

# TRATAMIENTO DE LODOS DE UNA POTABILIZADORA PARA LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO Y HIERRO COMO COAGULANTES

Thelma Beatriz Pavón Silva (\*)

Profesora de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México Paseo Colón y Paseo Tolloca s/n Toluca Estado de México. [tbps17@uaemex.mx](mailto:tbps17@uaemex.mx)

Víctor F. Pacheco Salazar

Profesor de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México Paseo Colón y Paseo Tolloca s/n Toluca Estado de México. [pacheco@multi-net.com](mailto:pacheco@multi-net.com)

Luz María Cárdenas Zuazo

Maestría en Ciencias Ambientales Facultad de Química UAEM

## RESUMEN

Se caracterizaron dos tipos de lodo (donde se utiliza  $\text{FeCl}_3$  y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , de acuerdo a los parámetros: hierro, aluminio, manganeso, calcio, magnesio, zinc, cobre, níquel, plomo, velocidad de sedimentación, densidad, sólidos suspendidos, gravedad específica, humedad y pH. Posteriormente, se realizó la recuperación del aluminio y hierro utilizando los ácidos nítrico, clorhídrico y sulfúrico. Se realizó una especiación química para conocer los compuestos formados de acuerdo a las condiciones aplicadas. Después se aplicaron los coagulantes recuperados a un proceso de coagulación – floculación en laboratorio para evaluar su eficiencia. Así mismo se realizaron análisis preliminares de toxicidad con semillas de lechuga evaluando el crecimiento en su raíz con diversos porcentajes de lodo.

Se determinó que no existe presencia de metales pesados superiores a los marcados en la NOM-004-ECOL-2001, pero hay concentraciones de 19600 mgAl/kg de lodo y 37000 mgFe/kg de lodo siendo la disponibilidad variable de acuerdo al ácido utilizado en su extracción, los porcentajes de recobro de las especies de interés fueron al usar ácido clorhídrico en un 57% para aluminio y 94% para hierro.

En cuanto a las pruebas de toxicidad se estimuló el crecimiento de la semilla por lo que se recomienda una evaluación más precisa

Palabras clave: recuperación de coagulantes, lodos de potabilización, reuso de coagulantes, toxicidad de lodos.

## INTRODUCCIÓN

En México existen 256 plantas potabilizadoras, las cuales tratan  $73.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , 165 de éstas utilizan algún tipo de coagulante, principalmente el sulfato de aluminio el promedio en la producción de lodo es de  $0.52 \text{ m}^3/\text{s}$  o  $44928 \text{ m}^3/\text{d}$  en base húmeda (CNA 2000).

En 1987 investigadores reportan (Committee Report), la importancia de realizar investigación relacionada con la disposición de lodos provenientes de la potabilización del agua debido al alto contenido de aluminio adicionado como coagulante recomendando estudios relacionados con la estabilidad evitando efectos al ambiente.

En Uganda Kaggawa y colaboradores (2001), estudiaron el efecto de la descarga de lodo obtenido de un coagulante de aluminio en el lago Victoria, encontrando anomalías en las raíces de algunas plantas y deficiencia de fósforo atribuyendo esto último a la presencia de aluminio que impide la correcta asimilación de fósforo por las raíces de la planta.

Castañeda en 1998 realiza estudios de toxicidad con lodo generado de tratamiento de agua potable aplicando tres metodologías: prueba de toxicidad aguda utilizando *Daphnia magna* (pulga de agua), prueba de toxicidad crónica utilizando *Panagrellus redivivus* (nematodo de sedimento) y prueba de toxicidad sobre la elongación de la raíz utilizando semillas de *Lactuca sativa* (lechuga romana) para determinar dosis inhibitoria de crecimiento. Sus resultados indican una baja toxicidad del lodo.

