

Secado de lodos de aguas de lavado de filtros

David Mendieta Piñeros* y Jairo A. Romero Rojas**

Para evaluar la eficiencia del secado de los lodos de las aguas de lavado de filtros, producidos en una planta de coagulación por contacto o filtración directa, como los de la planta Wiesner de la EAAB, se realizaron ensayos de acondicionamiento y secado mediante filtración al vacío y desaguado sobre lechos de arena. Los resultados obtenidos indican que es factible aumentar la concentración de sólidos y reducir el volumen de dichos residuos mediante acondicionamiento, filtración al vacío o secado en lechos de arena.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la operación de las plantas de purificación, una de las actividades que requieren mayor atención y recursos es el manejo y disposición de los lodos producidos. Estos lodos son un subproducto que requiere manejo adecuado, tanto desde el punto de vista operativo como ambiental.

Los lodos provenientes de la coagulación con sulfato de aluminio están compuestos por sólidos asociados a partículas orgánicas e inorgánicas de distintos tamaños, con contenidos diferentes de agua interna y grado variable de hidratación.

Los lodos, debido a sus bajas concentraciones de sólidos y a su gran contenido de agua, necesitan manejo especial, dando como resultado una de las actividades más engorrosas y de mayor demanda de recursos dentro de la operación de los sistemas de tratamiento.

El presente estudio se ha realizado con los lodos provenientes del proceso de coagulación y filtración (lavado de filtros) de la planta Wiesner para producción de agua potable. Esta planta utiliza para el tratamiento el sistema denominado coagulación por contacto, el cual no usa los procesos convencionales de floculación y sedimentación, pasando el agua coagulada directamente a los filtros.

MARCO TEÓRICO

El objeto del secado de los lodos, producidos en un sistema de tratamiento, es aumentar la concentración de sólidos tanto como sea posible.

Por medio de varios estudios se ha investigado la forma como el agua se encuentra presente en los lodos, observándose que parte de ella está asociada de diversas maneras o estados físicos, con propiedades diferentes de las del agua libre y que influyen en el grado de secado que se pueda lograr^{2,10}.

De acuerdo con lo anotado por Aarne Vesilind^{7,8,9,11}, varios investigadores coinciden en describir los estados físicos del agua en los lodos de la siguiente manera:

Agua libre: agua no asociada a los lodos y no influida por las partículas suspendidas.

Agua intersticial: agua existente entre las cavidades e intersticios de los flocs. Ésta se puede convertir en agua libre si el floc se destruye o si se elimina el confinamiento físico.

Agua vecinal: es aquella conformada por capas de moléculas de agua fuertemente adheridas a la superficie de las partículas por enlaces de hidrógeno. No es libre de moverse y permanece fuertemente adherida a dichas superficies.

Agua de hidratación: es el agua que se encuentra asociada químicamente a las partículas y que se puede remover únicamente con energía térmica.

* Ingeniero civil, magíster en ingeniería ambiental, gerente de Cipresa Ltda.

** Ingeniero civil, MEEE, miembro del Consejo Directivo y profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

El agua vecinal presenta propiedades físicas diferentes de las del agua libre, siendo menos densa y más viscosa. En diversos estudios^{4,10} (Drost-Hansen, 1985; Etzler y Fagundus, 1987) se reportan valores de densidad entre 0,965 y 0,970 g/cm³.

Por otra parte, la viscosidad de esta agua vecinal se estima entre 2 y 30 veces la del agua libre, resultado obtenido por diferentes investigadores, quienes, además, al estudiar el comportamiento de lí-

quidos no polares, encontraron que éstos no muestran ningún cambio en su viscosidad dentro de pequeños capilares, sugiriéndose que el incremento en la viscosidad del agua vecinal se debe a su naturaleza polar^{4,10}.

En los procesos de secado, el agua más fácil de remover es el agua libre, la cual se puede eliminar por drenaje, espesamiento o desaguado mecánico.

El agua intersticial se puede retirar con la destrucción o con la compresión del floc utilizando energía mecánica para escurrirlos.

La mayor parte de los procesos mecánicos de desaguado, como sistemas de vacío y centrifugación, se diseñan para remover el agua libre y la intersticial. Como la superficie de las partículas es la razón de la presencia del agua vecinal, el acondicionamiento químico no debe hacer cambiar la cantidad de ésta en los lodos, pues su efecto es el de aglomerar más los flocs, reduciendo la

cantidad de agua intersticial del lodo, pero sin cambiar el área superficial de las partículas^{5,10}.

