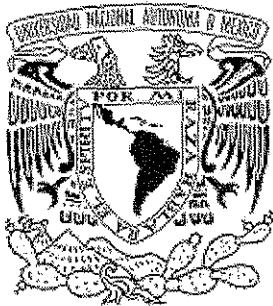


01177  
3



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**REDUCCIÓN DE VOLUMEN DE LODOS  
DE PLANTAS POTABILIZADORAS**

**T E S I S**  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRA EN INGENIERÍA**  
(AMBIENTAL)

PRESENTA:  
**LETICIA BEDOLLA VÁZQUEZ**

**DIRECTOR: M. EN I. LUCIANO SANDOVAL YOVAL**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**CAMPUS MORELOS**

**MAYO DE 2002**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERIA

3

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

RECIBÍ COPIA DE

( ) TRABAJO ESCRITO

(XX) TESIS

DESARROLLADO POR LA ALUMNA: LETICIA BEDOLLA VAZQUEZ.

PARA PRESENTAR EXAMEN:

( ) DE ESPECIALIZACION

(XX) DE GRADO

EN INGENIERIA: (AMBIENTAL) 490

FIRMA FECHA

PRESIDENTE:	DRA. GEORGINA FERNANDEZ VILLAGOMEZ	<i>[Signature]</i> 20/03/02
VOCAL:	M. EN I. LUCIANO SANDOVAL YOVAL	<i>[Signature]</i> 15/03/2002
SECRETARIO:	DRA. PETIA MIJAYLOVA NACHEVA	<i>[Signature]</i> 25/03/2002
SUPLENTE:	M. EN I. FRANCISCA IRENE SOLER ANGUIANO	<i>[Signature]</i> 20/03/02
SUPLENTE:	M. EN I. ANTONIO RAMIREZ GONZALEZ	<i>[Signature]</i> 25/03/02

APROBACION DEL TRABAJO DE TESIS POR EL DEPARTAMENTO \_\_\_\_\_

*Aprobado* *[Signature]*

BJS\*yoc

## AGRADECIMIENTOS

A Jesús mi Señor, por ser mi refugio, ayuda y fortaleza en los tiempos más difíciles, y también por el gozo, la paz y el amor que hallo siempre en Su presencia.



*Gracias por ser el milagro más glorioso que yo he vivido...*

A mis padres Manuel y María, gracias por toda la ayuda, apoyo y cariño que me han dado en toda mi vida. *Son los mejores padres que Dios creó para mí.*

A mi hermano Alberto, por su ayuda para la terminación del trabajo. *Siempre te estaré agradecida.*

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante la realización de mis estudios. *Muchas gracias.*

A Luciano Sandoval, por la oportunidad que me dio para realizar mi trabajo de tesis y por toda la ayuda, el apoyo, y sobre todo por su amistad que me ha brindado. *Gracias por tu espíritu tan servicial que tienes.*

A mis revisores de tesis y a Ana Elisa, por su experiencia y contribución al presente trabajo. *Gracias por la disposición y atención que me brindaron.*

A todos mis maestros, por los conocimientos impartidos y a mis compañeros de potabilización. Un agradecimiento especial a Lulú y Martín, por la amistad que me han dado desde que ingresé como becaria en el IMTA. *Gracias por el apoyo y el ánimo que siempre me dan.*

***“Jehová está conmigo entre los que me ayudan...” (Salmo 118:7 a).***

*Dios bendiga por siempre sus vidas.*

---

## DEDICATORIAS

Quiero dedicar este trabajo a mis padres. Porque me han dado siempre lo mejor y apoyado en toda circunstancia.

A mis hermanos (Alberto, Manuel, Efraín, Araceli, Angeles y Noemi) por ser mi familia. A Cheli por todo su apoyo y confianza en mí en todas las decisiones que he tomado; y a todos por los sobrinos preciosos que me han dado y que son mi alegría.

A Sara, por haberme dado el legado más grande y precioso de mi vida. *Eres un lazo de amor para mí, como Jonatán y David.*

A Luis, por ser parte del plan de Dios para mi vida. *Gracias por ser mi regalo.*

A todos mis hermanos y amigos, por compartir su amistad, cariño y apoyo en todo tiempo.

Y por siempre, a Jesucristo, quien ha hecho y hace posible todas las cosas.

***“El que hizo la tierra con su poder, el que puso en orden al mundo con su saber, y extendió los cielos con su sabiduría... “ (Jer. 10:12).***

---

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE GRÁFICAS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

<b>CAPÍTULO 1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>1</b>
1.1 GENERACIÓN DE LODOS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA.....	1
1.1.1 Coagulación.....	1
1.1.1.1 Mecanismos predominantes en la coagulación.....	2
1.1.1.1.1 Neutralización por compresión de la doble capa.....	2
1.1.1.1.2 Adsorción y neutralización.....	3
1.1.1.1.3 Coagulación por barrido.....	4
1.1.1.1.4 Puentes interparticulares.....	5
1.1.1.2 Sustancias químicas empleadas en la coagulación.....	5
1.1.1.2.1 Coagulación con sales de aluminio.....	5
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE ALÚMINA.....	6
1.2.1 Problemática.....	7
1.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL.....	9
1.3.1 Recuperación de aluminio de lodos de plantas potabilizadoras.....	10
1.3.2 Dosis de ácido sulfúrico.....	11
1.3.3 pH de acidificación.....	13
1.4 USO DE ALUMINIO RECUPERADO COMO COAGULANTE.....	13

<b>CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>16</b>
2.1 METODOLOGÍA.....	17
2.1.1 Pruebas a nivel laboratorio.....	17
2.1.1.1 Caracterización de lodos y sobrenadantes.....	18
2.1.1.2 Espesamiento.....	20
2.1.1.3 Acondicionamiento químico.....	20
2.1.1.4 Acidificación.....	21
2.2 DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE LODOS.....	23
2.3. PRUEBAS A ESCALA PILOTO.....	25
2.3.1 Descripción de la planta piloto de agua.....	25
2.3.2 Operación en conjunto de las dos plantas piloto.....	26
2.3.3 Pruebas en laboratorio.....	29
2.3.4 Pruebas en la planta piloto de lodos.....	29
2.3.5 Pruebas con la solución recuperada como coagulante.....	30
 <b>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	 <b>31</b>
3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.....	31
3.1.1 Reducción del volumen de lodo.....	31
3.1.1.1 Espesamiento.....	31
3.1.1.2 Acondicionamiento.....	31
3.1.1.3 Acidificación.....	32
3.1.2 Recuperación de aluminio.....	34
3.1.3 Caracterización de la solución recuperada.....	34
3.1.4 Potencial Z.....	35
3.1.5 Porcentaje de Humedad.....	36
3.1.6 Sólidos.....	37
3.2 DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE LODOS.....	39
3.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN ESCALA PILOTO.....	42
3.3.1 Resultados de pruebas en laboratorio y planta piloto.....	43
3.3.2 Reducción del volumen de lodos.....	46
3.3.3 Recuperación de aluminio.....	48
3.3.4 Uso del coagulante recuperado en el tratamiento del agua.....	51
3.3.4.1 Caracterización del coagulante recuperado.....	57
3.3.5 Demanda de ácido sulfúrico.....	60
 <b>CONCLUSIONES.....</b>	 <b>62</b>
 <b>RECOMENDACIONES.....</b>	 <b>63</b>
 <b>REFERENCIAS.....</b>	 <b>64</b>

---

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1.1	Alternativas de tratamiento y disposición de lodos provenientes de plantas potabilizadoras.....	9
Tabla 1.2	Pruebas de laboratorio.....	12
Tabla 1.3	Pruebas a escala piloto.....	12
Tabla 1.4	Pruebas a nivel planta.....	12
Tabla 1.5	Color del sobrenadante recuperado como una función del pH.....	14
Tabla 1.6	Concentración de hierro en la solución de recuperación de aluminio durante varios ciclos.....	15
Tabla 2.1	Análisis en la etapa de espesamiento.....	20
Tabla 2.2	Programa de monitoreo y control en la planta piloto de agua.....	28
Tabla 2.3	Programa de monitoreo y control en el tren de Tratamiento 1.....	28
Tabla 2.4	Programa de monitoreo y control en el tren de Tratamiento 2.....	29
Tabla 3.1	Reducción del volumen de lodo por espesamiento.....	31
Tabla 3.2	Resultados del acondicionamiento del lodo por los tratamientos propuestos.....	32
Tabla 3.3	Reducción del volumen de lodo por acondicionamiento.....	32
Tabla 3.4	Resultados de la acidificación del lodo por los tratamientos propuestos....	32
Tabla 3.5	Reducción del volumen de lodo mediante los Tratamientos 1 y 2.....	33
Tabla 3.6	Porcentaje de recuperación de aluminio.....	34
Tabla 3.7	Caracterización del coagulante recuperado por tren de tratamiento.....	35
Tabla 3.8	Valores promedio.....	35
Tabla 3.9	Análisis del potencial Z en el Tratamiento 1.....	36
Tabla 3.10	Análisis del potencial Z en el Tratamiento 2.....	36
Tabla 3.11	Porcentaje de humedad en el Tratamiento 1.....	36
Tabla 3.12	Porcentaje de humedad en el Tratamiento 2.....	36
Tabla 3.13	ST y SST en el Tratamiento 1.....	37
Tabla 3.14	ST y SST en el Tratamiento 1.....	37
Tabla 3.15	Resultados del potencial Z, % de humedad y ST en el lodo inicial y final de los Tratamientos 1 y 2.....	38
Tabla 3.16	Resultados de la reducción del volumen de lodos del Tratamiento 1.....	39

---



---

Tabla 3.17	Resultados de las pruebas de acondicionamiento y acidificación realizadas a nivel laboratorio.....	44
Tabla 3.18	Resultados de las pruebas en planta piloto de lodo.....	45
Tabla 3.19	Caracterización de la solución recuperada de sulfato de aluminio en planta piloto.....	45
Tabla 3.20	Reducción del volumen de lodo a nivel laboratorio.....	46
Tabla 3.21	Reducción del volumen de lodo en planta piloto.....	47
Tabla 3.22	Recuperación de aluminio en laboratorio.....	49
Tabla 3.23	Recuperación de aluminio a nivel piloto.....	50
Tabla 3.24	Caracterización del tratamiento de agua en planta piloto.....	52
Tabla 3.25	Efectividad del uso del coagulante recuperado en el tratamiento del agua.....	52
Tabla 3.26	Análisis de metales traza por absorción atómica en el agua cruda.....	56
Tabla 3.27	Análisis de metales traza por absorción atómica en el agua tratada.....	56
Tabla 3.28	Caracterización del coagulante recuperado en planta piloto.....	57
Tabla 3.29	Análisis de metales por absorción atómica del coagulante recuperado en planta piloto.....	59
Tabla 3.30	Determinación de la demanda de ácido sulfúrico en planta piloto.....	60

---

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1.1	Modelo de la doble capa difusa.....	2
Figura 1.2	Coagulación por adsorción.....	4
Figura 1.3	Coagulación por barrido.....	4
Figura 2.1	Tren de tratamiento de la planta potabilizadora Los Berros.....	16
Figura 2.2	Esquema de recepción de lodos en la planta potabilizadora Los Berros...	17
Figura 2.3	Trenes de tratamientos propuestos.....	18
Figura 2.4	Procedimiento para la acidificación del lodo.....	21
Figura 2.5	Esquema general de la planta piloto de agua.....	26
Figura 2.6	Sistema de tratamiento de agua y lodo a nivel piloto.....	27
Figura 3.1	Resultados estimados de la reducción de volumen de lodo a nivel planta.....	33
Figura 3.2	Diagrama de la planta piloto de lodos.....	41
Figura 3.3	Sistema de tratamiento de agua y lodo a nivel piloto.....	42

**ÍNDICE DE GRÁFICAS**

Gráfica 2.1	Determinación de la demanda de ácido sulfúrico.....	22
Gráfica 3.1	Comparación entre el lodo homogéneo y lodo producido por los tratamientos 1 y 2 con relación al potencial Z, % humedad y ST.....	38
Gráfica 3.2	Reducción del volumen de lodo en planta piloto.....	47
Gráfica 3.3	Concentración de ST en las etapas de tratamiento.....	48
Gráfica 3.4	Recuperación de aluminio en planta piloto de lodo.....	51
Gráfica 3.5	Turbiedad en el tratamiento del agua.....	53
Gráfica 3.6	Color en el tratamiento del agua.....	54
Gráfica 3.7	Metales traza en la solución recuperada analizados por absorción atómica.....	59
Gráfica 3.8	Efecto del exceso de ácido sobre la reducción del volumen de lodo por acondicionamiento.....	61

**ÍNDICE DE ILUSTRACIONES**

Ilustración 1.1	Disposición de lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros (Sistema Cutzamala, Edo. México).....	8
Ilustración 3.1	Agua tratada con coagulante recuperado.....	54

## RESUMEN

En este trabajo se probaron dos trenes de tratamiento de lodos a nivel laboratorio, con la finalidad de elegir al que lograra reducir más el volumen de lodo a disponer y permitiera la máxima recuperación del coagulante. El primer tren de tratamiento (Tratamiento 1) consistió en cuatro procesos: espesamiento por gravedad, acondicionamiento químico, acidificación y separación por sedimentación. En el segundo tren de tratamiento (Tratamiento 2) se plantearon las etapas de acondicionamiento químico, acidificación y separación de fases por sedimentación.

Mediante el Tratamiento 1 se obtuvo una reducción del volumen del lodo de 98.5% y una recuperación de aluminio del 91.6%; con el Tratamiento 2 se alcanzó un 97.6% de reducción del volumen de lodo con una recuperación de 87.6% de aluminio, por lo que se seleccionó el primer tren de tratamiento y éste se construyó a escala piloto.

Las unidades se diseñaron en función de los parámetros de operación obtenidos en laboratorio. Posteriormente la planta piloto de lodos fue puesta en marcha junto con una planta potabilizadora en escala piloto perteneciente a la planta de Los Berros.

La planta piloto de agua cuenta con las siguientes unidades de proceso: mezcla rápida o coagulación, floculación, sedimentación y filtración. El gasto de operación fue de 1 L/s y mediante el proceso convencional produjo el lodo que se trató en la planta piloto de tratamiento de lodos, cuyas pruebas mostraron reducciones de lodo homogéneo a lodo acidificado del 98.2% con una recuperación de aluminio del 89.9%.

El empleo de la solución rica en aluminio (coagulante recuperado) mostró ser efectivo en el tratamiento del agua al obtenerse la calidad requerida en el efluente como lo marca la Norma Oficial Mexicana de agua para uso y consumo humano NOM-127-SSA1-1994.

La recirculación del coagulante recuperado no presentó acumulación de metales traza en la solución recuperada. En total se realizaron nueve ciclos de la solución en el sistema de tratamiento de agua y la calidad del agua filtrada no se vio afectada.

De lo anterior se concluyó que el Tratamiento 1 es técnicamente factible de llevar a cabo para tratar el lodo proveniente de la potabilización del agua que emplea sulfato de aluminio, ya que además de reducir el volumen de lodos a disponer

---

añade la ventaja de recuperar el coagulante para reutilizarlo en el tratamiento del agua y proporcionar un ahorro del coagulante fresco.

---

## INTRODUCCIÓN

El sulfato de aluminio es el coagulante que más se emplea en el tratamiento del agua potable para eliminar las impurezas sedimentables. Los desechos están formados principalmente por hidróxidos de aluminio amorfo ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), lo cual crea grandes volúmenes de lodo (0.3 al 1% del agua tratada), que demanda de alternativas de tratamiento para que su disposición final no afecten al medio ambiente.

Actualmente, la protección al medio ambiente está recibiendo una mayor atención, siendo cada vez más necesario encontrar métodos alternativos para la disposición de lodos de plantas potabilizadoras. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) clasifica a éste tipo de desechos como un residuo industrial, el cual no puede ser descargado a cuerpos o corrientes de agua (Gruninger, 1975).

El propósito general en el tratamiento de lodos de plantas potabilizadoras es producir un lodo con una concentración de sólidos que pueda facilitar su manejo y disposición.

Una de las tecnologías que ayuda a concentrar el lodo de hidróxido de aluminio, eliminando parcialmente el agua que contienen los mismos es a través de la *acidificación*, lo cual reduce el volumen de lodos para su disposición y permite la recuperación del coagulante. Empleando además los procesos de espesamiento por gravedad y acondicionamiento químico, se puede eliminar gran parte del contenido de humedad del lodo, lo que ayuda a facilitar su manejo y disposición.

Este trabajo se presenta en el siguiente orden: en el Capítulo 1, se realiza una revisión sobre uno de los procesos básicos que interviene en la potabilización del agua y que es una de las principales fuentes de producción de lodos: la coagulación; así como también el problema que causan al medio ambiente. En el Capítulo 2 se describe el desarrollo experimental, el cual consistió en 3 partes fundamentales: pruebas en laboratorio para seleccionar un tren de tratamiento, diseño a escala piloto de la opción seleccionada y la realización de pruebas en planta piloto. En el Capítulo 3, se presentan los resultados obtenidos; y finalmente, se exponen las Conclusiones y Recomendaciones.

---

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

La magnitud del problema de manejo y disposición de lodos generados por las plantas potabilizadoras es un problema a nivel mundial, como lo indica la siguiente información.

En Estados Unidos hay 3600 plantas de tratamiento de agua produciendo lodos de varios procesos de coagulación. La cantidad de lodos que resultan de éstos se ha estimado en 1 millón de ton/año (Albrecht, 1972).

En América Latina los recursos para la operación de trenes de tratamiento de lodos en las plantas potabilizadoras son escasos (Sandoval *et al*, 1997).

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, siendo el sulfato de aluminio el coagulante 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 (Sandoval *et al*, 1997).

La disposición de éstos residuos en México se lleva a cabo en lagunas de secado o almacenados en terrenos, lo que está generando grandes daños al ambiente.

El problema principal que presentan estos residuos, es el alto contenido de agua (más del 99%) y baja capacidad de deshidratación ya que están formados principalmente por hidróxidos de aluminio, los cuales retienen una gran cantidad de agua incrementando el volumen de lodos a manejar y disponer.

El objetivo principal en el tratamiento es concentrar el lodo de hidróxido de aluminio, eliminando gran parte del agua que contienen los mismos, para esto existen varias alternativas de tratamiento y disposición final, y uno de ellos es el proceso de acidificación. Este proceso se ha utilizado desde 1903 en Estados Unidos y posteriormente se empleó en Japón, Inglaterra y Polonia.

La extracción de aluminio con ácido sulfúrico de un lodo donde predomina la forma Al(OH)<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O, el aluminio es disuelto en productos polimerizados y productos hidrolizados de aluminio hidratado, esto mejora la deshidratación del lodo, reduciendo su masa y volumen. La solución de aluminio bajo condiciones ácidas tiene la ventaja de poder utilizarse en el tratamiento del agua como coagulante.

---

En un estudio del tratamiento de lodos generados en la planta potabilizadora Los Berros (Sistema Cutzamala, Edo. México) para su manejo y disposición, se llevaron a cabo pruebas en laboratorio con el objeto de determinar las condiciones de deshidratación de este tipo de lodo, para reducir al máximo su volumen mediante un acondicionamiento químico y un proceso de acidificación, presentando la posibilidad de recuperar de esta manera parte del aluminio presente en los lodos. Los resultados obtenidos demostraron que el acondicionamiento químico con polímero mejora la deshidratación del lodo y permite un espesamiento de lodo en tiempos muy cortos y la acidificación de menores volúmenes de éste.

Este trabajo es la continuación al estudio de la tratabilidad y disposición final de los lodos producidos en la planta potabilizadora Los Berros. El estudio comprende escalar a nivel piloto un tren de tratamiento que permita la reducción al máximo del volumen de lodo a disponer y con la ventaja de recuperar una solución rica en aluminio, empleándola en el tratamiento del agua para evaluar su efectividad como coagulante, determinando el número de ciclos en que pueda recircularse cumpliendo la calidad requerida para un agua potable.