Por otro lado y utilizando un lodo generado a partir de sales de hierro, Zhang y Wang (2000), estudian el posible mecanismo de mutagenicidad hacia el ser humano considerando los compuestos orgánicos tóxicos que son removidos del agua a potabilizar.

Chen en 1976 comenta la dificultad de establecer una metodología de recuperación de aluminio debido a la gran diversidad de calidad de la fuente de abastecimiento antes de ser tratada, sin embargo considera una variable crítica el tipo de floculador con el que cuente el tratamiento de agua a potabilizar.

Otros investigadores enfocaron sus estudios a determinar las condiciones óptimas para reducir el volumen del lodo, ya que en él se forman compuestos que almacenan agua, por lo que el acondicionamiento del lodo para la deshidratación del mismo es importante (Sandoval *et al.*, 1998).

Soberanis *et al.* 2000, diseñaron un tratamiento para la reducción de volumen de lodo mediante espesamiento por gravedad acondicionamiento y acidificación (Castañeda 1998) encontrando variación en su composición debido a la acidificación.

Metodología de recuperación de especies como aluminio y hierro han sido propuestas por Cornwell y James (1979), Chu (1999), Kagaya (1999) y Petruzelli (2000), éstos dos últimos autores con el fin de reutilizarlo como lo hizo Chu quien lo aplico en la eliminación de plomo en agua obteniendo una eficiencia de remoción de plomo de 94%.

El objetivo de este trabajo es la recuperación de los elementos Fe y Al de lodo procedente del tratamiento de agua para consumo humano

## METODOLOGÍA

Se utilizaron dos tipos de lodo, uno extraído de una planta potabilizadora localizada en Ixtapan de la Sal, Estado de México en la que el coagulante utilizado es sulfato de aluminio (25 mg/L) y otro obtenido de la potabilizadora del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) ubicada en San Cayetano, Estado de México en la cual se utiliza cloruro férrico (25mg/L).

Se caracterizaron los lodos determinando concentraciones de aluminio total, hierro total, humedad, velocidad de sedimentación, pH, sólidos suspendidos, manganeso, calcio, magnesio, zinc, cobre, níquel, arsénico, cadmio, cromo, cobalto, plomo, mercurio, para realizar una comparación con los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL-2001 de *Protección ambiental. Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.*

Los metales se cuantificaron, pesando aproximadamente 10 gramos de lodo, agregando 5 mL de ácido nítrico concentrado, para realizar una digestión fuerte. La muestra digerida se filtró y se aforo a 100 mL, midiendo el metal presente en un equipo de absorción atómica, Varian AA 10 Plus.

La recuperación del coagulante en el lodo se realizó aplicando 50 mL del ácido correspondiente (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> o HNO<sub>3</sub>) a 50 mL de muestra, se agitó durante 30 minutos y se dejó sedimentar durante 3 horas, se observaron dos fases, la inferior que contiene el lodo al que se le extrajo el metal y la superior considerada el sobrenadante que contiene al metal de interés y que fue utilizado como **el coagulante recuperado**, siendo este un líquido de color amarillo sin apariencia visual de sólidos suspendidos, posteriormente se midió turbidez, pH y sólidos suspendidos totales.

Mediante el programa MEDUSA (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms), técnica de computo basada en determinar las posibles especies químicas formadas en disolución bajo ciertas características se trabajó para determinar la posible química desarrollada por el aluminio y hierro de acuerdo a las condiciones aplicadas.

Para probar los coagulantes recuperados, se preparo un lote de agua cruda en el laboratorio con una turbiedad aproximada de 90 UTN, se obtuvo la dosis optima de coagulante comercial (sulfato de aluminio y cloruro férrico) para el agua preparada y utilizar esta dosis como un control para las pruebas siguientes de reutilización de los coagulantes recuperados.

Se aplico el coagulante recuperado en dosis de: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 mg/L aplicando la prueba de jarras de acuerdo a los siguientes tiempos y gradientes: mezcla rápida de 200 rpm durante 30 segundos, mezcla lenta de 40 rpm durante 5 minutos y la sedimentación de 10 minutos determinando la turbiedad residual y el pH al final de la prueba.

