



Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre El Escorpión del municipio de Villapinzón, Cundinamarca

Evaluation of a centrifugation system for the drying of muds generated in the treatment of wastewater in the curtiembre the Scorpion of the municipality of Villapinzón, Cundinamarca

Daniel Esteban Ferro-Rodríguez¹, Jeimmy Catalina Castiblanco-Rocha², Rafael Nikolay Agudelo-Valencia³, Lida Esperanza Ruiz-Martínez⁴

Para citar: D. E. Ferro-Rodríguez, J. C. Castiblanco-Rocha, R. N. Agudelo-Valencia, L. E. Ruiz-Martínez, "Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre El Escorpión del municipio de Villapinzón, Cundinamarca". *Revista Vínculos: Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol. 16, no. 2, julio-diciembre de 2019, pp. 242-251. DOI: 10.14483/2322939X.15188

Enviado: 11/09/19/ **Recibido:** 12/09/19/ **Aprobado:** 03/10/19

Resumen

La industria de curtiembres genera una alta carga contaminante representada por residuos líquidos y sólidos. Entre los residuos sólidos, la disposición final del lodo del tratamiento de aguas residuales representa un serio inconveniente en términos de manejo, tiempo de procesamiento y costo de disposición final. Se evaluó un sistema de centrifugación con tela filtrante siguiendo el objetivo de analizar una alternativa que permita reducir el tiempo de tratamiento, costo y buscar obtener beneficios ambientales para el sector curtidor. Los materiales filtrantes fueron cinco tipos de telas (cambre, madre selva, jean, militar y gladiador) y se determinó que la resistencia a la filtración que ofrece cada material no es significativa. Por otra parte, el lodo, producto del tratamiento de agua residuales de pelambre, ofrece alta resistencia a la separación sólido/agua ($r = 7,0179E+13 \text{ s}^2/\text{kg}$) y, por lo tanto, un bajo alcance de filtración ($Y = 0,000413 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$), hecho que hace que un sistema de centrifugación requiera de una considerable área y alto consumo energético.

Palabras Clave: alcance de filtración, filtración, resistencia, separación sólido agua, sistema de centrifugación.

Abstract

The tannery industry generates a high load of pollutant represented by liquid and solid waste, among solid waste the final disposal of sludge from wastewater treatment represents a serious inconvenience in terms of handling, processing time and final disposal cost. A centrifugation system with filter cloth was evaluated in order to analyze an alternative that allows to reduce the time of treatment, cost and seek to obtain environmental benefits for the tanner sector. The filtering materials were 5 types of fabrics (cambre, jungle mother, jean, military and gladiator) and it was determined that the resistance to filtration offered by each material is not significant, on the other hand, the sludge product of the wastewater treatment of hair offers high resistance to solid / water separation ($r = 7.0179E + 13 \text{ s}^2/\text{kg}$) and therefore a low filtration range ($Y = 0.000413$

1. Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre de Colombia, Sede Bosque Popular. Correo electrónico: danielle-ferror@unilivre.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4952-991X>
2. Estudiante de Ingeniería Ambiental, Universidad Libre de Colombia, Sede Bosque Popular. Correo electrónico: jeimmymy-castiblanco@unilivre.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0341-1262>
3. Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad Libre de Colombia, Sede Bosque Popular. Correo electrónico: rafaeln.agudelo@unilivre.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6646-7725>
4. Magíster en Gestión Ambiental, Universidad Libre de Colombia, Sede Bosque Popular. Correo electrónico: lida.ruizm@unilivre.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0236-425X>

kg/m²*h), which makes a centrifugation system for this type of mud requires of a considerable area and high energy consumption.

Keywords: filtration range, filtration, resistance, solid water separation, centrifugation system.

1. Introducción

La industria del cuero, uno de los oficios de mayor arraigo y tradición en varias regiones de Colombia, ha ocupado un destacado lugar en la economía nacional [1]. Particularmente, en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca, el establecimiento del sector curtiembres se remonta hacia 1950, en la actualidad se encuentran alrededor de 120 curtidores ubicados al sur del municipio y extendidos en un área de 7000 m² a lo largo del río Bogotá [2]. La mayoría de las fábricas son de tipo familiar y la comunidad cuenta con un nivel educativo promedio de primaria, vive de una economía de subsistencia, utilizando una tecnología obsoleta [3].

Las curtiembres son unidades de proceso en las cuales se transforman las pieles animales en cuero, obteniéndose un material imputrescible y manejable. El proceso por el cual se realiza esta transformación es el curtido, donde los cueros se mantienen en contacto con curtientes tales como sales de cromo o taninos vegetales a fin de lograr la estabilización del colágeno que compone la piel. Cabe señalar que la industria del cuero en Colombia se encuentra distribuida principalmente en los departamentos de Antioquia, Atlántico y Cundinamarca [4].

