

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Selección del tren de tratamiento para deshidratar y reducir el volumen del lodo de plantas potabilizadoras.
<i>Autor / Adscripción</i>	Luciano Sandoval Yoval Leticia Motellano Palacios Martín Piña Soberanis Laura Sánchez Guzmán  Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 16(4): 91-105
<i>Fecha de publicación</i>	2001
<i>Resumen</i>	El objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del tipo de tratamiento y del polímero empleado en la deshidratación del lodo, así como en la reducción de su volumen. Estos lodos provinieron de plantas potabilizadoras antes de su disposición final. Se empleó espesamiento por gravedad, acondicionamiento con polímero (aniónico, catiónico, y no iónico), y acidificación.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/753">http://hdl.handle.net/123456789/753</a>

# Selección del tren de tratamiento para deshidratar y reducir el volumen del lodo de plantas potabilizadoras

Luciano Sandoval Yoval  
Leticia Motellano Palacios  
Martín Piña Soberanis  
Laura Sánchez Guzmán

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*A fin de poder establecer los efectos de un tratamiento de deshidratación de lodos provenientes de plantas potabilizadoras antes de su disposición final, se empleó espesamiento por gravedad, acondicionamiento con polímero (aniónico, catiónico, y no iónico), y acidificación. El acondicionamiento con polímero y posterior adición de ácido fue lo que proporcionó la mayor reducción del volumen del lodo (98%), sin embargo, su capacidad de deshidratación final disminuyó, al presentar valores de resistencia específica a la filtración mayores a las de un lodo acondicionado solamente. Esta desventaja se minimiza por la reducción del volumen de lodo obtenido. Este resultado fue corroborado con el empleo del potencial zeta (PZ), con el cual se determinó que la carga de las partículas se redujo de -19 a -5 mV, lo que permitió una mayor aglomeración y, por tanto, un incremento en la pérdida de agua. El polímero catiónico proporcionó la mayor disminución de carga en las partículas del lodo (-5.7 mV), reduciéndose aún más cuando éste fue acidificado (-4.8 mV). Ello proporcionó una mayor aglomeración de las partículas y la eliminación del agua libre. Lo anterior establece que para maximizar la reducción del volumen del lodo debe emplearse un polímero catiónico de alto peso molecular y acidificar posteriormente. La acidificación modificó la morfología del lodo al romper los enlaces de hidróxido de aluminio-sólido, lo que redujo los espacios entre las partículas, permitiendo una mayor pérdida de humedad libre y disminuyendo el volumen de lodos a disposición.*

**Palabras clave:** potabilización, lodo, reducción de volumen, potencial zeta, resistencia específica, porcentaje de humedad, espesamiento, acondicionamiento, acidificación.

## Introducción

El acondicionamiento de los lodos se refiere a los procesos físicos y químicos para modificar las características que faciliten la eliminación del agua. Las propiedades del lodo usadas para evaluar la efectividad de los agentes de acondicionamiento incluyen la resistencia específica a la filtración, el coeficiente de compresibilidad, el tiempo de succión capilar, el tiempo de filtración y el porcentaje de humedad. Además, se puede recurrir al potencial zeta como una medida para reducir de la carga de la partícula y al microscopio electrónico de barrido para determinar cambios morfológicos que indiquen una mayor o menor aglomeración de las partículas (Cornwell *et al.*, 1987; Cheremisnoff, 1994).

El acondicionamiento de lodos provenientes de plantas potabilizadoras sólo se aplica a lodos de hidróxido y desechos de retrolavado de filtros, cuyo objeti-

vo es eliminar el agua, aumentar la compresibilidad y minimizar el atascamiento en la operación de los filtros prensa. Cuando el acondicionamiento se usa para separar agua y sólidos, los polímeros son los elementos más empleados (Cornwell *et al.*, 1987).

## Antecedentes

### *Acondicionamiento*

Para acondicionar lodos, lo más frecuente es emplear polímeros, los cuales varían en composición estructural, peso molecular y densidad de carga. Para la mayoría de los polímeros catiónicos, la densidad de carga es cercana a 100%, pero el peso molecular es generalmente más bajo que el de los polímeros aniónicos o el de los no iónicos. Los polímeros aniónicos varían en densidad de carga y peso molecular y los no iónicos

no tienen densidad de carga, pero presentan alto peso molecular. Como una condición para el acondicionamiento de lodos de hidróxido se requiere que el polímero tenga un alto peso molecular para manejar menores dosis, por ello, el peso molecular es más importante que el tipo de carga o la densidad (Ruiz y Vila, 1986; Cornwell *et al.*, 1987).

El principal mecanismo para la aglomeración de las partículas es el de puente interparticular, en donde el polímero forma una matriz porosa que permite la pérdida de agua por evaporación o filtración sin alterar la estructura química de las partículas presentes en el lodo (Cheremisinoff, 1994). La adición de polímero es útil en la deshidratación de lodos químicos en lagunas de secado, lechos de secado de arena, filtración a presión, filtración a vacío, filtros banda y centrifugación (Cornwell *et al.*, 1987).

Durante la floculación de un lodo pueden producirse problemas debido a adsorción secundaria sobre la misma partícula, ruptura del flóculo por tensiones cortantes o exceso de dosis del polímero, lo que produce reestabilización. Por lo anterior, es necesario determinar la dosis óptima del polímero, que dependerá de la naturaleza y composición del lodo, del tipo y proceso a que se sometan los flóculos y del polímero utilizado (Arboleda, 1982).

#### Potencial zeta en la reducción del volumen de lodo

El potencial zeta en la reducción del volumen de lodo es una medida de la estabilidad de una partícula e indica el potencial que se requiere para penetrar la capa de iones circundantes para desestabilizarla. Por lo tanto, el potencial zeta es la potencia electrostática que existe entre la separación de las capas que rodean a la partícula.

Al utilizar un polímero catiónico se neutralizan las cargas negativas de los coloides y se anula el potencial zeta; por el contrario, un aniónico, o un no iónico, no anula las cargas. Sin embargo, existe una adsorción de radicales activos de la cadena del polímero sobre las partículas, creándose una modificación en su superficie y en el potencial zeta, lo que produce una aglomeración mediante un mecanismo de reticulación (Barraqué, 1979).

Hay que distinguir dos aspectos fundamentales en el proceso de acondicionamiento del lodo: la desestabilización de las partículas, o sea la disminución de las fuerzas que las mantienen separadas, y el transporte de las partículas desestabilizadas para llevar a cabo un contacto, generalmente estableciendo puentes entre sí y formando una malla tridimensional de flóculos porosos (Richter *et al.*, 1992; Weber, 1979; Arboleda,

1982). El primer aspecto se refiere a la *coagulación* y el segundo, a la *floculación*. La coagulación comienza en el mismo instante en que se agrega el reactivo al lodo y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente, consiste en una serie de reacciones físicas y químicas entre el coagulante y la superficie de las partículas del lodo. La floculación es la etapa de transporte que provoca el crecimiento de las partículas aglomeradas (Richter *et al.*, 1992; Arboleda, 1982).

### Resistencia específica a la filtración y porcentaje de humedad

#### Factores que caracterizan las propiedades del lodo

Existen varios parámetros que influyen en el comportamiento de la deshidratabilidad del lodo, las cuales se han clasificado en características físicas y químicas.

#### Características físicas

Las propiedades físicas de los lodos se han dividido en macropiedades y micropiedades. Las pruebas que definen las macropiedades del lodo pueden coadyuvar en la selección de un proceso de deshidratación y determinar la relativa facilidad de filtración; además son útiles como herramientas para precisar las dosis de acondicionamiento requeridas.

Las cuatro pruebas principales son las siguientes: resistencia específica a la filtración, tiempo de succión capilar, tiempo de filtración y compresibilidad (Cornwell *et al.*, 1987; Tosun *et al.*, 1993).