---



**OBJETIVO GENERAL:**

Evaluar la reducción del volumen de lodos de plantas potabilizadoras, recuperando y reutilizando el coagulante mediante un tren de tratamiento a nivel piloto.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Seleccionar un tren de tratamiento a nivel laboratorio que disminuya el volumen de lodo y proporcione una mayor recuperación de aluminio.
  2. Realizar el diseño y construcción a escala piloto del tren de tratamiento seleccionado.
  3. Evaluar a nivel piloto la recuperación y reutilización del coagulante y la reducción del volumen de lodo.
  4. Evaluar a través de la calidad del agua tratada (de acuerdo a las normas oficiales mexicanas) la efectividad de la solución recuperada como coagulante en el tratamiento del agua en planta piloto.
  5. Determinar experimentalmente el número de ciclos de efectividad del coagulante recuperado, sin que altere la calidad del agua requerida en el efluente.
  6. Determinar la demanda de ácido sulfúrico requerido a nivel piloto.
-

## CAPÍTULO 1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

### 1.1. GENERACIÓN DE LODOS EN LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

Durante la potabilización de las aguas de origen superficial comúnmente intervienen cinco procesos básicos: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección. Cada uno de estos procesos son necesarios para eliminar las impurezas y proporcionar al consumidor la calidad necesaria para su uso.

A continuación se analiza la parte teórica de la coagulación, como una de las principales fuentes de producción de lodos en la potabilización del agua.

#### 1.1.1 COAGULACIÓN

El objetivo de la coagulación es desestabilizar la carga de las partículas presentes en el agua con el fin de promover su aglomeración, mediante el agregado de sustancias químicas (coagulantes) y así facilitar su separación por sedimentación y/o filtración (Shovlin, 1993).

El proceso de la coagulación envuelve una serie de operaciones físicas y químicas mediante las cuales el agente coagulante se torna efectivo. Este proceso abarca tres fases (Unda, 1993):

- a) Agregado de sustancias químicas.
- b) Mezcla o difusión, etapa en la cual el coagulante disuelto se dispersa rápidamente en forma turbulenta en el agua cruda. La coagulación ocurre cuando se logra reducir las fuerzas repulsivas debidas a la carga superficial que tienen las partículas.
- c) Floculación, proceso que comprende un agitación lenta del agua por un período relativamente largo, durante el cual las partículas finamente divididas o en estado coloidal, van neutralizándose para formar un flóculo hidratado de tamaño tal que puedan sedimentar bajo la acción de la fuerza de gravedad. Sin embargo, los flóculos más finos no son eliminados por sedimentación, y por lo tanto se recurre a la filtración como proceso complementario.

Una fase coloidal se refiere a una cierta forma de materia en un estado de subdivisión en un medio. Las partículas de una fase coloidal están comprendidas entre  $1\mu$  y  $100\mu$ . El tamaño de las partículas mayores corresponden a fases en estado de suspensión o emulsión. El término "partícula" incluye todo tipo de materia suspendida, entre ella, arena, cieno, virus, bacterias, ácidos fúlvicos y húmicos, minerales (que incluyen asbestos, silicatos, sílice y partículas radioactivas) y orgánicas. La presencia de estas partículas se puede indicar en forma global midiendo la turbiedad. La norma mexicana NOM-127-SSA1-1994 de consumo humano establece 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

El proceso de la coagulación en el tratamiento del agua tiene por objeto fundamental eliminar la turbiedad y el color (materia orgánica), que se presenta como coloides negativos.

### 1.1.1.1 Mecanismos predominantes en la coagulación

Los mecanismos que describen cómo actúan los coagulantes en los coloides son los siguientes:

#### 1.1.1.1.1 Neutralización por compresión de la doble capa

Las impurezas presentes en el agua en forma de partículas en estado coloidal, tienen carga negativa, pero la dispersión coloidal (agua + coloides), no tienen una carga eléctrica única. Las cargas originales de las partículas son equilibradas con las cargas de la fase acuosa, resultando una doble capa eléctrica en cada interfase entre el sólido y el agua (Figura 1.1). La estabilidad de las suspensiones coloidales se explica por la forma en que actúan diferentes fuerzas entre las partículas.

Las fuerzas de difusión y atracción electrostática dispersan la carga en el agua alrededor de cada partícula, en una capa difusa. Las fuerzas eléctricas de repulsión y las fuerzas de atracción de Van Der Waals interaccionan con las partículas en la solución produciendo una barrera potencial que previene la aglomeración. Al proceso de vencer la barrera de repulsión para permitir que ocurra la aglomeración se le denomina *desestabilización* (CEPIS, 1992).

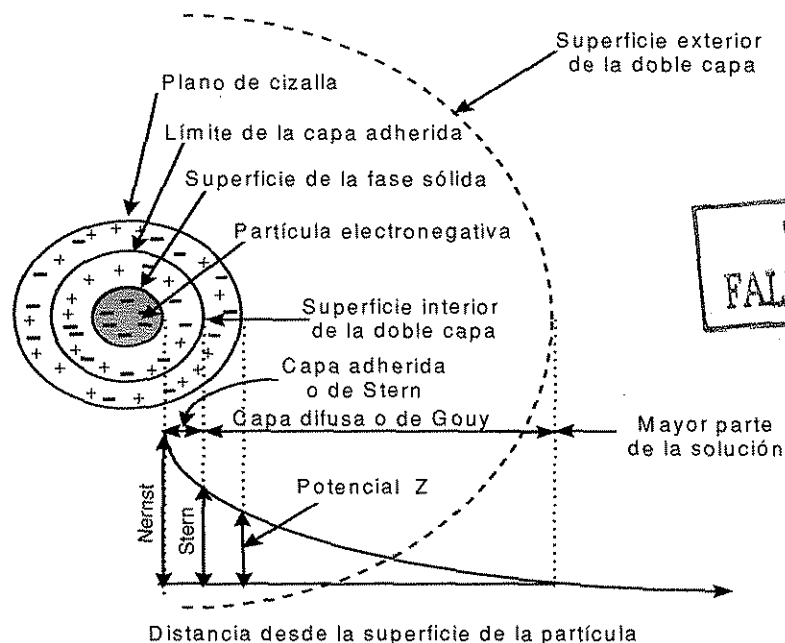


Figura 1.1 Modelo de la doble capa difusa de Stern - Gouy (CEPIS, 1992)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Los coloides pueden precipitarse por diferentes medios, ya sea por electroforesis o por reducción del potencial Z. La primera se debe a la atracción que ejerce un polo sobre las partículas cargadas con carga eléctrica de signo contrario, su uso en forma práctica no ha tenido resultados satisfactorios. La reducción del potencial Z se basa en que los coloides tienen una carga eléctrica que crea un potencial Z para la distancia más allá de la cual desaparece el efecto de la carga, y por consiguiente el potencial Z es una medida de la capacidad de atraer o repeler cargas eléctricas según sea el signo de la carga. El potencial Z puede reducirse por dos mecanismos (Unda, 1993):

- 1) Neutralizando la carga del coloide por otros coloides de carga eléctrica de signo opuesto, produciéndose algo similar a una neutralización y dando origen a un precipitado derivado de la mezcla de las sustancias originalmente presentes.
- 2) Por adsorción de iones de signo contrario a los que dan la carga a la partícula.

El mecanismo se lleva a cabo introduciendo iones de carga opuesta, normalmente positiva a la solución, tales como  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Fe}^{+++}$  y  $\text{Al}^{+++}$ ; estos iones provocan la reducción de la doble capa (B) (ver Figura 1.1), puesto que los mismos pasan a la capa adsorbida (A) y neutralizan la carga de la partícula, de esta forma la B se reduce y el potencial zeta tiende a cero.

Hay una enorme diferencia entre el poder relativo precipitador de los iones y el poder resultante debido a la carga que tiene el ion. Se puede concluir, en términos generales, que el poder precipitador de un ion bivalente es 50 a 60 veces superior al ion monovalente, y el ion trivalente tiene un poder de 600 a 700 veces superior (CEPIS, 1992).

#### 1.1.1.1.2 Adsorción y neutralización

Este mecanismo se presenta con coagulantes tanto orgánicos como inorgánicos. Cuando se agrega sulfato de aluminio o sales de hierro al agua se forman una serie de especies solubles hidrolizadas.

Los coagulantes se hidrolizan, formando especies con carga positiva, los cuales se adsorben a la superficie de la partícula (con carga negativa) y reaccionan químicamente con los grupos superficiales de la partícula formando un nuevo tipo de superficie. Esta superficie puede obtener carga opuesta en el caso de llegar a la sobredosificación y se reestabiliza de nuevo, pero esta vez con carga positiva. Este proceso no es simplemente electrostático, sino químico, puesto que se forman los enlaces químicos entre el coagulante y la partícula (Figura 1.2). Cuando la cantidad de los coloides presentes en el agua es grande, la distancia entre ellos es pequeña, siendo por lo tanto mayor la fuerza de atracción y la energía requerida para su desestabilización es menor (CEPIS, 1992).

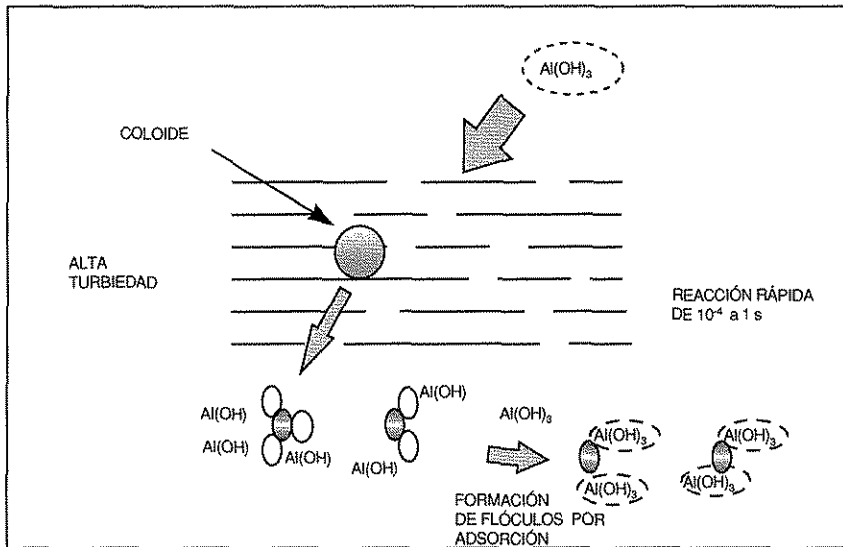


Figura 1.2 Coagulación por adsorción (CEPIS, 1992)

### 1.1.1.1.3 Coagulación por barrido

El mecanismo por barrido se presenta normalmente cuando el agua es clara y el porcentaje de partículas coloidales es pequeño (Figura 1.3). Con dosis de alúmina suficientemente altas se forma un precipitado de hidróxido de aluminio que al sedimentarse físicamente barre de la suspensión a las partículas coloidales.

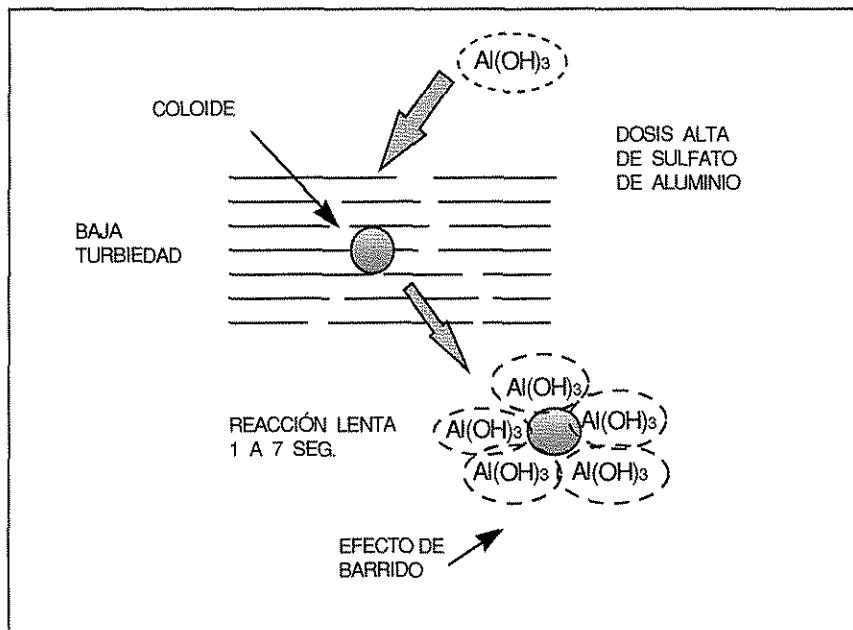


Figura 1.3 Coagulación por barrido (CEPIS, 1992)

#### 1.1.1.1.4 Puentes Interparticulares

Este mecanismo se presenta cuando se emplean polímeros de alto peso molecular y grupos superficiales activos que se adhieren a la superficie de la partícula. Algunos grupos de polímeros se adsorben a la superficie de la partícula y se forman "puentes" entre las mismas. En caso de una sobredosis puede ocurrir saturación o encubrimiento de la partícula y un efecto adverso (Sturmm and O'Melia, 1968).

#### 1.1.1.2 Sustancias químicas empleadas en la coagulación

Las sustancias químicas empleadas se clasifican en coagulantes, modificadores de pH y ayudantes de coagulación.

Las principales sustancias con propiedades coagulantes utilizadas en el tratamiento de las aguas son: el sulfato de aluminio, cloruro férrico, sulfato ferroso y férrico, clorosulfato férrico y carbonato de magnesio.

La desestabilización de los coloides en los procesos de tratamiento de agua se lleva a cabo ya sea por adsorción de especies coagulantes o por inmersión dentro de los precipitados de hidróxido o carbonato. Cuando la desestabilización se lleva a cabo por la adsorción, las especies que adsorben son generalmente polímeros. Estos polímeros pueden añadirse directamente al proceso (ej., polímeros orgánicos sintéticos, sílice activada) o, pueden ser producidos dentro del mismo a partir de sales (ej., Al(III) y Fe(III)) o producirse directamente dentro del sistema partiendo de sustancias presentes en el agua (ej., polímeros extracelulares). En el caso de la cal, la coagulación se lleva a cabo por la simple precipitación del  $\text{CaCO}_3$ , y a mayor pH del  $\text{Mg(OH)}_2$  (CEPIS, 1992).

##### 1.1.1.2.1 Coagulación con sales de aluminio

Las sales de aluminio forman un flóculo ligeramente pesado. Las más conocidas de éstas son el sulfato de aluminio, sulfato de aluminio amoniacal, cloruro de aluminio y el aluminato de sodio. El sulfato de aluminio es el coagulante que por su bajo costo y su manejo relativamente sencillo, se usa con mayor frecuencia en las plantas de tratamiento de agua potable. Se utiliza en forma sólida o líquida. La forma sólida se presenta en placas compactas, en forma granulada de diversos tamaños, o en polvo.

Las ventajas para la aplicación de sulfato de aluminio son:

1. Amplia disponibilidad.
2. Bajo costo.
3. Es efectivo para varios tipos de agua.
4. Amplia efectividad bajo varias condiciones.

Algunas desventajas son (Shovlin, 1993):

1. El volumen y disposición de lodos.
2. La necesidad de ajustar el pH del agua antes o después de la filtración.
3. La posible formación de aluminio residual si el sulfato de aluminio se sobredosifica.

El sulfato de aluminio se define, en general, por su contenido en alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), en un 17% aproximadamente. La densidad aparente del sulfato de aluminio en polvo es del orden de  $1000 \text{ kg/m}^3$ . El sulfato de aluminio está constituido por la sal de una base débil (hidróxido de aluminio) y de un ácido fuerte (ácido sulfúrico), por lo que sus soluciones acuosas son muy ácidas; su pH varía entre 0 y 3.8 según la relación molar sulfato/alúmina. Esta acidez debe tenerse en cuenta al proceder a su almacenamiento, preparación y distribución.

## 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE ALÚMINA

Las características de los lodos de alúmina varían de una planta a otra, dependen de la calidad de agua cruda, del tratamiento recibido y de la época del año; sin embargo, algunas características comunes son: el lodo de alúmina es un fluido no newtoniano, voluminoso, de aspecto gelatinoso, compuesto principalmente por hidróxido de aluminio, partículas inorgánicas, tales como arcilla o arena, coloides; residuos de reactivos químicos añadidos durante el proceso de tratamiento, plancton, y otra materia orgánica e inorgánica removida del tratamiento del agua. También presentan un alto contenido de agua (cerca del 99 %). El conocimiento de las características de los lodos de alúmina es esencial para determinar el tratamiento y la disposición final.

Los sólidos residuales de las plantas de tratamiento de agua están contenidos como sólidos suspendidos provenientes de los desechos de los procesos de coagulación - sedimentación y del retrolavado de los filtros. Generalmente tienen un contenido de sólidos totales en el rango de 3,000 - 15,000 mg/L donde los sólidos suspendidos representan un 90%, y los sólidos volátiles del 20 - 35%. La demanda bioquímica de oxígeno generalmente es de 30 - 100 mg/L. El pH del lodo está en un rango de 5 - 7. Todas éstas características provocan que el lodo sea (Albrecht, 1972):

- 1) Insoluble a un pH natural.
- 2) Fácilmente sedimentable, pero a una concentración que es inadecuada para un manejo conveniente y por consiguiente para relleno de tierra (se considera como mínimo una concentración de 20% de sólidos totales).
- 3) Muy compresible, sin embargo, resiste el paso del agua.
- 4) Tiene una composición que cuando se dispone en suelo azolva el terreno.

Estudios realizados en plantas potabilizadoras indican que a una concentración de sólidos del 20% en peso (Cornwell, 1979), los lodos de alúmina son comparables en consistencia a una arcilla blanda. A una concentración de 40 a 50%, llega a ser similar a una arcilla dura. El grado de deshidratación necesaria para cualquier planta dada dependerá del método de disposición final. La concentración mínima normalmente aceptable puede ser de 20%. Aproximadamente se remueven de 80 a 90% de los SS residuales en los

tanques de coagulación - sedimentación en instalaciones diseñadas correctamente. El remanente es removido por filtración y eliminado de los filtros en el agua de retrolavado.

El lodo proveniente del retrolavado de los filtros es más diluido, representando un volumen más grande de agua. La recuperación de esta agua es más fácil si se trata primero. Debido a las diferencias en las características entre los desechos del agua del retrolavado de los filtros y el lodo de alúmina, el empleo de un tanque de recuperación de agua del retrolavado debe ser considerado. El tratamiento del agua de lavado de los filtros se obtiene por una sedimentación sencilla y el sobrenadante clarificado se retorna a la entrada del agua cruda de la planta de tratamiento, y finalmente los lodos sedimentados se mezclan con los lodos de los desechos del clarificador (Borchardt, 1981).

### 1.2.1 Problemática

Actualmente, la protección al medio ambiente está recibiendo una mayor atención, siendo cada vez más necesario hallar métodos alternativos para la disposición de lodos de plantas de tratamiento de agua.

El lodo producido en las plantas potabilizadoras es en gran parte inorgánico y normalmente no excede la demanda de oxígeno en aguas superficiales. Históricamente, la mayoría de los lodos se descargaban a los cuerpos de agua más cercanos. Sin embargo, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) clasifica a éste tipo de desechos como un residuo industrial, el cual no puede ser descargado a cuerpos ó corrientes de agua (Gruninger, 1975).

La magnitud del problema de manejo y disposición de lodos generados por las plantas potabilizadoras es un problema a nivel mundial, como lo indica la siguiente información:

- En México, existen aproximadamente 256 plantas potabilizadoras (Comisión Nacional del Agua, 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, siendo el sulfato de aluminio el coagulante 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 (Sandoval, *et al*, 1997).
- En América Latina los recursos para la operación de trenes de tratamiento de lodos en las plantas potabilizadoras son escasos (Sandoval, *et al*, 1997).
- En Estados Unidos hay 3600 plantas de tratamiento de agua produciendo lodos de varios procesos de coagulación. La cantidad de lodos que resultan de éstos se han estimado en 1 millón de ton/año (Albrecht, 1972).