Del peso total de las pieles que ingresa a la curtiembre, el 60% es eliminado, ya sea en las aguas residuales o como residuos sólidos que incluyen grasas, tejidos biodegradables, pelo, fibras, cuero curtido en forma de pedazos, viruta y polvo [5]. El pelo residual es removido mediante filtración en algunos casos durante el proceso [6], pero en la mayoría de veces es descargado directamente al río Bogotá o al relleno sanitario, generando una problemática ambiental de alto impacto negativo sobre la calidad del agua y el suelo [2]. Por lo anterior, la industria de curtiembres ha sido reconocida no solo a nivel nacional, sino también

internacional como altamente contaminante, en virtud de que los procesos de degradación ambiental que produce son generalmente de carácter irreversible [5].

Además de agua residual, en el curtido de cueros se generan cantidades considerables de lodo, el cual representan una de las mayores problemáticas para este sector industrial. La mayor producción de lodo toma lugar en el proceso de pelambre o depilado del cuero, etapa que representa más del 75% de la carga contaminante total del proceso. Durante el pelambre, el pelo es retirado de las pieles haciendo uso de agua, cal y sulfuro de sodio, este último es el agente químico encargado de debilitar el pelo para removerlo de la piel, pero también puede ocasionar la dilución completa del pelo, complicando el tratamiento del agua residual por la dilución de las proteínas que lo conforman [7].

Además del lodo que se produce en el curtido a lo largo del tratamiento del agua residual, en especial en la clarificación se generan cantidades significativas de lodo con alto contenido de sólidos y materia orgánica [8].

La principal preocupación relacionada con esta opción es el destino de los metales pesados contenidos en el lodo de curtiembre y sus efectos en el crecimiento de las plantas y la calidad del suelo [9]. En diferentes trabajos de investigación, se analiza la posibilidad de extraer, por medio de microorganismos, metales valiosos presentes en los lodos de curtiembre, de modo que puedan ser reciclados en la industria misma industria de curtido; el objeto de estos estudios también ha sido mejorar la calidad del lodo para facilitar su disposición [10].

La industria de curtiembres se compone de actividades que impactan significativamente los componentes biótico, físico y social del ambiente. La mayoría de estos impactos son negativos debido a la forma como se han desarrollado los procesos productivos. Esta actividad productiva ha sido industrializada con el paso del tiempo y ha traído consigo el incremento en la contaminación del río Bogotá. Conforme a lo anterior, se hace necesario la búsqueda de alternativas que permitan realizar la pronta separación del pelo y el agua del baño de pelambre, evitando la dilución del pelo y permitiendo recircular el agua para continuar con el

proceso de pelambre.

En la mayoría de los procesos industriales, uno de los principales problemas lo constituye el manejo de lodo, ello debido a los requerimientos de energía y espacio para el manejo de este. La industria de curtido de pieles no es ajena a esta situación, a lo largo del proceso se generan distintos tipos de residuos, entre ellos lodo de procesos tales como pelambre y desencale. El lodo de pelambre presenta un alto contenido de agua, pelo, cal, sulfuro de sodio y materia orgánica. Como hecho adicional, el proceso de pelambre requiere la rápida separación entre pelo y agua, a fin de evitar sobre costos en el proceso de tratamiento de aguas residuales. Existen en el mercado distintas alternativas para reducir el contenido de humedad en el lodo, por ejemplo, los filtros prensa, filtros de tornillo, secadores rotatorios. En el presente proyecto, se evalúa el uso de una centrífuga como alternativa para acelerar el secado de los lodos del proceso de pelambre; para tal fin, se empleará una lavadora de segunda mano con el objeto de disminuir el tiempo de separación y reducir la probabilidad de dilución del pelo en el agua, hecho que favorece la disminución de los problemas de contaminación asociados al curtido de pieles bovinas, ubicadas específicamente en Villapinzón.

2. Materiales y métodos

El lodo utilizado fue el obtenido en la clarificación

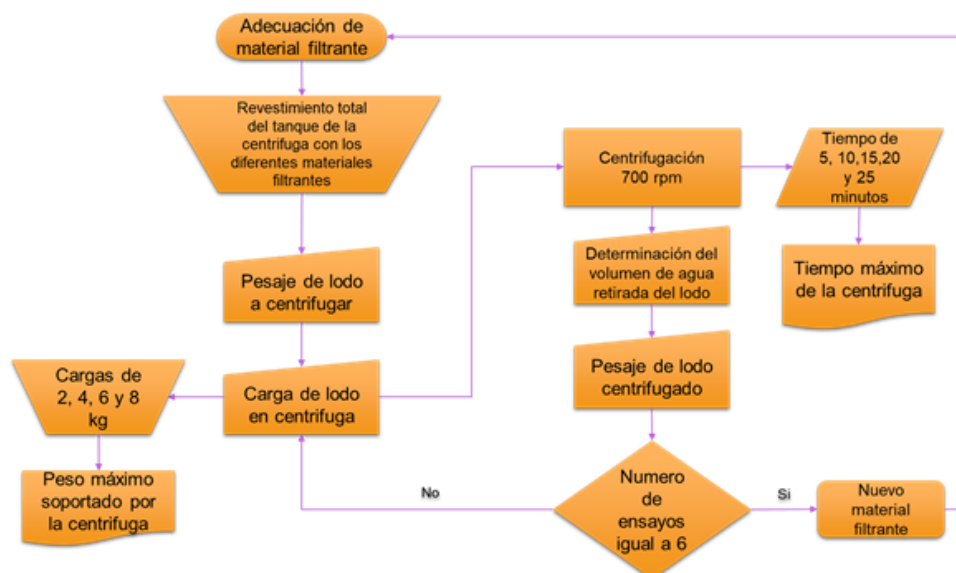


Figura 1. Diagrama de procesos para la centrifugación de lodos Fuente: elaboración propia.

por flotación de las aguas residuales del proceso de pelambre en la curtiembre El Escorpión, ubicada en la vereda Reatova, Villapinzón, Cundinamarca.

