

ESTUDIO PILOTO PARA REDUCIR EL VOLUMEN DE LODOS DE PLANTAS POTABILIZADORAS

Luciano Sandoval Y., Alejandra Martín D., Martín Piña S. y Leticia Montellano P.
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Progreso, Juitepec, Morelos, México
C.P. 62550, Tel 527 3 19 42 99, Fax 527 3 19 43 81
Correo electrónico lucsand@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

En el presente estudio se comprueba la eficiencia del tratamiento propuesto (espesamiento, acondicionamiento y acidificación) para reducir el volumen del lodo generado en plantas potabilizadoras mediante el empleo de una planta piloto de tratamiento de agua y lodos.

Los resultados demostraron que es factible reducir en un 91% el volumen de lodo a disponer y que se obtiene una ventaja adicional al recuperar cerca del 90% del coagulante presente en el mismo.

Durante el estudio se analizó la influencia del coagulante recuperado en el tratamiento del agua y la posible acumulación de metales traza en la misma. De esto, se estableció que éste es tan efectivo como el coagulante comercial y que no afecta la calidad final del agua tratada, cumpliendo con los niveles estipulados por la NOM-127-SSA1-1994, con relación a los parámetros analizados.

ANTECEDENTES

Las aguas superficiales contienen sólidos suspendidos que son removidos durante el proceso de potabilización, generando lodos químicos que representan del 0.3 al 1% del agua tratada. Actualmente estos lodos son dispuestos sin ningún tratamiento en presas, terrenos o en las mismas fuentes de suministro ocasionando daños al medio ambiente y en algunas ocasiones son descargados al alcantarillado y tratados en conjunto con las aguas municipales.

En México, existen 372 plantas potabilizadoras (CNA, 1998), las cuales en conjunto tratan alrededor de $109.8 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua. De éstas, solo operan 296 plantas con un gasto de operación de $76.8 \text{ m}^3/\text{s}$, las cuales utilizan algún tipo de coagulante para eliminar los sólidos suspendidos que contiene el agua, siendo el sulfato de aluminio es el más utilizado. Considerando un valor medio de producción de lodos del 0.7% del agua tratada, en el país se generan alrededor de $0.54 \text{ m}^3/\text{s}$ o $46,449 \text{ m}^3/\text{día}$ de lodos, que deben ser manejados y dispuestos adecuadamente.

El problema principal que presentan estos residuos es su alto contenido de agua, además de su baja capacidad de deshidratación, particularmente aquellos que son producidos por el uso de sulfato de aluminio como coagulante.

Su disposición sin tratamiento origina la contaminación de fuentes superficiales o subterráneas y, puede hacer la tierra estéril dándole una apariencia erosionada cuando se abandona o agota el lugar.

Características de los lodos

Las características de los lodos de alúmina varían de una planta a otra, dependiendo de la calidad de agua cruda, del tratamiento recibido y de la época del año, sin embargo, poseen características básicas similares.

El lodo de alúmina es un fluido no Newtoniano, voluminoso, de aspecto gelatinoso, compuesto principalmente por agua (más del 90%), hidróxido de aluminio, partículas inorgánicas (arcilla o arena), coloides, residuos de reactivos químicos añadidos durante el proceso de tratamiento, plancton, y otra materia orgánica e inorgánica removida del agua. El conocimiento de estas características son esenciales para determinar su tratamiento y su disposición final.

Los sólidos residuales de las plantas de tratamiento de agua están constituidos por sólidos suspendidos provenientes de los desechos de los procesos de coagulación-floculación, sedimentación y del retrolavado de los filtros. Generalmente tendrá un contenido bajo de sólidos, en el rango de 3,000 a 15,000 mg/l. Los sólidos suspendidos son del 75 al 90% de los sólidos totales (ST), con una cantidad de sólidos volátiles del 20 al 35% de los ST. La demanda bioquímica de oxígeno generalmente es de 30 a 100 mg/l. El pH del lodo está en un rango de 5 a 7.

Todas éstas características provocan que el lodo sea: insoluble a pH natural, fácilmente sedimentable, pero a una concentración que es inadecuada para su manejo conveniente y por consiguiente para relleno de tierra, muy compresible, sin embargo, resiste el paso del agua y que tenga una composición que cuando se dispone en el suelo lo azolva (Albrecht, 1972).

Reducción del volumen de lodo

El grado de deshidratación necesario para una planta dada, dependerá del método de disposición final. La concentración mínima normalmente aceptable puede ser de 20%, sin embargo, esto dependerá de que las instalaciones estén correctamente diseñadas para remover aproximadamente del 80 al 90% de los sólidos suspendidos en los tanques de coagulación - sedimentación (AWWA, 1991).

