

## TRATABILIDAD DE LOS LODOS PRODUCIDOS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Sandoval Yoval Luciano, Motellano Palacios Leticia, Martín Domínguez Alejandra, Sánchez Guzmán Laura, Santana Ramírez Ma. De Lourdes, Morán Plata Mario.

### Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación de tratamiento y Calidad del Agua. Subcoordinación de Potabilización  
Paseo Cuauhnáguac 8532 Col. Progreso 62550, Jiutepec, Morelos, México  
E-mail: lucsand@chac.imta.mx

### RESUMEN

En México, la potabilización del agua ha originado un problema de manejo y disposición de los lodos generados durante su tratamiento. El principal problema es que estos residuos presentan un alto contenido de agua (90% aproximadamente), además de presentar una pobre capacidad de deshidratación, particularmente aquellos que son producidos por el uso de sulfato de aluminio como coagulante. Actualmente, estos lodos son bombeados y almacenados en presas o dispuestos en terrenos sin ningún tratamiento, provocando un severo daño al ambiente. El IMTA efectuó pruebas a nivel laboratorio con los lodos generados en la planta potabilizadora de los Berros, para la evaluación de un tren de tratamiento que consiste en el espesamiento inicial de los mismos utilizando polímeros comerciales y la acidificación del lodo ya espesado para la recuperación de aluminio. Este procedimiento permite reducir hasta en un 97% el volumen del lodo y recuperaciones mayores del 90% del aluminio, el cual se utilizó nuevamente como coagulante para el de tratamiento de agua, dando resultados muy parecidos a los de un sulfato de aluminio fresco.



Figura 1. Disposición de lodos en la planta potabilizadora Los Berros

## **ANTECEDENTES**

El tratamiento del agua para consumo humano implica la producción de lodos como subproducto. El volumen de dichos lodos representa del 0.3 al 1% del agua tratada, provenientes de la remoción de sólidos suspendidos presentes en el agua cruda y de reactivos adicionados.

El manejo, tratamiento y disposición de dichos lodos es un problema importante que en México aún no ha sido resuelto. La principal dificultad que se presenta en el manejo de estos residuos es su alto contenido de agua (99%) y su pobre capacidad de deshidratación, particularmente la de los lodos producidos por sulfato de aluminio.

Hay que resaltar que los recursos para la operación de trenes de tratamiento de lodos en las plantas potabilizadoras de América Latina son escasos, hecho que debe tomarse en cuenta al proponer tecnologías para aplicarse en la región.

En México, existen aproximadamente 256 plantas potabilizadoras (CNA, 1997), las cuales en conjunto tratan alrededor de 73.6 m<sup>3</sup>/s de agua. De éstas, 165 plantas utilizan algún tipo de coagulante para eliminar los sólidos suspendidos que contiene el agua, donde 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 0.52 m<sup>3</sup>/s o 44,928 m<sup>3</sup>/día de lodos, que deben ser manejados y dispuestos adecuadamente.

El objetivo de este estudio fue el de determinar las condiciones óptimas de deshidratación de este tipo de lodos, para reducir al máximo su volumen mediante un acondicionamiento con polímeros y una posterior acidificación, con la posibilidad de una recuperación del coagulante.

## **CARACTERÍSTICAS DEL LODO**

Las características del lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua potable dependen del origen del agua cruda y de los sistemas usados en el tratamiento del agua y del lodo. Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y volúmenes de lodo. En una planta en particular, las características del lodo pueden cambiar anual, estacional o diariamente.

El lodo producido durante la coagulación contiene óxidos e hidróxidos metálicos y contaminantes orgánicos e inorgánicos como: microorganismos, arcilla y arena. En condiciones típicas de tratamiento de un agua proveniente de una fuente superficial y con una dosis de sulfato de aluminio cercana a 30 mg/L, la mayoría del aluminio en el lodo puede ser esperado como hidróxido de aluminio (Al (OH)<sub>3</sub> · 3H<sub>2</sub>O). Estos hidróxidos contienen grandes cantidades de agua atrapada en su molécula, lo que genera una suspensión de lodo voluminosa con una concentración de sólidos y propiedades de deshidratación bajas.

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.