De esta manera, la fracción de agua de mayor importancia en el secado de lodos es el agua vecinal, la cual no puede removerse mecánicamente.

Los lodos, debido a sus bajas concentraciones de sólidos y a su gran contenido de agua, requieren manejo especial, dando como resultado una de las actividades más engorrosas y de mayor demanda de recursos dentro de la operación de los sistemas de tratamiento.

Acondicionamiento de los lodos

Dado que mecánicamente sólo se pueden extraer el agua libre y la intersticial, resulta de gran importancia hacer un adecuado acondicionamiento de los lodos previo al uso de cual-

quier tipo de equipo de secado mecánico.

El objetivo principal del acondicionamiento es aumentar el tamaño de las partículas combinando partículas de inferior tamaño en agregados más grandes, con el fin de formar lodos con una estructura porosa poco compresible que aumente la eficiencia del proceso de desaguado.

El acondicionamiento se lleva a cabo mediante la neutralización de cargas coloidales superficiales por adsorción de polímeros orgánicos o de compuestos inorgánicos de cargas opuestas. El acondicionamiento se puede hacer por diferentes métodos. Generalmente, para lodos de origen físico-químico, el acondicionamiento con polímeros aniónicos es más efectivo¹⁰.

Los acondicionadores inorgánicos de mayor uso para secado de lodos al vacío son la cal y el cloruro férrico, aunque tienen como desventaja que incrementan la masa de

lodos secos^{1,6,10}. El cloruro férrico se hidroliza en el agua formando compuestos solubles de hierro de carga positiva que neutralizan las cargas negativas de los sólidos de los lodos, causando así la agregación de los mismos. Además, reacciona con la alcalinidad por bicarbonatos, formando hidróxidos que actúan como floculantes.

Las propiedades más fáciles y útiles de medir para el acondicionamiento de los lodos son la concentración de sólidos, el pH y la alcalinidad. De mayor fundamento pero más difíciles de medir y menos conocidas son la distribución de tamaño de partículas, la carga superficial, la naturaleza de la asociación agua-sólido en el lodo, la compresibilidad del lodo y su porosidad.

Una concentración alta de sólidos suspendidos afecta el acondicionamiento con polielectrolitos, ya que a mayor concentración se obtiene un resultado efectivo sobre un amplio rango de dosis, haciendo al sistema menos sensible a las sobredosificaciones. Por otra parte, mezclar un lodo con una concentración alta de sólidos es más difícil.

El pH influye en el acondicionamiento porque la naturaleza de las cargas superficiales y de la carga del coagulante depende de él. Además, el pH determina la especie química presente en el lodo.

La distribución del tamaño de partículas afecta el área superficial total y la porosidad del lodo; por tanto, altera también la dosis de coagulante requerida.

La carga superficial es otra propiedad de las partículas del lodo que afecta el acondicionamiento; de ella depende el tipo de interacción entre partículas y coagulante.

Resistencia específica

El ensayo de resistencia específica se realiza utilizando el embudo de Büchner, el cual proporciona una forma fácil de determinar la drenabilidad o características de desaguado de un lodo y el efecto de diferentes acondicionadores químicos.

Este ensayo, además de suministrar información útil para cualquier sistema de secado, se ha empleado ampliamente para el estudio y control de filtración al vacío. El ensayo se basa en el uso de un volumen de filtrado, durante un período uniforme de filtración, como una medida de la drenabilidad o filtrabilidad del lodo.

El equipo de laboratorio necesario para el ensayo de resistencia específica es el siguiente: embudo de Büchner, cilindro graduado para filtración, cronómetro y bomba de vacío.

En la figura 1 se muestra un esquema general del montaje para el ensayo de resistencia específica.

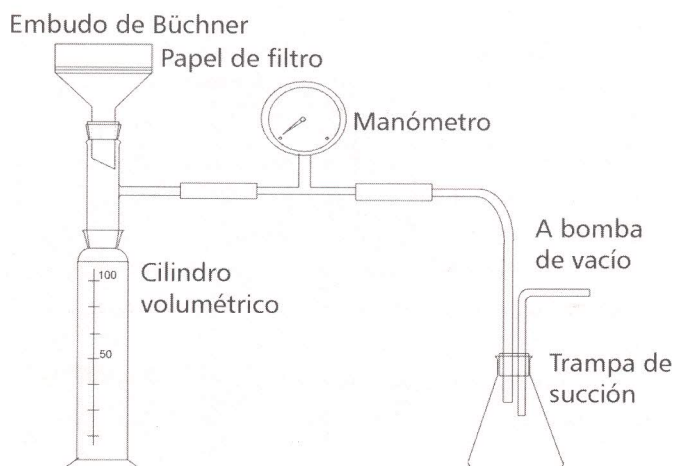


Figura 1. Montaje del aparato de Büchner para ensayo de resistencia específica.