Resistencia específica a la filtración (REF): esta prueba tiene gran utilidad para comparar las características de filtración de distintos lodos provenientes de plantas potabilizadoras y determinar las necesidades de tratamiento para producir una torta que ofrezca mínima resistencia y optimice el proceso de deshidratación del lodo (Bishop *et al.*, 1987; Ramalho, 1993).

El cálculo de la resistencia específica se basa en la ley de Poiseuille-D'Arcy, y está dada por la siguiente ecuación (Cornwell *et al.*, 1987; Ramalho, 1993):

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

donde:

- $r$  : resistencia específica a la filtración (cm/g)
- $P$  : presión de vacío aplicada ( $\text{dinas/cm}^2 = \text{g/cm s}^2$ )
- $A$  : área del filtro ( $\text{cm}^2$ )
- $b$  : pendiente ( $\text{s/cm}^6$ ) de graficar  $t/V$  vs.  $V$
- $V$  : volumen de filtrado ( $\text{cm}^3$ )

$m$  : viscosidad del filtrado (poise = g/cm s)  
 $c$  : concentración de sólidos totales por volumen de filtrado ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Tiempo de filtración ( $t_F$ ): una simplificación de la prueba de REF es el tiempo de filtración, que se realiza con el mismo equipo utilizado para la REF. Los únicos datos que se registran son el volumen inicial y el tiempo que se requiere para que se filtre la mitad del volumen utilizado; el tamaño de la muestra es muy importante para comparar los resultados (Bishop *et al.*, 1987).

### Características químicas

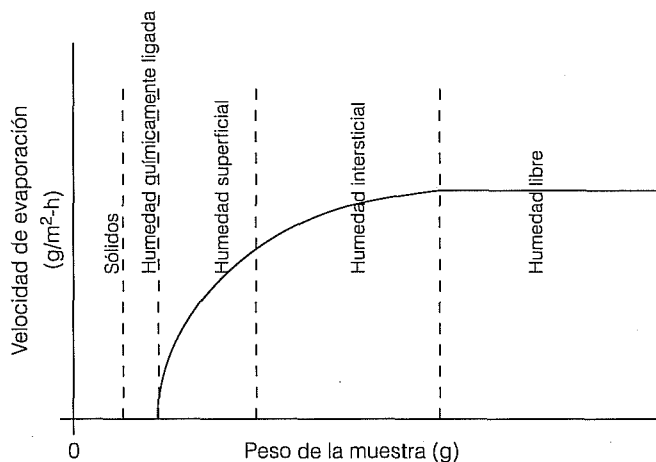
Una disposición adecuada de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua aumenta el interés por conocer los elementos químicos que componen los lodos. Por ejemplo, el mayor constituyente de cualquier lodo de aluminio es el agua (99%, aproximadamente) y la cantidad de agua influye en los requerimientos de energía específica para la separación de sólidos. Es importante conocer estos requisitos para seleccionar apropiadamente el proceso más efectivo de deshidratación, considerando el costo para reducir el volumen de lodos (Smollen, 1990; Tsang y Vesilind, 1990).

Aunque los nombres dados a las fracciones del agua (la cual también se denomina humedad) en un lodo pueden ser diferentes, la clasificación que se usa con mayor frecuencia es la operacional (Colín y Gazbar, 1995). En este caso, el contenido de humedad en un lodo se separa en dos categorías: humedad libre (no asociada con los sólidos), que se elimina con facilidad razonable, y humedad ligada. En general, se distinguen tres tipos de humedad ligada: mecánicamente ligada (intersticial), físicamente ligada (superficial) y químicamente ligada. Para la liberación de este último tipo de humedad se necesita de un tratamiento más avanzado. La proporción de humedad libre y ligada es determinante en la deshidratación de un lodo (Robinson y Knocke, 1992; Lotito *et al.* 1993; Colín y Gazbar, 1995). Tsang y Vesilind (1990) estudiaron las características de secado de algunos lodos mediante curvas termogravimétricas (ilustración 1).

### Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis

Con la microscopía electrónica de barrido (MEB) y los detectores de rayos X se identifican minerales muy pequeños (intervalo de aumento de 10 a 180,000x), y se puede examinar tanto su forma como su distribución, por lo que su empleo es útil para el estudio morfológico y de composición elemental en lodos, a fin de esta-

Ilustración 1. Curva de secado para identificar los diferentes tipos de humedad en el lodo (Tsang *et al.*, 1990).



blecer si un acondicionamiento influye en su morfología y composición y, a la vez, en la pérdida de agua (Reyes, 1997).

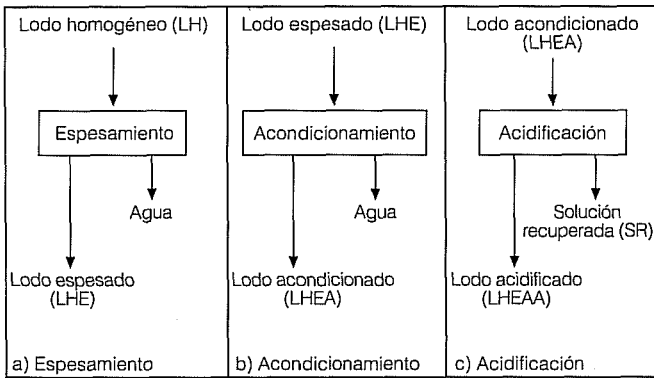
En general, las muestras que se analizan con MEB son relativamente fáciles de preparar; uno de los requerimientos es el tamaño, que puede ser desde muy pequeño hasta de 7 cm. Sin embargo, para cada caso se deben tomar en cuenta tres aspectos importantes: la muestra debe estar limpia y seca, debe mantenerse la morfología original y no debe tener cargas electrostáticas (conductivas).

Todas las técnicas de secado causan cambios dimensionales o estructurales, que pueden alterar la construcción original de la muestra. Los métodos de congelado-secado y de secado a punto crítico son los más importantes para la remoción de humedad hasta el momento y se utilizan principalmente en materiales biológicos, arcillas y zeolitas, con la finalidad de conservar la microestructura.

### Metodología

El objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del tipo de tratamiento y del polímero empleado en la deshidratación del lodo, así como en la reducción de su volumen. Para tal efecto, se utilizaron los parámetros de resistencia específica a la filtración, tiempo de filtración y porcentaje de humedad. Además, se recurrió al potencial zeta como una medida para reducir la carga de la partícula y al microscopio electrónico de barrido para determinar cambios morfológicos que indiquen una mayor o menor aglomeración de las partículas. Los tipos de polímeros empleados en las pruebas fueron uno aniónico, uno catiónico y otro no iónico.

Ilustración 2. Tratamientos propuestos.



Para tal efecto, se propusieron tres tratamientos (ilustración 2).

Para realizar estas pruebas se trabajó con lodo proveniente de la planta potabilizadora de Los Berros, sistema Cutzamala, Estado de México, la cual cuenta con un tren de tratamiento de sistema convencional: poscloración, mezcla rápida, floculación, sedimentación de alta tasa y filtración rápida. La muestra se tomó de la caja de recepción de lodos de los módulos B y C; a este tipo de lodo se le denominó lodo homogéneo (LH).

#### Determinación del potencial zeta

Además de los diferentes tipos de lodos mencionados en la ilustración 2, se analizaron las muestras de agua cruda (AC) y agua tratada (AT). La determinación del potencial zeta se realizó para conocer la carga final de las partículas proporcionada por cada tratamiento y polímero, comparando esta reducción con la carga de las partículas del agua cruda.

Para esta prueba, la muestra debe ser ligeramente turbia, sin llegar a ser opaca o completamente clara, y no debe contener más de 0.01% en volumen de partículas, debido a que podrían existir interferencias en la medición del potencial zeta (Brookhaven Instruments Corporation, 1994). Para lograr resultados confiables se realizaron treinta determinaciones a cada muestra, las cuales se promediaron para obtener un solo valor, además se obtuvo la desviación estándar de los resultados.