La eficiencia se determinó como se muestra en la formula siguiente:

$$E(\%) = \frac{\text{Turbiedad}_{\text{inicial}} - \text{Turbiedad}_{\text{final}}}{\text{Turbiedad}_{\text{inicial}}} * 100 \quad \text{ecuación (1)}$$

**Pruebas preliminares de toxicidad.-** Se realizó la prueba de toxicidad para evaluar la inhibición en el crecimiento de la raíz con semillas de lechuga (*Lactuca sativa*), midiendo y clasificando las semillas de acuerdo al tamaño (20 semillas por caja por duplicado), se sembraron con diluciones del lodo (10, 20, 40, 80 y 100%) y un blanco con agua destilada en cajas petri un total de 20 semillas, se incubaron ocho días y se midió la longitud de la raíz, realizando un análisis estadístico.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto a la caracterización de los lodos los resultados muestran valores que no rebasan los límites máximos permisibles de la norma NOM-004-ECOL-2001 por lo tanto los lodos no significan un daño hacia el ambiente por su contenido en metales como arsénico, cadmio, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc, pero en la cuantificación de aluminio y hierro los valores son muy altos y por lo tanto esto si puede representar un daño a los ecosistemas.

Cech y Montera (2000) cuantificaron aluminio en lodo producido en una potabilizadora de E.E.U.U. ellos encontraron valores de 530 µg/L, evaluaron la flora y encontraron que los lodos dispuestos sobre sembradíos no les permitía a las plantas la asimilación de fósforo y que en la población a la que se le suministraba agua que pasaba por estos sembradíos se les manifestaban desordenes neuro-esqueléticos; el valor obtenido por estos investigadores está reportado respecto a volumen, ahora bien, en la cuantificación realizada al lodo de aluminio muestreado para este trabajo (19 600 mg/kg) ese valor esta muy por debajo del de este trabajo, por lo que debe poner atención al manejo de estos lodos producidos en la potabilización.

**Tabla 1. Cuantificación de metales en los lodos utilizados y comparación con la NOM-004-ECOL-2001**

Metal	Lodo con Al	Lodo con Fe	<b>NOM-004-ECOL-2001</b>	
	mg/kg en base seca		mg/kg en base seca	
			Bueno	Excelente
Arsénico	0.025 ± 0.002	< 0.0015	75	41
Cadmio	0.059 ± 0.001	0.724 ± 0.002	85	39
Cromo	0.463 ± 0.021	0.082 ± 0.010	3000	1200
Cobre	1.5 ± 0.2	3.2 ± 0.3	4300	1500
Plomo	50 ± 12	184 ± 15	840	300
Mercurio	0.0075 ± 0.0002	0.009 ± 0.0004	57	17
Níquel	102 ± 32	45 + 14	420	420
Zinc	76 ± 5	29 ± 1	7500	2800

Aluminio	<b>19600 ± 30</b>	400 ± 23	NA	NA
Hierro	317.5 ± 1.2	<b>37000 ± 62</b>	NA	NA
Manganeso	760 ± 13	470 ± 11	NA	NA
Calcio	3190 ± 20	2780 ± 32	NA	NA
Magnesio	2180 ± 10	2190 ± 12	NA	NA

NA. No aplica

Es muy importante considerar las concentraciones de elementos que pueden servir como nutrientes y que no son considerados por la norma como Ca, Mg y Mn. En la tabla 2 se muestran los parámetros determinados en los lodos en cuanto a humedad esta en 87% para lodo de aluminio y 80% para lodo de hierro, se observa baja el pH es cercano a la neutralidad los sólidos sedimentables son muy diferentes quizá a que los lodos de hierro se compactan más rápidamente contienen una cantidad similar de sólidos suspendidos así como la densidad.