El objetivo principal en el tratamiento de los lodos de plantas potabilizadoras es producir un lodo con una concentración de sólidos que pueda facilitar su manejo y disposición. Para reducir el volumen total de lodos a disponer se puede aplicar alguna de las alternativas que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Alternativas de tratamiento y disposición de lodos de plantas potabilizadoras

Alternativa	Alternativa
• Acondicionamiento Químico	• Disposición final

<ul style="list-style-type: none"> • Tanques de espesamiento • Deshidratación <ul style="list-style-type: none"> Lechos de secado Lagunas Filtros prensa Filtros a vacío Centrifugación Congelamiento 	<ul style="list-style-type: none"> Descarga a aguas superficiales Relleno sanitario Incineración
--	---

Recuperación de Aluminio

El proceso de recuperación de aluminio, en forma de sulfato, mediante el empleo de ácido sulfúrico de lodos provenientes del tratamiento del agua potable fue patentado por W. M. Jewell en 1903, en los Estados Unidos, y se practicó posteriormente en Japón, Inglaterra y Polonia. La extracción con ácido sulfúrico es la más ampliamente aceptada, sin embargo, el uso de otros ácidos como el clorhídrico y bases como el hidróxido de sodio y de calcio también han sido utilizados.

La solución de aluminio bajo condiciones ácidas o alcalinas disminuye el contenido de $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ precipitado y mejorar la deshidratación del lodo reduciendo su masa y volumen.

La recuperación de aluminio se expresa mediante la siguiente relación estequiométrica:



Se ha preferido el ácido sulfúrico debido a su bajo costo y a su propiedad para extraer coagulantes primarios. El requerimiento estequiométrico de ácido sulfúrico para disociar el $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ a Al^{+3} es 1.5 moles de ácido por mol de $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ o, 1.11 kg de ácido por kg de $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ o 5.45 kg de ácido por kg de Al. Sin embargo, la disolución de aluminio no llega a ser completa debido a que:

- Otros materiales demandan ácido (sólidos presentes en el lodo como producto de la coagulación), tales como, óxidos e hidróxidos de hierro en concentraciones importantes, el manganeso y otros metales traza también están presentes en concentraciones significativas. Por lo tanto, si el ácido adicionado está basado en la concentración del aluminio presente en el lodo, solamente una fracción del aluminio total podrá ser disuelto.
- Cuando el agua cruda contiene una concentración alta de sólidos, en su mayoría constituidos por óxidos de aluminio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), éstos no pueden ser disueltos con dosis de ácido sulfúrico pequeñas, bajo condiciones de temperaturas bajas y períodos cortos de contacto.

Es importante considerar la presencia de otras sustancias de reacción alcalina, como los bicarbonatos y carbonatos que demandan ácido, por lo que es necesario emplear un exceso con respecto al equivalente estequiométrico del $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ presente (Chen, et al, 1976).

El lodo que queda después de la recuperación es generalmente un sedimento voluminoso, más concentrado y que puede deshidratarse más fácilmente en lechos de secado de arena. Por lo anterior, los factores importantes asociados con la evaluación de la recuperación de alúmina, son la demanda de ácido, el tiempo de contacto y el pH alcanzado para llevar a cabo la recuperación.

Uso del aluminio recuperado como coagulante

La calidad del aluminio recuperado se evalúa basándose en su concentración, y contenido de materia orgánica, turbiedad, color, manganeso, hierro y trazas de contaminantes orgánicos e inorgánicos. No obstante, que los contaminantes son reciclados en el proceso de tratamiento; se ha reportado que las concentraciones son iguales con las que se encuentran en coagulantes comerciales. Estudios reportan que el coagulante recuperado es más diluido que el comercial en un factor de 15 (Westerhoff, 1973).

El color y la turbiedad han sido usados en sistemas de laboratorio para determinar la efectividad del coagulante recuperado, mientras que en plantas piloto se han analizado características bacteriológicas, físicas y químicas.

Slechta y Culp (1967) concluyen que la efectividad del aluminio recuperado es igual al de un coagulante comercial después de 10 ciclos de extracción. Isaac y Vahidi (1961) encontraron que 10 mg/l de alúmina comercial remueve el 90% del color del agua cruda, mientras que una dosis de aluminio recuperado remueve solamente entre el 70 y 80%. También observaron que si el pH de la solución es menor a 3, la efectividad del aluminio disminuye. Saunders (1989) reportó que la dosis óptima de un coagulante está entre 0.8 a 2.0 mg/l como Al, que es equivalente a una dosis de alúmina de 8.9 a 22.2 mg/l.

Bishop *et al.* (1987) probaron a nivel planta una alúmina comercial y aluminio recuperado, con los siguientes resultados. El hierro y manganeso fueron los metales que se presentaron en concentraciones altas en el coagulante recuperado, sin embargo, fueron removidos en el tren de tratamiento. En el agua sedimentada, la turbiedad y el manganeso presentaron valores elevados cuando se utilizó aluminio recuperado. En términos generales, se reporta que la calidad del agua fue igual en ambos casos.

Joan Pera I. Libre (1991) realizó pruebas a nivel de planta piloto para la recuperación de aluminio, obteniendo un ahorro del 46.5% del coagulante fresco, ya que sólo acidificaron el 50% del lodo producido a un pH aproximadamente de 3.5, esto se realizó con la finalidad de evitar la extracción de otros metales. Si se hubiese utilizado el 100% del lodo se hubiera recuperado 93% del coagulante. Este estudio no involucró la incidencia de la materia orgánica en la recuperación del coagulante. La materia orgánica es otro factor a controlar en el coagulante recuperado, ya que su incremento repercute en el color de la solución del aluminio recuperado y en el consumo de ácido sulfúrico (Cornwell y Susan, 1979).