#### Determinación de la resistencia específica a la filtración y el por ciento de humedad

Para estudiar los mecanismos de deshidratación se seleccionaron la resistencia específica a la filtración, el tiempo de filtración y el porcentaje de humedad (dis-

tribución de humedad en el lodo), para conocer la filtrabilidad y evaporación del agua retenida en los diferentes tipos de lodos. A continuación se presenta la metodología utilizada para la medición de estos parámetros.

Resistencia específica a la filtración

Equipo:

- Aparato de REF montado como se muestra en la ilustración 3. Consta principalmente de un embudo Büchner de 9 cm de diámetro y una probeta graduada de 250 mililitros.
- Bomba de vacío.
- Papel filtro de celulosa (Whatman núm. 1 o equivalente) con retención de 8 mm (tamaño de poro).
- Cronómetro.

Procedimiento:

1. Determinar los sólidos totales (ST) de la muestra inicial de lodo.
2. Determinar el porcentaje de humedad del lodo (*c*) con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de humedad del lodo } (c) = [(1000 - ST) / 1000] * 100 \quad (2)$$

3. Pesarse el papel filtro que se utilizará para cada prueba.
4. Colocar el papel filtro dentro del embudo Büchner y humedecerlo.

Ilustración 3. Dispositivo para determinar la REF (Cornwell, et al., 1987).

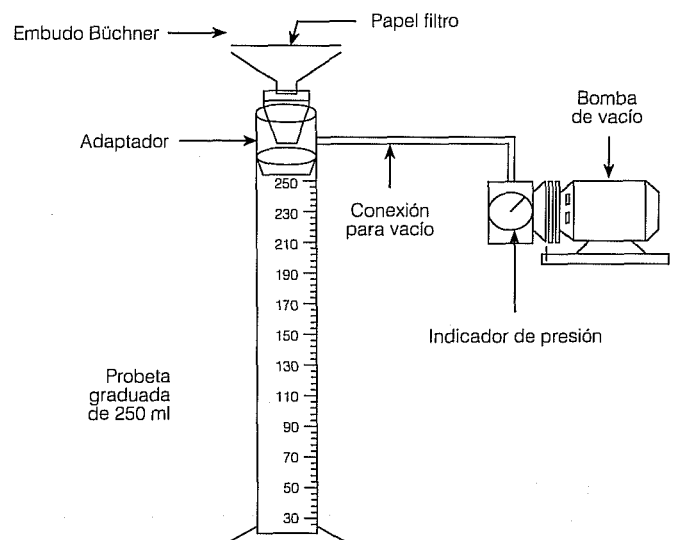
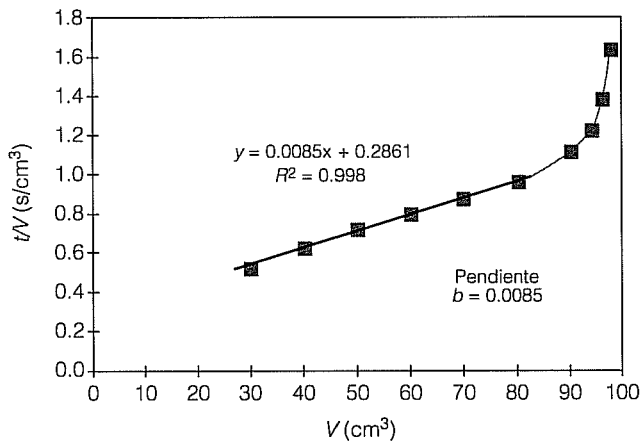


Ilustración 4. Gráfico de  $t/V$  en función de  $V$  para la obtención de la pendiente  $b$ .



- Ajustar la presión de la bomba de 400 a 500 mm de mercurio (Hg).
- Medir un volumen dado de lodo (generalmente 100 ml) y vaciar la muestra cuidadosamente, e iniciar, a la vez, el registro del tiempo de filtración utilizando un cronómetro.
- Registrar el tiempo de filtración con volúmenes de filtrado predeterminados y la presión aplicada hasta observar que la torta empieza a quebrarse.
- Realizar una gráfica con los resultados obtenidos de la relación tiempo-volumen de filtrado ( $t/V$ ), en función del volumen de filtrado (ilustración 4) y obtener la pendiente ( $b$ ).
- Determinar el porcentaje de humedad (cf) en los sólidos retenidos en el papel filtro (torta) de la siguiente manera:

$$\% \text{ humedad de la torta (cf)} = [(STH - STS) / STH] * 100 \quad (3)$$

donde:

STH = sólidos en la torta húmeda  
 STS = sólidos en la torta seca

- Calcular el parámetro  $c$  mediante la siguiente ecuación:

$$c = \frac{1}{\frac{c_i}{100 - c_i} - \frac{c_f}{100 - c_f}} \quad (4)$$

- Calcular  $r$  a partir de los datos anteriores utilizando la ecuación 1.

Porcentaje de humedad

Equipo:

- Balanza de humedad marca Ohaus.
- Rango de temperatura: 35 a 205°C.
- Variación de temperatura:  $\pm 1^\circ\text{C}$ .
- Intervalo de medición: 0 a 100%.
- Rango de tiempo: 0 a 180 minutos.
- Capacidad: 200 gramos.
- Precisión:  $\pm 0.007$  gramos.

Procedimiento:

- Colocar el platillo de aluminio dentro de la balanza y tarar a cero gramos, transferir al platillo una muestra de lodo (15 a 20 g).
- Secar la muestra a una temperatura constante (103 a 105°C) por tres horas.
- Registrar el peso del lodo a intervalos de diez minutos hasta evaporar toda el agua. El momento en que no existe pérdida de masa se define como tiempo de secado.
- Calcular el porcentaje de humedad con la siguiente ecuación:

$$Pi - Pt / Pi * 100$$

donde:

$Pi$  = peso inicial de la muestra de lodo  
 $Pt$  = peso del lodo a cada intervalo de tiempo

- Realizar una gráfica del porcentaje de humedad *versus* tiempo de secado.

#### Microscopio electrónico de barrido (MEB)

Las muestras de lodos se analizaron en los microscopios electrónicos de barrido de los institutos de Física y Materiales, campus Morelos, y de Geología, de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Para el análisis con MEB se requirió que las muestras estuvieran libres de agua, por lo que se prepararon con el método de liofilización. Se escogió este tratamiento debido al control que se logra en la pérdida del agua.

#### Difracción de rayos X

En el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se realizó el análisis mineralógico por difracción de rayos X, con la finalidad de identificar el tipo de arcilla presente en el lodo, además de establecer si con los diferentes tratamientos dicha arcilla no sufría algún cambio.

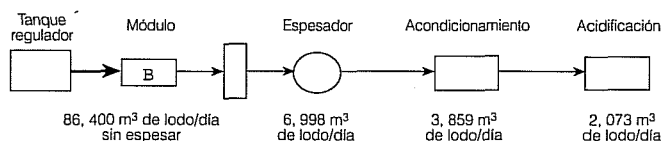
## Resultados

### Reducción del volumen del lodo

Se realizaron dos muestreos de lodo y los resultados de reducción (de una sola muestra) obtenidos por cada tratamiento se dan en el cuadro 1.

En promedio, la reducción más baja se logró por el espesamiento (91.9%) y la mejor, por el tratamiento de acidificación (97.6%). Con el método de acondicionamiento, el polímero catiónico fue el que más redujo el volumen del lodo (95.9%) y al acidificarse se logró una reducción máxima de 98.1 por ciento.

Ilustración 5. Tren de tratamiento propuesto para reducir el volumen del lodo en la planta de Los Berros.



En la ilustración 5 se presenta una extrapolación de los resultados para estimar el volumen de lodo que se dispondría en la planta potabilizadora de Los Berros (en la que se tratan entre 15 y 17 m³/s de agua), si, hi-

Cuadro 1. Reducción del volumen del lodo por tratamiento.