**Tabla 2. Caracterización del lodo procedente de potabilizadoras**

Parámetro	Lodos con aluminio	Lodos con hierro
Humedad	86.7 ± 1.5	79.7 ± 2.0
pH	7.88 ± 0.13	8.10 ± 0.20
Sólidos sedimentables (mL/L en 30 min)	98 ± 1	20 ± 2
Sólidos suspendidos (mg/L)	29.67 ± 0.35	30.58 ± 0.64
Densidad (g/mL)	1.15 ± 0.01	1.10 ± 0.01

**Determinación de aluminio y hierro disponible.-** En esta prueba se realizó la cuantificación del aluminio y hierro disponible en el lodo, pero no significa que lo cuantificado es lo mismo que puede ser extraído para ser reusado, esto se debe a que esta prueba se hace a micro escala y conforme se aumenta los volúmenes de lodo y ácido varía la extracción posible del metal de interés. Esta prueba se realizó trabajando con 100 mL de muestra y agregando el ácido diluido al 30 %, para posteriormente, mantenerlo en agitación y dejar sedimentar, en el sobrenadante es cuantificado el aluminio o hierro disponible.

En la tabla 3 se puede observar a cuantificación de aluminio y hierro y el porcentaje disponible en el lodo. Partiendo de una concentración inicial de aluminio en el lodo 2603 ± 11 mg de Al/L de lodo y una concentración de 2600 ± 15 mg de Fe/L de lodo en el lodo de hierro.

La cuantificación de aluminio y el porcentaje disponible con el ácido clorhídrico y el nítrico presentaron recobros similares de 57 y 53% respectivamente y el ácido sulfúrico da el menor recobro de aluminio con un 25%

Para el hierro, el porcentaje disponible es mayor con los ácidos clorhídrico y nítrico 94.5% y 93.2% del hierro contenido en el lodo y el ácido sulfúrico solo considera disponible el 36.2%.

**Tabla 3. Cuantificación de aluminio disponible**

Tipo de lodo	Aluminio disponible			Disponibilidad		
	HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HCl	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	mg/L			%		
Lodo con aluminio	1498 ± 22	1393.5 ± 12	665.9 ± 2.3	57	53	25
	Hierro disponible			Disponibilidad		
Lodo con hierro	2458 ± 12	2422.9 ± 11.2	943.1 ± 10.2	94.5	93.2	36.2

**Cuantificación del aluminio en coagulante recuperado.**- Una vez recuperado el aluminio de los lodos y haciendo la comparación con lo recuperado por otros investigadores, se presenta en la tabla 4 la variación de recuperación del metal, ya que la naturaleza de cada lodo es distinta, cada lodo necesitará diferente tipo y cantidad de ácido, en algunas pruebas el ácido utilizado fue sulfúrico, mientras que en otros estudios el ácido que dio mejores resultados fue el nítrico.

Para el caso de hierro son pocos investigadores quienes han hecho recuperación de hierro ya que actualmente (2003) son pocas las potabilizadoras utilizan cloruro férrico. Como se puede observar el ácido sulfúrico es uno de los más utilizados por los autores; sin embargo, para el lodo utilizado en este trabajo fue el que presentó menores eficiencias de recuperación.

**Tabla 4 Comparación de la recuperación de aluminio de diversos autores**

Autor	Recuperación de aluminio		Ácido utilizado
	% p/p		
De este trabajo	63		HCl
De este trabajo	25		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
De este trabajo	68		HNO <sub>3</sub>
Cornwell y Susan	65 – 90		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Issac y Vaihidi	60		ND
Webster	53 – 83		HNO <sub>3</sub>
Saunders	41.1		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Candler	68.1		H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Bishop	74-79		HNO <sub>3</sub>

ND. No Disponible

**Cuantificación del hierro en coagulante recuperado.**- Una vez recuperados los metales de interés y considerándolos como posibles coagulantes se realizó la caracterización analizando pH que en todos los casos fue <1, en cuanto a sólidos suspendidos totales se encuentra entre 10 – 20 mg/L y para turbiedad entre 0.8 – 5.7 UTN.