La resistencia específica del lodo representa la resistencia relativa que ofrecen los líquidos del lodo a ser drenados. De acuerdo con la ecuación básica de filtración:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu r c V}{2PA^2} + \frac{\mu r}{PA} \quad (1)$$

La resistencia específica se puede calcular con la expresión $2^{2,3}$:

$$r = \frac{2bA^2P}{\mu c} \quad (2)$$

donde:

- r = resistencia específica (m/kg)
- b = pendiente de la recta de mejor ajuste de t/V contra V (s/m^6)
- A = área de filtración (m^2)
- P = presión de prueba (N/m^2)
- μ = viscosidad dinámica del filtrado ($N-s/m^2$)
- V = volumen del filtrado (m^3)
- t = tiempo de filtración (s)
- c = masa de sólidos depositados por unidad de volumen filtrado (kg/m^3).

Cuando se ensayan diferentes dosificaciones de un producto acondicionador para probar su eficacia, la mejor dosis será la que corresponda a un valor de resistencia específica menor.

Para determinar la resistencia específica no existe un método estándar, por lo cual resultan difíciles su determinación y su comparación. Es necesario uniformizar la forma de medir el área de filtración, la masa de sólidos por unidad de volumen filtrado y la viscosidad del filtrado. Además, la resistencia específica del lodo depende del diferencial de presión aplicado.

Tiempo de filtrado

En este ensayo se proporciona un indicativo de la rata con que el agua se libera de un lodo, o sea la rata de desaguado, incluyendo el efecto de diferentes concentraciones de sólidos.

Cuando la concentración de sólidos y la viscosidad del filtrado no varían sustancialmente entre muestras, se puede correlacionar con el ensayo de resistencia específica, con la ventaja de que su determinación resulta más sencilla y precisa.

Para el ensayo se requiere el mismo montaje que para el ensayo de resistencia específica, utilizando papel de filtro Whatman N° 1 o 2 o su equivalente.

El ensayo consiste en colocar en el embudo de Büchner una muestra de 200 mL y medir el tiempo que toma filtrar 100 mL, o para muestras de volúmenes diferentes el tiempo que toma filtrar la mitad de la misma⁵.

METODOLOGÍA

Los ensayos se realizaron sobre muestras provenientes del lavado de los filtros, teniendo en cuenta que todos los filtros de la planta son similares en cuanto a su geometría y parámetros de operación.

Para los ensayos de filtración y resistencia específica se utilizaron los lodos sedimentados de las aguas de lavado de los filtros, acondicionados con tres productos inorgánicos diferentes y con un polímero aniónico.

Caracterización

A los lodos sedimentados y a las aguas de lavado se les realizaron los siguientes análisis: densidad relativa, SST, alcalinidad, pH, temperatura, DQO, Al, acondicionamiento utilizando el ensayo de jarras, ensayos de tiempo de filtración y ensayos de resistencia específica usando el embudo de Büchner.

La densidad del lodo seco se calculó con la expresión 3²:

$$\frac{100}{P_b} = \frac{100 - C}{P_w} + \frac{C}{P_{dry}} \quad (3)$$

donde:

- C = concentración de SS del lodo (%)
- P_b = densidad del lodo húmedo (g/mL)
- P_w = densidad del agua (g/mL)
- P_{dry} = densidad del lodo seco (g/mL).

Acondicionamiento

Para determinar el mejor acondicionamiento se usaron cloruro férrico, sulfato de aluminio, cal y polímero aniónico A130.

El acondicionamiento se realizó con el aparato de jarras, utilizando 500 mL de muestra en cada jarra, 30 segundos de mezcla rápida a 90 rpm y 10 minutos de mezcla lenta a 40 rpm. Después de realizar la mezcla con dosis diferentes de cada acondicionador se colocó la muestra en el aparato de Büchner para medir el tiempo de filtrado.

Tiempo de filtración

El ensayo se realizó con el embudo de Büchner en las siguientes condiciones:

- Muestra: 200 mL de lodo sedimentado y acondicionado.
- Filtro: Whatman N° 2.
- Diámetro del filtro: 8 cm.
- Presión aplicada: 230 mm Hg (9" Hg).