Fecha	Volumen inicial de LH (L)	Espesamiento Volumen final (L)	Tratamiento					
			Acondicionamiento Volumen final (L)			Acidificación Volumen final (L)		
			Aniónico	Catiónico	No iónico	Aniónico	Catiónico	No iónico
10/09/99	290.3	25.5	13.6	13.3	14.8	6.9	3.9	8.1
Reducción (%)		91.2	95.3	95.4	94.9	97.6	98.7	97.2
11/10/99	310.2	23.1	15.0	11.6	12.6	8.0	7.8	9.0
Reducción (%)		92.6	95.2	96.3	95.9	97.4	97.5	97.1
Red. promedio (%)		91.9	95.3	95.9	95.4	97.5	98.1	97.2

Cuadro 2. Potencial z y sólidos suspendidos totales de los diferentes tipos de lodo.

Muestra	10/09/99						11/10/99					
	PZ (mV)		SST (g/L)				PZ (mV)		SST (g/L)			
AC	-19.68		0.043				-19.10		0.097			
LH	-13.54		1.175				-14.64		2.735			
LHE	-12.73		14.605				-14.91		29.005			
LHEA*	-10.09		27.720				-5.49		49.230			
LHEAA*	-4.68		42.330				-6.07		80.330			
Polímero	Aniónico		Catiónico		No iónico		Aniónico		Catiónico		No iónico	
	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST
LHEA	-10.1	23.32	-8.56	30.73	-11.60	29.11	-2.04	39.84	-2.11	51.63	-12.31	56.23
LHEAA	-4.45	38.56	-2.87	50.93	-6.73	37.52	-6.81	87.61	-7.43	83.57	-3.98	69.81
Polímero	Aniónico		Catiónico		No iónico		Aniónico		Catiónico		No iónico	
	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST	PZ	SST
LHEA+	-6.07	31.58	-5.34	41.18	-11.96	42.67						
LHEAA+	-5.63	63.09	-5.15	67.25	-5.36	53.67						

\* Valor promedio de las tres muestras de polímeros.

LH: lodo homogéneo.

LHEA: lodo homogéneo espesado acondicionado.

PZ: potencial zeta.

+ Valor promedio de las dos pruebas.

LHE: lodo homogéneo espesado.

LHEAA: lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado.

SST: sólidos suspendidos totales.

potéticamente, se llegara a aplicar un proceso que incluyera en secuencia los tres tratamientos propuestos. En esta planta operan veinte sedimentadores que generan 50 l/s de lodo cada uno (dato proporcionado por personal de la planta), por lo que el volumen que se obtiene en un día alcanza los 86,400 m<sup>3</sup>. Sin embargo, se desconoce cuál es el volumen de lodo espesado que se genera y, por tanto, del que se dispone.

**Potencial zeta**

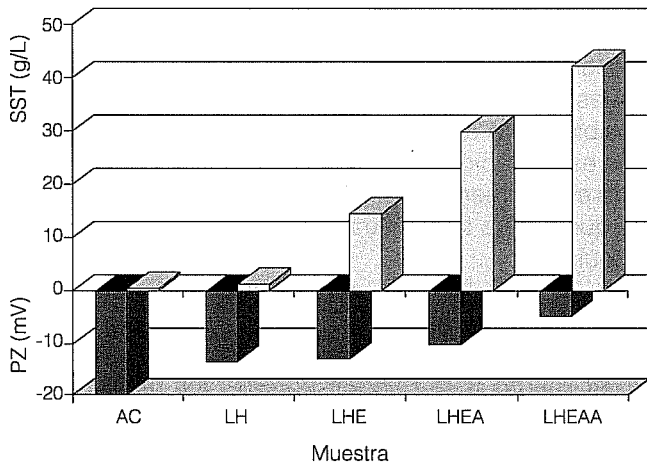
Los resultados obtenidos en las estimaciones promedio del potencial zeta se muestran en el cuadro 2. En este análisis se observó que la carga de las partículas en el agua tratada fue alrededor de -19 mV, y cuando se agregó el coagulante para eliminarlas (LH), disminuyeron su carga a -14.0 mV. Al espesarse el lodo, la

carga de las partículas no presentó un cambio importante (-13.8 mV), pero al acondicionarlo, su potencial se redujo a -7.3 mV y hasta -5.4 mV al emplearse la acidificación.

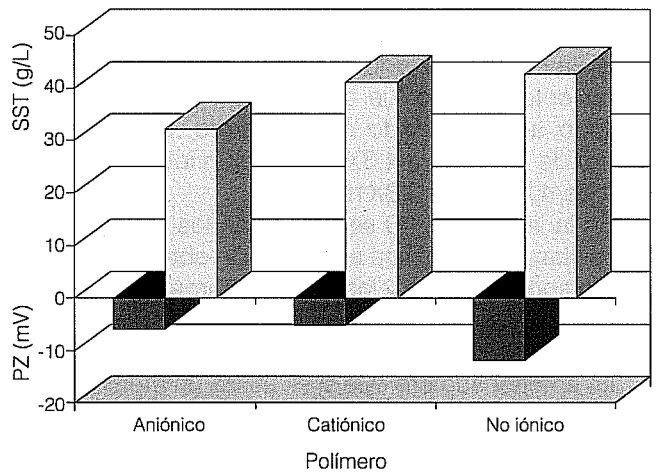
En las ilustraciones 6 y 7 se muestra la relación entre el potencial zeta y los sólidos suspendidos totales (SST) del agua cruda y el lodo obtenido mediante los diferentes tipos de tratamiento en las dos pruebas realizadas. Se observó que existe una mayor desestabilización de la carga de las partículas conforme el potencial se aproxima a cero, permitiendo que éstas se aglomeren para incrementar, así, la concentración de los SST presentes en el lodo.

Por otra parte, el tratamiento que incluyó acondicionamiento y acidificación proporcionó la menor carga y la mayor concentración de SST. En las ilustraciones 8 y 9 se muestran los resultados de la comparación del

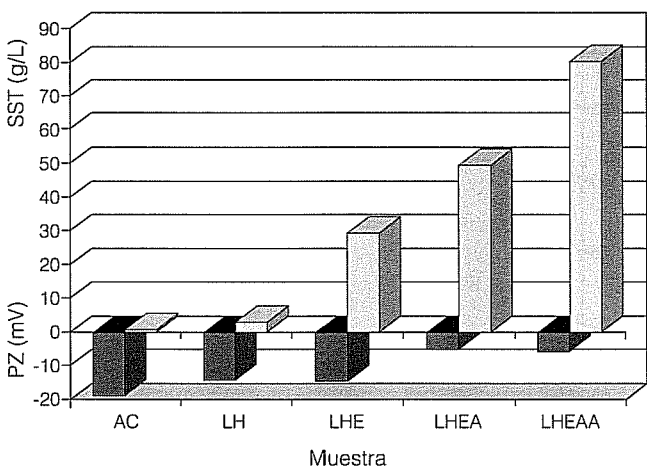
**Ilustración 6. PZ y SST. Prueba 10/09/99.**



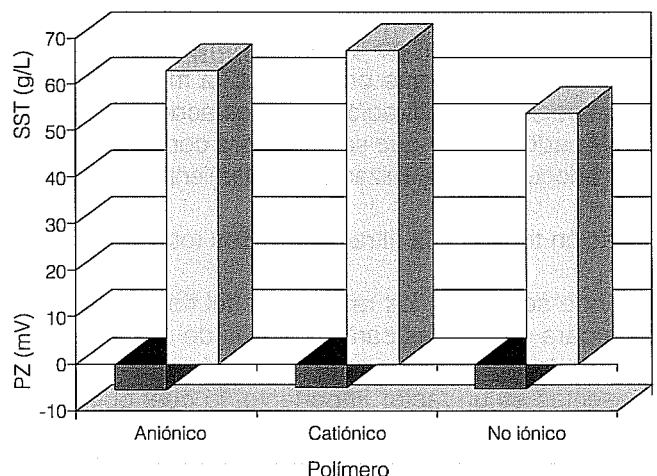
**Ilustración 8. PZ y SST del acondicionamiento.**



**Ilustración 7. PZ y SST. Prueba 11/10/99.**



**Ilustración 9. PZ y SST de la acidificación.**





potencial zeta y los sólidos suspendidos totales obtenidos con los tres polímeros empleados.