En cuanto a la especiación química se realizaron los análisis para pH < 2 encontrando en todos los casos la especie predominante de forma iónica es decir aluminio predomina como Al<sup>3+</sup> y hierro como Fe<sup>3+</sup>.

La reutilización de las especies recuperadas en la potabilización de agua en pruebas a nivel laboratorio comparadas con un control de la sal comercial (FeCl<sub>3</sub> y Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> en dosis de 10mg/L), muestran eficiencias de remoción máximas de 95%, que se considera una dosis alta comparada con el control, el cual tiene una eficiencia de 96%. En la tabla 5 se muestran las eficiencias de remoción de turbiedad de los coagulantes recuperados con respecto a los diferentes ácidos.

**Tabla 5. Eficiencias de remoción de los coagulantes recuperados**

Dosis	% remoción de turbiedad aplicando Al recuperado			% remoción de turbiedad aplicando Fe recuperado		
	HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>	HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HNO <sub>3</sub>
10	82.4	87.1	85.2	82.5	76.3	76.4
20	86	87.1	85.3	83.1	76.7	72
30	72	87.3	86.1	78.2	75.2	67.8
40	80.7	88.3	81.9	77	76.5	67.8
50	73.5	92.3	88.8	73.7	71.3	61.5
60	80	88.2	87.2	75.2	73.7	72
70	94.8	88.2	88.5	79.8	74.8	73
80	95.6	88.2	86.3	75.3	NE	NE

NE No evaluado. Turbiedad inicial 90 UTN

En la figura 1, se observa la turbiedad residual en función de la dosis de aluminio recuperado con los diferentes ácidos, en ninguno de los casos se presentan turbiedades menores a 15 UTN, apreciando que la mejor eficiencia es en el aluminio recuperado con ácido clorhídrico. La figura 2 presenta la turbiedad residual para el hierro recuperado teniendo la mejor remoción con el hierro recuperado con ácido sulfúrico, que en 10 mg/L la turbiedad es de 12 UTN.

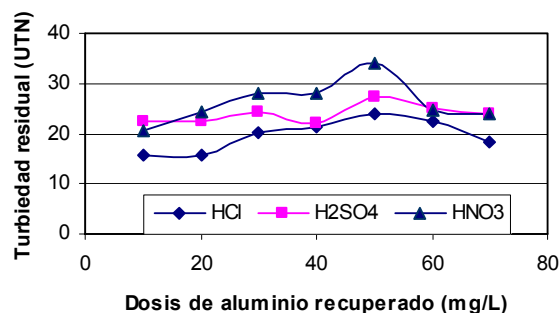


Figura 1. Turbiedad residual de aluminio recuperado

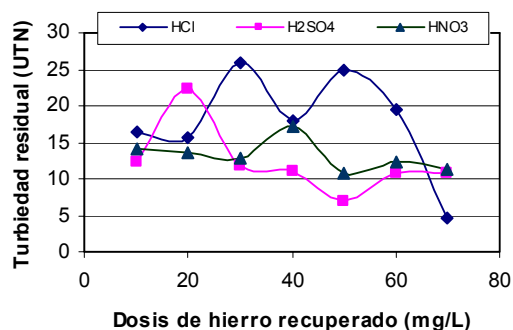
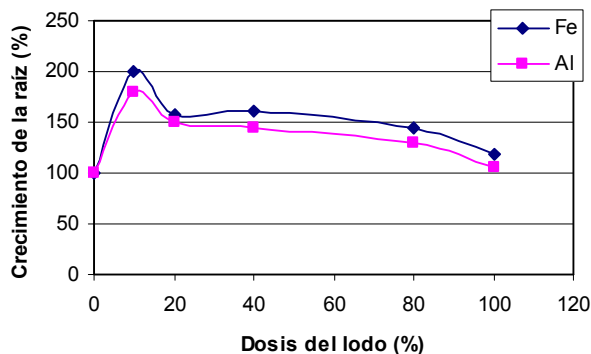