Para los experimentos, el equipo que se utilizó fue una lavadora en desuso para centrifugar el lodo, la potencia de esta es de 460 W y gira a una velocidad de rotación de 700 rpm. Se emplearon seis tipos de materiales diferentes para determinar la eficiencia de cada uno de ellos en lo que respecta a la separación agua-sólidos en el lodo. El tambor o recipiente de la lavadora fue recubierto en su momento con cada una de las telas a fin de determinar la resistencia de las tortas o lodo acumulado en la superficie durante la centrifugación.

Los ensayos se realizaron con diferentes cargas de lodo (2, 4, 6 y 8 kg) los materiales filtrantes utilizados fueron tela madre selva 80 g, tela cambre 150 g, lona tipo militar 80 g, tela de jean 100 g y tela tipo gladiador 80 g. Los tiempos de centrifugación fueron de cinco, diez, quince, veinte y veinticinco minutos, la efectividad del proceso se midió en términos de porcentaje máximo de agua removida del lodo y porcentaje de sólidos secos después del proceso de centrifugación. Cada uno de los ensayos fue replicado seis veces para determinar el valor promedio para cada tipo de material filtrante. En la Figura 1, se presenta el esquema bajo el cual fueron realizados los ensayos.

La masa de lodo contenida en cada tanque después de los distintos tiempos de centrifugación fue determinada empleando una balanza o bascula de plataforma con capacidad para medir hasta 60 kg, con un margen de error en las mediciones entre 0 y 5 kg de 5 g y para mediciones entre 10 y 50 kg de 10 g. El volumen de agua recolectada en el proceso fue medido empleando probetas de la marca Brand con capacidad de 100 mL, 500 mL y 1000 mL. La densidad del agua se midió en campo utilizando las probetas y la balanza, en el laboratorio se utilizó el picnómetro y balanzas analíticas.

Para determinar la resistencia a la filtración ocasionada por el material sobre la superficie del material, se realizaron pruebas de filtración al vacío sobre trozos circulares de cada una de las telas o materiales empleados en campo. El equipo de filtración suministra o permite alcanzar una presión de vacío de -15 cm Hg, es decir, -19998.35 Pa. El contenido de sólido seco en el lodo inicial fue determinado por evaporación a 90° C durante veinticuatro horas. El lodo fue dispuesto sobre un embudo Buchner y recubierto con cada una de las telas o materiales de filtración, el agua filtrada fue recolectada y medido el volumen y densidad de esta.

Para determinar la resistencia al secado ofrecida por la torta o sólidos acumulados sobre la superficie del material, se llevaron a cabo ensayos a nivel de laboratorio; la información obtenida en estos sirvió como base para el cálculo de la resistencia mencionada. En el caso de canastas centrífugas con material filtrante, el modelo matemático propuesto en [11] obedece a la formulación matemática que se presenta en las ecuaciones (1) a (5):

$$\frac{dv}{dt} = \frac{P \cdot A^2}{\mu(r \cdot c \cdot V + Rm \cdot A)} \quad (1)$$

En la ecuación anterior V es el volumen del filtrado (m^3), t es el tiempo (s), P es la presión de vacío (Pa) aplicada en el ensayo, A es el área de filtración (m^2) μ es la viscosidad del filtrado, ($\frac{kg}{m \cdot s}$) y r es la resistencia específica de la torta ($\frac{s^2}{kg}$). C es la masa de soluto o de sólido por volumen de filtrado (kg/m^3), Rm la resistencia inicial del medio filtrante. La ecuación (2), permite realizar el cálculo de la variable C .

$$C = \frac{\text{Masa de solución}}{\text{Volumen de filtrado}} \left[\frac{kg}{m^3} \right]; C = \frac{\rho}{\frac{Ci}{100-Ci} - \frac{Cf}{100-Cf}} \quad (2)$$

Ci es el porcentaje de humedad inicial. Cf es el porcentaje de humedad final. La presión de vacío en el sistema es constante, la ecuación diferencial (1) puede ser simplificada para obtener la ecuación (3), en la cual, al despreciar el término Rm y realizar ajustes algebraicos, se puede observar que corresponde a la ecuación de una recta que pasa por el origen, la pendiente de esta recta corresponde a la ecuación (4) de que fue despejado el valor de r o resistencia específica de la torta.