Esta planta recibe aproximadamente 15 m<sup>3</sup>/s de agua proveniente de las presas Valle de Bravo, Guadalupe Victoria y Chilesdo. Este flujo se distribuye en cinco módulos denominados: B, C, D, E y F, cada uno de los cuales está a su vez constituido por dos floculadores, cuatro sedimentadores y ocho filtros. Además, los sedimentadores cuentan con equipos de recolección en continuo de los

lodos que se generan en los mismos. Al final, el agua tratada en los cinco módulos es almacenada en un cárcamo, de donde es enviada a su distribución (ilustración 2).

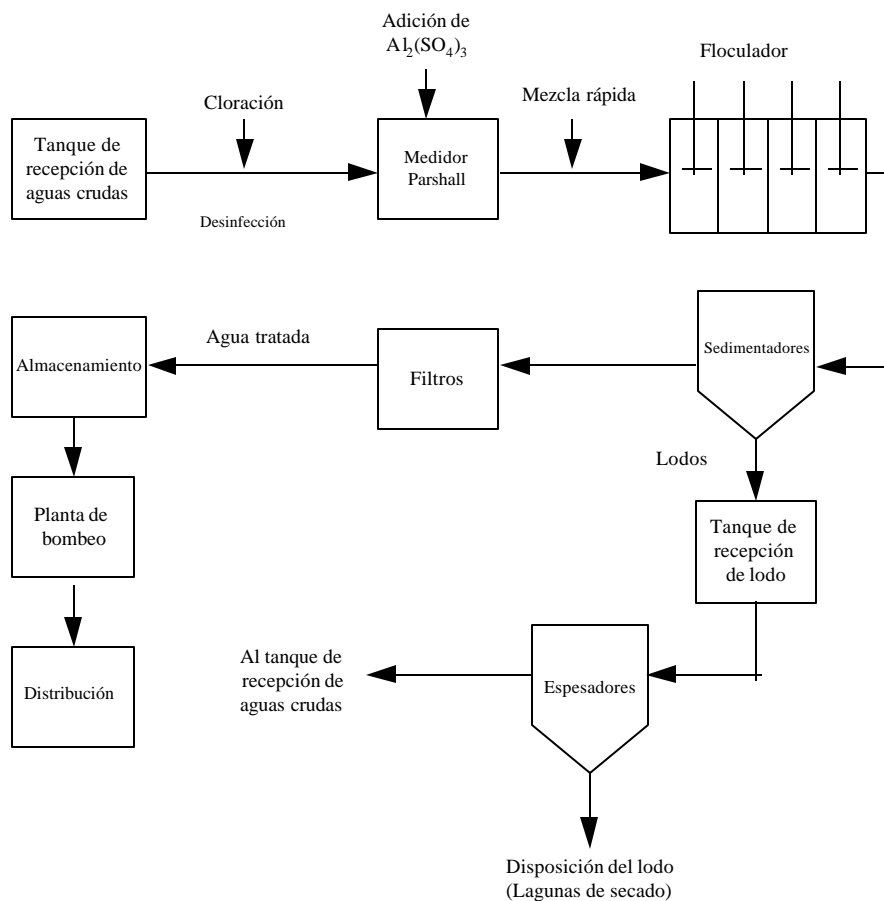
En la tabla 1 se presentan las características del lodo, el cual está constituido principalmente por sólidos fijos, y destacando el aluminio, hierro y sílice. Además, se observa una baja concentración de sólidos volátiles que muestra la escasa presencia de materia orgánica.

**Tabla 1. Caracterización del lodo producido en la planta potabilizadora de Los Berros**

Muestra	Turbiedad FTU	pH	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Si (mg/L)	ST (g/L)	STF (g/L)	STV (g/L)
1	294	7.14	50.0	~	46.0	0.575	0.47	0.105
2	541	7.09	~	~	~	0.923	~	~
3	150	7.15	23.0	5.61	19.0	0.4425	~	~
4	101.6 NTU	6.51	157.0	34.38	98.90	2.025	2.30	0

Al = Aluminio; Fe= Hierro; Si= Sílice; ST= Sólidos totales; STF= Sólidos totales fijos; STV= Sólidos totales volátiles; NTU = Unidades de turbiedad nefelométricas; FTU = Unidades de turbiedad de formacina. ~ No determinado.