La disposición de ellos sin tratamiento resulta en la contaminación de terrenos, fuentes superficiales o subterráneas. El problema principal que presentan estos residuos, particularmente aquellos que son producidos por el uso de sulfato de aluminio como coagulante, es el alto contenido de agua y baja capacidad de deshidratación ya que están formados principalmente por hidróxidos de aluminio, los cuales retienen una gran cantidad de agua incrementando el volumen de lodos a manejar y disponer (Ilustración 1.1).



**Ilustración 1.1 Disposición de lodos generados en la planta potabilizadora "Los Berros" (Sistema Cutzamala, Edo México)**

La disposición actual de los lodos generados en las plantas potabilizadoras del país es sólo en lagunas de secado provocando la desertización del terreno, ya que el aluminio destruye las raíces más finas de las plantas e impide la absorción correcta de nutrientes. Por lo tanto, éstos residuos pueden hacer la tierra estéril y darle una apariencia de barro cuando se abandona o agota el lugar; en éstas condiciones es difícil que se reúnan características habitables. La descarga en cuerpos de agua y ríos puede causar degradación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL

El objetivo general 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.

El problema básico de los lodos generados por las plantas potabilizadoras es concentrar el lodo de hidróxido de aluminio, eliminando parcial o totalmente el agua que contienen los mismos. Para reducir el volumen total de lodos a disponer se puede aplicar alguna de las siguientes alternativas (Tabla 1.1).

**Tabla 1.1 Alternativas de Tratamiento y Disposición de Lodos provenientes de Plantas Potabilizadoras (Albrecht,1972)**

ALTERNATIVA	ALGUNAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acondicionamiento Químico</li> </ul>	Se utilizan polielectrolitos, los cuales incrementan la concentración de sólidos, liberando una gran cantidad de agua.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tanques de espesamiento</li> </ul>	Reduce el volumen del lodo antes de la disposición final. La reducción del volumen es de un medio a un quinto de su volumen original.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desaguado</li> </ul>	Aumenta la concentración de sólidos.
Lechos de secado	
Lagunas	Pueden ser económico cuando el terreno está disponible y relativamente barato. El costo de operación es bajo cuando la remoción de lodo puede ser realizada por el uso de rastreo en línea. Aunque este método de deshidratación es típico en muchas áreas, hay desventajas definidas. El clima influye en la efectividad de este método.
Filtros prensa	Son utilizados después del espesamiento con un polielectrolito. Con un lodo de 1.5 - 2.0% de sólidos, un filtro prensa es capaz de aumentar la concentración de sólidos de 15 a 20%. El trabajo debe ser suspendido periódicamente para remover la torta e inspeccionar la textura.
Filtros a vacío	Existen algunas variables que afectan su eficiencia como son: la concentración hidratada del lodo, temperatura, demanda de agua y eficiencia de clarificación. Entre mayor sea la concentración de aluminio en el lodo, es más gelatinoso y es difícil de filtrar.
Centrifugación	Requiere un espacio pequeño. Sin embargo, la centrifugación, aunque es ampliamente usada para la deshidratación de lodos, no se recomienda para lodos de aluminio.
Congelamiento	El congelamiento remueve el agua del lodo y destruye la estructura coloidal. Cuando el lodo es descongelado y sedimentado, el agua no regresa al lodo, y puede ser decantada.

(Continuación)

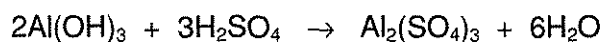
ALTERNATIVA	ALGUNAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disposición final</li> </ul> <p data-bbox="160 378 375 474">Descarga a aguas superficiales</p>	<p data-bbox="375 378 1361 442">Es el método de disposición más económico, pero de acuerdo a la legislación federal en términos de contaminación, este método se eliminó.</p>
<p data-bbox="160 527 375 591">Relleno sanitario</p>	<p data-bbox="375 527 1361 655">Los lodos de aluminio se mezclan con desechos de plantas residuales en sistemas de rellenos que no afectarán los procesos biológicos aerobios, incrementando la carga de sólidos en ellos y dejando el problema de disposición en manos de la planta de tratamiento de aguas residuales.</p>
<p data-bbox="160 676 375 719">Incineración</p>	<p data-bbox="375 676 1361 868">Requiere de poca área para su instalación. Reduce el volumen del lodo en un 80 a 95%. Destruye totalmente los microorganismos patógenos y oxida a los compuestos orgánicos. Los metales pesados no son degradados, su concentración aumenta en las cenizas. Provoca contaminación atmosférica si no hay control de emisiones. Los costos de inversión, operación y mantenimiento son altos.</p>
<p data-bbox="160 889 375 932">Acidificación</p>	<p data-bbox="375 889 1361 1083">Investigaciones preliminares de laboratorio, indican que mediante la acidificación, se produce un lodo que puede ser deshidratado más fácilmente por espesamiento o por filtración al vacío (acondicionamiento del lodo), reduciendo el volumen de lodos para su disposición y permitiendo la recuperación del coagulante. La desventaja de este método es la posible contaminación por metales pesados (principalmente hierro y manganeso), y color.</p>

### 1.3.1 Recuperación de aluminio del lodos de plantas potabilizadoras

El proceso de la 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; 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 ácido clorhídrico y bases como el hidróxido de sodio e hidróxido de calcio también han sido utilizados (Moran and Roddy, 1960).

Cuando en un lodo predomina la forma  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  y al ser extraído el aluminio, este es disuelto en productos polimerizados intermedios y productos hidrolizados de aluminio hidratado. 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 puede significativamente mejorar la deshidratación del lodo y reducir su masa y volumen (Saunders and Randall, 1988).

En forma de ecuación, la recuperación de aluminio es la siguiente (Fulton, 1974):



El requerimiento estequiométrico de ácido sulfúrico para disociar el  $(\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$  a  $\text{Al}^{+3}$  es 1.5 moles/mol  $(\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ , 1.4 kg/kg  $(\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$  o 5.45 kg/kg Al. Se ha preferido el ácido sulfúrico debido a su bajo costo y a su habilidad para extraer coagulantes primarios.

No es necesario emplear un exceso de ácido con respecto al equivalente estequiométrico del  $\text{Al}(\text{OH})_3$  presente; pero es necesario tener en cuenta la presencia de otras sustancias de reacción alcalina, como los bicarbonatos y carbonatos alcalinos o alcalinotérreos. Sin embargo, la disolución completa de aluminio no llega a ser al cien por ciento debido a:

1. Otros materiales demandan ácido (sólidos presentes en el lodo como producto de la coagulación), tales como, óxidos e hidróxidos de hierro en concentraciones equivalentes a las de aluminio, mientras que 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.
2. La forma del aluminio en el lodo, por ejemplo,  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  ó  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , puede tener un efecto dramático en su recuperación cuando el agua cruda contiene una concentración alta de sólidos.

Bajo condiciones de recuperación del coagulante, los óxidos de aluminio asociados con el agua cruda no pueden ser disueltos. Esto se debe a que el ácido sulfúrico se usa en menor dosis, a menor temperatura y en un período corto de contacto con los sólidos del lodo. El lodo que queda después de la recuperación es generalmente más concentrado y puede deshidratarse más fácilmente en lechos de secado de arena.

Los factores importantes asociados con la evaluación de la recuperación del coagulante, son la demanda de ácido, el tiempo de contacto y el pH alcanzado para llevar a cabo la recuperación.

### 1.3.2 Dosis de ácido sulfúrico

La cantidad de ácido sulfúrico adicionado, así como su concentración, varían ampliamente en los procedimientos experimentales debido a las diferentes características del lodo y a la necesidad de una medición exacta en procedimientos de prueba a pequeña escala. En muchos casos, la dosis de ácido es normalizada a la cantidad de aluminio recuperado del lodo ( $\text{kg H}_2\text{SO}_4/\text{kg Al}$  recuperado) por una comparación estequiométrica de la demanda de ácido. Una medición más exacta de comparación puede ser normalizando la dosis de ácido con el aluminio total presente en el lodo. Sin embargo, en muchas ocasiones esta concentración es desconocida. Por lo que, la dosis de ácido normalizada será siempre más alta que la dosis para recuperar el aluminio total.

Las Tablas 1.2, 1.3 y 1.4 muestran resultados de dosis normalizadas que se han hallado a nivel laboratorio, escala piloto y a nivel de planta.

**Tabla 1.2 Pruebas de laboratorio**

REFERENCIAS	DOSIS ÓPTIMA DE ACIDO	% DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO
Isaac y Vahidi (1961)	3.95 kg/kg Al a (2.37 kg/kg Al)	60
Webster (1967)	2.41 kg/kg Al a 4.14 kg/kg Al	53 - 83
Albrecht (1972)	0.64 kg/kg de sólidos secos ó 4.94 kg/m <sup>3</sup> de lodo	
Cornweel y Susan (1979)	1.5 moles/ mol Al (5.45 kg/kg Al)	56 - 90
Saunders (1989)	1 kg/kg Al	41.1
L. Sandoval <i>et al</i> (1997)	5.6 -6.3 kg/kg Al recp.	87
Otros	2.15 kg/kg Al	66.5
	7 kg/kg Al	68.1

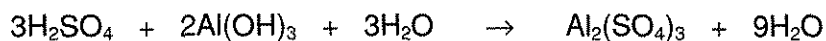
**Tabla 1.3 Pruebas a escala piloto**

REFERENCIAS	DOSIS ÓPTIMA DE ÁCIDO	ALUMINIO RECUPERADO
Webster (1966)	1.85 kg/m <sup>3</sup> de ácido equivale a 4 kg/kg Al recuperado	obtuvo 0.45 kg/m <sup>3</sup>
Westerhoff y Daly (1974)	0.37 kg/kg de lodo seco	
Gruninger (1975)	0.43 kg/kg Al recuperado	

**Tabla 1.4 Pruebas a nivel planta**

REFERENCIAS	DOSIS ÓPTIMA DE ACIDO	% ALUMINIO RECUPERADO
Bishop et al (1987)	2 mol/mol Al (7.27 kg/kg Al)	
Bishop et al (1987)	0.6 kg/kg de sólido seco pH ≈ 2	74 - 79 % con una concentración de aluminio de 2 a 2.7 kg/m <sup>3</sup>
Moran y Roddy (1960)	4.1 kg/kg Al	

En el presente estudio la recuperación se basará sólo en el aluminio disuelto que pueda ser extraído mediante una digestión débil empleando ácido sulfúrico, de acuerdo a la siguiente reacción:



En éste caso se considera que el aluminio que se extrae es el que proviene de la adición del coagulante ( $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), ya que el aluminio presente en la arcilla ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) es mucho

---

más difícil de disolver, requiriendo para esto una digestión fuerte utilizando temperaturas elevadas.

### 1.3.3 pH de acidificación

Moran y Roddy (1960) concluyeron que el pH varía con la alcalinidad del agua cruda, así, agua con alta alcalinidad requiere un pH menor para recuperar el aluminio.

Isaac y Vahidi (1961) concluyeron que un pH óptimo podría ser de 3. Además de que se ha reportado que valores menores incrementan el color de la solución, afectando la calidad del coagulante recuperado. Así como también, determinaron el tiempo de contacto óptimo para la disolución ácida del aluminio, el cual fue de 15 minutos, suficiente para obtener un equilibrio estequiométrico.

Chen *et al* (1976) concluyó que un pH óptimo para un lodo no puede ser trasladado a otro lodo. A valores de pH menores de 2.5, la recuperación de aluminio en la mayoría de los lodos se maximiza. Cornwell y Susan (1979) encontraron que aproximadamente a los 5 minutos se obtiene un 80% de equilibrio, mientras que el 100% se obtuvo antes de los 20 minutos. El equilibrio lo definieron como el punto donde no se disuelve ya más el aluminio.

Sandoval *et al* (1997) reportaron que para una recuperación del aluminio aproximadamente del 80% se requiere un pH en un rango de 2.8 a 3.0, con un tiempo de contacto de 10 minutos.

## 1.4 USO DEL ALUMINIO RECUPERADO COMO COAGULANTE

Se ha reportado que el aluminio recuperado podría ser usado como coagulante en las plantas de tratamiento de agua o para remover el fósforo en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Cuando se reusa como un coagulante esta solución proporciona beneficios similares a los productos comerciales de aluminio.

La calidad del aluminio recuperado se evalúa con base en el contenido de aluminio, materia orgánica, turbiedad, color, manganeso, hierro y trazas de contaminantes orgánicos e inorgánicos. El contenido de aluminio es importante ya que el producto se utilizará para remover color y coloides. Los contaminantes son reciclados en el proceso de tratamiento; sin embargo, se han reportado que las concentraciones son comparables con las que se encuentran en coagulantes comerciales. Algunos 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) concluyeron 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 similar de aluminio recuperado remueve solamente entre un 70 a 80%. También observaron que si el pH de la solución es menor a 3, la efectividad del aluminio se deteriora. Saunders (1988) 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. La turbiedad se incrementa drásticamente a altas dosis de aluminio, indicando una reestabilización de las partículas. Esto puede ser debido a una sobredosis de coagulante o al bajo pH del mismo (debido a su naturaleza ácida de extracción).

Bishop *et al* (1987) probó a nivel planta una alúmina comercial y aluminio recuperado. Las concentraciones finales de los contaminantes fueron iguales en ambos casos. Al final del sedimentador la turbiedad y el manganeso presentaron valores elevados para el sistema de aluminio recuperado; sin embargo, después del filtro, las concentraciones fueron iguales en ambos casos. El hierro y manganeso fueron los metales que se presentaron en concentraciones altas en el coagulante recuperado, los cuales pudieron representar un problema; sin embargo, fueron removidos en el tren de tratamiento. En términos generales, se reporta que la calidad del agua fue igual en ambos casos.

Joan Pera I. Llibre (1991) realizó un estudio 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 en la misma, empleando una acidificación a un pH aproximadamente de 3.5, esto se realizó con la finalidad de evitar en lo posible la disolución de otros cationes. Si se hubiese utilizado el 100% del lodo se hubiera recuperado 93% del coagulante. Concluyeron también que desde el punto de vista de calidad del agua, la reutilización de los lodos para regenerar el coagulante no empeora apreciablemente los resultados. 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 (Tabla 1.5; Cornwell y Susan, 1979).

**Tabla 1.5 Color del sobrenadante recuperado como una función del pH**

pH	% Al RECUPERADO	COLOR HAZEN
3.90	7	50
3.15	38	875
3.05	53	1550
3.00	66	1750
2.50	79	5600
2.20		7000

En relación a los metales, se debe de observar la acumulación de algunos como son el hierro y el manganeso en la solución del coagulante, ya que son constituyentes

principales del lodo y ambos son solubles a pH bajos, por lo que pueden causar un deterioro en la calidad del agua.

Estudios realizados empleando la recirculación de la solución de aluminio como coagulante mostraron que la concentración de hierro decrece en los primeros cuatro ciclos y después permanece más o menos constante, lo que indica que la concentración de hierro no aumenta en el coagulante recuperado (Isaac y Vahidi, 1961) (Tabla 1.6).

**Tabla 1.6 Concentración de hierro en la solución de recuperación de aluminio durante varios ciclos**

CICLO	COAGULANTE ADICIONADO mg/L DE Al			Fe mg/Lt recuperado	pH
	Comercial	Recuperado	Total		
1	4.3		4.3	35.0	2.2
2	1.4	3.8	5.2	28.0	2.3
3	1.9	4.0	5.9	18.2	2.5
5	1.4	4.0	5.4	14.0	2.4
6	1.9	4.1	6.0	17.5	2.6

Wang y Yang (1975) concluyeron que el hierro puede estar en estado férrico, causando la formación de flóculos de hierro durante la floculación, lo que puede favorecer con un aumento en la coagulación. La concentración de hierro en el agua del proceso de coagulación será menor debido a que su solubilidad es menor a un pH neutro y precipitará como una especie sólida de hidróxidos durante el proceso de coagulación. Para el manganeso a altos niveles se recomienda un tratamiento posterior para su oxidación y subsecuente remoción.



## CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### UBICACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

El lodo que se empleará para este estudio proviene de los desechos de la coagulación del tratamiento del agua de la planta potabilizadora "Los Berros" del sistema Cutzamala, ubicada en el Edo. de México. El tren de tratamiento en la planta es de tipo convencional, siendo los procesos que se llevan a cabo: desinfección, coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Figura 2.1).

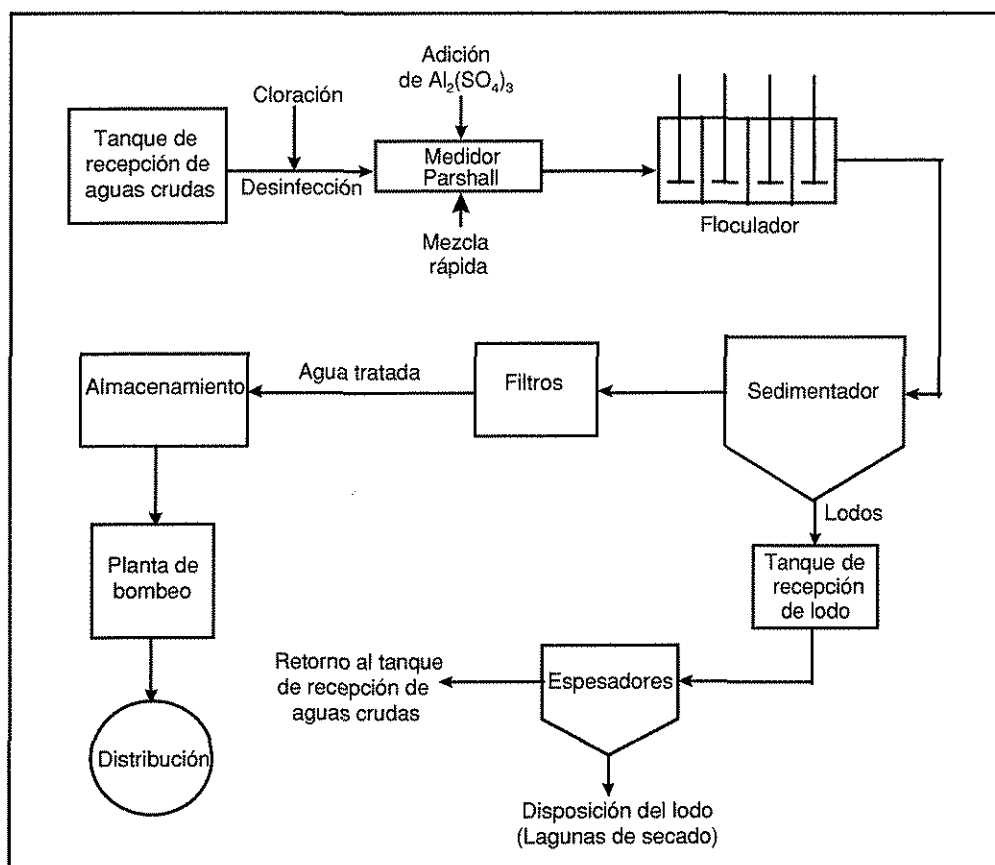


Figura 2.1 Tren de tratamiento de la planta potabilizadora Los Berros (Sistema Cutzamala)

La planta recibe aproximadamente de 15 a 17 m<sup>3</sup>/s de agua proveniente de las presas Valle de Bravo, Guadalupe Victoria y Chilesdo. El flujo se distribuye en cinco módulos denominados B, C, D, E y F, cada uno de los cuales está a su vez constituido por un canal Parshall, dos floculadores, cuatro sedimentadores y ocho filtros rápidos. Los sedimentadores cuentan con equipos de recolección de lodos en continuo. Al final, el agua tratada en los cinco módulos es almacenada en un cárcamo, de donde es enviada a su distribución. El lodo generado por los módulos B y C llegan a un tanque de recepción de lodos, y el lodo de los módulos D, E y F llega a un segundo tanque de recepción de

lodos. Los lodos de éste último tanque reciben un acondicionamiento químico (adición del polímero Flomex 83704), posteriormente se reparte el lodo a cuatro espesadores (Figura 2.2).