$$\frac{t}{V} = \left(\frac{\mu \cdot r \cdot c}{2 \cdot P \cdot A^2} \right) \cdot V + \frac{\mu \cdot Rm}{P \cdot A} \quad (3)$$

$$r = \frac{2 \cdot D \cdot \Delta P \cdot A^2}{\mu \cdot c} \quad (4)$$

En las ecuaciones (3) y (4), todas las variables ya fueron definidas, b corresponde a la pendiente de la línea que se debe formar al graficar V contra t/V . Con el valor de la pendiente de cada recta se determina la resistencia específica de la torta del lodo y el alcance de la filtración "Y", esta última variable es útil para determinar el área de centrífuga requerido una vez conocida la resistencia específica del lodo y el flujo masico que debe ser tratado. La variable "Y" se determina a partir de la ecuación (5).

$$Y = \left(\frac{2 \cdot \Delta P \cdot C \cdot \phi}{\mu \cdot r \cdot \theta \cdot g} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (5)$$

En la θ ecuación anterior, ϕ es la sumergencia o porcentaje de área de la centrífuga cargado con lodo, es el tiempo de centrifugación en "s".

3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se presenta el resultado promedio remoción de agua obtenidos en los ensayos de campo hechos con cada uno de los materiales filtrantes.

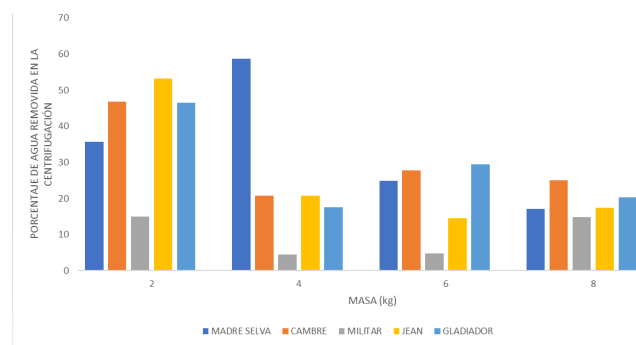


Figura 2. Porcentaje de agua Removida en 25 minutos de centrifugación

La eliminación de lodo es una parte integral de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, su costo generalmente representa más de la mitad del costo total de operación. Debido a ello, la deshidratación de lodo es un proceso esencial para la eliminación de estos, y es importante para la reducción efectiva del costo de procesamiento final [11].

La eficiencia está dada o se relaciona a partir de porcentajes de reducción de masa del material contenido en la centrifuga, también se ejemplifica a través de la comparación frente a otro material para

retención de sólidos. Con base en lo anterior, y a fin de determinar con precisión cuál de los materiales empleados permite lograr el mejor resultado, se realiza el análisis de varianza (ANOVA, por sus singlas en inglés), tomando como hipótesis nula que no importa el tipo de tela, el porcentaje de remoción de agua promedio para cualquiera de los tipos de tela utilizados no difiere. La Tabla 1 corresponde al ANOVA para los datos analizados, este es hecho para el tiempo de operación total de todos y cada uno de los materiales utilizados.

	Grados de libertad	Suma de cuadrado	Cuadrado Medio	Valor F	Prob>F
Modelo	4	1362,9447	340,73618	1,6586	0,21164
Error	15	3081,54184	205,43612		
Total	19	4444,48654			

Tabla 1. Análisis de varianza para los resultados obtenidos Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 1, estadísticamente no se puede demostrar la diferencia entre uno u otro material en términos de efectividad para la remoción de agua en el secado de lodos, en otras palabras, se acepta la hipótesis nula. La anterior similitud entre resultados puede ser observada en el diagrama de cajas presentado en la Figura 3.

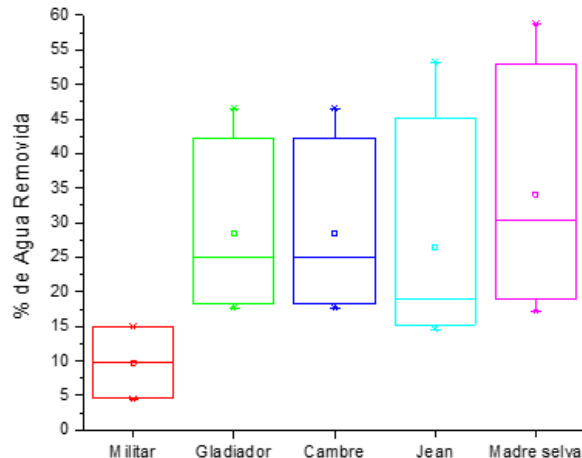


Figura 3. Diagrama de cajas para comparar los valores medios de porcentaje de remoción de masa obtenidos en los ensayos Fuente: elaboración propia.

El grafico de cajas de error (Figura 3) permite verificar lo expuesto en el ANOVA, es decir, no se determina una diferencia significativa entre los distintos materiales usados para la retención de sólidos en la centrifuga. Lo anterior es la situación común al realizar el cálculo de las resistencias en un proceso de centrifugación, de modo que la resistencia principal al secado la ofrece la torta o capa de sólido que se deposita sobre le material filtrante.

A razón de los resultados descritos en el ANOVA, se analizó cuál de los materiales permite retirar agua en el menor tiempo y, por ende, reducir el consumo de energía, hecho que reduce el consumo de energía en la operación y el costo de secado del lodo.