Pruebas en laboratorio del IMTA

Pruebas realizadas en laboratorio, han demostrado que el volumen de lodo generado en las plantas potabilizadoras que utilizan sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), se puede reducir hasta un 87% mediante un espesamiento por gravedad o un acondicionamiento químico, eliminando gran parte de su contenido de agua, lo que facilita su manejo y disposición.

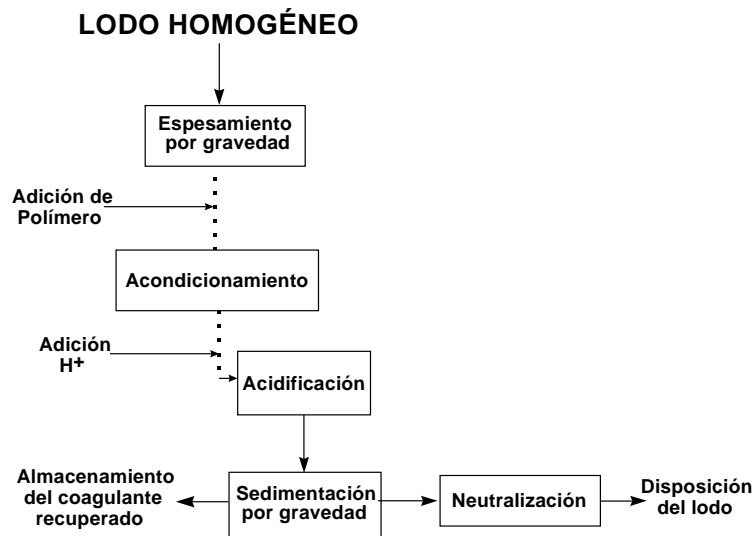


Figura 1. Tren de tratamiento propuesto a nivel laboratorio

También se ha demostrado la factibilidad de extraer el 90% del coagulante de los lodos mediante una acidificación con ácido sulfúrico, reduciendo el volumen hasta en un 97%. Con la aplicación combinada de los procesos anteriores en lodo proveniente de la planta potabilizadora de Los Berros, se obtuvo a nivel laboratorio (Figura 1) una reducción de volumen de lodo homogéneo a lodo acidificado del 98.5% con una recuperación de aluminio del 91.6%.

Lo anterior ofrece amplias expectativas de ser utilizado nuevamente como coagulante en el agua cruda, ya que se obtuvieron resultados muy favorables al aplicarlo en pruebas de jarras, donde la turbiedad y color residual fueron de 2 UNT y 6 UPtCo en el agua.

CARACTERIZACIÓN DEL LODO

Las pruebas que se realizaron en este trabajo tomaron como base el lodo que se genera en la planta potabilizadora de Los Berros, del sistema Cutzamala, Edo. de México, la cual suministra agua potable a las ciudades de Toluca y México.

En la Tabla 2 se presentan las características del lodo, el cual está constituido principalmente por sólidos suspendidos (84.9%), además, destacan los metales aluminio, hierro y sílice. Adicionalmente, se observa una baja concentración de sólidos volátiles que muestra la escasa presencia de materia orgánica.

Tabla 2. Caracterización del lodo de la planta potabilizadora de Los Berros

Muestra	pH	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	ST (g/L)	SST (g/L)
1	6.95	165	10.4	0.803	3.6000	3.2840
2	6.64	56	---	---	---	0.4160
3	7.11	34	2.62	0.390	0.3357	0.2650
4	7.01	48	2.89	0.113	0.9465	0.7884
5	7.12	44	2.19	0.115	1.1170	0.8990
6	7.17	64	---	---	1.8010	1.6310

Al=Aluminio; Fe=Hierro; Mn=Manganeso; ST=Sólidos totales; ST=Sólidos totales; SST=Sólidos suspendidos totales; ---No determinado.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA PILOTO (PPL)

Con base en los resultados anteriores se diseñó una planta piloto de tratamiento de lodos en continuo (Figura 2) en la cual se desarrollaron pruebas de reducción de volumen y recuperación de aluminio, considerando el tren de lodo homogéneo espesado, acondicionado y acidificado con un gasto de operación de 4 L/min de lodo a la entrada del espesador. El objetivo de utilizar una planta piloto es el de comprobar la factibilidad técnica del tren de tratamiento seleccionado. Como se muestra en la Figura 2, la PPL se conectó a la planta piloto de tratamiento de agua, la cual opera con un gasto de 1 L/s, y se localiza en las instalaciones de la planta potabilizadora de Los Berros. La finalidad de esta conexión fue que el lodo homogéneo generado en el sedimentador fuera enviado al espesador y la solución de aluminio recuperada se incorporara a la mezcla rápida de agua, operando en forma continua.

La planta piloto se construyó de acrílico de 6 mm de espesor con bases tubulares metálicas y fue colocada sobre una plataforma.