En el tratamiento por acondicionamiento, la concentración de SST proporcionada por los polímeros catiónico y no iónico fue muy semejante, sin embargo, el polímero catiónico fue el que en promedio redujo más la carga de las partículas presentes en el lodo (-8.56 y -2.11 mV) y al acidificarlo, su potencial zeta fue de -2.87 y -7.43 milivoltios.

### Resistencia específica a la filtración y porcentaje de humedad

#### Resistencia específica a la filtración

Se realizaron 16 análisis de REF en total, dos de lodo homogéneo, dos de lodo homogéneo espesado, seis de lodo homogéneo espesado acondicionado y seis de lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado; los valores promedio de la REF en estos lodos fueron  $2.30 \times 10^{12}$ ,  $1.13 \times 10^{12}$ ,  $1.69 \times 10^{11}$  y  $1.16 \times 10^{12}$  cm/g, respectivamente. Por consiguiente, el intervalo de valores de REF en un lodo al cual no se le aplicó ningún tratamiento químico fue de  $1.0 \times 10^{12}$  a  $3.0 \times 10^{12}$ ; para un lodo acondicionado con polímero, el REF estará dentro de  $7.0 \times 10^{10}$  a  $4.3 \times 10^{11}$  y en un lodo acidificado será de  $4.0 \times 10^{11}$  a  $3.3 \times 10^{12}$ .

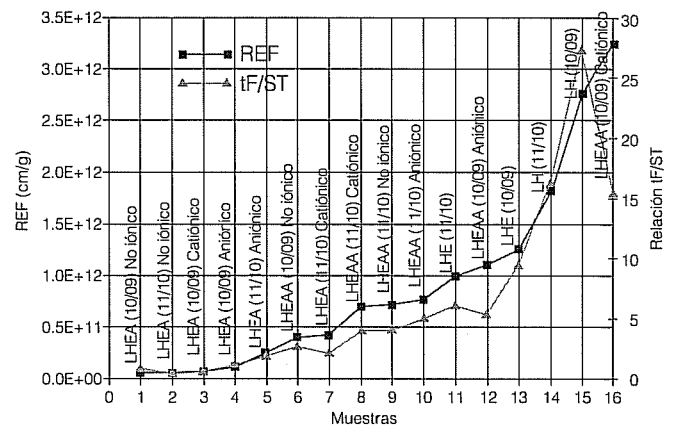
En la ilustración 10 se presentan los resultados de la resistencia específica a la filtración obtenidos por los cuatro tipos de lodos y los tres polímeros, así se puede observar desde el valor más bajo de resistencia hasta el más alto.

Lo anterior sugiere que si se utiliza un método de filtración para deshidratar lodo es conveniente acondicionarlo solamente con polímero, ya que presentará una menor resistencia a la filtración. Sin embargo, una desventaja es que se requerirá un área de lechos de secado más grande, ya que el volumen de lodo a deshidratar será mayor, en comparación con un lodo acidificado. Asimismo, de los tres polímeros analizados, el no iónico fue el que proporcionó la menor resistencia específica a la filtración en lodos acondicionados y acidificados, por lo que se considera como el polímero más adecuado para utilizar en el tratamiento de los lodos.

#### Relación tiempo a la filtración/sólidos totales (tF/ST)

Cuando se utilizan los resultados del tiempo de filtración para evaluar las características de deshidratabilidad de los lodos, la concentración de sólidos totales presentes es un factor importante, lo cual obligaría a comparar únicamente aquéllos que presenten concentraciones similares. Sin embargo, utilizando la relación

Ilustración 10. Resultados de resistencia específica a la filtración.



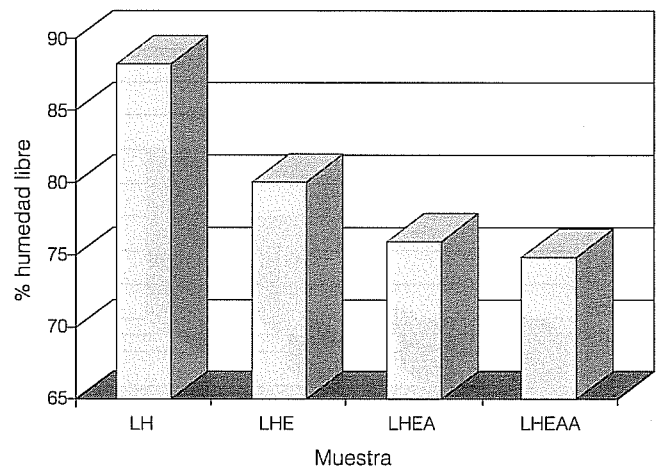
tiempo a la filtración y sólidos totales (tF/ST), se puede establecer una comparación sin ninguna restricción entre los lodos con y sin tratamiento.

En la ilustración 10 se observa que la relación tF/ST presenta la misma tendencia que la REF para los diferentes lodos, con excepción de dos muestras (debido posiblemente a un mal manejo de la muestra), por lo que esta relación puede emplearse para conocer si un lodo es fácilmente deshidratable por filtración, además de que facilita tanto el trabajo de laboratorio como los cálculos.

#### Porcentaje de humedad

En el cuadro 3 se pueden apreciar los resultados de los porcentajes del tipo de humedad presente en los cuatro tipos de lodos.

Ilustración 11. Humedad libre.



**Cuadro 3. Resultados del porcentaje de distribución de humedad.**

Fecha	Humedad libre (HL)	Humedad intersticial (HI)	Humedad superficial (HS)	Humedad Q ligada (HQL)	Fecha	Humedad libre (HL)	Humedad intersticial (HI)	Humedad superficial (HS)	Humedad Q. ligada (HQL)			
10/09/99	92.68	6.52	0.67	0.13	10/09/99	81.10	13.53	3.53	1.99			
11/10/99	83.81	12.24	3.65	0.30	11/10/99	79.07	14.64	3.34	2.95			
LHEA	Aniónico				Catiónico				No iónico			
	HL	HI	HS	HQL	HL	HI	HS	HQL	HL	HI	HS	HQL.
10/09/99	78.44	14.11	4.79	2.66	77.36	13.59	6.85	2.20	76.94	14.22	6.91	1.93
11/10/99	72.84	16.53	6.34	4.29	73.70	15.15	5.10	6.05	76.90	15.05	2.55	5.50
LHEAA	Aniónico				Catiónico				No iónico			
10/09/99	75.80	13.66	4.84	5.70	72.64	13.25	7.79	6.32	72.82	16.42	6.24	4.52
11/10/99	74.71	7.90	7.79	9.60	75.26	12.95	2.49	9.30	78.17	10.14	3.30	8.39

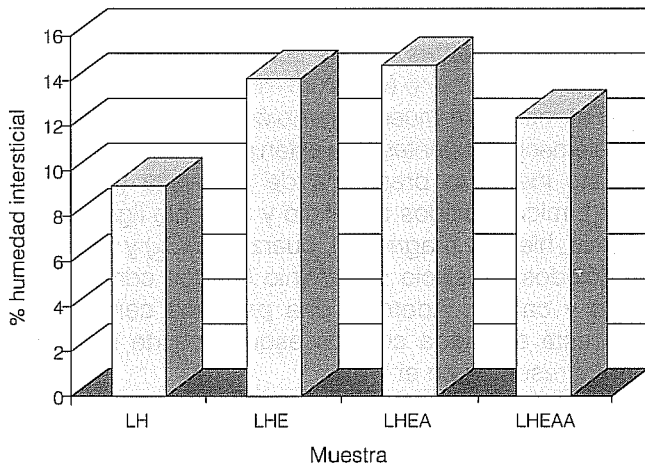
LH: lodo homogéneo.

LHE: lodo homogéneo espesado.

LHEA: lodo homogéneo espesado acondicionado.