Figura 2. Turbiedad residual de hierro recuperado

La figura 3. muestra el crecimiento de la raíz de la lechuga (*Lactuca sativa*), que es superior al control, lo que indica que no hay inhibición por la dosis de lodo presente, sino que es favorable la presencia de este, esto se puede explicar debido a los elementos presentes que se muestran en la tabla 1, como manganeso, calcio y magnesio y concentraciones bajas de metales como zinc, cadmio y cobre que pueden resultar benéficos para favorecer el crecimiento de la raíz de la lechuga.



**Figura 3. Crecimiento de la lechuga de raíz en función del lodo residual**

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Recuperación de especies fueron posibles
  - HNO<sub>3</sub> 68 % para Al
  - HCl 93 % para Fe
- Predominan las especies iónicas recuperadas
- Turbiedad residual al reuso varía entre:
  - ~15 UTN con Fe (10 mg/L) recuperado con HCL,
  - 7-12 UTN con Al (10mg/L-50mg/L) recuperado con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y
  - ~ 5 con Al (70mg/L) recuperado con HCl.
- Realizar un estudio de costo beneficio
- Continuidad a las pruebas de toxicidad

**Agradecimientos.-** se agradece a la Coordinación General de Investigación y Estudios Avanzados por el registro del proyecto SF013/2002 y la beca para la alumna que realizó parte del trabajo experimental.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bishop.M.M., Rolan.A.T., Bailey.T and Cornwell.D.A (1987).Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. J. AWWA. 87:76-83
- Castañeda, Onia. (1998) determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos. IMTA. 751-765
- Chen.B.H.H., King.P.H and Randall. C.W (1976). Alum recovery from representative water-treatment-plant sludges. 76:204-207
- Chu. W (1999) Lead metal removal by recycled alum sludge. Water research. Vol.33 No.13:3019-3025
- Chu.W (2001). Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge. Water Research. Vol.35 No.13:3147-3152
- Cornwell.D.A and James.S.A (1979) Characteristics of acid-treated alum sludges. J.AWWA. 79:604-608
- Comisión Nacional del agua (1997) Inventario de plantas potabilizadoras en México.
- Kagaya.S., Shimizu. K., Arai. R and Hsegawa. K. (1999) Separation of titanium dioxide photocatalyst in its aqueous suspensions by coagulation with basic aluminium chloride. Water research.Vol.33 No.7:1753-1755
- Kaggwa.R.C.,Mulatelo.C.I., Patrick.D and Okurutu.T.O (2001) The impact of alum discharges on a natural tropical Wetland in Uganda. Water Research. Vol.35 No.3:795-807
- Petruzzelli.D.,Volpe.A.L and Passino.R.(2000) Coagulants removal and discovery from water clarifier sludge. Water Research. Vol 34. No.72:177-2182

Puigdomenech, I. Program MEDUSA (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms) <http://www.inorg.kth.se/Ignasi/Index.html>

Sandoval. Y. L., Montellano. P. L., Martín. D. A., Sánchez. G. L., Santana. R. M y Mora. P. M. (1998) Tratabilidad de lodos producidos en la potabilización del agua. IMTA.

Soberanis. M. P. ,Sandoval. Y. L., Sánchez. L. O y Montellano. P. L. (1999). Análisis mediante microscopía electrónica y difracción de rayos-X de lodos generados en la potabilización del agua durante su tratamiento. IMTA. 727-740

Zhang.G and Wang. Z (2000) Mechanism study of the coagulant impact on mutagenic activity in water. Water Research. Vol 34. No.6:1781-1790