**Ilustración 1.- Tren de tratamiento de la planta potabilizadora Los Berros (sistema Cutzamala)**



## METODOLOGÍA

### Acondicionamiento químico

Se efectúa un acondicionamiento del lodo con la finalidad de facilitar su deshidratación, mediante la adición de reactivos químicos que provoquen la desestabilización de los sólidos dispersos presentes en el mismo. Así, el polímero utilizado fue el BL 5368 (Flores L. et al 1997). Se acondicionaron dos tipos de lodos, el que se genera en los sedimentadores (lodo homogéneo) y el que sale de los espesadores (lodo espesado), bajo las siguientes condiciones:

Lodo homogéneo

- a) Mezcla rápida; 10 seg,  $120 \text{ s}^{-1}$
- b) Mezcla lenta ; 5 min,  $19 \text{ s}^{-1}$
- c) Sedimentación; 3 min.

Lodo espesado

- a) Mezcla rápida; 10 seg,  $350 \text{ s}^{-1}$
- b) Mezcla lenta ; 5 min,  $22 \text{ s}^{-1}$
- c) Sedimentación; 5 min.

Seleccionado el polímero y establecidas las condiciones de operación en el acondicionamiento químico de lodo, se establece el procedimiento para realizar la acidificación del mismo

### Acidificación

El aluminio es un ion metálico que fácilmente se hidroliza. La utilización del sulfato de aluminio en la potabilización del agua, genera lodos en los que predomina la forma  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , sin embargo, también coexisten en equilibrio con el hidróxido de aluminio numerosos monómeros y polímeros ( $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$ ). Al disminuir el contenido de  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  en el lodo se mejora significativamente la deshidratación del mismo, reduciendo su volumen. La adición de ácido a los lodos ha sido usada como un método de recuperación de coagulante y de acondicionamiento del lodo. Cuando la solución ácida rica en aluminio se reusa como coagulante proporciona beneficios similares a los productos comerciales de aluminio (F. Michael y Michael L., 1991).

La dosis de ácido empleada para recuperar cierta cantidad de aluminio generalmente se expresa como kilogramos de ácido sulfúrico utilizado por un kilogramo de aluminio recuperado. Una determinación exacta de la demanda de ácido es aquella que corresponde estequiométricamente al aluminio disponible presente en el lodo, sin embargo, la presencia de otros metales y de materia orgánica requieren también ácido, por lo que la cantidad requerida estequiométricamente de ácido siempre será menor que la dosis real necesaria para recuperar el aluminio disponible

En la planta potabilizadora de Los Berros se utiliza sulfato de aluminio como coagulante primario, por lo que el interés de la acidificación se centra en la extracción del aluminio presente en los lodos. El aluminio total y el que puede ser extraído del lodo se determinó mediante las siguientes técnicas implementadas en el IMTA:

Aluminio total: Digestión fuerte de la muestra con 5 mL ácido nítrico concentrado. La muestra digerida se filtra y se afora, midiendo el aluminio presente con un espectrofotómetro Hach o mediante absorción atómica.

Aluminio disponible: Acidificación débil con ácido sulfúrico diluido, con medición continua del pH y de la conductividad de la solución. Sedimentación y separación de las dos fases. El aluminio en el sobrenadante se determina mediante un espectrofotómetro Hach o mediante absorción atómica.

El aluminio disponible representa el que puede realmente ser extraído por disolución con ácido y el comportamiento de la conductividad durante la acidificación indica claramente en que momento concluye la reacción.