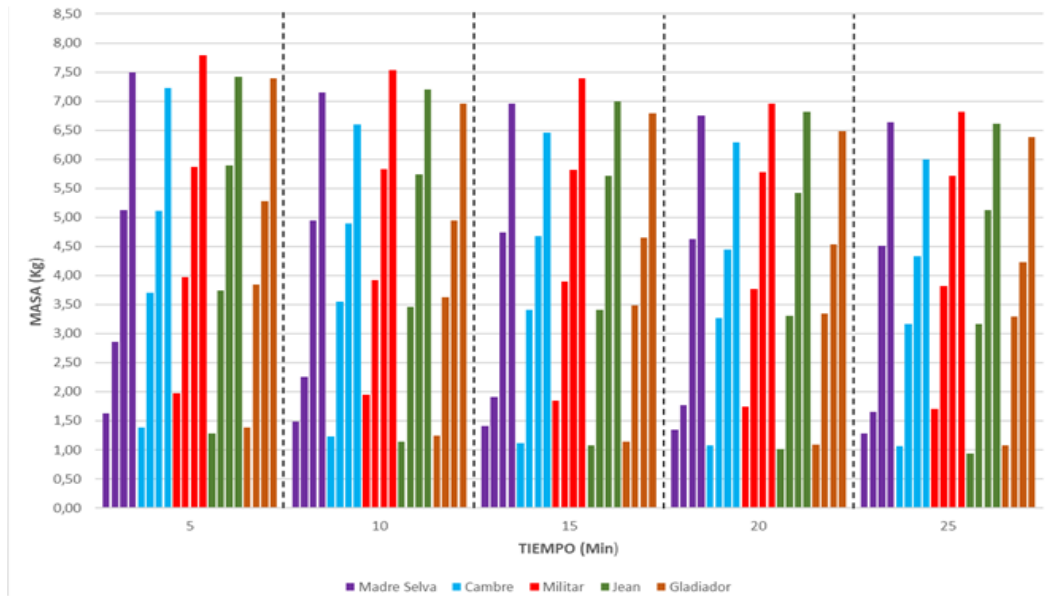


Figura 4. Disminución de masa vs tiempo **Fuente:** elaboración propia.

El análisis minucioso de la Figura 4 permite determinar que los materiales cambre y madre selva son aquellos para los cuales, en un periodo de tiempo de quince minutos, se alcanza el mayor descenso en la masa de lodo por pérdida de agua; no obstante, la velocidad de secado depende de la carga en la centrífuga, de esa manera, en el caso del material cambre, cuando la carga de lodo en la centrífuga fue de 6 y 8 kg, se alcanzó en solo quince minutos la mayor parte del descenso de peso. Es necesario señalar que la densidad del agua efluente de la centrífuga fue medida, encontrándose que la densidad del agua fue similar en todos los casos. Con el valor de la pendiente se calcula r o resistencia específica de la torta. En la Figura 5, aparecen los datos en forma linealizada para obtener el valor de la resistencia específica del lodo.

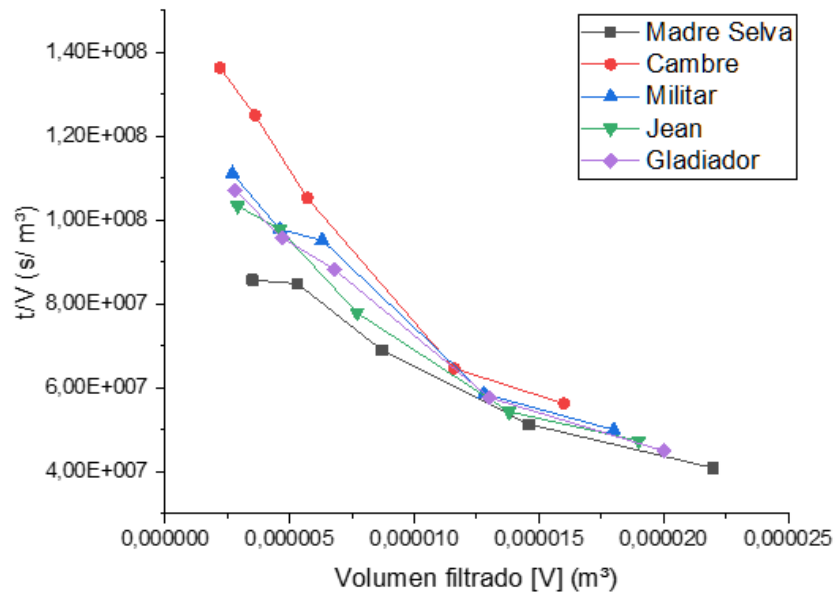


Figura 5. Forma linealizada de los datos para el cálculo de la resistencia específica de la torta **Fuente:** elaboración propia.

La Tabla 2 presenta los resultados del análisis de regresión de datos para determinar la pendiente de las rectas que aparecen en la Figura 4, el coeficiente de correlación para los datos obtenidos con cada uno de los materiales, el valor de la resistencia específica del lodo r y el valor del alcance de filtración “Y”. En la Tabla 3 se encuentran valores del alcance de filtración para lodos procedentes de tratamientos de aguas residuales.