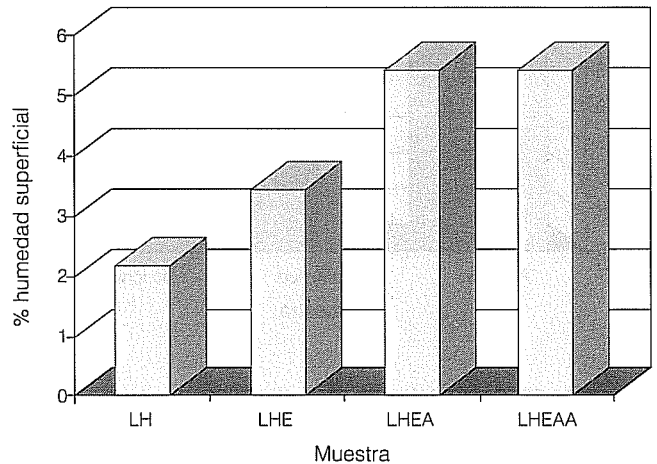
LHEAA: lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado.

**Ilustración 12. Humedad intersticial.**



El agua libre, al no estar ligada de ninguna forma con los flóculos puede eliminarse con facilidad. Además, si al lodo se le da un tratamiento que involucre dos o más procesos, se incrementará la pérdida de humedad (ilustración 11). El porcentaje de humedad intersticial, superficial y químicamente ligada aumenta conforme el agua libre se elimina durante un espesamiento o acondicionamiento con polímero. Sin embargo, la acidificación libera agua intersticial y superficial adherida a las estructuras sólidas como consecuencia de una agitación vigorosa y de la adición de ácido sulfúrico, disminuyendo el porcentaje de éstas en el lodo e incrementando la pérdida de agua (ilustraciones 12

**Ilustración 13. Humedad superficial.**



y 13). El agua químicamente ligada no fue removida por ninguno de los tratamientos propuestos, reflejándose en un aumento, como se muestra en la ilustración 14.

Cuando se utiliza un polímero para acondicionar el lodo se espera que proporcione la mayor eliminación de agua libre. Por lo anterior, y de acuerdo con la ilustración 15, se observó que al aplicar el polímero catiónico se obtuvieron los porcentajes más bajos de humedad libre en el lodo homogéneo espesado acondicionado y lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado.

Se comparó la cantidad de agua que puede eliminarse mediante los mecanismos de filtración y evapo-

Ilustración 14. Humedad químicamente ligada.

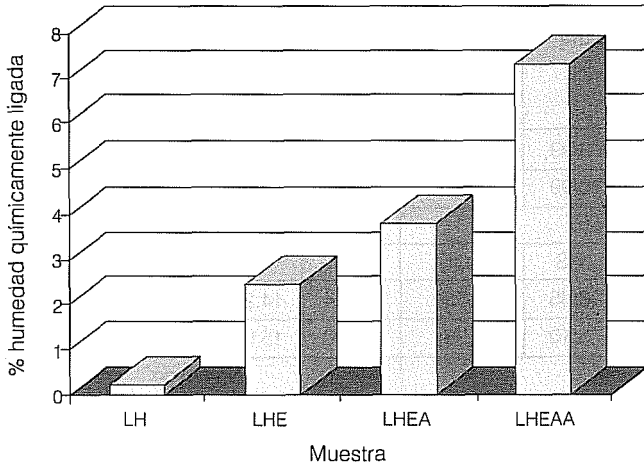


Ilustración 15. Comparación de los tres polímeros.

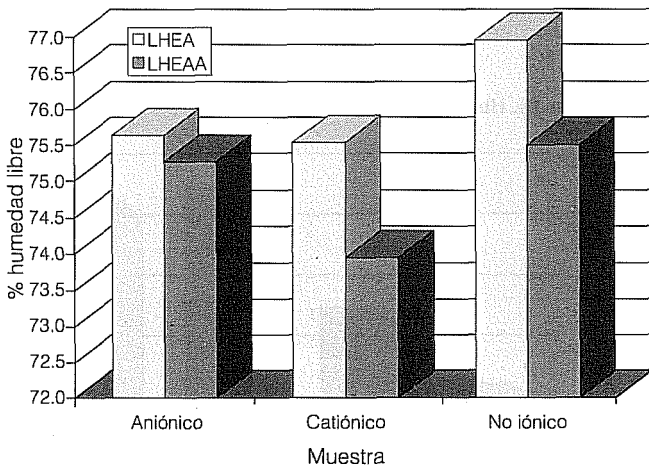
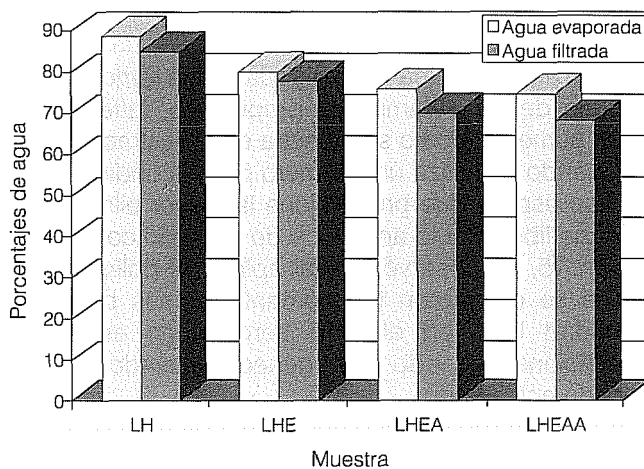


Ilustración 16. Porcentajes de agua eliminada por evaporación y filtración.



ración (ilustración 16), y se observó que la cantidad de agua residual disminuyó conforme se aplicó un tratamiento al lodo, además de que la pérdida de agua por filtración fue más rápida, aunque la cantidad de agua eliminada a través de la evaporación fue mayor.

#### Resultados del análisis por rayos X

Los lodos se forman por arcillas en dispersión, constituidas principalmente por silicatos de aluminio. Los resultados de la determinación de los tipos de arcilla que constituyen los diferentes lodos analizados se presentan en el cuadro 4.

El tipo de tratamiento y la adición de reactivos no modificó la composición química del lodo, como se muestra en el cuadro 4, donde el principal constituyente fue la arcilla halloysita, seguida por trazas de mica, cristobalita y cuarzo, y en menor cantidad, feldespatos, plagioclasas y esmectitas.

#### Microscopio electrónico de barrido

#### Resultados del análisis elemental

A partir de estos resultados se observó que los principales constituyentes de los cuatro tipos de lodo son oxígeno (O), carbono (C), aluminio (Al), silicio (Si) y hierro (Fe), como se muestra también en la ilustración 17. Los elementos restantes sólo están presentes como traza.

Esto indicó la presencia de halloysita ( $Al_2(OH)_4Si_2O_5$ ), micas (óxidos de silicio y aluminio ligados con potasio, hierro y magnesio), cuarzos ( $SiO_2$ ) y feldespatos (óxidos de silicio y aluminio ligados con potasio, sodio y calcio). Además, una pequeña cantidad de  $SiO_2$  está asociada con los esqueletos de las diatomeas presentes en el lodo.

En la ilustración 18 se presentan las relaciones en peso que se obtuvieron a partir del análisis elemental proporcionado por el MEB. La presencia de oro en estos análisis se debe al recubrimiento que se le dio a

Cuadro 4. Análisis mineralógico de los diferentes lodos.

Muestra	Mineralogía de la fracción arcillosa
Lodo homogéneo	Halloysita. Trazas de mica, cristobalita, cuarzo y posiblemente esmectita
Lodo del espesamiento	Halloysita. Trazas de mica, cristobalita, cuarzo y posiblemente esmectita
Lodo del acondicionamiento	Halloysita. Trazas de mica, cristobalita y cuarzo
Lodo de la acidificación	Halloysita. Trazas de mica, cristobalita, cuarzo y plagioclasas

Ilustración 17. Composición elemental por tipo de lodo.