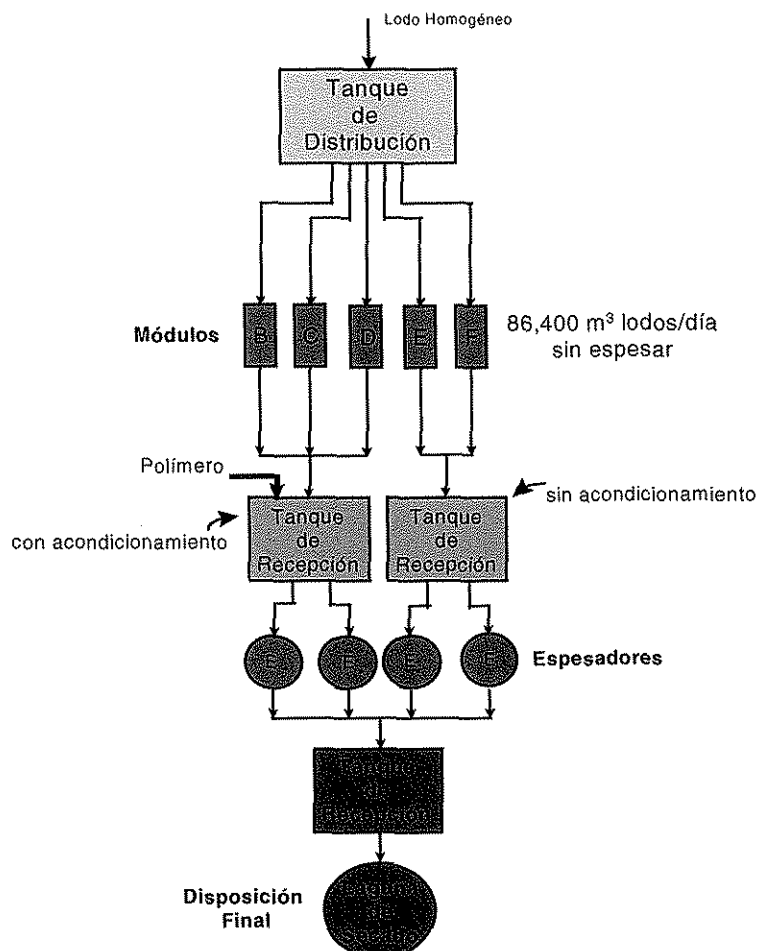


Figura 2.2 Esquema de recepción de lodos en la planta potabilizadora Los Berros

Para realizar las pruebas a nivel laboratorio, el lodo se extraerá de la caja de recepción de lodos de los módulos B y C (Figura 2.2), y para las pruebas a nivel piloto el lodo se generará en una planta piloto de 1 L/s, a éste tipo de lodo se le designará con el nombre de lodo homogéneo (LH).

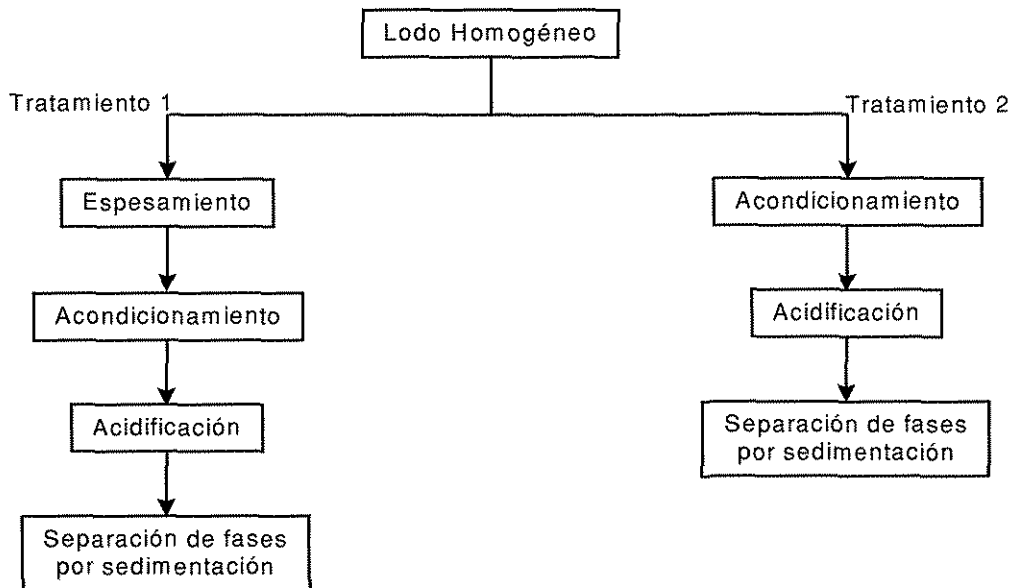
## 2.1 METODOLOGÍA

### 2.1.1 Pruebas a nivel laboratorio

La primera parte del estudio consistirá en la evaluación de dos trenes de tratamiento a nivel laboratorio, con el propósito de seleccionar al que permita obtener la mayor deshidratación y menor volumen de lodo, proporcionando además la máxima

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

recuperación de aluminio. El tren de tratamiento elegido se diseñará y construirá a nivel piloto. La Figura 2.3 presenta los dos trenes de tratamiento que se llevarán a cabo a nivel laboratorio.



**Figura 2.3 Trenes de tratamientos propuestos**

Los tratamientos consisten en una combinación de los procesos de espesamiento, acondicionamiento, acidificación y separación de fases (líquido-sólido) por gravedad. Como primer paso se determinarán los parámetros de operación y control para cada etapa de los mismos. A continuación se explica la metodología que se seguirá en cada una de ellas.

### 2.1.1.1 Caracterización de lodos y sobrenadantes

Los parámetros que se emplearán para caracterizar el lodo y los sobrenadantes generados en cada tratamiento son los siguientes:

- Volumen
- pH
- Aluminio disuelto
- Hierro disuelto
- Manganeso disuelto
- ST
- SST
- Potencial Z
- Pruebas de humedad

Para determinar la reducción del volumen del lodo se medirá la cantidad de lodo homogéneo y el producido en cada proceso de los trenes de tratamiento. El pH se medirá y controlará principalmente en la etapa de acidificación para la extracción del aluminio.

En los sobrenadantes se analizará la concentración de aluminio, ya que éste es objeto de estudio; también se determinarán hierro y manganeso porque son metales presentes en concentraciones importantes en el lodo y que demandan ácido sulfúrico. La determinación de éstos metales disueltos se hará mediante un método colorimétrico (espectrofotometría Hach), el cual es de fácil manejo, rápido y económico.

Los sólidos totales (ST) y suspendidos totales (SST) se analizarán para evaluar su aumento en cada etapa de los trenes propuestos. La determinación se realizará empleando la técnica estandarizada (APHA, 1992).

Se medirá el potencial Z con la finalidad de comparar y evaluar la reducción de la carga de las partículas coloidales (Zeta-Meter, 1993), lo cual indicará el grado de desestabilización que se produzca en el lodo después de haber pasado por cada uno de los procesos propuestos. Se empleará un analizador de potencial zeta (Zeta Plus) con las siguientes especificaciones:

⇒ Voltage: 115 Volts

⇒ Ciclos: 60 Hz

⇒ Computadora:

Velocidad: 100 Mhz

Memoria ram: 32 MB

Tamaño de disco duro: 2 GB

⇒ Versión de software:

Sistema operativo (DOS): 6.22

Windows: 3.11

Zeta Plus para DOS: 3.59

Zeta Plus para Windows: 1.23

Se determinará el contenido de humedad en el lodo homogéneo y en cada uno de los lodos resultantes en cada etapa de los trenes de tratamiento con el propósito de conocer la cantidad de agua ligada a las partículas sólidas y observar su pérdida en cada uno de los distintos lodos. Para estos análisis se empleará una balanza de humedad marca OHAUS con las siguientes especificaciones:

⇒ rango de temperatura: 35 °C a 205°C

⇒ variación de temperatura: ± 1°C

⇒ rango de tiempo: 0 a 180 min.

⇒ capacidad: 200 g

El procedimiento para realizar esta prueba es el siguiente:

1. Colocar la charola porta muestra y oprimir ON TARE.
2. Colocar la muestra en la charola (15 a 20 g) la pantalla indicará el peso de la muestra.
3. Programar a temperatura de 105 °C y tiempo de 180 min.

4. Registrar el % de humedad inicial en la muestra al tiempo cero y por lapsos de 10 minutos, hasta registrar 3 valores iguales.
5. Determinar el % de humedad y % de sólidos totales.

### 2.1.1.2 Espesamiento

El espesamiento del lodo consistirá en tomar un volumen medido de lodo homogéneo y dejar sedimentar por gravedad durante 30 minutos. Los análisis que se determinarán al lodo antes y después de su espesamiento se indican en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Análisis en la etapa de espesamiento**

Muestra	ST g/L	SST g/L	Volumen L
LH	x	x	x
LHE	x	x	x

LH: Lodo homogéneo

LHE: Lodo homogéneo espesado

### 2.1.1.3 Acondicionamiento químico

El acondicionamiento químico se empleará con el propósito de mejorar las características de deshidratación del lodo. Se llevará a cabo mediante el procedimiento de pruebas de jarras (ASTM D2035-80). Las condiciones óptimas de operación y el polímero que se aplicarán son los que se determinaron en el estudio de Sandoval *et al* (1997) para éste tipo de lodo.

Lodo homogéneo:

- Mezcla rápida:  $120 \text{ s}^{-1}$ , con un tiempo de 10 s
- Mezcla lenta o floculación:  $19 \text{ s}^{-1}$ , con un tiempo de 5 min
- Tiempo de sedimentación: 3 min
- Polímero BL-5368

Lodo espesado:

- Mezcla rápida:  $350 \text{ s}^{-1}$ , con un tiempo de 10 s
- Mezcla lenta o floculación:  $22 \text{ s}^{-1}$ , con un tiempo de 5 min
- Tiempo de sedimentación: 5 min

Después de la sedimentación, se retira el sobrenadante del lodo acondicionado, y se determinan los siguientes parámetros en éste último:

- Volumen de lodo
- ST y SST
- Porcentaje de humedad
- Potencial Z

### 2.1.1.4 Acidificación

Como última etapa en cada tratamiento se encuentra la acidificación, la cual aumenta la deshidratación del lodo y reduce en mayor proporción su volumen, permitiendo recuperar una solución rica en aluminio.

En la Figura 2.4 se muestra el procedimiento para la acidificación del lodo.

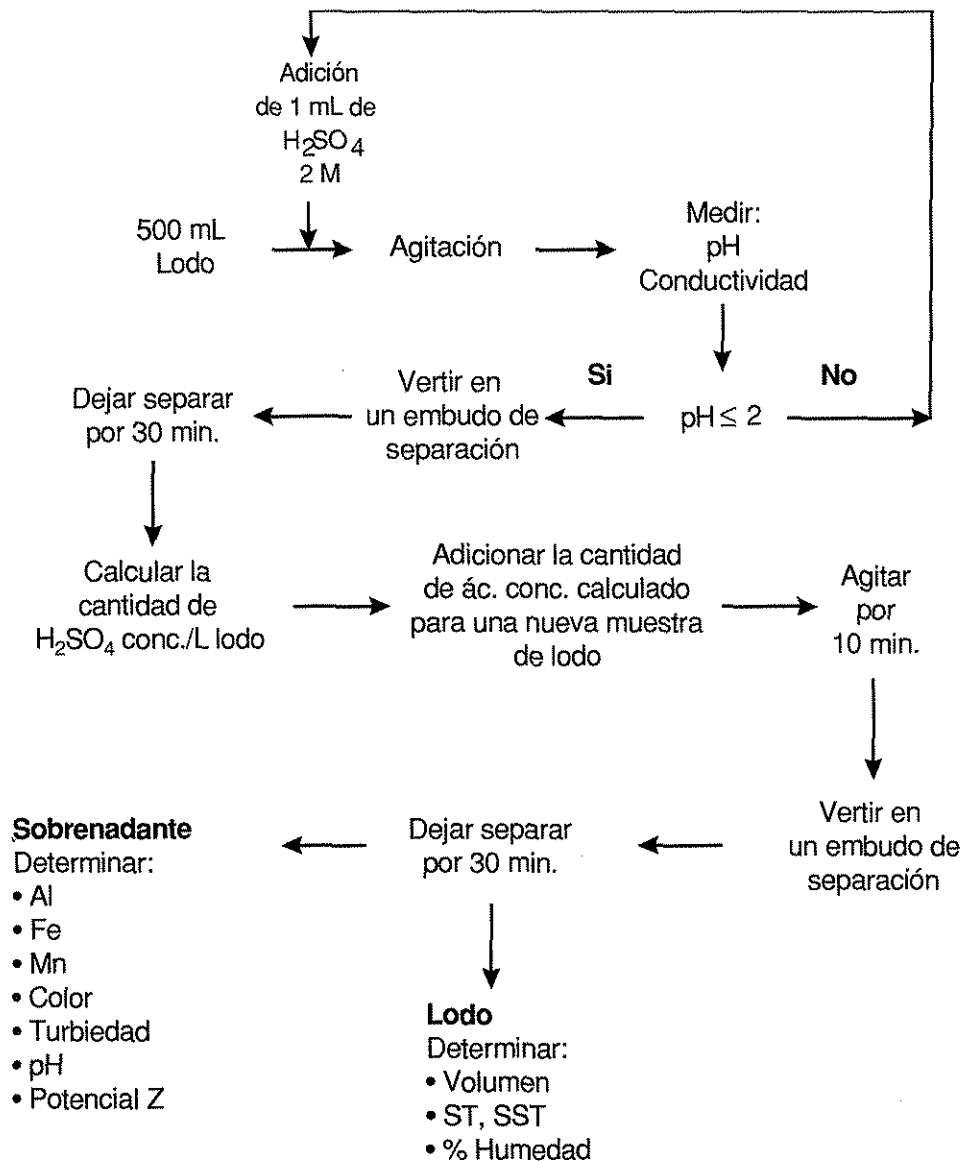
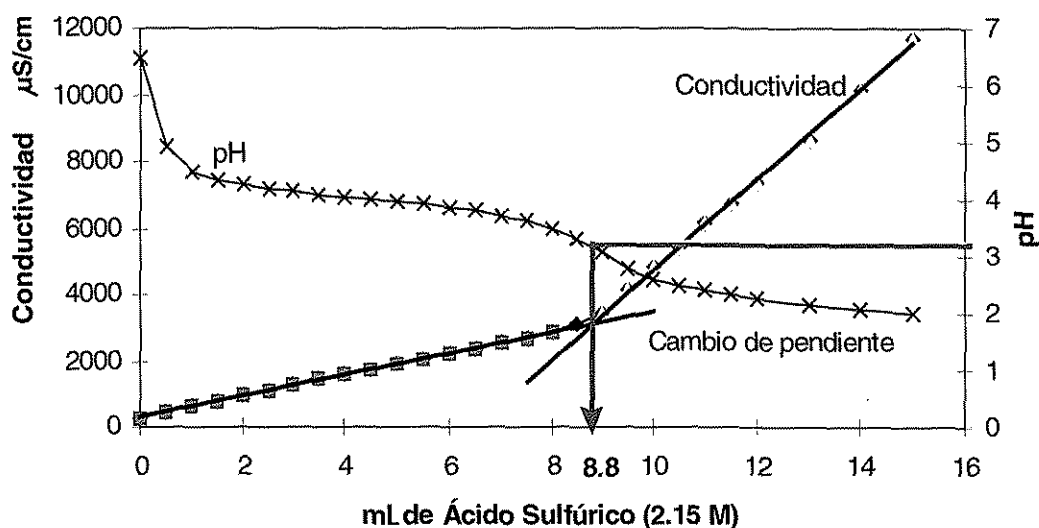


Figura 2.4 Procedimiento para la acidificación del lodo

Para determinar la cantidad de ácido sulfúrico concentrado requerido por un volumen dado de lodo, es necesario realizar primero una titulación potenciométrica y conductimétrica como se muestra a continuación (Gráfica 2.1).



**Gráfica 2.1 Determinación de la demanda de ácido sulfúrico**

Para alcanzar el punto de equivalencia en una muestra de 500 mL de lodo se necesitaron 8.8 mL de ácido sulfúrico 2.15 M. En este punto el ácido ya no tiene sustancias para reaccionar y es por eso que existe un cambio de pendiente en la conductividad y pH. A continuación se muestra un ejemplo del cálculo.

Ejemplo:

$M = 2.15$  moles/L soln.

$V_1 =$  Volumen utilizado de ácido = 8.8 mL

Densidad del  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 1.84$  g/mL

Cantidad de ácido concentrado:

$$N_0 \text{ moles} = (2.15 \text{ moles/L})(0.0088 \text{ L}) \\ = 0.0189$$

g ác. conc. =

$$= (0.0189 \text{ moles})(98.08 \text{ g/1 mol ác.}) = 1.85 \text{ g}$$

$$\text{vol. ác.} = (1.85 \text{ g}) / (1.84 \text{ g/mL}) = 1.008 \text{ mL}$$

Pureza del ác. = 98.2%

Vol. ác. = 1.008 mL (100%/98.2%) = 1.02 mL

Por lo tanto, para 500 mL de lodo se necesitarán 1.02 mL de ác. conc., para un litro de lodo se necesitarían 2.04 mL. De esta manera se calculará la cantidad de ác. requerido para cada muestra de lodo a acidificar de los dos trenes de tratamiento.

En el lodo se medirá el volumen, ST, SST, % de humedad y potencial Z, en el sobrenadante además de medir la cantidad de aluminio extraído se determinará también la concentración de hierro y manganeso ya que están en mayor proporción en el lodo y son disueltos durante la acidificación.

La medición del color y turbiedad en la solución recuperada del coagulante servirá para evaluar la calidad de la misma cuando se reusa como coagulante en planta piloto, ya que se ha reportado que éstos parámetros aumentan en la solución recuperada cuando recircula con éste propósito; además, a pH muy bajos ( $\text{pH} < 2$ ) el color se incrementa.