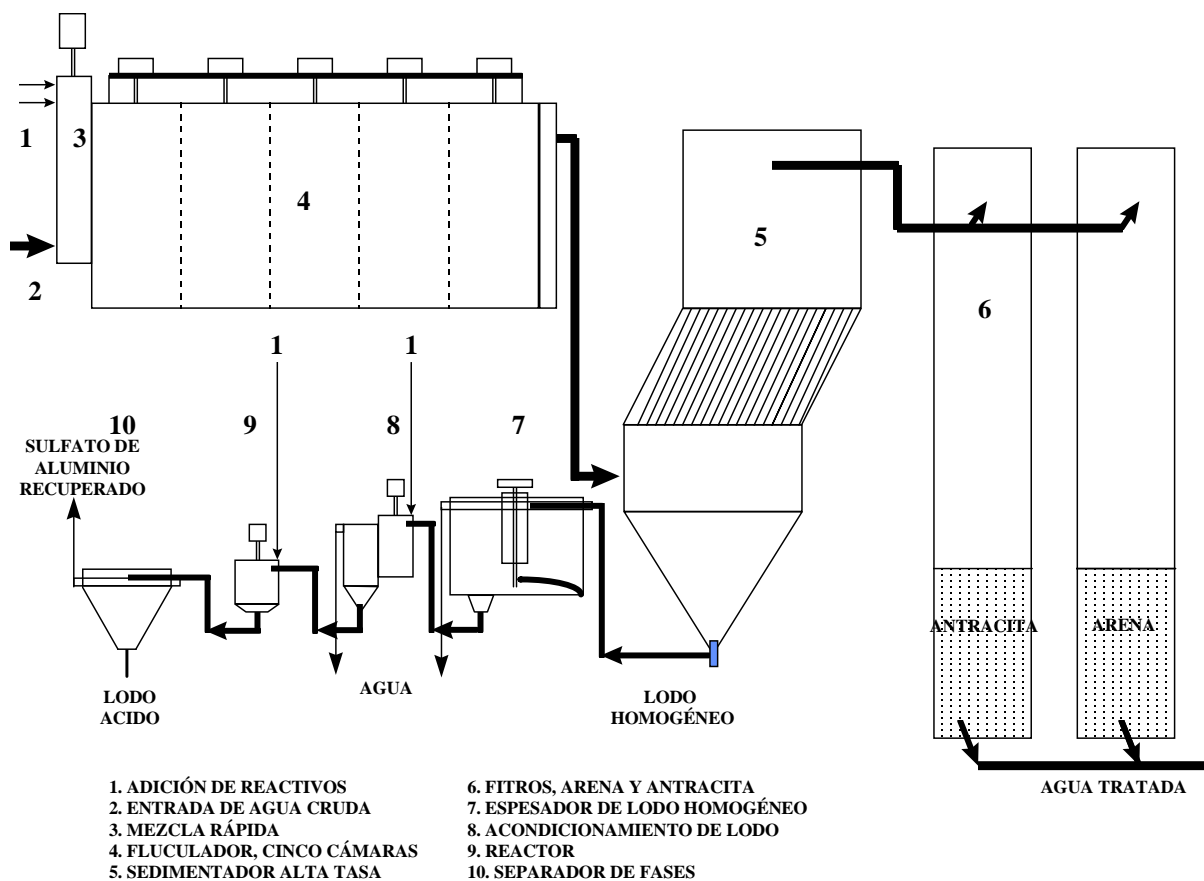


Figura 2. Sistema de tratamiento de agua y lodo a nivel piloto.

METODOLOGÍA

Durante la operación de la planta piloto, el agua cruda presentó turbiedades de 10 a 20 UTN, por lo que el contenido de sólidos suspendidos fue bajo, lo que obligó a operar en continuo la planta piloto de agua, el espesador a un flujo de 1 L/min y la planta de lodo por lapsos de 3 a 4 horas diarias. Una vez que se obtuvo el suficiente volumen de lodo homogéneo espesado, se procedió a trabajar de la siguiente manera:

Pruebas de laboratorio

Se requirió de la realización de pruebas a nivel laboratorio para determinar requerimientos de reactivos y parámetros indicativos de reducción de volumen de lodo y recuperación de aluminio, que sirvieron como base para operar la PPL.

- a) Se realizó la acidificación diluida y concentrada de lodo homogéneo espesado y se determinó la recuperación del aluminio.
- b) Se determinó la dosis de polímero mediante el acondicionamiento de cuatro litros de lodo, además, se calculó el porcentaje de reducción de volumen de lodo.
- c) Se realizó la acidificación diluida y concentrada de lodo homogéneo espesado acondicionado y se determinó la recuperación del aluminio, la cantidad de ácido sulfúrico requerido y el porcentaje de reducción de volumen de lodo.

Los valores de las dosis de polímero y de ácido sulfúrico obtenidas en las pruebas anteriores se utilizaron para operar la PPL.

Pruebas en planta piloto de lodos

La PPL operó en continuo de la manera siguiente:

- a) Se ajustó el flujo de lodo homogéneo espesado y de acuerdo a éste, las dosis de polímero y la de ácido sulfúrico requeridas.
- b) El control de la reducción de volumen de lodo por acondicionamiento, se realizó mediante la válvula de salida de lodo acondicionado.
- c) El control de la acidificación se realizó mediante la medición del pH.
- d) Se determinó la reducción del volumen de lodo homogéneo espesado a lodo acidificado y la recuperación de aluminio.

Comparando los resultados obtenidos en las pruebas a nivel laboratorio con los de la PPL, se determinó la eficiencia de la esta última.