Este procedimiento se realizó con muestras sin acondicionamiento y con diferentes dosis de acondicionamiento para cada uno de los productos seleccionados. Para hacer comparables los resultados, siempre se utilizó el mismo volumen de muestra. Se siguió el procedi-

miento 2710 H del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater⁵.

Ensayos de resistencia específica

Los ensayos de resistencia específica se realizaron para el agente acondicionador que reportó el menor tiempo de filtrado en los ensayos de tiempo de filtración. El ensayo se efectuó acondicionando la muestra de lodo sedimentado con cloruro férrico a diferentes dosis con el aparato de jarras. De cada una de las muestras acondicionadas se tomaron 100 mL para ser colocadas en el embudo de Büchner, inmediatamente se aplicó vacío y se registró el volumen filtrado cada diez segundos.

Con los valores registrados se obtienen los gráficos de tiempo/volumen filtrado contra tiempo. A la recta de mejor ajuste obtenida se le calcula la pendiente que corresponde al valor de *b* de la ecuación 2.

Para calcular la resistencia específica se utilizaron los siguientes parámetros:

- Área de filtración: 0,005 m²
- Presión aplicada (vacío): 230 mm Hg
- Viscosidad dinámica del filtrado: 1,111 × 10⁻³ Ns/m².

El valor de *c* en la ecuación 2 se tomó como la concentración de sólidos totales de la muestra analizada, como una aproximación a la masa de sólidos depositada por unidad de filtrado en el ensayo.

Para efectos de comparación, a la muestra sin acondicionamiento también se le calculó la resistencia específica.

La confiabilidad de los ensayos se comprobó repitiéndolos tres veces para cada acondicionamiento.

Ensayos de secado en lecho de arena

Se realizaron ensayos de drenabilidad en lecho de arena con el lodo sedimentado crudo y acondicionado con cloruro férrico.

Los ensayos se efectuaron con una columna de 4,5 cm de diámetro y una altura de lecho de 20 cm, compuesta por 10 centímetros de arena de 0,5 milímetros de tamaño efectivo y de 10 cm de arena de 1 mm. Sobre el lecho se colocó una muestra de lodo de 500 mL para obtener una altura de lámina inicial de 35 cm, aproximadamente.

El ensayo consiste en drenar la muestra de lodo por gravedad hasta obtener una pasta seca en la superficie del lecho de tal concentración, que se pueda retirar manualmente y registrar el tiempo de drenado.

RESULTADOS

Densidad relativa

La densidad relativa del agua de lavado fue, en promedio, 0,9999 a 17°C. Para los lodos provenientes del agua de lavado sedimentada, la densidad relativa promedio fue de 1,0019 a 17°C.

Caracterización

En las tablas 1 y 2 se muestran las características promedio del lodo sedimentado y de las aguas de lavado de filtros.

Densidad del lodo seco

La densidad promedio del lodo seco fue de 2,35 g/mL.

Acondicionamiento y tiempos de filtración

Los mejores resultados se obtuvieron con cloruro férrico para dosis entre 25 y 50 mg/L.

El tiempo de filtración para el lodo sin acondicionamiento varió

entre 6 y 13 minutos, reduciéndose con el cloruro férrico a valores entre 25 y 50 segundos, apreciándose notablemente el efecto del acondicionamiento sobre la velocidad de desaguado del lodo (gráficos 1, 2, 3 y 4).

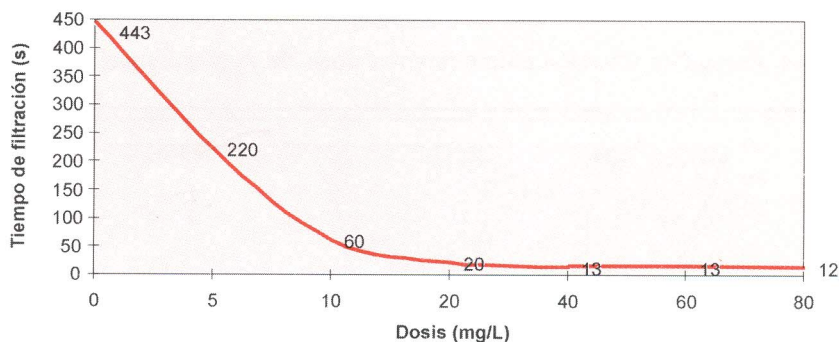


Gráfico 1. Tiempo de filtración para diferentes dosis de cloruro férrico.