## 2.2 DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE LODOS

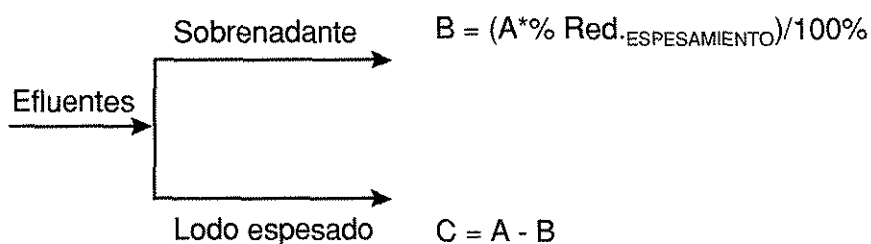
Con los resultados obtenidos del punto 2.1 se diseñará un tren de tratamientos de lodos a nivel piloto que se acoplará a una planta piloto de tratamiento de agua. Considerando que la planta de agua opera con un gasto de 1 L/s, y que la planta potabilizadora Los Berros genera por módulo (Figura 2.2) 200 L/s de lodos, al tratar  $3 \text{ m}^3$  de agua, entonces se tiene que la cantidad de lodo que se produciría en la planta piloto de agua es:

$$\text{Lodo producido por 1 L/s de agua} = (1 \text{ L/s})(200 \text{ L/s})/3000 \text{ L/s} = 0.067 \text{ L/s} = 4 \text{ L/min}$$

Este valor servirá de base para el cálculo del tren que se seleccione, así para el Tratamiento 1 se tiene:

- **Espesamiento:**

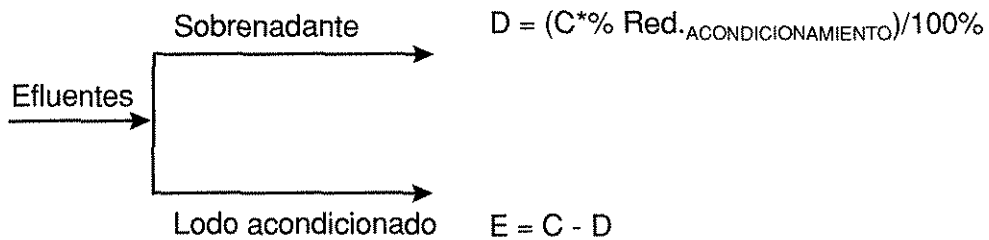
- ⇒ Influyente = 4 L/min. = A
- ⇒ Tiempo de residencia = 30 min



- **Acondicionamiento:**

- ⇒ Influyente = C
- ⇒ Mezcla rápida = 10 s,  $350 \text{ s}^{-1}$
- ⇒ Mezcla lenta = 5 min,  $22 \text{ s}^{-1}$
- ⇒ Sedimentación = 5 min



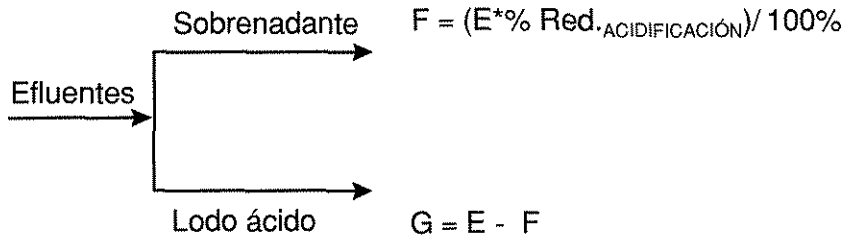


- Acidificación:

- ⇒ Influyente = E
- ⇒ Tiempo de residencia = 15 min
- ⇒ Efluente = E

- Separación:

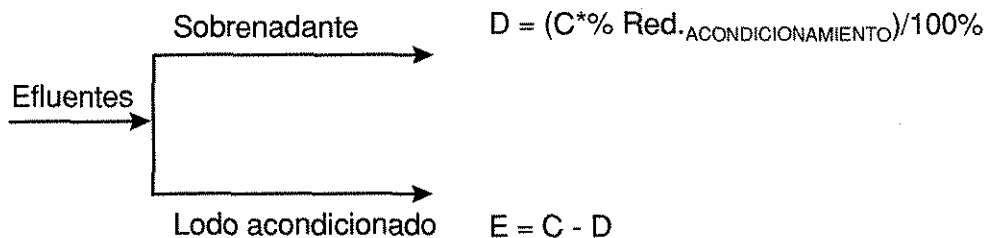
- ⇒ Influyente = E
- ⇒ Tiempo de residencia = 30 min



Para el Tratamiento 2:

- Acondicionamiento:

- ⇒ Influyente = 4 L/min. = A
- ⇒ Mezcla rápida = 10 s,  $350 \text{ s}^{-1}$
- ⇒ Mezcla lenta = 5 min.,  $22 \text{ s}^{-1}$
- ⇒ Sedimentación = 5min



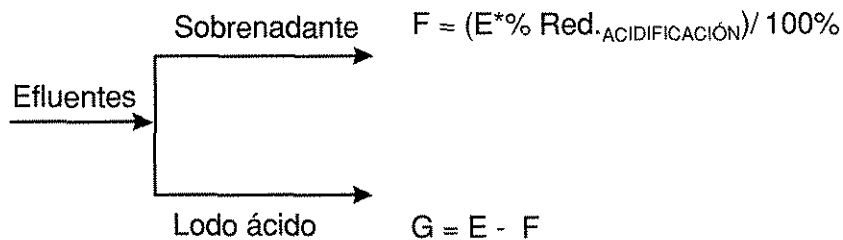
- Acidificación:

- ⇒ Influyente = E
- ⇒ Tiempo de residencia = 15 min
- ⇒ Efluente = E

- Separación:

⇒ Influyente = E

⇒ Tiempo de residencia = 30 min



## 2.3 PRUEBAS A ESCALA PILOTO

### 2.3.1 Descripción de la planta piloto de agua

La planta piloto de agua se encuentra ubicada en la nave 1 que almacena los tanques de sulfato de aluminio de la planta potabilizadora Los Berros.

La planta fue diseñada y construida para realizar simulaciones de las condiciones de operación de la planta real, así como para predecir los resultados que generan los cambios que puedan efectuarse al proceso.

La capacidad de la planta piloto está diseñada para operar con un gasto de 1 L/s, y cuenta con las siguientes unidades de proceso:

- Mezcla rápida: Consiste en un tanque con un agitador, con un tiempo de residencia de 30 s.
- Floculación: Está compuesto por cinco cámaras operadas en serie y divididas por mamparas. Cada una tiene un agitador de velocidad variable que proporciona el gradiente de energía para el mezclado. El tiempo de residencia total es de 25 min.
- Sedimentación: Esta unidad es de flujo laminar con placas paralelas, con un tiempo de residencia de 15 minutos. El drenado de lodos se realiza por gravedad y en forma manual.
- Filtración: La planta piloto tiene tres filtros y opera normalmente con dos. La carga hidráulica es de  $291.53 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ . El gasto que alimenta a cada filtro es de  $46.36 \text{ m}^3/\text{d}$  ( $0.536 \text{ L/s}$ ); cuando se aplica el gasto de diseño ( $1 \text{ L/s}$ ) la tasa de filtración es de  $271.62 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ . Los filtros son operados por gravedad con gasto constante. El tiempo de residencia es de 15 min.

La Figura 2.5 muestra un esquema general de la planta piloto:

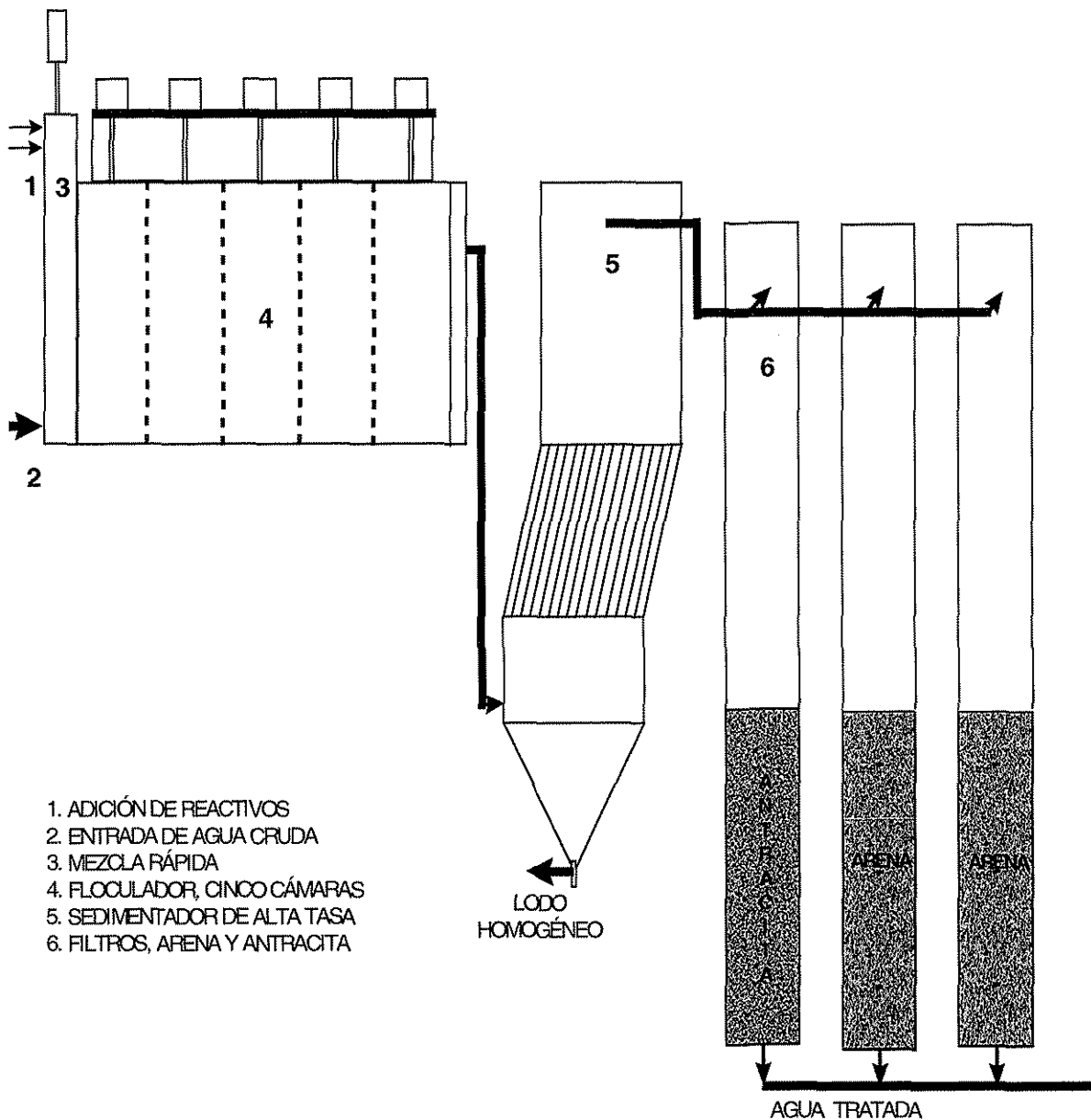
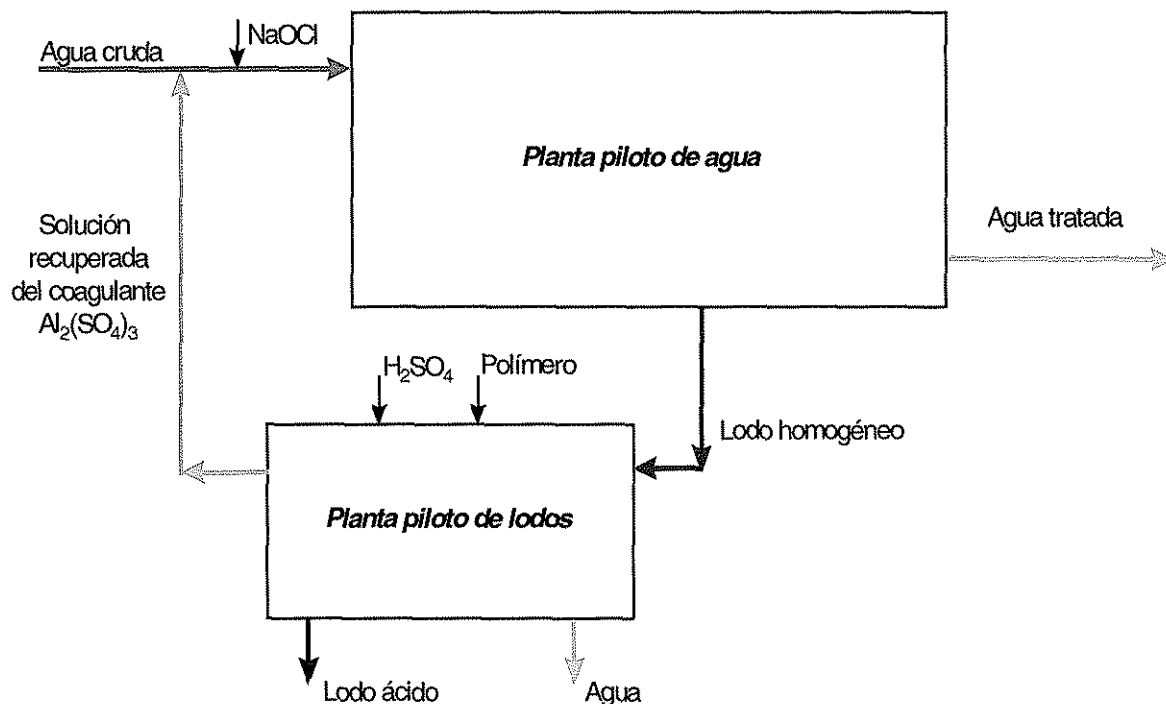


Figura 2.5 Esquema general de la planta piloto de agua

### 2.3.2 Operación en conjunto de las dos plantas piloto

La finalidad de operar en serie las dos plantas es de que el lodo que se genere ingrese directamente a su tratamiento y que la solución de coagulante recuperado ingrese a la planta de agua como se muestra en la Figura 2.6.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Figura 2.6 Sistema de tratamiento de agua y lodo a nivel piloto**

La planta piloto de agua se abastecerá del tanque de recepción de aguas crudas (Figura 2.1) y se mantendrá en operación con un gasto de 1L/s. Se caracterizará el agua cruda determinando los parámetros de turbiedad y color; y con base en esto, se harán pruebas de jarras para hallar la dosis y concentración óptima del sulfato de aluminio, el cual será el mismo que emplea la planta de Los Berros.

La determinación de la turbiedad y del color en el agua tratada servirá para evaluar la efectividad del coagulante recuperado en el tratamiento del agua, comparando los resultados con los obtenidos al emplear sulfato de aluminio fresco.

En la Tabla 2.2 se indican los puntos de muestreo y los parámetros que se analizarán en el sistema de tratamiento de agua. La determinación de aluminio se hará en campo utilizando el espectrofotómetro Hach DR/2000 y se analizará también por absorción atómica. Los metales traza que se analizarán son los marcados en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994: arsénico (As), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb), , zinc (Zn), mercurio (Hg); además de antimonio (Sb), cobalto (Co), níquel (Ni), plata (Ag) y selenio (Se), los cuales forman parte de la composición de lodos de aguas residuales (Borchardt *et al*, 1981).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 2.2 Programa de monitoreo y control en la planta piloto de agua**

PARÁMETRO	FRECUENCIA	AGUA CRUDA	MEZCLA RÁPIDA	FLOCULADOR (EFLUENTE)	SEDIMENTADOR (EFLUENTE)	FILTROS AGUA TRATADA
Dosis de coagulante (mg/L)	Cada hora		X			
Dosis de cloro (mg/L)	Cada 3 horas		X			
Revoluciones por minuto en las cámaras del floculador	4 veces al día					
Turbiedad (UTN)	Cada hora	X		X	X	X
Color (aparente) (Pt-Co)	Cada 3 horas	X		X	X	X
Cloro residual (mg/L)	4 veces al día		X			X
pH	Cada 3 horas	X				X
Aluminio (mg/L)	1 vez al día	X				X
ST (mg/L)	1 vez al día	X				X
SST (mg/L)	1 vez al día	X				X
Metales traza	1 vez al día					X

Con el propósito de establecer y mantener una producción óptima de lodos, se verificará frecuentemente la dosis de coagulante y las revoluciones por minuto en las cámaras del floculador, así como la clarificación del agua en el sedimentador.

El monitoreo de la planta piloto de lodos dependerá del tren seleccionado, de acuerdo a esto se presentan las Tablas 2.3 y 2.4 en donde se muestran los parámetros y puntos de muestreo, así como la frecuencia en que se realizarán para cada tren de tratamiento.

**Tabla 2.3 Programa de monitoreo y control en el tren de Tratamiento 1**

PARÁMETRO	FRECUENCIA	(LH)	(LHE)	(SLHE)	(LHEA)	(SLHEA)	(LHEAA)	(SLHEAA)
Turbiedad (UTN)	Diario							X
Color (aparente) (PtCo)	Diario							X
pH	Diario	X						X
Aluminio (mg/L)	Diario	X						X
ST (mg/L)	Diario	X	X	X	X	X	X	X
SST (mg/L)	Diario	X	X	X	X	X	X	X
Volumen (L)	Diario	X	X	X	X	X	X	X
Metales traza	Diario							X

SLHE: sobrenadante del lodo homogéneo espesado

LHEA: Lodo homogéneo espesado acondicionado

SLHEA: sobrenadante del lodo homogéneo espesado acondicionado

LHEAA: Lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado

SLHEAA: Sobrenadante del lodo homogéneo espesado acondicionado acidificado

**Tabla 2.4 Programa de monitoreo y control en el tren de Tratamiento 2**

PARÁMETRO	FRECUENCIA	(LH)	(LHA)	(SLHA)	(LHAA)	(SLHAA)
Turbiedad (UTN)	Diario			X		X
Color (aparente) (PtCo)	Diario			X		X
pH	Diario	X				X
Aluminio (mg/L)	Diario	X				X
ST (mg/L)	Diario	X	X	X	X	X
SST (mg/L)	Diario	X	X	X	X	X
Volumen (L)	Diario	X	X	X	X	X
Metales traza	Diario					X

LHA: Lodo homogéneo acondicionado

SLHA: Sobrenadante de lodo homogéneo acondicionado

LHAA: Lodo homogéneo acondicionado acidificado

SLHAA: Sobrenadante de lodo homogéneo acondicionado acidificado

La determinación de metales traza en la solución del coagulante recuperado (SLHAA) se hará con el propósito de conocer su composición y la posible acumulación de éstos en las recirculaciones del coagulante en el tratamiento del agua. También se analizarán metales traza en el agua cruda y tratada para conocer si hay alteración en la calidad requerida de la misma por el uso del coagulante recuperado.

### 2.3.3 Pruebas en laboratorio

Para iniciar la operación de la planta de tratamiento de lodos será necesario llevar a cabo algunas pruebas en laboratorio, con la finalidad de establecer las dosis de reactivos (polímero y ácido sulfúrico) a emplear en planta piloto y evaluar la reducción del volumen de lodo y la recuperación de aluminio.

1. De acuerdo al procedimiento indicado en el punto 2.1.1, se acondicionará un volumen conocido de lodo para hallar la dosis óptima del polímero y se calculará el porcentaje de reducción de su volumen.
2. Se realizará una acidificación diluida y concentrada a un volumen determinado de lodo para determinar la demanda de ácido sulfúrico concentrado y conocer la cantidad de aluminio extraíble.
3. Se medirá el volumen de lodo ácido producido y se evaluará el porcentaje de reducción.

### 2.3.4 Pruebas en la planta piloto de lodos

El tratamiento del lodo en planta piloto se llevará a cabo en sistema continuo, como se indica en la metodología siguiente:

1. Se ajustarán los flujos calculados en el punto 2.2 para el ingreso del lodo purgado a la planta de piloto del tren de tratamiento seleccionado. El control de los flujos se hará mediante válvulas a las salidas de los equipos.
2. La adición del polímero se hará inyectando el polímero en línea (en el flujo del lodo que ingrese al acondicionamiento) y la dosificación del ácido sulfúrico concentrado se controlará mediante el comportamiento del pH de la reacción (pH entre 2.5 y 3).
3. Se medirá el volumen de lodo ácido generado y su sobrenadante, caracterizándolo de acuerdo a las tablas 2.3 ó 2.4 según el tratamiento que se seleccione.
4. Se determinará la reducción del volumen de lodo tratado y la recuperación de aluminio.

Los resultados de las pruebas en planta piloto se compararán con los obtenidos en laboratorio para determinar la eficiencia del tren a nivel piloto.

### **2.3.5 Pruebas con la solución recuperada como coagulante**

El empleo de la solución recuperada del coagulante en el tratamiento de agua se realizará en la forma siguiente:

1. Determinar la turbiedad del agua cruda y con base en esta se determinará la dosis óptima de sulfato de aluminio fresco.
2. Calcular el aluminio presente en la dosis hallada de sulfato de aluminio fresco.
3. Determinar la concentración de aluminio en la solución recuperada del coagulante.
4. Calcular el volumen de la solución recuperada que proporcione el aluminio requerido.
5. Calcular el gasto a dosificar de la solución recuperada.

Con el propósito de observar y evaluar la efectividad del coagulante recuperado en el tratamiento del agua, se llevará a cabo un monitoreo en el agua cruda y en agua tratada como se indicó en la Tabla 2.2.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Se realizaron 3 muestreos de lodo para desarrollar a nivel laboratorio los procesos propuestos por los dos trenes de tratamiento. El tren que proporcione el menor volumen de lodos a disponer y la mayor recuperación de aluminio será escalado a nivel piloto.

A continuación se presenta la evaluación de los dos trenes de tratamiento basándose en los objetivos establecidos.

#### 3.1.1 Reducción del volumen de lodo

##### 3.1.1.1 Espesamiento

De acuerdo a los trenes de tratamiento propuestos (Figura 2.3), para el Tratamiento 1 el lodo homogéneo en la etapa de espesamiento alcanzó los porcentajes de reducción que muestra la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Reducción del volumen de lodo por espesamiento**

PRUEBA	Vol. LH (L)	Vol. LHE (L)	% RED. Vol. Lodo
1	85.5	5.9	93.1
2	182.11	9.86	94.6
3	129.5	11.3	91.3
<b>Promedio</b>			<b>93.0</b>

Se obtuvo un porcentaje de reducción del volumen del lodo por espesamiento de 93% en promedio.