Determinación de parámetros

Con la finalidad de establecer el posible impacto en la calidad final del agua final al ser tratada con el coagulante recuperado, así como su efectividad, se realizó un seguimiento de la posible acumulación de metales traza y de otros parámetros de control. En la Tabla 3 se muestra el parámetro analizado por tipo de muestra.

Tabla 3. Análisis de parámetros por tipo de muestra

Parámetro	Agua Cruda	Coagulante recuperado	Agua tratada
Turbiedad	Si	No	Si
Color	Sí	No	Sí
pH	Si	Si	Si
Hierro	Sí	Sí	Sí
Manganeso	Si	Si	Si
Aluminio	Sí	Sí	Sí
Cobre	Si	Si	Si
Arsénico	Sí	Sí	Sí
ST	Si	Si	Si
SST	Sí	Sí	Sí
Cl residual	No	No	Si

RESULTADOS

Reducción de volumen

Con la finalidad de evaluar la reducción del volumen de lodo efectuada por la planta piloto, ésta se comparó con los resultados obtenidos a nivel laboratorio. En la Tabla 4 se muestran estos resultados.

Tabla 4. Evaluación de la reducción de volumen de lodo

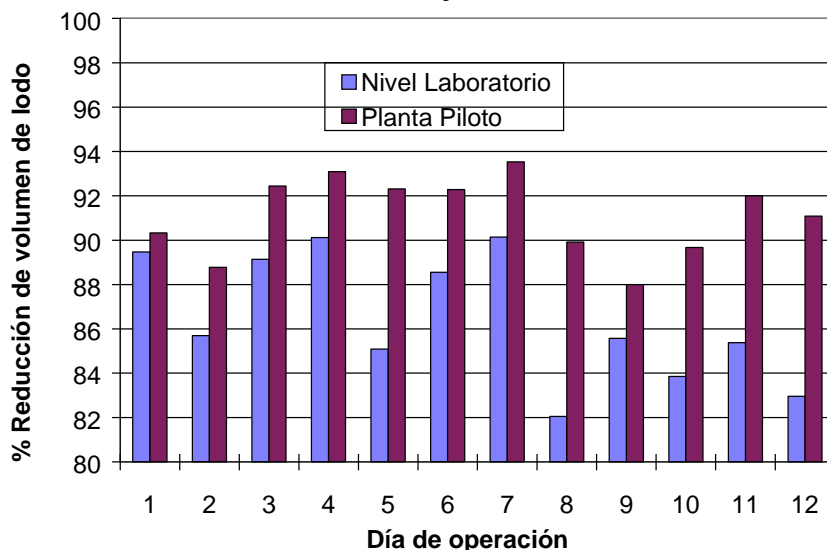
Día	LHE Vol. (L)	Acondicionamiento				Acidificación				% Reducción Total	
		N.L.		PPL		N.L.		PPL		N.L.	P.P.L
		Vol. (L)	% Red.	Vol. (L)	% Red.	Vol. (L)	% Red.	Vol. (L)	% Red.		
1	155	60.71	60.83	82.20	46.97	16.39	73.0	15.0	81.75	89.47	90.33
2	130	42.25	67.50	73.90	43.15	18.59	56.0	14.6	80.24	85.70	88.77
3	135	47.93	64.50	67.80	49.78	14.67	69.4	10.2	84.96	89.14	92.44
4	165	53.63	67.50	61.40	62.79	16.30	69.6	11.4	81.43	90.12	93.09
5	130	61.75	52.50	52.60	59.54	19.39	68.6	10.0	80.99	85.04	92.31
6	186.5	77.40	58.50	91.70	50.83	21.36	72.4	14.4	84.30	88.55	92.28
7	125	53.13	57.50	48.70	61.04	12.13	76.8	8.1	83.37	90.14	93.52
8	108	61.43	43.12	59.10	45.28	15.36	75.0	10.9	81.56	82.05	89.91
9	130	84.50	35.00	68.70	47.15	18.76	77.8	15.6	77.29	85.57	88.00
10	122	57.95	52.50	67.00	45.08	19.70	66.0	12.6	81.19	83.85	89.67
11	100	43.00	57.00	40.60	59.40	14.62	66.0	8.0	80.30	85.38	92.00
12	120	72.00	40.00	55.40	53.83	20.45	71.6	10.7	80.69	82.96	91.08
Prom.			54.70		52.07		70.18		81.51	86.50	91.12

N.L. = Nivel laboratorio; P.P.L. = Planta piloto de lodo; LHE = Lodo homogéneo espesado

La reducción del volumen por acondicionamiento fue menor (2.7%) en la PPL, en comparación con las pruebas efectuadas a nivel laboratorio. Sin embargo, en las tres primeras pruebas existió una mayor diferencia, ya que el equipo no efectuó adecuadamente la sedimentación, por lo que se

introdujo una mampara a media altura para permitir que los flóculos formados sedimentaran más rápidamente y se compactaran más. Una vez realizado este cambio, el porcentaje de reducción fue semejante e incluso en algunos casos mejor. La reducción del volumen por acidificación fue en promedio 10% mayor en la planta piloto que a nivel laboratorio.

En términos globales la reducción a nivel laboratorio fue del 86.50% y a nivel planta piloto de un 91.12% en promedio, siendo éste último un 5% mejor (Gráfica 1).