Tabla 1

Caracterización lodo sedimentado

Parámetro	Valor
ST (mg/L)	4.849
STV (mg/L)	2.028
SDT (mg/L)	83
SST (mg/L)	4.773
DQO (mg/L)	1.951
Aluminio (mg/L Al)	306
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	43
pH	7,2

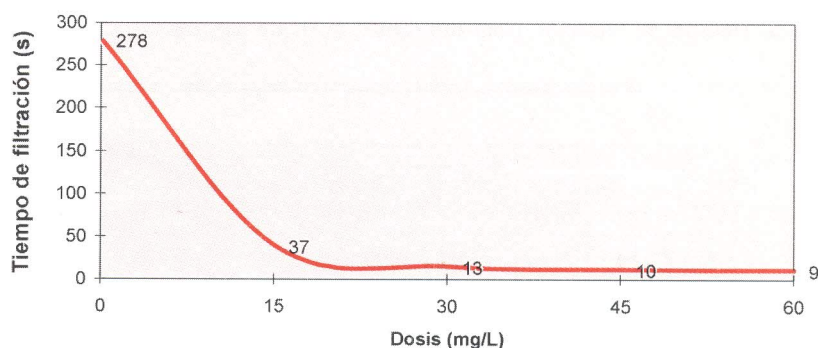


Gráfico 2. Tiempo de filtración para diferentes dosis de cloruro férrico.

Tabla 2

Caracterización agua de lavado

Parámetro	Valor
ST (mg/L)	135
STV (mg/L)	60
SDT (mg/L)	51
SST (mg/L)	99
DQO (mg/L)	39
Aluminio (mg/L Al)	5,7
Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)	18,5
pH	7,4

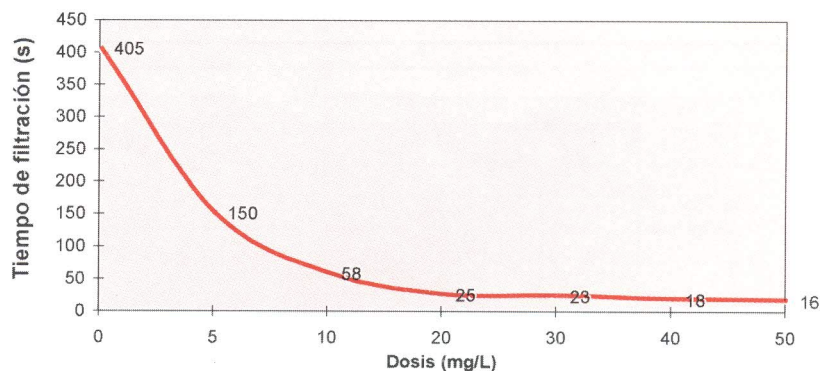


Gráfico 3. Tiempo de filtración para diferentes dosis de cloruro férrico.

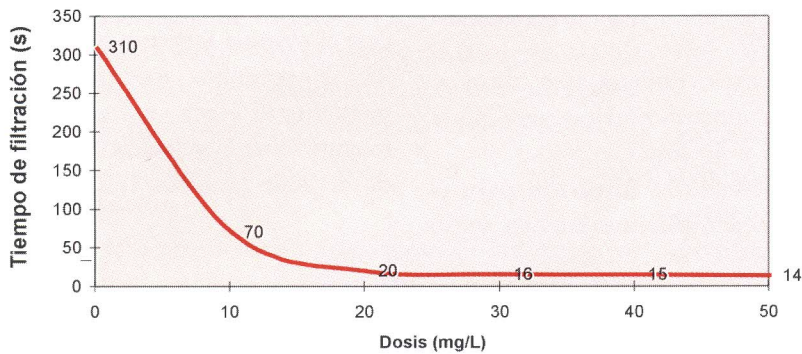


Gráfico 4. Tiempo de filtración para diferentes dosis de cloruro férrico.