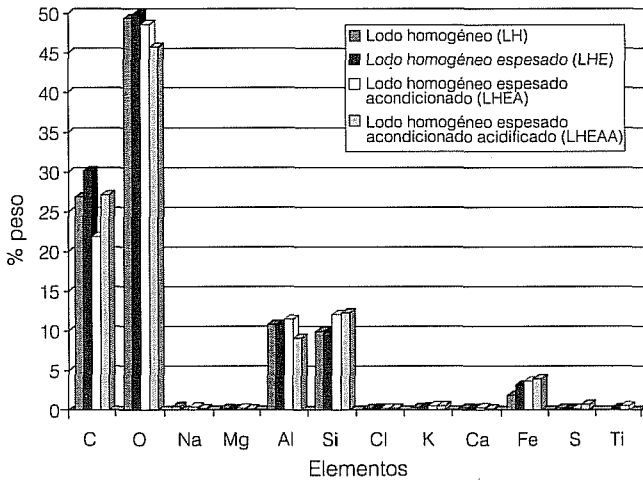
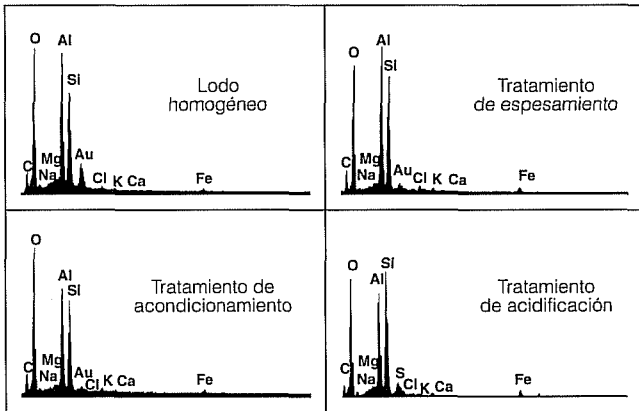


Ilustración 18. Análisis elemental por tipo de tratamiento.



la muestra para evitar su polarización. Se observó también que la composición del lodo al ser espesado no cambió; no obstante, cuando se le agregó un polímero donde los principales componentes son el carbono y el oxígeno, se incrementó el segundo elemento. En el tratamiento de acidificación la presencia del azufre aumentó, mientras que las del aluminio, carbono y oxígeno se redujeron, debido a la adición del ácido sulfúrico utilizado para acondicionar el lodo y a la recuperación del sulfato de aluminio (coagulante), respectivamente.

#### Análisis morfológico

#### Por tratamiento

En la ilustración 19 se muestran las micrografías de los lodos obtenidos en cada tratamiento; se observa que en el lodo inicial las partículas o flóculos no están agru-

Ilustración 19. Micrografías por tipo de lodo.



pados, por lo que existen amplios espacios entre ellos (a). En un lodo espesado, la distancia entre los flóculos se redujo, presentando una masa compacta (b). Cuando el lodo se acondicionó con polímero se formaron aglomerados, reduciendo aún más los espacios entre los flóculos (c). Al agregar ácido sulfúrico, el aluminio y el polímero que mantenían aglomeradas a las partículas se disolvieron y las partículas liberadas formaron pequeños grumos (d).

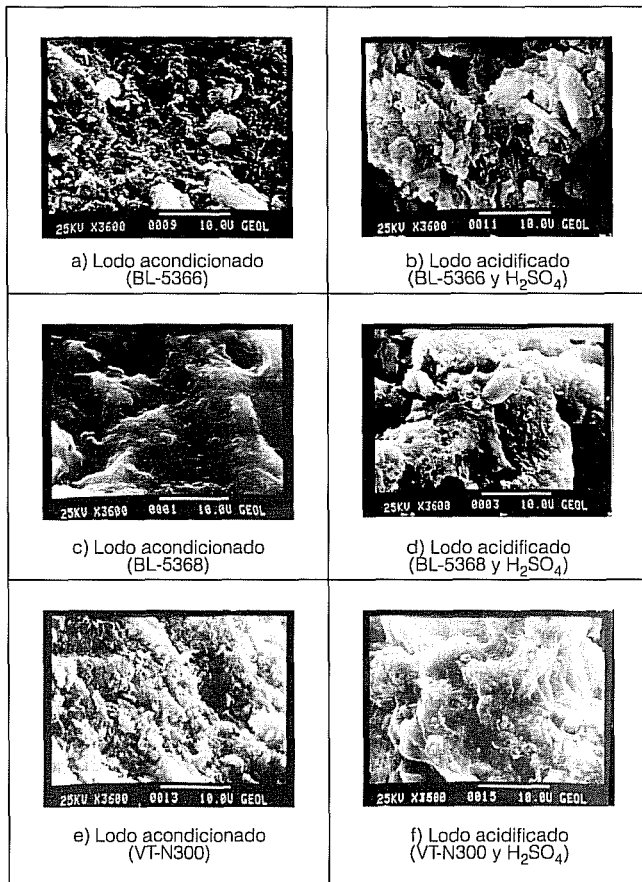
El tipo de tratamiento influyó en la morfología del lodo, siendo un factor importante en la reducción de su volumen al formar aglomerados más compactos y al disminuir los espacios que existen entre las partículas, lo cual permitió liberar un mayor volumen de humedad libre.

#### Por polímero

La ilustración 20 muestra las micrografías de los lodos obtenidos después de ser acondicionados y acidificados. En el acondicionamiento, la neutralización de la carga de la partícula y la formación de puentes interparticulares efectuada por el polímero catiónico resultó más efectiva, al generar aglomerados más compactos que no muestran flóculos libres, reduciendo los espacios entre partículas (c). Mientras que los polímeros aniónico y no iónico que utilizan sólo puentes interparticulares muestran partículas sueltas al producirse su aglomeración mediante el mecanismo de reticulación y, por tanto, el espacio entre partículas fue mayor (a y e).

El tipo de carga del polímero influyó en la formación de aglomerados y en la disminución de los espacios

Ilustración 20. Micrografías por tipo de polímero.



que existen entre las partículas, modificando la morfología del lodo. Estos factores resultan importantes para la reducción del volumen. Cuando los tres lodos acondicionados se acidificaron no se observó ninguna diferencia entre ellos, como se muestra en la ilustración 20 (b, d y f), ya que presentaron un aspecto de pequeñas láminas.

#### Comparación de la efectividad de los tratamientos y polímeros

##### Tratamiento

En el cuadro 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos con los diferentes tratamientos en cada una de las pruebas evaluadas:

El tratamiento de acidificación favoreció la reducción del volumen del lodo, ya que presentó la disminución más notable en la carga de las partículas, permitiendo una mayor aglomeración; sin embargo, aumentó la concentración de metales traza. Por otra parte, el lodo residual se puede disponer en lechos de secado de

arena para su deshidratación, debido a que sus características finales facilitan la eliminación de la humedad libre por evaporación y filtración.

##### Polímeros

En la el cuadro 6 se muestra un resumen de los resultados obtenidos por los polímeros en cada una de las pruebas realizadas para evaluar su efectividad en la reducción del volumen del lodo y en la recuperación del coagulante, así como las características que le confieren al lodo residual para facilitar su deshidratación final.

Este análisis sugiere que si lo primordial es disminuir el volumen del lodo y recuperar el coagulante, resulta conveniente acondicionar el lodo con el polímero catiónico, ya que reduce en mayor proporción la carga de las partículas, generando una excelente aglomeración y, por lo tanto, una mejor eliminación de humedad libre. Esto se debe principalmente a que el polímero es de alto peso molecular, por lo que la desestabilización o reducción de la carga de la partícula se lleva a cabo por neutralización y puente interparticular.

Si se requiere que el lodo sea deshidratado mediante lechos de secado de arena, se recomienda que previamente se acondicione con un polímero no iónico, debido a que este elemento le confirió las mejores características de pérdida de humedad libre por filtración y evaporación.