Gráfica 1. Porcentaje de reducción de volumen de lodo

Recuperación de aluminio

Para evaluar la recuperación del aluminio, primero se determinó la cantidad de aluminio que se puede extraer del lodo homogéneo espesado mediante una acidificación diluida. Cabe aclarar que cuando se realiza la acidificación se obtiene un sobrenadante con el aluminio que se recupera y un lodo ácido que contiene aluminio no recuperable, por lo que, en la Tabla 5 se muestran los volúmenes de solución recuperada de sulfato de aluminio y las concentraciones de aluminio encontradas.

Una vez obtenida la cantidad de aluminio recuperable del lodo homogéneo espesado, se determinó la cantidad de aluminio recuperado en la planta piloto y se estableció un porcentaje de recuperación, el cual fue de un 90.0% en promedio. En la Gráfica 2 se muestra una comparación del aluminio obtenido a nivel laboratorio (que se puede recuperar) y en planta piloto (que se recuperó), así como el porcentaje que representa esta recuperación.

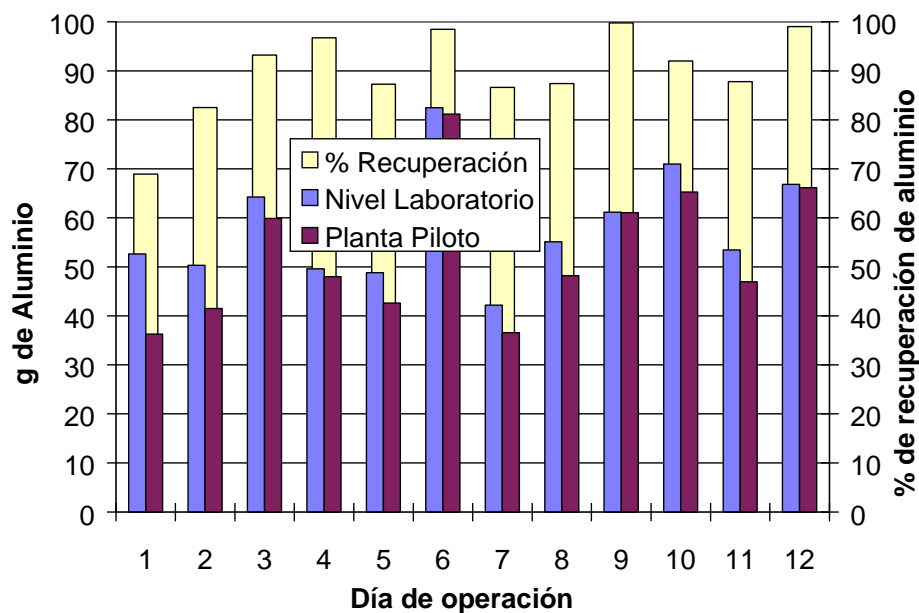
El porcentaje de recuperación obtenido en pruebas previas a nivel laboratorio fue del 89% y en este caso a nivel piloto fue del 90.0%, por lo que se puede establecer que el proceso propuesto a nivel piloto es el adecuado para recuperar aluminio.

Tabla 5. Porcentaje de recuperación de aluminio

Día	LHE (L)	Nivel Laboratorio			Planta piloto de lodos			% de Recp.
		SA (L)	Al (mg/L)	Al (g)	SA (L)	Al (mg/L)	Al (g)	

1	155.0	138.57	380	52.656	67.2	540	36.288	68.92
2	130.0	117.00	430	50.310	59.3	700	41.510	82.51
3	135.0	121.23	530	64.252	57.6	1040	59.904	93.23
4	165.0	150.32	330	49.606	50.0	960	48.000	96.76
5	130.0	116.22	420	48.812	42.6	1000	42.600	87.27
6	186.5	168.22	490	82.429	77.3	1050	81.165	98.46
7	125.0	117.13	360	42.167	40.6	900	36.540	86.66
8	108.0	95.04	580	55.123	48.2	1000	48.200	87.44
9	130.0	115.44	530	61.183	53.1	1150	61.065	99.81
10	122.0	105.89	670	70.950	54.4	1200	65.280	92.01
11	100.0	89.10	600	53.460	32.6	1440	46.944	87.81
12	120.0	107.76	620	66.811	44.7	1480	66.156	99.02

LHE = Lodo homogéneo espesado; SA = Solución ácida recuperada



Gráfica 2. Recuperación de aluminio

Acumulación de contaminantes

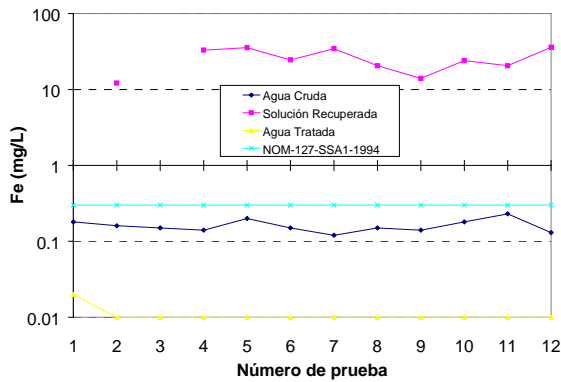
Algunos metales, tales como el arsénico, mercurio y plomo son disueltos junto con el aluminio durante la acidificación del lodo. La importancia de la determinación éstos, se debe a que son perjudiciales para la salud humana.