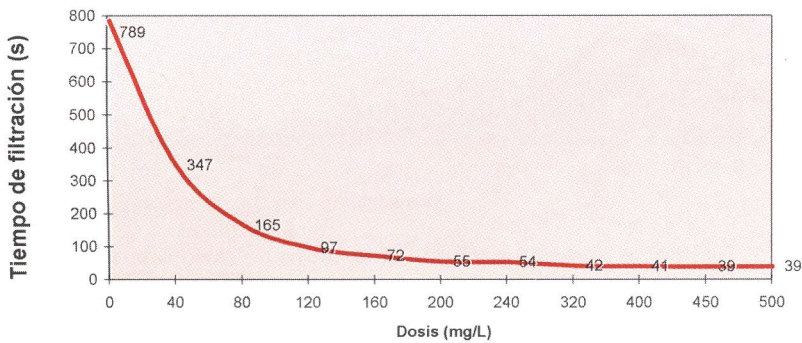


Gráfico 5. Tiempo de filtración para diferentes dosis de cloruro férrico.

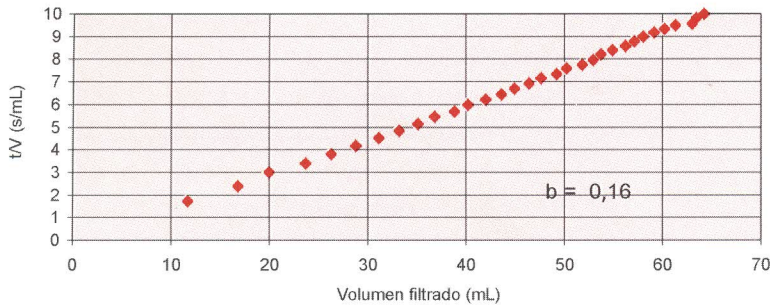


Gráfico 6. Sin acondicionar.

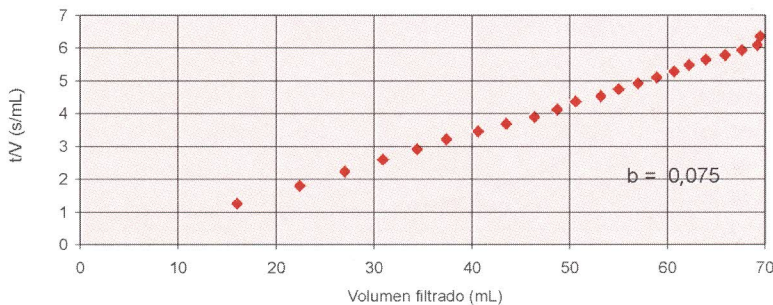


Gráfico 7. Dosis: 5 mg/L.

Con el sulfato de aluminio como acondicionador también se logró una reducción considerable en los tiempos de filtración, aunque con dosis mucho mayores (gráfico 5).

Resistencia específica

En general el comportamiento del lodo obedece al modelo estándar no parabólico.

En los gráficos 6, 7, 8 y 9 se aprecia el comportamiento de t/V contra V , de la pendiente b y de la resistencia específica. El valor de b va disminuyendo a medida que se aumenta la dosis del acondicionador, lo cual significa que la resistencia específica disminuye y que aumenta la tasa de desaguado del lodo.

El valor promedio de la resistencia específica, para el lodo sin acondicionar, fue de $4,89 \times 10^{13}$ m/kg, muy cercano a los reportados para este tipo de lodo

Para el lodo acondicionado con cloruro férrico se obtuvieron valores de resistencia específica hasta de dos órdenes de magnitud menores, entre $5,61 \times 10^{11}$ y $1,19 \times 10^{12}$ m/kg.

Ensayos de secado en lechos de arena

En los gráficos 10 y 11 se aprecia la reducción en el tiempo de drenaje entre el lodo crudo sin acondicionamiento y el lodo acondicionado con 20 mg/L de cloruro férrico.

Gracias al acondicionamiento el tiempo de drenaje se reduce de 51 a cinco horas, para obtener una torta de concentración similar de sólidos.

Los lodos desaguados en los lechos de arena presentaron una concentración promedio de 9% de sólidos, con una consistencia gelatinosa que permite manejo manual.

Caracterización del filtrado

Como se observa en las tablas 3 a 6, el filtrado de lodos con acondicionamiento y sin él permite obtener aguas de excelente calidad, lo cual hace posible su vertimiento al embalse de San Rafael. El aluminio se remueve casi totalmente y la DQO residual varía entre 3 y 8 mg/L. Lo anterior indica que la filtración de los lodos a vacío o en lechos de arena son métodos viables para el manejo de los mismos y para reducir su impacto ambiental.

CONCLUSIONES

- Las características de los lodos de la planta Wiesner hacen necesario su adecuado manejo y disposición. El contenido de sólidos suspendidos, DQO y aluminio en las aguas de lavado de filtros no es alto y permite su disposición en algún cuerpo de agua receptor. Sin embargo, al permitir su sedimentación, estas sustancias se concentran hasta valores por encima de la norma de vertimiento.