##### 3.1.1.2 Acondicionamiento

Por el proceso de espesamiento sólo se produjo un cambio físico en el lodo, para lograr un cambio en la estructura molecular y poder eliminar la humedad libre del lodo es necesario emplear un acondicionamiento químico. Por lo que se acondicionó un volumen determinado de lodo, tanto del lodo homogéneo espesado (Tratamiento 1), como de lodo homogéneo (Tratamiento 2). Los resultados de la reducción del volumen alcanzados se muestran en la Tabla 3.2.



**Tabla 3.2 Resultados del acondicionamiento del lodo por los tratamientos propuestos**

PRUEBA	TRATAMIENTO 1			TRATAMIENTO 2		
	Vol. LHE L	Vol. LHEA L	% REDUCCIÓN POR ACONDICIONAMIENTO	Vol. LH L	Vol. LHA L	% REDUCCIÓN POR ACONDICIONAMIENTO
1	5	2.34	53.2	13	1.72	86.8
2	6	3.22	46.3	70	4.11	94.1
3	7	4.1	41.4	48	4.92	89.8
<b>Promedio</b>			<b>47.0</b>			<b>90.2</b>

La Tabla 3.3 presenta el volumen de lodo homogéneo extraído de la planta Los Berros y el volumen que se produciría por espesamiento y acondicionamiento aplicando los porcentajes de reducción alcanzados por cada tratamiento.

**Tabla 3.3 Reducción del volumen de lodo por acondicionamiento**

PRUEBA	VOL. INICIAL L	TRATAMIENTO 1		TRATAMIENTO 2	
		VOL. FINAL	% REDUCCIÓN TOTAL	VOL. FINAL	%REDUCCIÓN TOTAL LHA
1	85.52	2.76	96.8	11.3	86.8
2	182.11	5.29	97.1	10.7	94.1
3	129.50	6.62	94.9	13.3	89.8
<b>Promedio</b>			<b>96.3</b>		<b>90.2</b>

Se observan mayores porcentajes de reducción del volumen del lodo al aplicar primero un espesamiento, como lo demuestran los resultados de la Tabla 3.3 ya que el Tratamiento 1 alcanzó una reducción del 96%, mientras el Tratamiento 2 (sin espesamiento) se redujo el volumen en un 90%.

### 3.1.1.3 Acidificación

En el proceso de acidificación el Tratamiento 2 produjo un volumen de lodo menor (74% de reducción) y el Tratamiento 1 alcanzó una reducción del 59.8% al tratar 500 mL de lodo, como se observa en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Resultados de la acidificación del lodo por los tratamientos propuestos**

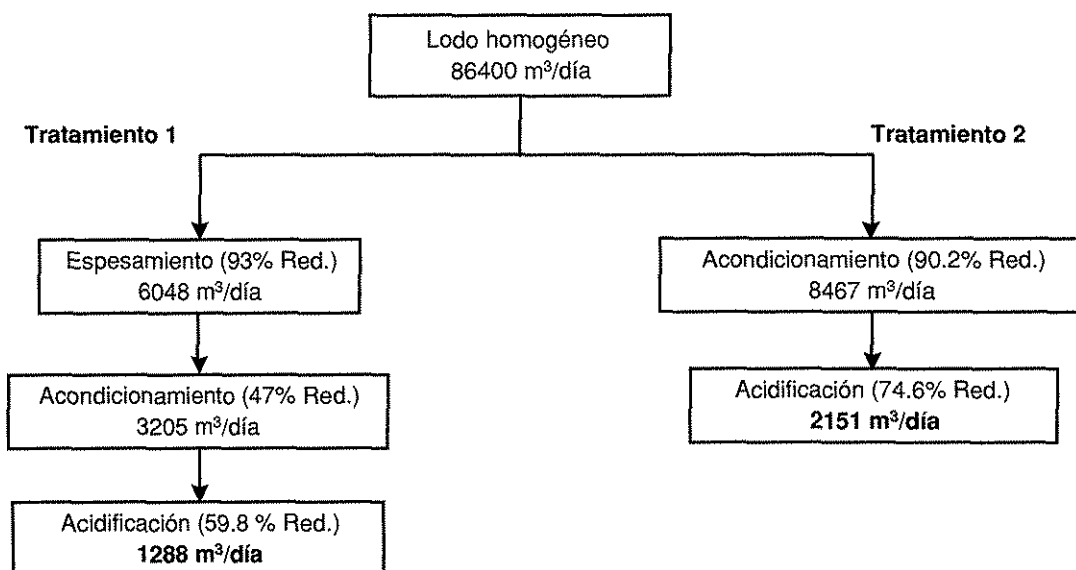
PRUEBA	TRATAMIENTO 1			TRATAMIENTO 2		
	Vol. LHEA L	Vol. LHEAA L	% REDUCCIÓN POR ACIDIFICACIÓN	Vol. LHA L	Vol. LHAA L	% REDUCCIÓN POR ACIDIFICACIÓN
1	1	0.325	67.5	1	0.205	79.5
2	2	0.850	57.5	2.5	0.640	74.4
3	2	0.915	54.3	2	0.605	69.8
<b>Promedio</b>			<b>59.8</b>			<b>74.6</b>

Considerando los porcentajes obtenidos por los procesos anteriores para cada tren y suponiendo que se trata el volumen inicial de LH, se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3.5

**Tabla 3.5 Reducción del volumen de lodo mediante los Tratamientos 1 y 2**

PRUEBA	TRATAMIENTO 1					TRATAMIENTO 2		
	LH L	LHE L	LHEA L	LHEAA L	%REDUCCIÓN TOTAL	LHA	LHAA	%REDUCCIÓN N TOTAL
1	85.525	5.94	2.78	0.9035	98.9	11.31	2.32	97.3
2	182.11	9.86	5.29	2.25	98.8	10.69	2.74	98.5
3	129.50	11.30	6.62	3.03	97.7	13.27	4.01	96.9
<b>Promedio</b>					<b>98.5</b>			<b>97.6</b>

La diferencia en la reducción del volumen del lodo entre ambos tratamientos fue de sólo 1%. Sin embargo, al aplicar estos porcentajes de reducción al volumen de lodos generados diariamente en la planta Los Berros, se tienen los siguientes resultados:



**Figura 3.1 Resultados estimados de la reducción de volumen de lodos a nivel planta**

Se observa que la diferencia de 1% equivale a disponer cerca de 863 m<sup>3</sup> menos de lodo generado en la planta Los Berros mediante la aplicación del Tratamiento 1 (un 40% menos).

### 3.1.2 Recuperación de aluminio

La concentración de aluminio determinada en el sobrenadante del lodo acidificado en cada prueba realizada por tratamiento se presenta en la Tabla 3.6. Los resultados mostraron que aplicando el tren de tratamiento 1 (espesamiento, acondicionamiento y acidificación) se obtuvieron concentraciones más altas de aluminio disuelto que en el segundo tratamiento.

**Tabla 3.6 Porcentaje de recuperación de aluminio**

PRUEBA	SLHEAA Tratamiento 1			SLHAA Tratamiento 2		
	Al dis. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil. mg/L	Al dis. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc. mg/L	% REC.	Al dis. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil. mg/L	Al dis. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc. mg/L	% REC.
1	1040	1020	98.0	520	420	80.7
2	1280	1140	89.0	610	600	98.4
3	1140	1000	87.7	490	410	83.7
Promedio			91.6			87.6

Las concentraciones mayores de aluminio se obtuvieron con el empleo de ácido diluido (2 M aproximadamente), debido a que la prueba se lleva a cabo en tiempos de contacto más largos (cerca de 30 min.) y el ácido es agregado paulatinamente. Esta prueba servía como base para calcular la cantidad de ácido requerido por litro de lodo.

El porcentaje de la recuperación de aluminio se calculó considerando que el aluminio que se puede extraer es el que se disuelve a partir de una acidificación con ácido diluido aplicado a un lodo proveniente de la etapa de acondicionamiento y relacionándolo con el aluminio extraído aplicando ácido concentrado al mismo tipo de lodo. La siguiente expresión lo resume:

$$\begin{aligned} \% \text{ Rec.} &= [Al_{LHEAA \text{ ac. dil}}/Al_{LHEAA \text{ ac. conc.}}]*100\% && \text{(Tratamiento 1)} \\ \text{ó } \% \text{ Rec.} &= [Al_{LHAA \text{ ac. dil}}/Al_{LHAA \text{ ac. conc.}}]*100\% && \text{(Tratamiento 2)} \end{aligned}$$

Con el tren de tratamiento 1 se logró alcanzar una recuperación del 91.6%, mientras que mediante el segundo tratamiento se obtuvo un 87.6%.

### 3.1.3 Caracterización de la solución recuperada como coagulante

En la Tabla 3.7 se muestra la caracterización realizada a la solución recuperada en los tratamientos.

**Tabla 3.7 Caracterización del coagulante recuperado por tren de tratamiento**

PARAMETRO	SLHEAA Tratamiento 1			SLHAA Tratamiento 2		
	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3	PRUEBA 1	PRUEBA 2	PRUEBA 3
pH	3.37	3.47	3.32	3.80	3.34	3.54
Color (Pt-Co)	860	1100	1020	299	720	455
Turbiedad (UTF)*	163	177	158	54	111	77
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	4840	5060	4770	2680	3450	2640
Fe dis. (mg/L)	9.85	9.55	10.05	3.20	6.45	3.80
Mn dis. (mg/L)	3.66	3.70	3.78	1.565	1.810	1.300
Al dis. (mg/L)	1020	1140	1000	420	600	410

\*Determinada mediante un espectrofotómetro de campo (Drel 2000, Hach) utilizando una técnica adaptada por Hach (1988), cuyas unidades se expresan como Formazin Turbidity Units (FTU por sus siglas en inglés o UTF en español).

Los resultados de los análisis realizados en cada prueba del Tratamiento 1 fueron muy similares. Se observó que los valores determinados fueron un poco más del doble a los obtenidos mediante el Tratamiento 2. En la Tabla 3.8 se muestran los promedios de los valores anteriores por tratamiento. En cuanto al pH de la solución recuperada se observó que aplicando el Tratamiento 1 se obtienen valores más bajos.

**Tabla 3.8 Valores promedio**

PARAMETRO	SLHEAA Tratamiento 1	SLHAA Tratamiento 2
pH	3.38	3.56
Color (Pt-Co)	993.33	491.33
Turbiedad (UTF)	166	81
Conductividad ( $\mu\text{S/cm}$ )	4890	2923.33
Fe dis. (mg/L)	9.82	4.48
Mn dis. (mg/L)	3.71	1.5588
Al dis. (mg/L)	1053	477

La diferencia entre los trenes de tratamiento se puede atribuir debido a que por medio del Tratamiento 1 se obtiene un lodo con una concentración mayor de sólidos, por lo que origina un sobrenadante con mayor concentración de aluminio, metales disueltos, además de color y turbiedad.

### 3.1.4 Potencial Z

En cuanto a los resultados de potencial Z se analizó el efecto en las partículas por cada tratamiento propuesto. En la Tablas 3.9 y 3.10 se presentan éstos resultados:

**Tabla 3.9 Análisis del potencial Z en el Tratamiento 1**

PRUEBA	LH	LHE	LHEA	LHEAA
1	-17.57	-17.27	-21.20	7.41
2	-14.17	-13.56	-8.56	-3.97
3	-17.35	-13.73	-12.87	-5.35

**Tabla 3.10 Análisis del potencial Z en el Tratamiento 2**

PRUEBA	LH	LHA	LHAA
1	-17.57	-14.76	-6.33
2	-14.17	-11.64	-4.87
3	-17.35	-11.27	-3.51

Se observó que mediante el Tratamiento 1, la etapa de espesamiento no afectó la carga de las partículas, ya que sólo fue un cambio físico; en cambio, por medio del acondicionamiento químico y del proceso de acidificación se produjo una reducción del potencial Z en aproximadamente 6 unidades en cada prueba, sin considerar que en la prueba 1 la carga de las partículas cambiaron de signo.

Se observó que se produjo una mayor reducción de la carga en las partículas del lodo por el Tratamiento 2. Del lodo homogéneo al lodo ácido, la reducción de la carga fue cerca de 10 unidades.

### 3.1.5 Porcentaje de humedad

Comparando los resultados obtenidos aplicando los dos trenes de tratamiento, en la Tablas 3.11 y 3.12 se presentan el comportamiento que se tuvo en cuanto a la humedad presente en el lodo.

**Tabla 3.11 Porcentaje de humedad en el Tratamiento 1**

PRUEBA	LH	LHE	LHEA	LHEAA
1	99.90	99.36	98.15	94.9
2	99.95	98.75	97.50	94.0
3	99.88	98.40	97.27	93.8
Promedio				94.2

**Tabla 3.12 Porcentaje de humedad en el Tratamiento 2**

PRUEBA	LH	LHA	LHAA
1	99.90	99.10	95.8
2	99.95	98.80	95.5
3	99.88	98.75	96.2
Promedio			95.8

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Las pruebas de humedad mostraron que el contenido de agua ligada al lodo homogéneo fue de aproximadamente de 99.9% y al llevar a cabo el Tratamiento 1 el porcentaje de humedad se redujo hasta un 94%, lográndose retirar un 5.9% de agua con respecto al lodo homogéneo, mientras que el Tratamiento 2 sólo retiró un 4.1% de agua.

### 3.1.6 Sólidos

De la misma forma el aumento en la concentración de los sólidos presentó un comportamiento similar a las pruebas de humedad. Las Tablas 3.13 y 3.14 muestran los resultados de los sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST) en cada tratamiento.

**Tabla 3.13 ST y SST en el Tratamiento 1**

PRUEBA	LH		LHE		LHEA		LHEAA	
	ST mg/L	SST mg/L	ST mg/L	SST mg/L	ST mg/L	SST mg/L	ST mg/L	SST mg/L
1	0.9465	0.7884	9.7590	9.4203	19.623	19.253	53.802	45.18
2	1.117	0.899	14.520	14.215	26.938	26.314	63.136	50.300
3	1.801	1.631	17.160	16.829	29.414	28.117	65.770	54.162

En el Tratamiento 1 se observó que los ST del lodo homogéneo se incrementaron 10 veces en la etapa de espesamiento, duplicaron su concentración en la etapa de acondicionamiento y aproximadamente aumentaron 50 veces en la etapa de acidificación. El comportamiento de los sólidos suspendidos totales es muy similar a los ST.

**Tabla 3.14 ST y SST en el Tratamiento 2**

PRUEBA	LH		LHA		LHAA	
	ST mg/L	SST mg/L	ST mg/L	SST mg/L	ST mg/L	SST mg/L
1	0.9465	0.7884	10.39	9.8243	44.43	37.853
2	1.117	0.899	13.752	13.474	47.659	41.998
3	1.801	1.631	13.340	12.972	41.047	35.614

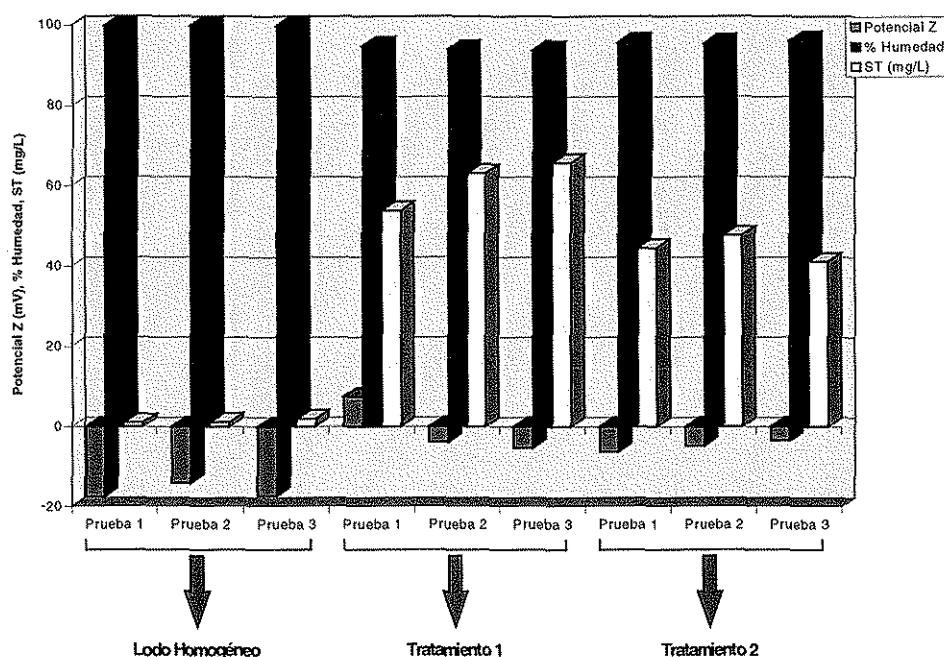
El incremento de los ST del lodo homogéneo fueron en aproximadamente 10 veces en la etapa del acondicionamiento y cerca de 40 veces en la etapa de acidificación. En los SST se presentó el mismo comportamiento que el anterior.

Haciendo una comparación entre los tratamientos 1 y 2 de los resultados obtenidos del potencial Z, % de humedad y de los ST en los lodos producidos se tiene la Tabla 3.15.

**Tabla 3.15 Resultados del Potencial Z, % humedad y ST en el lodo homogéneo y lodo acidificado de los tratamientos 1 y 2**

Prueba	LH			Tratamiento 1 LHEA			Tratamiento 2 LHAA		
	Potencial Z (mV)	% Humedad	ST mg/L	Potencial Z (mV)	% Humedad	ST mg/L	Potencial Z (mV)	% Humedad	ST mg/L
1	-17.57	99.90	0.947	7.41	94.90	53.802	-6.33	95.85	44.430
2	-14.17	99.95	1.117	-3.97	94.00	63.136	-4.87	95.50	47.659
3	-17.30	99.88	1.801	-5.35	93.80	65.770	-3.51	96.19	41.047

Se observó que los resultados del potencial Z en ambos tratamientos, indicaron que se produce una reducción en la carga, lo cual se refleja en la aglomeración de las partículas, permitiendo un aumento en la concentración de sólidos en el lodo y en la eliminación de humedad del mismo. En la mayoría de los casos se observó que a mayor reducción de la carga se obtiene un lodo más deshidratado y con una mayor concentración de sólidos totales (Gráfica 3.1).



**Gráfica 3.1 Comparación entre el lodo homogéneo y lodo producido por los tratamientos 1 y 2 en relación al potencial Z, % humedad y ST**

Sobre la base de los resultados anteriores se seleccionó el tren de Tratamiento 1, como se puede observar, el espesamiento contribuyó a que se obtuviera un lodo más deshidratado, con una concentración mayor de sólidos y un sobrenadante con la concentración más alta de aluminio.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.2 DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO DE LODOS

Para el diseño del tren de tratamiento 1 a escala piloto se tomaron como base los resultados obtenidos de las pruebas anteriores (Tabla 3.16):

**Tabla 3.16 Resultados de la reducción del volumen de lodos del Tratamiento 1**

PRUEBAS	% REDUCCIÓN DE VOLUMEN DE LODOS			
	Espesamiento	Acondicionamiento	Acidificación	TOTAL
1	93.05	53.2	67.5	98.94
2	94.6	46.33	57.5	98.76
3	91.3	41.43	54.25	97.66
Promedio	92.8	46.7	59.7	98.4

Basándose en estos resultados, se tomaron los valores promedios para el cálculo de los flujos de lodos y sobrenadantes en los equipos que conformaron la planta piloto de lodos. Se consideró que el tratamiento de 1 L/s de agua cruda produce 0.067 L/s (4 L/min.) de lodo homogéneo.