	Pendiente de la recta (s/m ⁶)	Resistividad [r] (s ² /kg)	Correlación [R ²]	Y (kg/m ² *h)
Madre selva	-2,5931E+12	1,3850E+12	0,9588	1,874945
Cambre	-6,0146E+12	3,4424E+14	0,9568	0,112591
Militar	-4,1148E+12	2,0158E+12	0,9629	1,622785
Jean	-3,6588E+12	1,4801E+12	0,9528	2,084147
Gladiador	-3,6694E+12	1,7670E+12	0,9620	1,748229

Tabla 2. Resultados para cálculos de la resistividad y alcance de la filtración **Fuente:** elaboración propia.

En la Tabla 2, se observa que el coeficiente de correlación para todos los ensayos en cada distinto material fue superior a 0.95, siendo este un valor razonablemente aceptable. No obstante, se observa similitud en los valores numéricos de la resistencia específica y el alcance de la filtración, excepto para el material cambre, situación que puede ser efecto de la heterogeneidad del lodo. La comparación de los valores en la Tabla 3 con los valores obtenidos en los ensayos permite afirmar que el lodo del tratamiento de aguas de pelambre ofrece una resistencia muy superior a la resistencia presentada por los diferentes tipos de lodos que aparecen la tabla, se infiere que los lodos procedentes del tratamiento de aguas residuales del proceso de pelambre o depilado ofrecen mayor resistencia para la remoción de agua por centrifugación a causa de la alta carga de sólidos orgánicos insolubles, cal y restos de pelo que se acumulan en la superficie del material de filtración, dificultando el paso del agua a través del material acumulado y la pérdida de peso por evacuación de agua

Tipo de lodo	Sólidos cargados (kg/m ² *h)	Porcentaje de torta de solidos
Lodo fresco primario	29-39	25-38
Lodo fresco primario y residuos activados.	20-24	16-25
Lodo fresco primario y residuos activados. (oxígeno puro)	24-30	20-28
Lodo fresco primario y filtro percolador de humus	20-29	20-30
Digestor primario (anaerobio)	24-39	25-32
Digestor primario y residuos de lodos activados (anaerobio)	20-24	14-22

Tabla 3. Rendimiento de los filtros de vacío para el tratamiento de lodos municipales condicionados por Cloruro Férrico y Cal Fuente: [12].

Dentro de todo proceso u operación, es importante conocer el consumo de energía por unidad procesada; en el presente caso, el volumen de lodo procesado por unidad de tiempo y por unidad de potencia consumida, con el objeto de poder determinar potencia de equipos en función del caudal o flujo volumétrico de lodo que se procesara. En la Tabla 4, aparecen los valores de la relación descrita para los distintos ensayos llevados a cabo con los materiales filtrantes analizados. De acuerdo con la literatura, el valor de esta relación para lodo proveniente del tratamiento de aguas residuales domesticas la relación descrita varía entre

$$0.5 \frac{\text{gal}}{\text{min*HP}} \left(3,65 \frac{\text{m}^3}{\text{kW*día}} \right) \text{ y } 2 \frac{\text{gal}}{\text{min*HP}} \left(14,6 \frac{\text{m}^3}{\text{kW*día}} \right) \text{ [12].}$$

Masa	2 kg	4 kg	6 kg	8 kg
Consumo (gal/min*HP)	0,0264	0,0527	0,0791	0,1054

Tabla 4. Consumo de energía por unidad de masa Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la Tabla 4 permiten confirmar que la remoción de agua del lodo requiere una cantidad de energía superior a la requerida para otros lodos provenientes del tratamiento de agua residual; de esta manera, un sistema de centrifugación para lodo de aguas residuales de pelambre requeriría de una cantidad significativa de área y de energía.

El problema que amerita alternativas de solución se enfoca en el manejo del lodo generado en el tratamiento de aguas residuales para el sector curtidor. El trabajo realizado por Scholz se centró en evaluar la succión capilar (CST, por sus siglas en inglés) como alternativa para el manejo y tratamiento de lodos de curtiembre, ello con base en que la técnica representa una alternativa simple y económica en ausencia de fuente externa de presión

o succión [13] . Esta prueba (CST) difiere de la típica prueba de determinación de resistencia específica de la torta (RET) en el tiempo de realización de ensayos, complejidad y costos, dado que requiere de una fuente de vacío [14], [15] . Sin embargo, la prueba (RET) se considera mejor estandarizada y más aceptada a nivel técnico y científico debido a sus características hidrodinámicas [16] , a partir de los resultados de la pruebas se desarrollan modelos matemáticos para deshidratación de distintos tipos de lodo. Por otra parte, otra técnica de análisis de características de tortas filtrantes es la prueba de celda de compresión de filtración (FCC, por sus siglas en inglés), a partir de la cual se permite evaluar las etapas de filtración y compresión en la deshidratación por compresión de lodos a escala de laboratorio [17]-[19].

Por otra parte, no sobra resaltar que el agua y los sólidos presentes en la torta presentan una complicada relación de convivencia, la interacción entre ellos resulta en características únicas a través de varios tratamientos de deshidratación. En general, si la presión aplicada en la filtración supera cierto valor, la red de lodo tiende a colapsar, de manera que el agua queda atrapada debido al cierre de la torta y el deterioro subsiguiente en la capacidad de filtrado del lodo, es decir, la permeabilidad de la torta disminuye con el exceso de presión [20]-[24]. Por lo tanto, una presión excesivamente alta es inútil para mejorar la tasa de deshidratación, puesto que dentro de un rango de baja presión (0-50 kPa) se obtiene una relación lineal entre RET y la caída de presión a través de la torta, lo que favorece la filtración y el secado [25].