- Los lodos sedimentados, de las aguas de lavado de filtros de la planta Wiesner, pueden acondicionarse químicamente con cloruro férrico o con sulfato de aluminio y desagüados por filtración al vacío o sobre lechos de arena.

- La DQO de los lodos sedimentados está asociada al contenido de sólidos suspendidos. La DQO del agua filtrada oscila entre 3 mg/L y 8 mg/L; la del lodo sedimentado es del orden de 2.000 mg/L.

- El cloruro férrico fue el mejor acondicionador ensayado, obteniéndose reducciones en los tiempos de filtración, con embudo de Büchner, desde 13 minutos hasta 20 segundos, con dosificaciones de 30 mg/L.

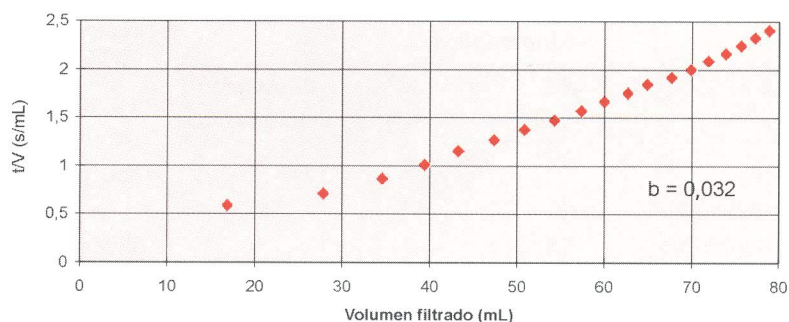


Gráfico 8. Dosis: 10 mg/L.

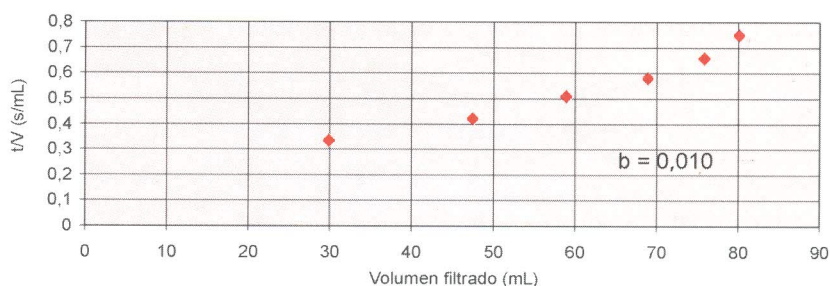


Gráfico 9. Dosis: 20 mg/L.

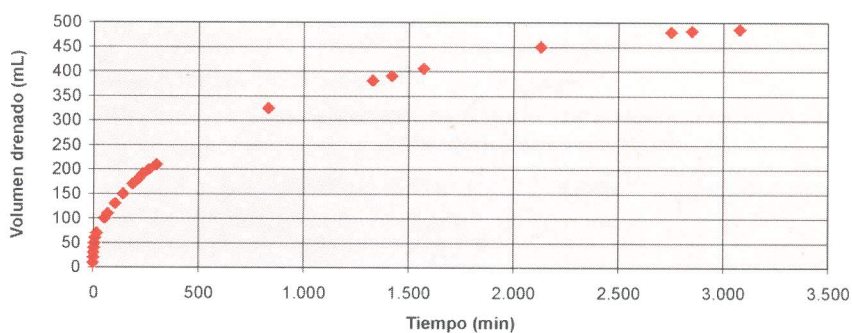


Gráfico 10. Sin acondicionar.

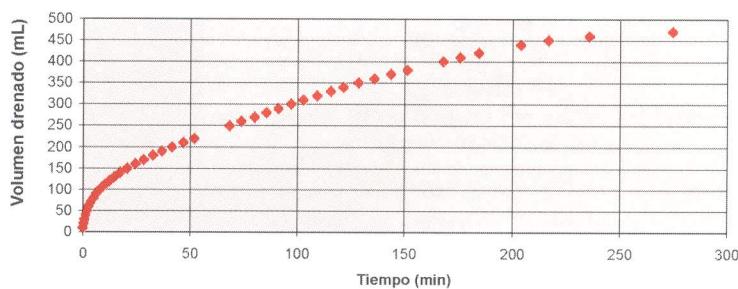


Gráfico 11. Dosis: 20 mg/L.