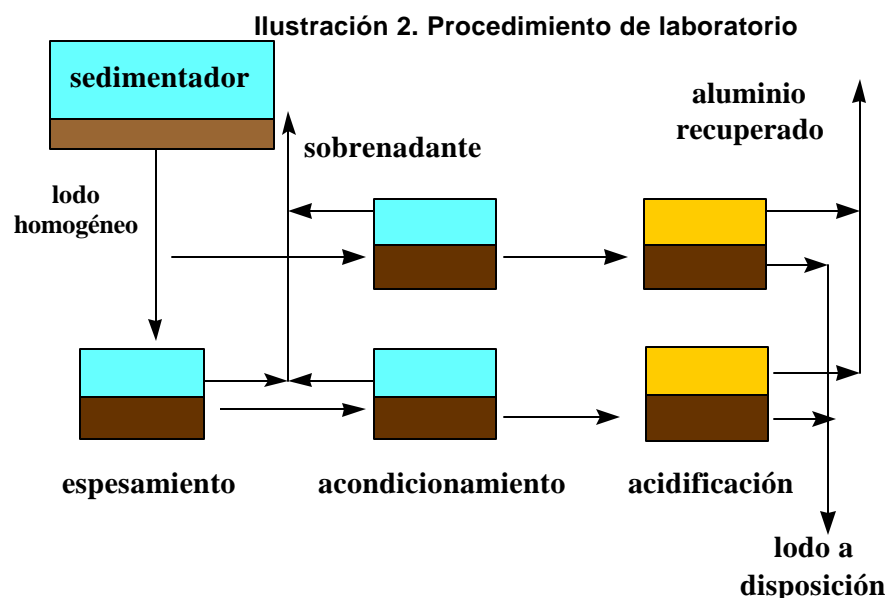
Conociendo la cantidad de ácido utilizado hasta el final de la reacción, se puede estimar la cantidad de aluminio extraído, siempre y cuando se considere que el ácido reacciona solamente con el aluminio.

Con la finalidad de evaluar los parámetros que controlan la extracción de aluminio: pH, dosis de ácido y tiempo de contacto, se realizaron pruebas a nivel laboratorio, en las cuales se utilizaron lodos producidos en condiciones controladas a partir de agua cruda (lodo sintético) y lodos producidos en los sedimentadores de la planta potabilizadora de Los Berros (lodo sin acondicionamiento), a su vez este último se acondicionó con polímero de acuerdo a la metodología establecida en el apartado de acondicionamiento.

Cada muestra de lodo sin acondicionar se dejó sedimentar, separándose el agua clarificada para trabajar con el lodo espesado.

Parte del lodo espesado se acondicionó con polímero y ambos tipos de lodo (acondicionado y sin acondicionar) se acidificaron para extraer el aluminio. También se hicieron pruebas del tiempo de contacto entre el lodo y el ácido sulfúrico, para evaluar su influencia sobre el porcentaje de recuperación del aluminio y la reducción de volumen del lodo.

Un esquema que muestra el procedimiento de laboratorio es el siguiente.



Estas mismas pruebas se efectuaron en la planta de Los Berros, con reactivos y condiciones propias de la misma.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El acondicionamiento con polímero asegura el espesamiento del lodo en tiempos muy cortos (aproximadamente de 3 a 5 minutos) y permite acidificar menores volúmenes de lodo, lo que hace más eficiente el uso del reactivo.

Los resultados obtenidos en el laboratorio de la planta de Los Berros, muestran que la recuperación del aluminio y la disminución del volumen de los lodos, es técnicamente factible si se acondicionan con polímero y se acidifican con ácido sulfúrico (tablas 2 y 3). Pero si se requiere obtener un solución de aluminio más concentrada es conveniente espesar primero y posteriormente acondicionar con polímero, ya que esto proporcionó una mayor concentración de sólidos y por con siguiente una deshidratación más alta del lodo (tablas 4 y 5).

**Tabla 2. Reducción del volumen con acondicionamiento y acidificación**

Número de Prueba	g/L		Lodo con polímero			Acidificación			% Reduc. final
	ST	SVT	Lodo inic.	Lodo final	%Red uc.	Lodo inic.	Lodo final	%Reduc.	
1	18,10		22,99	3,99	82,6	500	170	66,0	94.1
2	9,99	2,230	22,20	6,18	72,2	500	90	82,0	95.0
3	9,82	1,900	23,86	2,58	89,2	500	96	80,8	97.9
4	18,15	3,125	20,74	7,36	64,5	500	148	70,4	89.5
5	7,12	1,795	44,58	2,16	95,2	500	87	82,6	99.2
5R	6,33	1,805	45,32	3,32	92,7	500	112	77,6	98.4
6	6,77	1,531	24,75	1,45	94,1	500	85	83,0	99.0
6R	9,90	1,950	19,75	0,75	96,2	500	68	86,4	99.5
7	29,38	2,750	22,01	1,34	93,9	500	214	57,2	97.4

