios posteriores en condiciones similares podrían parametrizar al tiempo de permanencia del lodo dentro de 40 minutos o 60 minutos y enfocar mayores esfuerzos en el estudio del rango de temperatura. No se recomienda el uso de 20 minutos debido a que a esta temperatura se obtuvo un mayor porcentaje de humedad después del secado a 150°C y 200°C. La obtención de un porcentaje de humedad en el lodo menor al que se presenta en esta investigación (17.74% humedad a temperatura de 200°C y 60 minutos) amerita un estudio de otras variables como la cantidad de carga de lodo alimentada al equipo.

El monitoreo exhaustivo antes y después de la deshidratación del lodo residual en la concentración de *Escherichia Coli* y *Huevo de Helminthos* permitió concluir que la primera variable es la que demanda mayor atención por su valor elevado, mientras que la segunda cumple con los requisitos establecidos por la normativa peruana inclusive sin tratamiento térmico. La adición de cal hidratada al lodo fue necesaria para poder estabilizarlo y utilizarlo como fuente de nutrientes en el cultivo.

La reutilización del lodo deshidratado como fertilizante en cultivos podría ser una opción viable por la presencia de nutrientes (*N*, *P*, *Mg*, *C* y *K*) que contiene la muestra según lo dicha la Tabla II, pero el contenido excesivo de algunos metales sugiere cambios generales en la planta de tratamiento de aguas actualmente. Una alternativa de reutilización del lodo deshidratado podría considerar el uso de algún cultivo de absorción selectiva de compuestos que evite los metales.

Los resultados sobre el tratamiento y la caracterización de los lodos abren la puerta a

investigar sobre la posibilidad de usar estos lodos deshidratados para promover la economía circular y disminuir la contaminación.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al personal técnico que labora en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Santa Clara que apoyó en las corridas experimentales y toma de muestras. Asimismo, se agradece también a la plana docente de la Maestría en Tratamiento de Aguas de la Universidad Nacional de Ingeniería; específicamente se hace mención a las valiosas sugerencias brindadas por el Dr. Pedro Valdivia y Dr. Rudy Noriega Pisani.

## REFERENCIAS

- [1] Pueblo Libre Noticias (2021). Senamhi: humedad de hasta 100% se registra en distritos costeros de Lima [En línea]. Disponible en: <https://noticiasdepueblolibre.com/2021/08/17/senamhi-humedad-de-hasta-100-se-registra-en-distritos-costeros-de-lima/>
- [2] J. Espinoza, E. Santos de la Cruz, "Innovación en la gestión de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en Lima-Callao", *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos*, vol. 24, no. 48, pp. 205-215, 2021
- [3] Francisco, J., Ramos, P., Aguirre, G. "Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra-Lima", *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 77, no. 1, pp. 75-85, 2011
- [4] Castellanos, J., Merchán, N., Galvis, J., Manjarres, E. "Deshidratación de los lodos en lecho de secado y su influencia sobre la actividad biológica de los microorganismos", *Gestión y Ambiente*, vol. 21, no. 2, pp. 242-251, 2018.
- [5] D. Glatstein, "Secado de lodos obtenidos en el proceso de purificación de agua", *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 4, no. 2, pp. 27-32, 2017.
- [6] C. Diocaretz, "Aspectos técnicos y económicos de procesos de higienización de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas", Tesis para obtener el título de Ingeniero Ambiental. Universidad de Concepción (Chile), 2011.
- [7] Decreto Supremo N° 015-2017- VIVIENDA. D.S que aprueba el Reglamento para el Reaprovechamiento de los Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales.
- [8] Ley N° 28611 (2005). Ley General del Medio Ambiente en Perú. [En línea]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%Bo-28611.pdf>



Los artículos publicados por TECNIA pueden ser compartidos a través de la licencia Creative Commons: CC BY 4.0. Permisos lejos de este alcance pueden ser consultados a través del correo [revistas@uni.edu.pe](mailto:revistas@uni.edu.pe)

[9] United Nations (2021). The sustainable Development Goals Report. [En línea]. Disponible en: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2021/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2021.pdf>

[10] INEI (2021). Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales. [En línea]. Disponible en: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1827/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1827/libro.pdf)

[11] Heredia, G., Gandarillas, V., Becerra, A. (2020). “Estudios de caso en saneamiento sostenible – Tratamiento descentralizado de aguas residuales con enfoque de reúso en Cochabamba, Bolivia”. Folleto: Sustainable Sanitation Alliance (SUSANA). [En línea]. Disponible en: <https://www.susana.org/en/knowledge-hub/resources-and-publications/library/details/3983#>

[12] Metcalf & Eddy.. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. AECOM, 2013.

[13] Lipolt, A., Sirok, B., Hocevar, M., Novak, L. “Convective Drying of Sewage Sludge Layer in Through flow”. *Journal of Mechanical Engineering*, vol.66(2020)9, 481-493, 2020.

[14] Poos, T., Orvos, M. Horvath, M. “Thermal Dewatering of Waste Sludge in an Agitated Drum dryer”, *Acta Polytechnica Hungarica*, vol.11, no.3, pp. 37-50, 2014.

[15] Bennamoun, L., Arlabosse, P., Leonard, A. “Review on fundamental aspect of application of drying process to wastewater sludge”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 28, pp. 29-43, 2017

[16] Mahamud, M. Gutiérrez, A., y Sastre, H. “Biosólidos Generados en la depuración de Aguas: Métodos de Tratamiento”, *Revista Ingeniería del Agua*, vol. 3, pp. 45-55, 1996.

[17] Turovskiy, I. Wastewater sludge processing. Wiley-Interscience. Primera edición. Canadá, 2006.

[18] Dos Santos, E. Investigation on biochar production from biosolids via microwave assisted pyrolysis and its potential applications. PhD thesis, James Cook University (Australia), 2017.

[19] SMEWW. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington, D.C, American Public Health Association. Tercera Edición, USA.

[20] Norma Oficial Mexicana 004 - SEMARNAT. Protección Ambiental, Lodos y Biosólidos, Especificaciones y Límites Máximos Permisibles de Contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, 2002

[21] Morera, M. Diseño de un proceso de secado para los lodos centrifugados provenientes del sistema de tratamiento de lodos de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Los Tajos. Tesis Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica, 2018.