Tabla 3
Características aguas del filtrado a vacío de los lodos sedimentados

Muestra	DQO (mg/L)	Al (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
Sin acondicionar	4,5	0	28
Sin acondicionar	6	0,15	40
Sin acondicionar	3,5	0	40
FeCl ₃ (30 ppm)	3	0	36

Tabla 4
Características aguas del filtrado a vacío de los lodos sedimentados

Muestra	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH
Sin acondicionar	-	85	18	6,5
Sin acondicionar	29	100	2,3	6,4
Sin acondicionar	-	98	6,3	6,7
FeCl ₃ (30 ppm)	-	80	5,4	6,6

Tabla 5
Características aguas del filtrado en lechos de arena de los lodos sedimentados

Muestra	DQO (mg/L)	Al (mg/L)	Alcalinidad (mg/L CaCO ₃)
FeCl ₃ (10 ppm)	3	0	30
FeCl ₃ (20 ppm)	4	0	26

Tabla 6
Características aguas del filtrado en lechos de arena de los lodos sedimentados

Muestra	SST (mg/L)	SDT (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH
FeCl ₃ (10 ppm)	-	83	3,2	6,4
FeCl ₃ (20 ppm)	-	98	5,7	6,4

• La resistencia específica promedio del lodo sin acondicionar fue de 5×10^{13} m/kg (Vesilind reporta valores entre 1 y 4×10^{13} m/kg para lodos de aluminio). El lodo ya acondicionado con cloruro férrico presenta valores de resistencia específica hasta de dos órdenes de magnitud por debajo, $5,61 \times 10^{11}$ a $1,19 \times 10^{12}$ m/kg.

• El volumen de lodos producidos en la planta Wiesner, calculado en 1.327 m³/día (con una concentración promedio de sólidos totales de $0,5$ %), requiere algún sistema de desaguado para reducir su cantidad. Con el uso de lechos de secado de arena se logran lodos con humedad del 91% en promedio, con tiempos de drenaje de tan sólo 3 a 9 horas para el lodo acondicionado. Para el lodo sin acondicionar se obtienen valores de humedad similares, con tiempos de drenaje de hasta 47 horas.

• La reducción en volumen obtenida al concentrar los lodos de un $0,5\%$ a un $9,2$ % de sólidos, en el lecho de secado de arena, es de 18 veces, pudiéndose reducir el volumen de lodos de 1.327 m³/día a $72,1$ m³/día. La torta obtenida con este grado de desaguado es de consistencia gelatinosa y se deja manejar manualmente. Con mayores tiempos de drenaje se podrían obtener tortas más concentradas.

NOTAS

- Christensen, G. Lee and Dick, Richard I., "Specific resistance measurements: methods and procedures", *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 111, N° 3, Asce, June 1985, pp. 258 - 271.
- Hall, Jeremy E. and Zmyslowska, Anna, "Development of sludge treatment and disposal strategies for large conurbations: Case Study - Warsaw", *Water Science and Technology*, Vol. 36, N° 11, IAWQ, 1997, pp. 291-298.
- Journal of Water Pollution Control Federation*, Unit for Specific Resistance, Vol. 55, abril de 1983.
- Knocke, William R. and Wakeland, Douglas L., "Fundamental characteristics of water treatment plant sludges. Research and technology". *J. Awwa*, October 1993, pp. 516-523.
- Okuno, Nagaharu; Uriu, M.; Horii, T.; Miyagawa, Kazunori, "Evaluation of thermal sludge solidification", *Water Science and Technology*, Vol. 36, N° 11, IAWQ, 1997, pp. 227-233.
- Romero R., Jairo A., *Acuipurificación*, Escuela Colombiana de Ingeniería, 1993.
- Slatter, P.T., "The rheological characterization of sludges", *Water Science and Technology*, Vol. 36, N° 11, IAWQ, 1997, pp. 9-18.
- Smollen, Maryla and Kafaar, Achmad, "Investigation into alternative sludge conditioning prior to dewatering", *Water Science and Technology*, Vol. 36, N° 11, IAWQ, 1997, pp. 115-119.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., 1995, pp. 2-80 a 2-83.
- US Environmental Protection Agency, *Dewatering Municipal Wastewater Sludges*. EPA/625/1-87/014, September 1987.
- Vesilind, P. Arne and Hsu, Cheng-Chao, "Limits of sludge dewaterability", *Water Science Technology*, Vol. 36, N° 11, 1997, pp. 87-91