**Tabla 3. Recuperación de aluminio**

Número de Prueba	Aluminio (mg/L)		
	Muestra	Recuperado	% Recuperado
1	980.0	820.0	83.7
2	580.0	530.0	91.4
3	860.0	820.0	95.3
4	700.0	600.0	85.7
5	490.0	500.0	102.0
5R	560.0	510.0	91.1
6	510.0	480.0	94.1
6R	820.0	780.0	95.1
7	1300.0	1340.0	130.1
Promedio			93.5

**Tabla 4. Comparación de la concentración de aluminio recuperado.**

Tren de tratamiento de lodo	Aluminio mg/L	
	Prueba 1	Prueba 2
Acondicionamiento - Acidificación	420	600
Espesamiento - Acondicionamiento - Acidificación	1020	1140

**Tabla 5. Reducción de volumen****Prueba 1**

Tren de tratamiento de lodo	Reducción de volumen (Litros)			
	Inicial	Espesamiento	Acond.	Acidificación
Acondicionamiento - Acidificación	85.50	-----	11.31	2.32
Espesamiento - Acondicionamiento - Acidificación	85.50	5.90	2.76	0.90

**Prueba 2**

Tren de tratamiento de lodo	Reducción de volumen (Litros)			
	Inicial	Espesamiento	Acond.	Acidificación
Acondicionamiento - Acidificación	182.11	-----	10.67	2.73
Espesamiento - Acondicionamiento - Acidificación	182.11	9.86	5.46	1.85

La evaluación del aluminio recuperado como coagulante se realizó a través de prueba de jarras, utilizando agua cruda de la planta de Los Berros, con las siguientes características; turbiedad 11 UFT, color 52 PtCo y pH de 8.15. Inicialmente se realizó una búsqueda de la dosis optima de sulfato de aluminio, la cual fue de 21 mg/L. Tomando como base este dato se tomaron los volúmenes requeridos de solución recuperada de aluminio. Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 6. Evaluación del aluminio recuperado como coagulante.**

Sulfato de aluminio	Concentración de Al mg/L	militros adicionados	Turbiedad final UFT	Color final PtCo	pH final
Agua cruda	-----	-----	11	52	8.15
Blanco	-----	-----	11	52	7.97
Fresco	-----	2.1	0	2	7.11
Recuperado 1	310	6.2	3	4	-----
Recuperado 2	260	7.4	2	0	-----
Recuperado 3	310	6.2	2	6	7.14
Recuperado 4	350	5.5	2	9	7.12

**CONTAMINANTES TRAZA EN EL COAGULANTE RECUPERADO**

Para asegurar que el coagulante recuperado puede ser utilizado en el sistema de tratamiento, es necesario considerar que el ácido sulfúrico disuelve también otros metales y materia orgánica que contenga el lodo.

Como principales constituyentes metálicos en la solución ácida se encuentran el aluminio, el hierro y el manganeso. Sin embargo, existe muchos otros metales que están presentes en el agua cruda y por consiguiente son concentrados en los lodos y posteriormente extraídos en la acidificación. Con la

finalidad de poder establecer un balance de metales traza en el sistema se realizaron determinaciones al agua cruda, al lodo homogéneo, a la solución ácida y al agua tratada. Los resultados se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7. Metales traza presentes en el sistema de tratamiento**

<b>Metal (mg/L)</b>	<b>Agua Cruda</b>	<b>Lodo Homogéneo</b>	<b>Solución Ácida</b>	<b>Agua Tratada</b>
Antimonio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Aluminio	1.68	79.50	485.00	0.23
Arsénico	< 0.1	0.77	4.06	< 0.1
Bario	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Berilio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cadmio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Calcio	17.45	16.50	39.60	12.90
Cobalto	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cobre	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cromo	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Hierro	0.63	12.55	1.95	< 0.1
Magnesio	5.61	6.39	9.70	5.99
Manganeso	0.11	2.78	2.44	< 0.1
Molibdeno	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Níquel	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Plata	0.14	0.12	< 0.1	< 0.1
Plomo	< 0.1	0.16	0.67	< 0.1
Potasio	3.30	3.93	5.64	3.48
Selenio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Sodio	11.14	10.20	16.80	12.20
Talio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Vanadio	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Zinc	< 0.1	< 0.1	0.25	< 0.1