- **Espesamiento:**

⇒ Influyente:  $A = 4 \text{ L/min}$

⇒ Efluentes:

- Sobrenadante = B

$$B = (4 \text{ L/min})(98.2\%)/100\% = 3.928 \text{ L/min}$$

- Lodo espesado = C = A - B

$$C = (4 - 3.928) \text{ L/min} = 0.072 \text{ L/min}$$

⇒ Tiempo de residencia<sup>1</sup> = 40 min

- **Acondicionamiento:**

⇒ Influyente = C = 0.072 L/min

⇒ Efluentes:

- Sobrenadante = D

$$D = (0.072 \text{ L/min})(48.2\%)/100\% = 0.034 \text{ L/min}$$

- Lodo acondicionado = E = C - D

$$E = (0.072 - 0.034) \text{ L/min} = 0.038 \text{ L/min}$$

⇒ Tiempo de sedimentación = 5 min

<sup>1</sup> Obtenido en pruebas de sedimentabilidad (Weber, 1979; Ramalho, 1991)



- **Acidificación:**

- ⇒ Influyente:  $E = 0.038 \text{ L/min}$
- ⇒ Efluente:  $E = 0.038 \text{ L/min}$
- ⇒ Tiempo de residencia: 15 min

- **Separación de fases:**

- ⇒ Influyente:  $E = 0.038 \text{ L/min}$
- ⇒ Efluentes:

- Sobrenadante = F

$$F = (0.038 \text{ L/min})(66.2\%)/100\% = 0.025 \text{ L/min}$$

- Lodo ácido =  $G = E - F$

$$G = (0.038 - 0.025)\text{L/min} = 0.013 \text{ L/min}$$

- ⇒ Tiempo de residencia = 30 min

La Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo y las unidades para el tren de tratamiento de lodo seleccionado.

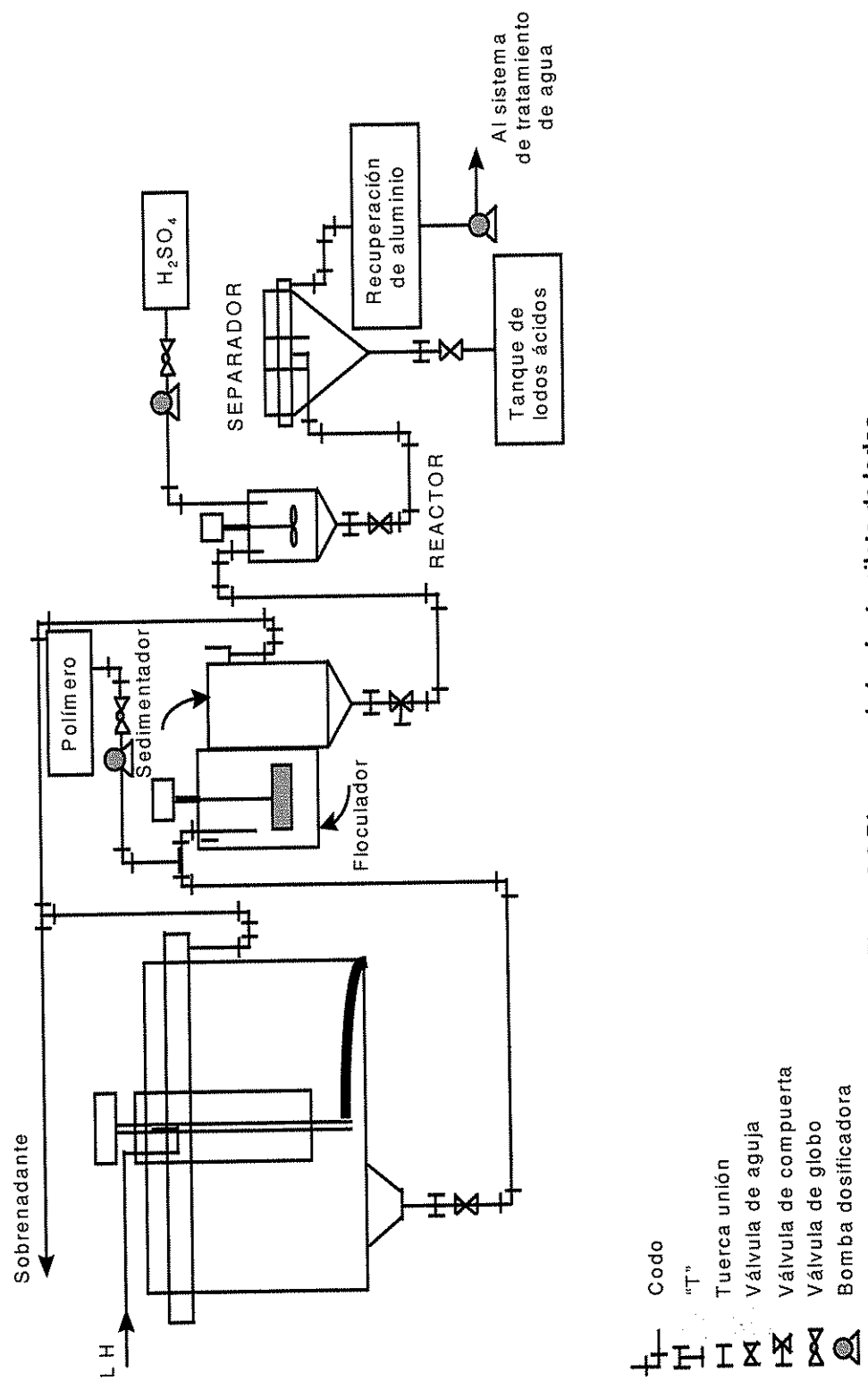
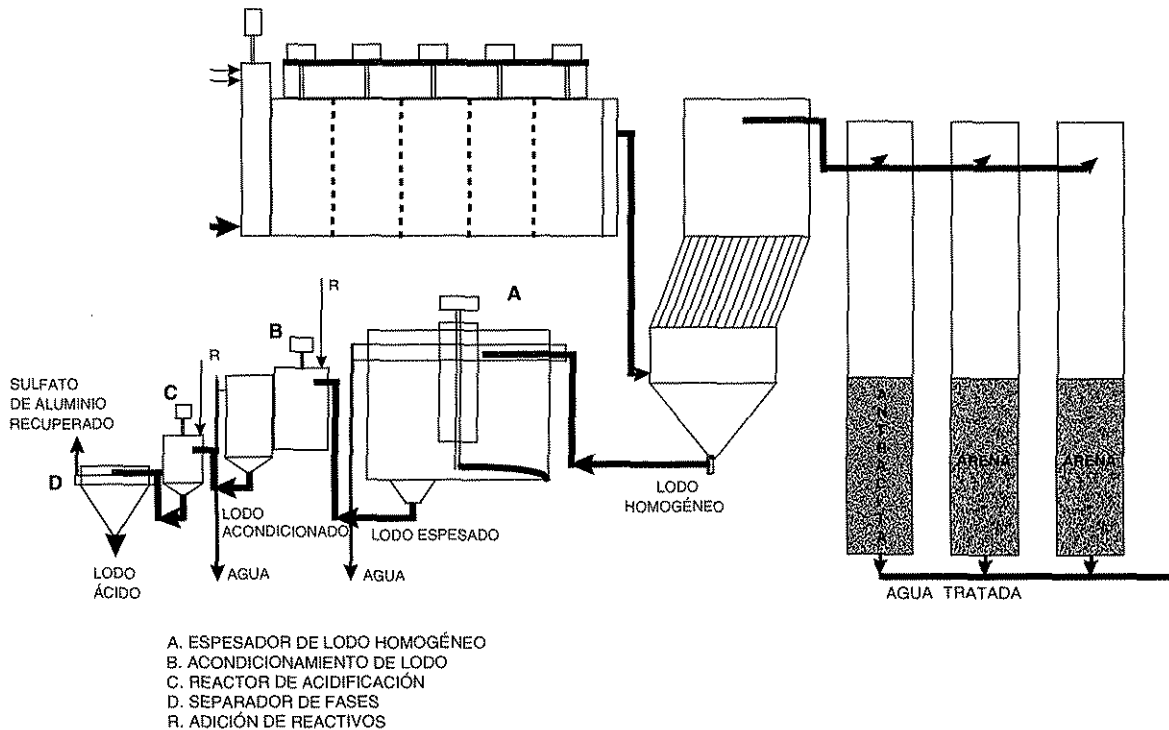


Figura 3.2 Diagrama de la planta piloto de lodos

### 3.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN ESCALA PILOTO

De acuerdo a los resultados obtenidos en el punto 2.2 se construyó la planta piloto de lodos, la cual fue conectada a la salida de los lodos del sedimentador de la planta piloto de agua, con la finalidad de que el lodo homogéneo generado fuera enviado al espesador y la solución de aluminio recuperada se conectara a la mezcla rápida de agua, operando en forma continua como se observa en la Figura 3.2.



**Figura 3.3 Sistema de tratamiento de agua y lodo a nivel piloto**

Cabe mencionar que cuando se realizaron las pruebas, la turbiedad del agua cruda estuvo entre 10 y 20 UTN, por lo que el contenido de sólidos fue bajo, y por tanto la cantidad de lodo no fue suficiente para operar todo el sistema en continuo. Por esta razón se operó la purga de lodos a un flujo de 1 L/min., gasto con el que trabajó el espesador. Una vez obtenido el lodo espesado que se generó en un día, la planta piloto de lodos operó al gasto que se diseñó.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### **3.3.1 Resultados de pruebas en laboratorio y planta piloto**

Los resultados de las pruebas que se realizaron al lodo espesado a escala laboratorio se muestran en la Tabla 3.17. Se presenta el volumen de lodo que se acondicionó para determinar la dosis del polímero a utilizar en planta piloto, así también se muestran las concentraciones de aluminio que se obtuvieron en los sobrenadantes de la acidificación tanto diluida como concentrada, y el volumen de lodo que se produjo en cada etapa del tratamiento.

La Tabla 3.18 presenta los resultados de los análisis obtenidos de las pruebas en planta piloto de lodos. Destacando principalmente el volumen de lodo ácido obtenido, así como el de la solución recuperada de sulfato de aluminio y su concentración, ya que son los parámetros que se emplearon para evaluar la eficiencia de operación de la planta.

En la Tabla 3.19 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de la solución recuperada de sulfato de aluminio.

Tabla 3.17 Resultados de las pruebas de acondicionamiento y acidificación realizadas a nivel laboratorio

Prueba	Lodo Homogéneo Espesado										Lodo Homogéneo Espesado Acondicionado																
	Acidificación *1					Acidificación *2					Acondicionamiento					Acidificación *1					Acidificación *2						
	Vol. Lodo ácido mL	Vol. Sob. mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Al mg/L	Vol. Lodo mL	Vol. Sob. mL	Vol. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Al mg/L	Vol. Lodo mL	Vol. Sob. mL	Vol. LHE L	Polimero mL	Vol. LHE L	Vol. Lodo L	Vol. Sob. L	Vol. Lodo mL	Vol. Sob. mL	Vol. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Al mg/L	Vol. Lodo mL	Vol. Sob. mL	Vol. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Al mg/L	Vol. Lodo mL	Vol. Sob. mL	Vol. H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Al mg/L
1	53	447	0.86	380	57	443	0.90	400	4.0	12	4.70	4.0	12	4.70	7.30	120	380	2.26	1200	135	365	2.30	1340				
2	50	450	0.88	430	69	431	0.90	370	4.5	4	1.30	4.5	4	1.30	2.70	173	327	2.84	1480	220	280	2.85	1240				
3	51	449	1.04	530	70	430	1.05	490	3.0	4	1.42	3.0	4	1.42	2.58	116	384	2.74	1360	153	347	2.75	1320				
4	44	456	0.71	330	62	438	0.71	320	2.5	6	1.95	2.5	6	1.95	4.05	136	364	2.17	1100	152	348	2.20	1080				
5	53	447	0.87	420	68	432	0.87	420	3.0	4	1.90	3.0	4	1.90	2.10	112	388	1.62	840	157	343	1.60	740				
6	49	451	0.85	490	70	430	0.90	440	3.0	4	1.66	3.0	4	1.66	2.34	100	400	2.15	1220	138	362	2.15	1040				
7	32	468	0.68	360	45	455	0.70	320	0.5	4	1.70	0.5	4	1.70	2.30	69	431	1.50	820	116	384	1.50	740				
8	60	440	1.00	580	96	404	1.00	460	3.0	4	2.28	3.0	4	2.28	1.72	88	412	1.80	1000	125	375	1.80	980				
9	56	444	1.20	530	75	425	1.20	510	4.0	4	2.60	4.0	4	2.60	1.40	76	424	1.40	660	111	389	1.40	640				
10	66	434	1.20	670	96	404	1.20	640	4.5	4	1.90	4.5	4	1.90	2.10	130	370	2.50	1360	170	330	2.50	1340				
11	55	445	1.10	600	102	398	1.10	560	3.0	4	1.72	3.0	4	1.72	2.28	122	378	2.50	1440	170	330	2.50	1340				
12	51	449	1.16	620	70	430	1.20	580	3.5	4	2.40	3.5	4	2.40	1.60	84	416	1.80	1080	142	358	1.80	970				

\*1 El volumen de lodo que se acidificó fue de 500 mL

\*2 El ácido sulfúrico empleado fue diluido (2 M)

\*3 El ácido sulfúrico empleado fue concentrado (pureza 88.3%)

\*3 El polímero empleado fue el VTN-300

Tabla 3.18 Resultados de las pruebas en planta piloto de lodo

Prueba	Lodo Homogéneo Espesado				Lodo Acondicionado				Lodo Acidificado						
	Vol. L	ST mg/L	SST mg/L	Polímero mL	Vol. L	ST mg/L	SST mg/L	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Vol. L	ST g/L	SST g/L	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> mL	Vol. L	ST g/L	SST g/L
1	155.0	16.17	16.03	4.0	82.2	23.45	22.72	---	15.0	109.06	108.00	---	15.0	109.06	108.00
2	130.0	21.50	19.41	4.5	73.9	---	---	240	14.6	163.68	157.30	240	14.6	163.68	157.30
3	135.0	17.60	17.06	3.0	67.8	45.31	44.85	345	10.2	204.50	196.13	345	10.2	204.50	196.13
4	165.0	12.12	11.76	2.5	61.4	23.10	22.66	262	11.4	147.37	134.62	262	11.4	147.37	134.62
5	130.0	15.87	15.68	3.0	52.6	39.44	39.18	230	10.0	181.57	169.19	230	10.0	181.57	169.19
6	186.5	10.11	9.82	3.0	91.7	26.00	25.60	383	14.4	103.67	92.12	383	14.4	103.67	92.12
7	125.0	4.35	4.14	0.5	48.7	11.92	11.30	164	8.1	63.84	54.38	164	8.1	63.84	54.38
8	108.0	7.36	7.00	3.0	62.9	10.40	10.30	210	14.7	56.73	---	210	14.7	56.73	---
9	130.0	7.04	6.81	4.0	68.7	9.87	9.51	289	15.6	56.11	42.66	289	15.6	56.11	42.66
10	123.0	8.75	8.00	4.5	67.0	22.38	20.65	275	12.6	61.85	46.27	275	12.6	61.85	46.27
11	100.0	10.12	9.70	3.0	40.6	27.04	25.83	213	8.0	86.55	70.84	213	8.0	86.55	70.84
12	120.0	12.04	11.40	3.5	55.4	20.00	18.66	270	10.7	110.62	97.81	270	10.7	110.62	97.81

Tabla 3.19 Caracterización de la solución recuperada de sulfato de aluminio

Prueba	Vol. L	Color Pt-Co	Turbiedad UTN	ST g/L	SST g/L	pH	Al mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Cu mg/L	Si mg/L	As mg/L
1	67.2	---	---	7.62	---	3.84	540	12.15	1.56	9.95	56.3	0.1
2	59.3	---	---	10.00	0.36	3.14	---	---	---	---	---	---
3	57.6	2320	270	12.16	0.23	2.42	860*	33.00*	7.00*	16.06*	34.5*	0.1*
4	50.0	540	40	13.12	0.11	2.33	960	35.50	8.30	15.20	15.8	0.1
5	42.6	4080	466	14.54	0.65	2.62	1000	24.50	4.95	16.60	8.8	0.1
6	77.3	3120	415	13.66	0.54	3.00	1050	34.39	8.12	14.12	24.1	0.1
7	40.6	1760	184	11.22	0.23	2.92	900	20.50	4.70	12.05	16.0	0.1
8	48.2	1660	154	12.08	---	3.35	1000	14.00	3.35	17.55	24.3	0.1
9	53.1	1540	160	14.73	0.34	2.80	1150	24.00	5.30	18.95	17.3	0.1
10	54.4	1740	164	15.24	0.42	2.92	1200	20.50	5.45	20.85	15.6	0.1
11	32.6	2440	214	17.98	0.44	2.50	1440	36.00	6.80	26.35	25.3	0.1
12	44.7	2780	273	19.57	0.44	2.48	1480	37.50	8.10	25.75	10.5	0.1

\*Se mezclaron las soluciones recuperadas de las pruebas 2 y 3, caracterizándose la solución final.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

### 3.3.2 Reducción del volumen de lodos

La planta piloto de agua generó un volumen de lodo espesado de aproximadamente 130 L diariamente. El tratamiento del lodo en planta piloto fue en promedio de 3.5 horas por día.

Los volúmenes de lodo espesado que se obtuvieron en el laboratorio se encuentran en la Tabla 3.20, la cual muestra el volumen en cada etapa del tratamiento y el porcentaje de reducción alcanzado en cada una de ellas.

**Tabla 3.20 Reducción del volumen de lodo a nivel laboratorio**

PRUEBA	LHE L	LHEA L	% RED. LODO Por Acondic.	VOL. LHEA L	LHEAA L	% RED. LODO Por Acidif.	% RED. TOTAL
1	12	4.70	60.8	0.5	0.135	73.0	89.4
2	4	1.30	67.5	0.5	0.220	56.0	85.7
3	4	1.42	64.5	0.5	0.153	69.4	89.1
4	4	1.95	67.5	0.5	0.152	69.6	85.2
5	6	1.90	52.5	0.5	0.157	68.6	90.1
6	4	1.66	58.5	0.5	0.138	72.4	88.6
7	4	1.70	57.5	0.5	0.116	76.8	90.1
8	4	2.28	43.0	0.5	0.125	75.0	85.8
9	4	2.60	35.0	0.5	0.111	77.8	85.6
10	4	1.90	52.5	0.5	0.170	66.0	83.9
11	4	1.72	57.0	0.5	0.170	66.0	85.4
12	4	2.4	40.0	0.5	0.142	71.6	82.9
<b>Promedio</b>			54.7			70.2	86.8

La reducción total del lodo a nivel laboratorio, de la etapa de espesamiento a la acidificación fue en promedio del 86.8%. De la etapa de espesamiento al acondicionamiento del lodo se obtuvo una reducción mayor al 50%, al igual que en las pruebas anteriores.

La Tabla 3.21 presenta los resultados de la reducción del volumen de lodo que se alcanzaron en planta piloto. Comparando la reducción obtenida de 98.4% en las pruebas para seleccionar el tren (Tabla 3.16), la reducción del volumen a escala piloto fue menor en 0.02%, lo cual indica que el tren de tratamiento propuesto para la disminución del volumen de lodos a disponer es el adecuado.