Se observó que después de 10 ciclos de recircular la solución ácida, ésta no presentó un incremento importante en la concentración de los metales traza. Además, la calidad final de agua no se vio afectada, como se muestra al comparar las pruebas uno y tres, donde se utilizó sulfato de aluminio fresco, con las pruebas en las que se utilizó el aluminio recuperado.

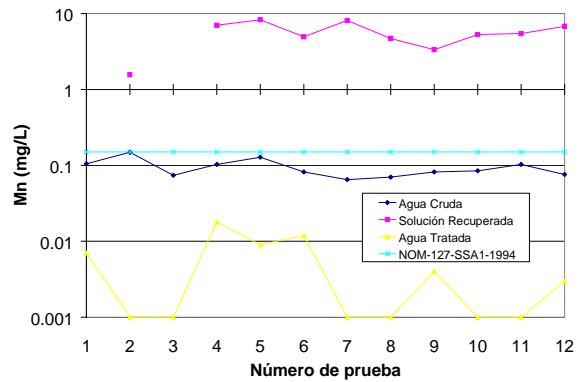
Otro aspecto importante es la evaluación del proceso de tratamiento de agua, la cual generalmente se realiza mediante la determinación de la remoción de turbiedad y de color. La

utilización del coagulante recuperado, que tiene una turbiedad y color elevado, no influyó en el proceso de potabilización.

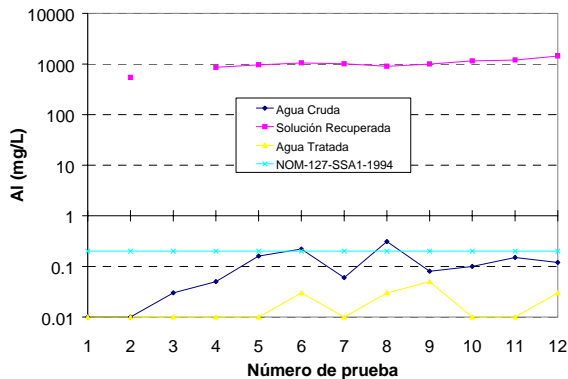
Esto indica que el aluminio recuperado es tan efectivo para remover turbiedad y color como el sulfato de aluminio fresco. Además, el agua tratada con sulfato de aluminio recuperado cumple con los niveles estipulados por la Norma NOM-127-SSA1-1994 con relación a los parámetros analizados.



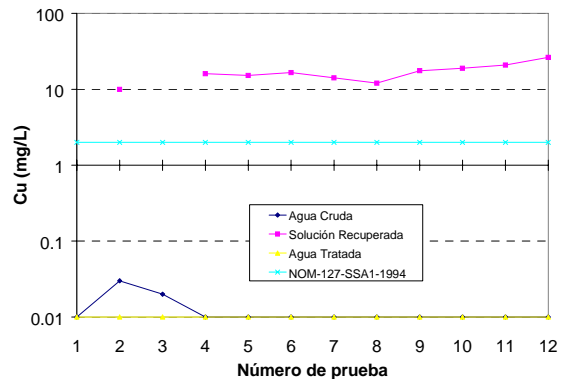
Gráfica 3. Hierro en el sistema de tratamiento de agua



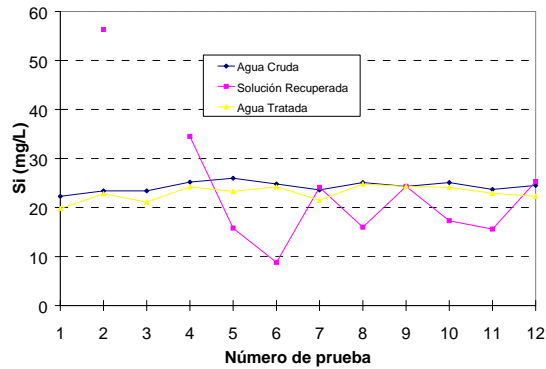
Gráfica 4. Manganeso en el sistema de tratamiento de agua.



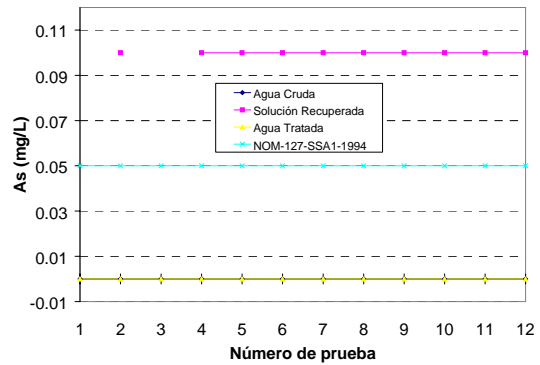
Gráfica 5. Aluminio en el sistema de tratamiento de agua.