En términos generales el agua cruda contiene sólo ocho metales presentes en concentraciones realmente pequeñas (por abajo de la norma NOM-127-SSA1-1994). Sin embargo, en la solución ácida se incrementó la concentración de los siguientes metales: hierro (1.95 mg/L), manganeso (2.44 mg/L), plomo (0.67 mg/L) y zinc (0.25 mg/L). Esto no presenta un inconveniente mayor, mientras el factor de dilución con el agua a tratar los mantenga por abajo de la norma y los ciclos de recirculación del coagulante se controlen con base en la concentración de estos contaminantes

## **CONCLUSIONES**

- El pH, la dosis del ácido sulfúrico y el tiempo de contacto, son los parámetros de mayor importancia para la reducción de volumen del lodo, así como para la recuperación del aluminio.
- El acondicionamiento del lodo con polímero mejora la deshidratación del lodo, la calidad del sobrenadante, acorta el tiempo de sedimentación y aumenta la concentración del aluminio con respecto a la sedimentación natural.



- Mediante la conjunción de un acondicionamiento con polímero y una acidificación, se puede obtener una reducción del volumen del lodo de hasta un 97% y una recuperación del 93% del coagulante.
- El aluminio recuperado proporciona remociones de turbiedad y color similares a las de sulfato de aluminio fresco.
- El coagulante recuperado acumula algunos metales traza, pero su impacto puede reducirse si se controlan los ciclos de recirculación y los niveles de dilución con el agua a tratar.

## IMPACTO

La utilización de esta técnica podría reducir un volumen de lodo de 44,928 m<sup>3</sup>/día a 1,347.8 m<sup>3</sup>/día, disminuyendo así los costos y las áreas de disposición, aunado a esto se obtiene una solución rica en aluminio que puede ser reutilizada en el sistema de tratamiento, disminuyendo los costos de adquisición de sulfato de aluminio fresco. Sin embargo, lo más importante es la disminución del impacto al ambiente al disponer un menor volumen de lodo.

## RECONOCIMIENTOS

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

Annual Book of ASMT Standar (1990). "Standard practice for coagulation-flocculation jar test of water". D 2035-80. Vol. 11.01

Comisión Nacional del Agua (1997). *Inventario de plantas potabilizadoras en México*.

Degrémont (1979). *Manual técnico del agua*. Degrémont. 4a edición. pp 481-882

F. Michael Saunders and Michael L. Roeder. *Coagulant Recovery: A Critical Assessment*. AWWA. AWWA Research Foundation. Cap. II. USA 1991.

Flores L., Santana M. L., Martín A. (1997) "Acondicionamiento químico de lodos de sales de aluminio subproducto de la potabilización del agua". Memorias Técnicas, XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Vol. II, pp 306-315

Gotoh K., Nishimura O., Satoh H., Satoh A., Lee Y.D. (1991). "Dewatering characteristics of polymer conditioning alum sludge under low compressive pressure by a constant-rate strain compression test". *Water Supply*, Vol. 9, pp. 195-203.

Hach Company (1988). *Manual de procedimientos del espectrofotómetro DR2000*. Técnica adaptada por FWPCA Methods for Chemical Analysis of water and wastes. pp. 509-510.

Hudson H. E. Jr., Wagner E. G. (1981). "Conduct and uses jar tests". *Journal American Water Works Association*. Vol. 73, No. 4, pp. 218-223.

Knocke R.W., Dishman M., Miller F.G. (1993). "Measurement of chemical sludge floc density and implications related to sludge dewatering". *Water Environment Research*. Vol. 65, pp. 735-743.

Lynch P.D., Novak. T.J. (1991). "Mixing intensity and polymer dosing in filter press dewatering". *Water Pollution Control Federation*. Vol. 63, No.2, pp. 160-165.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. "Salud ambiental, agua para consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para consumo humano". *Diario Oficial de la Federación*. Jueves 18 de enero de 1996.