Las características de los lodos obtenidos en los procesos de tratamiento dependen de los procesos de la coagulación, la floculación y sus combinaciones con otros pretratamientos, incluidos los mecanismos de deshidratación. Varios coagulantes y floculantes utilizados en la deshidratación de lodo, incluidos coagulantes inorgánicos, floculantes poliméricos naturales y sintéticos orgánicos y biofloculantes, se

presentan en detalle porque los coagulantes y floculantes hacen que la RET varíe de acuerdo con la dosis de cada insumo para la clarificación del agua [11].

Finalmente, es necesario señalar que, en la mayoría de las empresas de curtido de pieles ubicadas en el municipio de Villapinzón, los lechos de secado de lodos se ven copados cuando la empresa tiene un alto flujo de producción; este hecho hace que se deba recurrir a desechar los lodos en sitios que no corresponde a su disposición parcial o final. De igual manera, para entregar el lodo con un porcentaje de humedad bajo, como se presentó en el experimento, al implementar un lecho de secado tendría un tiempo estimado de diez días para lograr dicha reducción. Las condiciones meteorológicas y la altitud donde se encuentra el municipio influyen directamente; así, extendiendo el tiempo de uso de los lechos de secado de lodo, se evidencia la disminución de estos reemplazando con el sistema de centrífuga, reduciendo el área y optimizando el tiempo. Sin embargo, el uso energético sería alto para lograr la potencia ideal, dando una mayor facilidad a la curtidora del manejo de estos lodos para su transporte y disposición final.

4. Conclusiones

En cuanto a los materiales, las telas cambre y madre selva presentaron una regularidad basados en términos de eficacia, mas no de eficiencia, ya que estos estuvieron por debajo en el porcentaje de filtración siendo permeables; puede darse al calibre y el grosor del material, ello también implica la separación entre los hilos. A partir del ANOVA, no se puede demostrar eficiencia en tanto que no se evidencia una diferencia significativa o distintiva entre las telas en el uso como materiales filtrantes.

Dada la relación entre la potencia experimental, se evidenció que a mayor potencia se incrementa potencia de la centrifuga; no obstante, la potencia del experimento está por debajo de la teórica, ya que la masa del lodo posee una alta resistividad, el valor del alcance de filtración es bajo y se requerirían áreas muy amplias para el sistema de centrifugación, asimismo, la energía consumida sería muy alta. A través de este experimento se evidenció que el modelo de centrifugación no es viable para hacer el secado del lodo de tratamiento de las aguas residuales de una curtiembre, ya que la presencia de pelo en el lodo obstruye la circulación del agua.

Agradecimientos

Al ing. Hugo Ferro por sus aportes en conocimientos y contribución al desarrollo del proyecto.

A la ing. Vanessa Leguizamón por el constante apoyo y acompañamiento a la construcción de esta investigación.

Al señor Emeramo Ruiz dueño de la curtiembre El Escorpión por brindar el espacio para la realización de la presente investigación.

Referencias

- [1] Herrera, C., Samper, J. y A. Charry, "Oportunidades de negocio en sectoriales y grupos poblaciones clave". <https://propais.org.co/wp-content/uploads/inteligencia-mercados/im2-opportunidades-sectoriales.pdf>
- [2] L. Osorio, et al., "Iniciativas ambientales en la cuenca del Río Bogotá: Curtiembres de Villapinzón y Chocontá y Cuenca del Embalse Tominé. Bogotá" Operaciones Gráficas, 2011.
- [3] L. Osorio, et al., "La gestión ambiental y la inclusión social, condiciones para lograr la competitividad en micro y pequeñas industrias (MyPI)". Bogotá: Operaciones Gráficas, 2011.
- [4] J. Merizalde y J. Mujica, "Valorización lodos de curtiembre". [https://docplayer.es/52159543-Valorizacion-lodos-de-curtiembres-juan-carlos-merizalde-hoyos-julian-r-mujica-](https://docplayer.es/52159543-Valorizacion-lodos-de-curtiembres-juan-carlos-merizalde-hoyos-julian-r-mujica-munoz-escuela-de-ingenieria-de-antioquia-ingenieria-ambiental-envigado.html)
[munoz-escuela-de-ingenieria-de-antioquia-ingenieria-ambiental-envigado.html](https://docplayer.es/52159543-Valorizacion-lodos-de-curtiembres-juan-carlos-merizalde-hoyos-julian-r-mujica-munoz-escuela-de-ingenieria-de-antioquia-ingenieria-ambiental-envigado.html)
- [5] J. Corredor, "El residuo líquido de las curtiembres estudio de caso: cuenca alta del Río Bogotá", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 16, n.º 2, pp. 14-28, 2006. <https://doi.org/10.18359/rcin.1230>
- [6] K. Guzmán y M. Luján, "Reducción de emisiones de la etapa de pelambre en el proceso de curtido de pieles", *Acta Nova*, vol. 4, n.º 4, pp. 464-492.
- [7] L. A. Artuz, M. S. Martínez, y C. J. Morales, "Las industrias curtiembres y su incidencia en la contaminación del río Bogotá," *Isocuanta*, vol. 1, no. 1, p. 43-53, 2008.
- [8] J. D. Silva et al., "Effect of different tannery sludge compost amendment rates on growth, biomass accumulation and yield responses of Capsicum plants", *Waste Management*, vol. 30, n.º 10, pp. 1976-1980, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.011>
- [9] A. Patel and D. D. Patra, "Influence of heavy metal rich tannery sludge on soil enzymes vis-à-vis growth of tagetes minuta, an essential oil bearing crop," *Chemosphere*, vol. 112, pp. 323-332, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.04.063>
- [10] D. Fang and L.-X. Zhou, "Enhanced Cr bioleaching efficiency from tannery sludge with coinoculation of Acidithiobacillus thiooxidans TS6 and Brettanomyces B65 in an air-lift reactor", *Chemosphere*, vol. 69, n.º 2, pp. 303-310, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.03.059>
- [11] H. Wei, B. Gao, J. Ren, A. Li, and H. Yang, "Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review", *Water Research*, vol. 143, pp. 608-631, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>
- [12] T. Reynolds and P. Richards, *Unit operations and processes in environmental engineering*. Washington: PWS Publishing Company, 1977.
- [13] M. Scholz, "Review of recent trends in capillary suction time (CST) dewaterability testing research", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 22, pp. 8157-8163, 2005. <https://doi.org/10.1021/ie058011u>