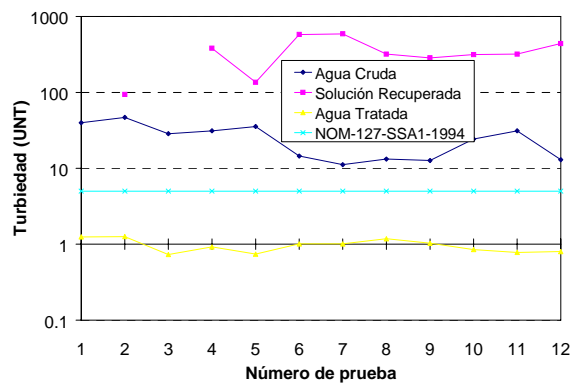
Gráfica 6. Cobre en el sistema de tratamiento de agua.



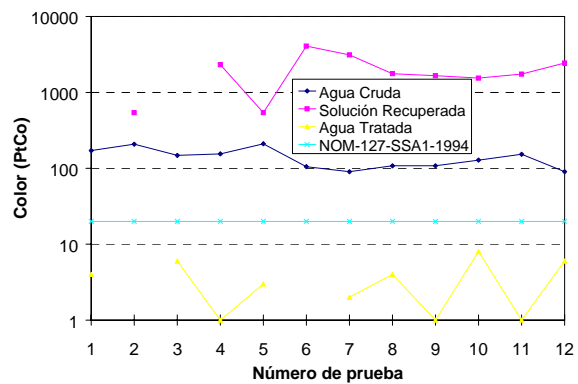
Gráfica 7. Sílice en el sistema de tratamiento de agua.



Gráfica 8. Arsénico en el sistema de tratamiento de agua.



Gráfica 9 Remoción de turbiedad en el sistema de tratamiento de agua.



Gráfica 10 Remoción de color en el sistema de tratamiento de agua.

CONCLUSIONES

1. Debido a la baja turbiedad del agua (< 20 UNT), la generación de lodo fue mínima, por lo que el sistema no se operó en continuo.
2. La recuperación de aluminio fue de un 89.99% y la reducción del volumen de lodo en un 91.12%.
3. El porcentaje de reducción del volumen de lodo a disponer mejoró a nivel piloto en un 9%.
4. El proceso propuesto a nivel planta piloto, es el adecuado para la disminución del volumen de lodos a disponer y la recuperación de aluminio.
5. No se observó acumulación de metales traza en la solución recuperada.
6. El aluminio recuperado fue tan efectivo para remover turbiedad y color como el sulfato de aluminio fresco.
7. El agua tratada con sulfato de aluminio recuperado cumplió con los niveles estipulados por la Norma NOM-127-SSA1-1994 en relación a los parámetros analizados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado con el apoyo de la empresa Vitro PQ Química y de la Comisión Nacional del Agua, en particular al personal de la planta potabilizadora de Los Berros, Estado de México.

BIBLIOGRAFÍA

1. AWWA (1991). *Coagulant Recovery: A Critical Assessment*, American Water Works Association, Denver, Colorado, USA.
2. Albrecht A. E. (1972). "Disposal of Alum Sludges", *Journal American Water Works Association*, No. 1, pp. 46-52.
3. Bisop Mark M., A. T. Rolan, Tom L. Bailey and David A. Cornwell (1987). "Testing of Alum Recovery for Solids Reductin and Reuse", *Journal American Water Woks Association*, No. 6, pp. 76-83.
4. Chen Ben H. H., Paul H.King and Clifford W. Randall (1976). "Alum Recovery from representative Water-Treatment Plant Sludges", *Journal American Water Works Association*, U.S.A., pp. 24-207.
5. CNA (1998). *Inventario de Plantas Potabilizadoras 1998*, Gerencia de Proyectos de Agua Potable y Saneamiento, Cd. de México.
6. Cornwell, D. A. y Susan, J. A. (1979). "Characteristics of Acid-Treated Alum Sludge". *Journal American Water Works Association*. No. 10, pp. 604-608.
7. David A. Cornwell and James A. Susan (1979). "Characteristics of acid-treated alum sludge", *Journal American Water Works Association*, No. 10, 1979, pp. 604-608.
8. Diario Oficial de la Federación (1996). *Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse para su potabilización*.
9. Issac P.C. and Vahidi I. (1961). "The Recovery of Alum Sludge", *Proc. Soc. Water Treatment and Examination*, No. 91.
10. Joan Pera I. Libre (1991). "Recuperación en una planta piloto del sulfato de aluminio de un fango aluminoso producido por una potabilizadora", *Tecnología del Agua*, Año XI, No.79, pp. 17-26.
11. Saunders, F.M. (1989). "Coagulant Recovery from Alum Sluges at Nort Area Plan", Final Report for Bureaw of Water, City of Atlanta, Ca.
12. Slechta, A.F. and Culp, G.L. (1967). "Water Reclamation studies at tha south Tahoe Public Utility Doistricts", *Jour. WPCF*, 39 (5), pp 787-814.
13. Sturmm, W. O'Melia, C.R. (1968). "Stiochiometry Coagulation", *Journal American Water Woks Association*, pp. 514-539.
14. Wang L.K. and Yang J.K. (1975). "Total Waste Recycle System for Water Purification plant Using Alum as Primary Coagulant", *Res. Recovery and Cons.*, pp 67-84
15. Westerhoff, G. P. Alum recycling (1973). "Alum Recyvlng: An Idea Whose Time Has Come?", *Water and Wastes Engineering*. No. 12, pp. 28-31 y 48.