##### Conclusiones

- Con el tratamiento de acidificación se obtuvo el menor volumen de lodo a disponer.
- Las mejores reducciones del potencial zeta se obtuvieron con el tratamiento de acidificación.
- El polímero catiónico proporcionó la mayor reducción del volumen del lodo en el acondicionamiento (98.1%).
- El acondicionamiento del lodo con polímero facilita la pérdida de agua por filtración, al obtener la menor resistencia específica a la filtración.
- Existe una tendencia similar entre los valores obtenidos de la resistencia específica a la filtración y la relación con el tiempo de filtración de sólidos totales, por lo que esta última puede ser empleada para determinar la mayor o menor facilidad con que el lodo puede filtrarse.
- El polímero no iónico confiere al lodo las mejores características de deshidratación por filtración y evaporación.
- La acidificación proporciona la mayor pérdida de humedad libre.

**Cuadro 5. Resumen de resultados por tratamiento.**

Prueba	Tratamiento		
	Espesamiento	Acondicionamiento	Acidificación
Reducción del volumen del lodo	Bueno	Muy bueno	Excelente
Ausencia de metales traza	Excelente	Bueno	Regular
Reducción de carga de la partícula	Bueno	Muy bueno	Excelente
Resistencia específica a la filtración	Regular	Excelente	Bueno
Relación tF/ST	Regular	Excelente	Bueno
Relación t/V	Regular	Excelente	Bueno
Velocidad de evaporación	Bueno	Muy bueno	Excelente
Tiempo de evaporación	Bueno	Muy bueno	Excelente
Pérdida de humedad libre	Bueno	Muy bueno	Excelente
Microscopio electrónico de barrido (morfología)	Flóculo pequeño	Aglomerados	Láminas

**Cuadro 6. Resumen de resultados por polímero.**

Prueba	Polímero		
	BL-5366	BL-5368	VT-N300
Reducción del volumen del lodo	Muy bien	Excelente	Muy bien
Ausencia de metales traza	Excelente	Regular	Muy bien
Reducción de la carga de la partícula	Muy bien	Excelente	Muy bien
Resistencia específica a la filtración	Muy bien	Bueno	Excelente
Relación tF/ST	Muy bien	Bueno	Excelente
Relación t/V	Muy bien	Bueno	Excelente
Velocidad de evaporación	Muy bien	Muy bien	Excelente
Tiempo de evaporación	Bueno	Muy bien	Excelente
Pérdida de humedad libre	Muy bien	Excelente	Bueno
Microscopio electrónico de barrido (morfología)	Aglomerados con partículas sueltas	Aglomerados compactos	Aglomerados con partículas sueltas

- El tipo de tratamiento empleado para reducir el volumen del lodo no afecta su composición elemental.
- El lodo está constituido principalmente por la arcilla halloysita.
- El tipo de tratamiento escogido modifica la morfología del lodo, aumentando o disminuyendo su capacidad para perder agua libre.

### Agradecimientos

Este trabajo pudo realizarse gracias al apoyo de la Comisión Nacional del Agua y en particular del personal de la planta potabilizadora de Los Berros, Estado de México; de la Universidad Autónoma de México (UAM) Iztapalapa; de la doctora Judith Cardoso Martínez; del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, y de la maestra Margarita Reyes.

Recibido: 14/04/2000  
Aprobado: 27/08/2000

### Referencias

- Arboleda, V. J., *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*, CEPIS, OPS/OMS, 1982, pp. 558.
- Barraqué, C., *Manual técnico del agua*, Degrémont, cuarta edición, Francia, 1979, pp. 1216.
- Bishop, M. M., A.T. Rolan, T. Bailey y D.A. Cornwell, "Testing of Alum Recovery for Solids Reduction y Reuse", *Journal American Water Works Association*, núm. 6, 1987, pp. 76-83.
- Brookhaven Instruments Corporation, *Instruction Manual for ZetaPlus, Zeta Potencial Analyzer*, Virginia, EUA, 1994.
- Cheremisinoff, P., "Sludge Management and Disposal. Water Management and Supply", *Water and Wastewater Treatment Guidebooks*, Prentice-Hall, Nueva Jersey, 1994, pp. 204.
- Coackley, P. y B.R.S. Jones, "Vacuum Sludge Filtration. Interpretation of Results by the Concept of Specific Resistan-

- ce", *Sewage and Industrial Wastes*, núm. 8, 1956, pp. 963-975.
- Colín, F. y S. Gazbar, "Distribution of Water in Sludges in Relation to their Mechanical Dewatering", *Water Research*, núm. 8, 1995, pp. 2000-2005.
- Cornwell, D. A., M.M. Bishop, R.G. Gould y C. Vandermeijden, *Water Treatment Plant Waste Management, Handbook of Practice*, American Water Works Association Research Foundation, 1987, pp. 431.
- Lotito, V., G. Mininni, L. Spinosa y F. Lore', "Developments in Laboratory Evaluation of Sewage Sludges Dewaterability", *Water Science Technology*, núm. 1, 1993, pp. 103-108.
- Ramalho, R. S., *Tratamiento de aguas residuales*, Reverté, Barcelona, 1993, 705 pp.
- Reyes, S.A.M., *Microscopía electrónica y microanálisis a la solución de problemas geoquímicos*, VII Congreso Nacional de Geoquímica, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1997.
- Richter, C., C.J. Pérez y L. Cánepa, "Programa regional HPE/OPS/CEPIS de mejoramiento de la calidad del agua para consumo humano", *Coagulación*, tomo 1, Lima, Perú, 1992, pp. 1-10.
- Robinson, J. y W.R. Knocke, "Use of Dilatometric and Drying Techniques for Assessing Sludge Dewatering Characteristics", *Water Environment Research*, núm. 1, 1992, pp. 60-68.
- Ruiz, R. y M.J. Vila, "Solución a algunos problemas de floculación de fangos mediante el uso conjuntos de floculantes aniónicos y catiónicos", *Tecnología del agua*, núm. 27, 1986, pp. 50-55.
- Smollen, M., "Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction", *Water Science and Technology*, núm. 12, 1990, pp. 153-161.
- Tosun, I., U. Yetis, M.S. Willis y G.G. Chase, "Specific Cake Resistance: Myth or Reality", *Water Science Technology*, núm. 1, 1993, pp. 91-101.
- Tsang, K.R. y P.A. Vesilind, "Moisture Distribution in Sludges", *Water Science Technology*, núm. 12, 1990, pp. 135-142.
- Weber, W. J., *Control de la calidad del agua. Procesos físico-químicos*, Reverté, Barcelona, 1979, pp. 654.

### Abstract

Sandoval Yoval, L., L. Motellano Palacios, M. Piña Soberanis & L. Sánchez Guzmán, "Selection of Dewatering Treatment to Reduce Sludge Volume in Water Potabilization Plants", Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish), vol. XVI, num. 4, pages 91-105, October-December, 2001.

The objective of this study is to determine the effects of a previous treatment by using polymer in sludge dewatering. In this case, three processes were employed: gravity thickening, conditioning with three different polymers (anionic, cationic and no ionic) and acidification. Polymer conditioning followed by acidification was the best to reduce sludge volume (97.6%). However, its dewatering capacity was inferior because the specific resistance to filtration was greater than conditioned sludge. This result was corroborated with zeta potential since particles charges were reduced from  $-19$  to  $-5$  mV which resulted in greater particle agglomeration and water loss in sludge. The cationic polymer was the best to reduce particle charge ( $-5.7$  mV) and when this was acidified, zeta potential dropped to  $-4.8$  mV. Thus a greater particle agglomeration and elimination of free water was possible. In conclusion, to obtain the greatest reduction of sludge it is necessary to use high molecular weight cationic polymer followed by acidification. Acidification modified sludge morphology due to breakings of solid-aluminum hydroxide links which derived in reduced free space between particles causing in turn free waterloss and, in consequence, less sludge volume.

**Key words:** potabilization, sludge, volume reduction, zeta potential, specific resistance, water percentage, thickening, conditioning, acidification.

### Dirección institucional de los autores:

Luciano Sandoval Yoval  
Leticia Motellano Palacios  
Martín Piña Soberanis  
Laura Sánchez Guzmán

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532  
62550 Progreso, Morelos, MÉXICO  
Correo electrónico: lucsand@tlaloc.imta.mx