- <https://doi.org/10.1021/ie058011u>
- [14] H. Yukseler, . Tosun and U. Yetis, "A new approach in assessing slurry filterability", *Journal of Membrane Science*, vol. 303, n.º 1 – 2 , p p . 7 2 – 7 9 , 2 0 0 7 . <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.06.053>
- [15] O. Sawalha and M. Scholz, "Modeling the relationship between capillary suction time and specific resistance to filtration", *Journal of Environmental Engineering*, vol. 136, no. 9 , p p . 9 8 3 – 9 9 1 , 2 0 1 0 . [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000223](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000223)
- [16] D. Fitria, M. Scholz and G. M. Swift, "Impact of different shapes and types of mixers on sludge dewaterability", *Environmental Technology*, vol. 34, n.º 7, p p . 9 3 1 – 9 3 6 , 2 0 1 3 . <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.722692>
- [17] J. Vaxelaire and J. Olivier, "Conditioning for municipal sludge dewatering. From filtration compression cell tests to belt press", *Drying Technology*, vol. 24, no. 10, p p . 1 2 2 5 – 1 2 3 3 , 2 0 0 6 . <https://doi.org/10.1080/07373930600838090>
- [18] M. Raynaud, J. Vaxelaire, J. Olivier, E. Dieudé-Fauvel and J.-C. Baudez, "Compression dewatering of municipal activated sludge: Effects of salt and pH", *Water Research*, vol. 46, n.º 14, pp. 4 4 4 8 – 4 4 5 6 , 2 0 1 2 . <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.047>
- [19] Y. Lu, G. Zheng, W. Wu, C. Cui, and L. Zhou, "Significances of deflocculated sludge flocs as well as extracellular polymeric substances in influencing the compression dewatering of chemically acidified sludge", *Separation and Purification Technology* , vol. 176, pp. 2 4 3 – 2 5 1 , 2 0 1 7 . <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.016>
- [20] A. D. Stickland, "Compressional rheology: A tool for understanding compressibility effects in sludge dewatering", *Water Research*, vol. 82, pp. 37–46, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.004>
- [21] M. Smollen and A. Kafaar, "Investigation into alternative sludge conditioning prior to dewatering", *Water Science and Technology*, vol. 36, no. 11, pp. 115–119, 1 9 9 7 . <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0401>
- [22] Y. Qi, K. B. Thapa and A. F. Hoadley, "Benefit of lignite as a filter aid for dewatering of digested sewage sludge demonstrated in pilot scale trials", *Chemical Engineering Journal*, vol. 166, n.º 2 , p p . 5 0 4 – 5 1 0 , 2 0 1 1 . <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.003>
- [23] J. T. Novak, M. L. Agerbæk, B. L. Sørensen and J. A. Hansen, "Conditioning, Filtering, and Expressing Waste Activated Sludge", *Journal of Environmental Engineering*, vol. 125, n.º 9, pp. 816–824, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1999\)125:9\(816\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1999)125:9(816))
- [24] H. Liu et al., "A comprehensive insight into the combined effects of Fenton's reagent and skeleton builders on sludge deep dewatering performance", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 258–259, pp. 1 4 4 – 1 5 0 , 2 0 1 3 . <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.04.036>
- [25] S. G. Sveegaard, K. Keiding and M. L. Christensen, "Compression and swelling of activated sludge cakes during dewatering", *Water Research*, vol. 46, n.º 16, pp. 4 9 9 9 – 5 0 0 8 , 2 0 1 2 . <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.039>