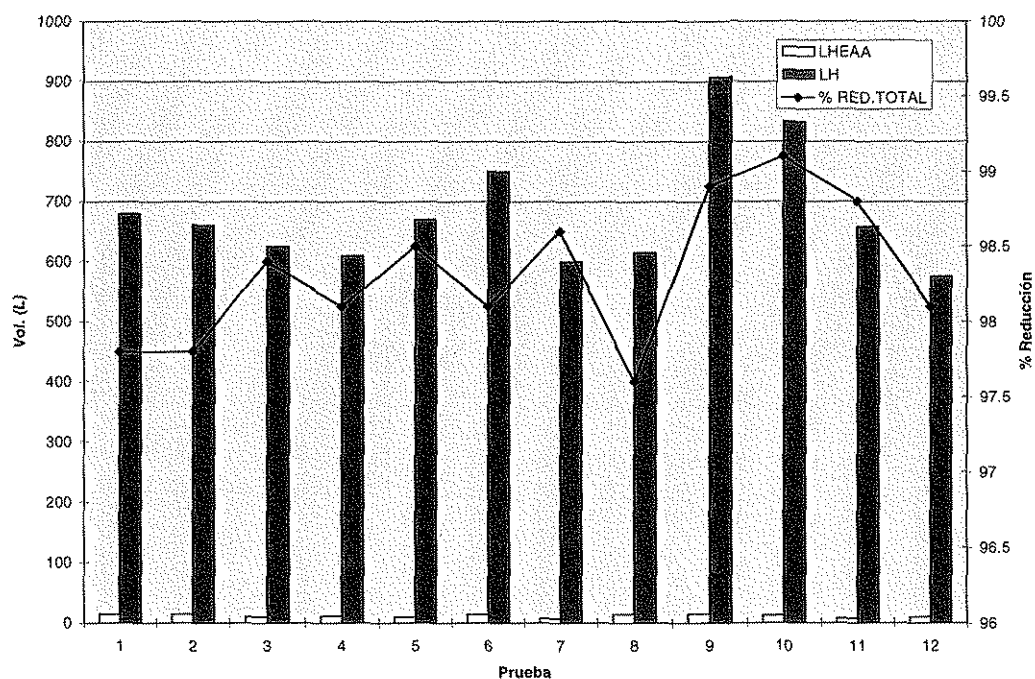
La operación de la planta piloto para disminuir el volumen de lodo fue mejor, ya que se obtuvo un 4% más en la reducción del volumen de la etapa de espesamiento a la acidificación, que en las pruebas de laboratorio en esta parte del estudio (86.8%).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.21 Reducción del volumen de lodo en planta piloto

PRUEBA	LH L	LHE L	% RED. Por Espes.	LHEA L	% RED. Por Acond.	LHEAA L	% RED. Por acidif.	% RED. Esp. a Acid.	% RED. TOTAL
1	680	155	77.2	82.2	47.0	15.0	81.7	90.3	97.8
2	660	130	80.3	73.9	43.1	14.6	80.2	88.8	97.8
3	625	135	78.4	67.8	49.8	10.2	84.9	92.4	98.4
4	610	165	72.9	61.4	62.8	11.4	81.4	93.1	98.1
5	670	130	80.6	52.6	59.5	10.0	81.0	92.3	98.5
6	750	186.5	75.1	91.7	50.8	14.4	84.3	92.3	98.1
7	600	125	79.2	48.7	61.0	8.1	83.4	93.5	98.6
8	615	108	82.4	62.9	41.7	14.7	76.6	86.4	97.6
9	907	130	85.7	68.7	47.1	15.6	77.3	88.0	98.3
10	832.5	123	85.2	67.0	45.5	12.6	81.2	89.7	98.5
11	658	100	84.8	40.6	59.4	8.0	8.3	92.0	98.8
12	575	120	79.1	55.4	53.8	10.7	80.7	91.1	98.1
<b>Promedio</b>	<b>681.9</b>		<b>81.0</b>		<b>51.8</b>	<b>12.1</b>	<b>81.1</b>	<b>90.8</b>	<b>98.2</b>

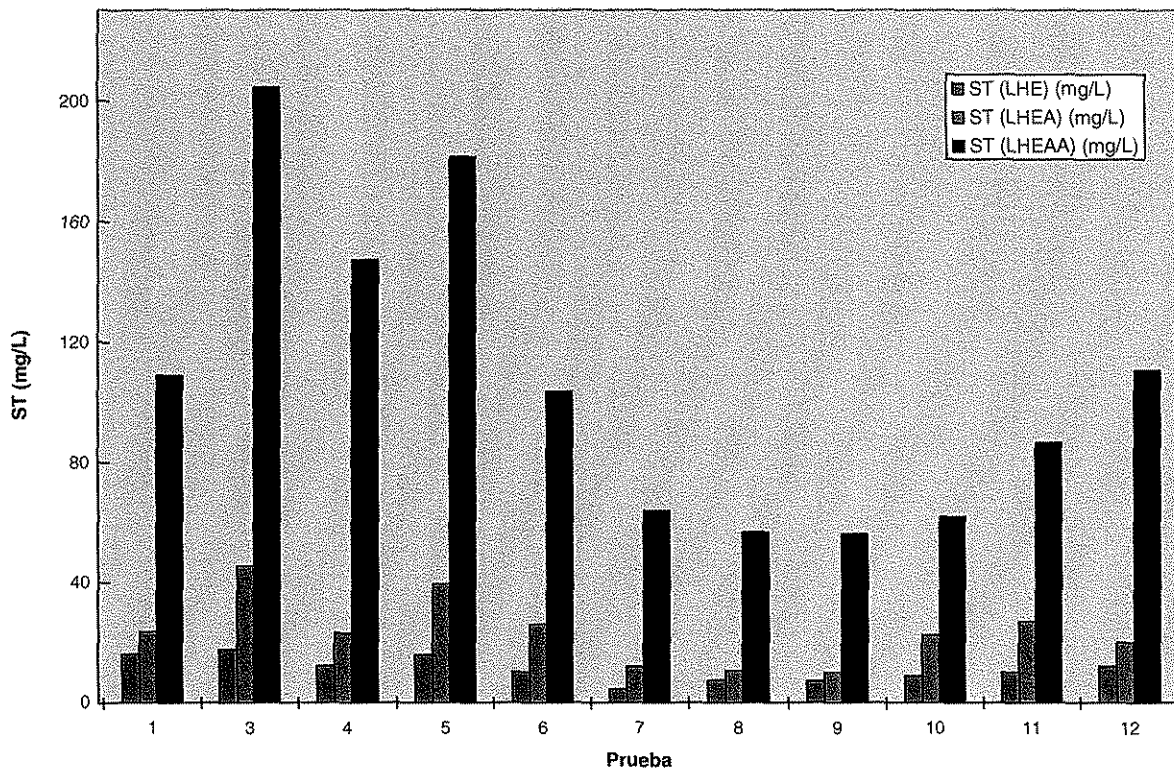
La Gráfica 3.2 muestra los volúmenes de lodo homogéneo generado del tratamiento del agua y el lodo acidificado que quedó al final del tratamiento a nivel piloto, así como el porcentaje de reducción que representa. La planta piloto de agua produjo en total un volumen de lodo homogéneo de 8182.5 L por las 12 pruebas en que estuvo operando, y al tratarse el lodo en el sistema de tratamiento piloto se produjo un volumen de 145.2 L de lodo, lo cual representa disponer el 1.77% del lodo generado.



Gráfica 3.2 Reducción de volumen de lodo en planta piloto



En la Gráfica 3.3 se muestra el aumento en la concentración de los ST en cada etapa del tratamiento a partir del espesamiento. En el acondicionamiento químico del lodo se observó que la concentración de ST se duplicó (al igual que en las primeras pruebas de laboratorio) y en la etapa de acidificación se produjo un lodo con una concentración de ST nueve veces mayor a la del lodo espesado (mayor que en la primera parte).



Gráfica 3.3 Concentración de ST en las etapas de tratamiento

### 3.3.3 Recuperación de aluminio

La Tabla 3.22 contiene los valores de la recuperación de aluminio en las pruebas llevadas a cabo en laboratorio en esta parte del estudio y presenta los resultados obtenidos en las tres primeras pruebas realizadas (Tabla 3.6). Para las pruebas efectuadas en esta parte, la concentración de aluminio proviene de la acidificación diluida y concentrada del lodo acondicionado contenidos en la Tabla 3.17, en donde la recuperación fue en promedio de 92.4%, superando en 0.8% a la obtenida en las primeras pruebas en laboratorio (91.56%).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 3.22 Recuperación de aluminio en laboratorio

Prueba	Al (mg/L) Ac. diluido	Al (mg/L) Ac. conc.	% Recuperación	Recuperación en laboratorio (pruebas anteriores)	
				Prueba	% Recp.
2	1480	1240	83.8	1	98.0
3	1360	1320	97.1	2	89.0
4	1100	1080	98.2	3	87.7
5	840	740	88.1		91.6
6	1220	1040	85.3		
7	820	740	90.2		
8	1000	980	98.0		
9	660	640	97.0		
10	1360	1340	98.5		
11	1440	1340	93.0		
12	1080	970	89.8		
<b>Promedio</b>			92.4		

El porcentaje de recuperación de aluminio en escala piloto se calculó de la siguiente manera:

1. La cantidad determinada de aluminio en el sobrenadante acidificado se consideró como la cantidad total de aluminio que se podría extraer del lodo espesado.
2. Al finalizar el tratamiento del lodo en la planta piloto, se midió el volumen de la solución recuperada y su concentración de aluminio.
3. Basándose en la cantidad extraíble de aluminio (punto 1) se determinó la recuperación del mismo en planta piloto.

A continuación se muestra un ejemplo:

En la primer acidificación del lodo espesado realizada en laboratorio, en un volumen de 0.5 L se obtuvo 447 mL de sobrenadante con una concentración de aluminio de 380mg/L; por lo tanto, la cantidad de aluminio que se puede extraer de 0.5 L de lodo espesado es:

$$\frac{380\text{mgAl}}{L_{\text{sobrenadante}}} * 0.447L_{\text{sobrenadante}} = 169.86\text{mgAl}$$

Así, en 1 L de lodo espesado se puede extraer 339.72 mg de aluminio. Si el volumen que se trató en planta piloto fue de 155 L de lodo espesado, la cantidad de aluminio que se podría extraer sería:

$$\frac{339.72 \text{mgAl}}{L_{LE}} * 155 L_{LE} = 52,656.6 \text{mgAl} \quad (\text{a})$$

Así, el cien por ciento de extracción correspondería a 52,656.6 mg de aluminio. Ahora, al finalizar el tratamiento del lodo en planta piloto, se obtuvo un volumen de 67.2 L de solución acidificada con una concentración de aluminio de 540 mg/L, por lo que se tiene una cantidad de aluminio en masa de:

$$\frac{540 \text{mgAl}}{L_{sobrenadante}} * 67.2 L_{sobrenadante} = 36,288 \text{mgAl} \quad (\text{b})$$

Relacionando (a) y (b) se obtiene el porcentaje de recuperación:

$$\begin{aligned} \% \text{ Recuperación} &= (\text{mg Al en planta piloto} / \text{mg Al en laboratorio}) * 100\% \\ &= (36,288 \text{ mg Al} / 52,656.6 \text{ mg Al}) * 100\% = 68.91\% \end{aligned}$$

Por lo tanto, se recuperó el 68.9% del aluminio extraíble del lodo espesado.

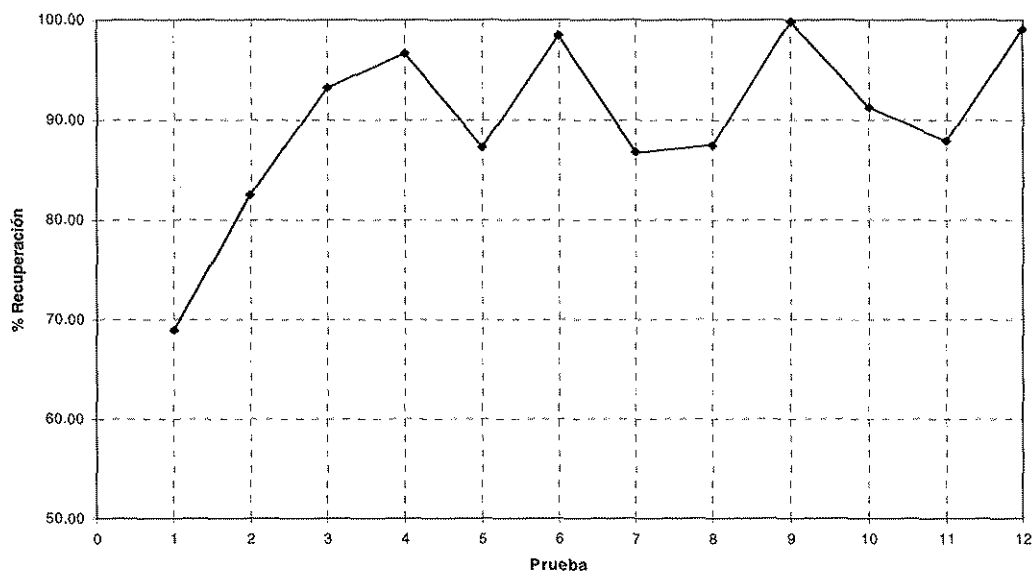
De la misma forma se realizó el cálculo para las demás pruebas. Los resultados se presentan en la Tabla 3.23.

**Tabla 3.23 Recuperación de aluminio a nivel piloto**

P r u e b a	Pruebas de laboratorio				Pruebas en planta piloto					% Rec. de aluminio
	Vol. sobren. ácido L	Al mg/L	Al en 0.5 L (LE) mg	Al en 1 L (LE) mg	Vol. LE L	Al extraíble mg	Soln. rcp. L	Al mg/L	rcp. mg	
1	0.447	380	169.86	339.72	155.0	55656.6	67.2	540	36288	68.9
2	0.450	430	193.50	387.00	130.0	50310.0	59.3	700	41510	82.5
3	0.449	530	237.97	475.94	135.0	64251.9	57.6	1040	59904	93.2
4	0.456	330	150.48	300.96	165.0	49658.4	50.0	960	48000	96.6
5	0.447	420	187.74	375.48	130.0	48812.4	42.6	1000	42600	87.3
6	0.451	490	220.99	441.98	186.5	82429.3	77.3	1050	81165	98.5
7	0.468	360	168.48	336.96	125.0	42120.0	40.6	900	36540	86.7
8	0.440	580	255.20	510.4	108.0	55123.2	48.2	1000	48200	87.4
9	0.444	530	235.32	470.64	130.0	61183.2	53.1	1150	61065	99.8
10	0.434	670	290.78	581.56	123.0	71531.9	54.4	1200	65280	91.3
11	0.445	600	267.00	534.00	100.0	53400.0	32.6	1440	46944	87.9
12	0.449	620	278.38	556.76	120.0	66811.2	44.7	1480	66156	99.0
Promedio									89.9	

En la Gráfica 3.4 se muestran los porcentajes alcanzados en la recuperación de aluminio. De las pruebas realizadas, en cuatro se alcanzaron porcentajes mayores al 95%, alcanzándose en dos ocasiones el 99%. La primera recuperación fue muy baja, esto pudo haber ocurrido por el inicio de la operación y control de la planta piloto. En promedio se

obtuvo un 89.9 % de recuperación, 0.9% más que en las primeras pruebas realizadas a nivel laboratorio. Por lo tanto, el tren propuesto es el adecuado para recuperar el aluminio extraíble del lodo.



**Gráfica 3.4 Recuperación de aluminio en planta piloto de lodo**

### 3.3.4 Uso de la solución recuperada en el tratamiento del agua como coagulante

El uso como coagulante de la solución recuperada en el tratamiento del agua en planta piloto demostró su efectividad al obtenerse un agua cuya calidad cumple con la norma oficial mexicana de agua para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994). Los análisis efectuados en agua cruda y tratada fueron: turbiedad, color, pH, ST, SST, cloro residual y aluminio. También se realizaron análisis de metales traza mediante absorción atómica.

La Tabla 3.24 muestra la caracterización realizada al agua cruda y agua tratada en donde se empleó sulfato de aluminio fresco y coagulante recuperado.

**Tabla 3.24 Caracterización del tratamiento de agua en planta piloto**

Prueba	AGUA CRUDA						AGUA TRATADA						
	Turb. UTN	Color Pt-Co	pH	Al* mg/L	ST mg/L	SST mg/L	Turb. UTN	Color Pt-Co	pH	Al* mg/L	ST mg/L	SST mg/L	Cl red. mg/L
2	39.80	171	7.66	0.01	0.225	0.050	1.25	4	7.26	0.00	0.25	0.00	---
3	46.80	208	8.03	0.00	0.320	0.090	1.26	0	7.34	0.01	0.11	0.09	0.83
4	28.50	148	7.74	0.03	0.210	0.040	0.73	6	7.57	0.00	0.10	0.02	0.77
5	31.10	155	7.81	0.05	0.220	0.040	0.92	1	7.17	0.00	0.21	0.00	1.05
6	35.50	210	8.02	0.16	0.200	0.040	0.74	3	7.21	0.00	0.10	0.00	0.72
7	14.50	105	7.82	0.22	0.210	0.040	1.01	0	7.20	0.03	0.11	0.00	1.13
8	11.18	90	8.08	0.06	0.200	---	1.01	2	7.62	0.02	0.10	---	0.93
9	13.20	108	8.23	0.31	0.200	---	1.18	4	7.91	0.03	0.10	---	0.84
10	12.66	108	7.76	0.08	0.210	0.024	1.03	1	7.38	0.05	0.11	0.00	1.03
11	24.30	128	8.26	0.10	0.210	0.038	0.85	8	7.35	0.01	0.10	0.00	1.12
12	31.10	153	7.49	0.15	0.410	0.042	0.78	1	7.39	0.00	0.31	0.01	1.07
13	12.98	90	7.85	0.12	0.210	0.026	0.80	6	7.38	0.03	0.21	0.00	0.99

En las pruebas 2 y 8 se empleó sulfato de aluminio fresco, en todas las demás se utilizó el coagulante recuperado.

\* Determinado por espectrofotómetro Hach DR/2000

La determinación de color y turbiedad en el agua tratada sirvieron para evaluar la efectividad del coagulante recuperado comparándolo con el uso del coagulante fresco. En la Tabla 3.25 se indica el coagulante utilizado en el tratamiento de agua (recuperado o fresco) y el porcentaje de remoción alcanzado en éstos parámetros.

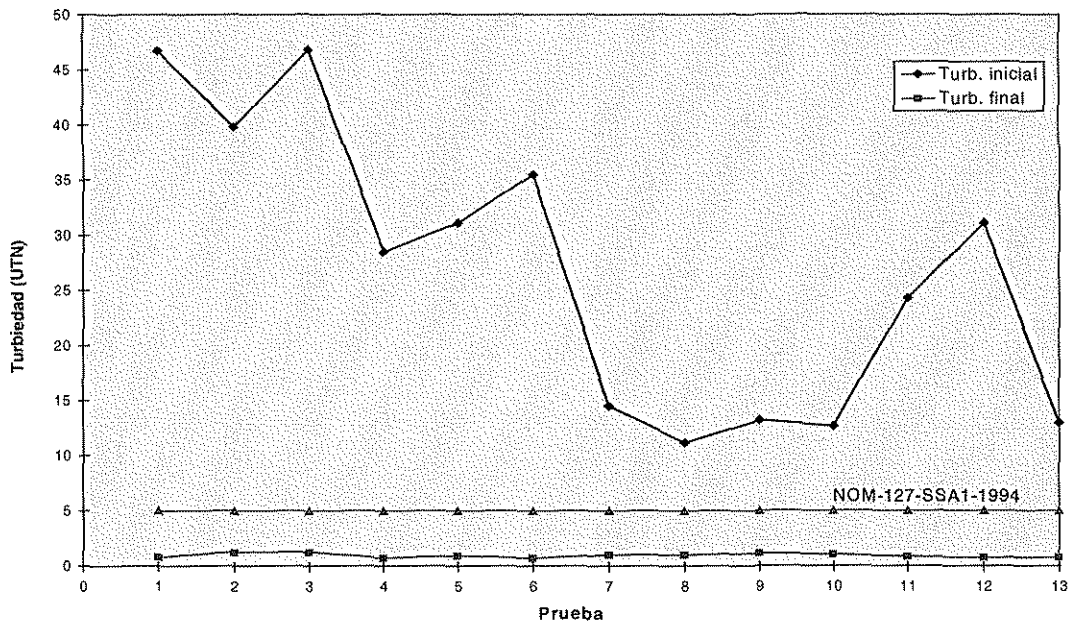
**Tabla 3.25 Efectividad del uso del coagulante recuperado en el tratamiento del agua**

PRUEBA	COAGULANTE	% REMOCIÓN DE TURBIEDAD	% DE REMOCIÓN DE COLOR
1	Sulfato de aluminio fresco	98.23	96.98
2	Sulfato de aluminio fresco	96.86	97.66
3	Soln. recuperada de sulfato de aluminio	97.31	100.0
4	Sulfato de aluminio fresco	97.44	95.95
5	Soln. recuperada de sulfato de aluminio	97.04	99.35
6	soln. recuperada de sulfato de aluminio + sulfato fresco	97.92	98.57
7	Soln. recuperada de sulfato de aluminio	93.03	100
8	Sulfato de aluminio fresco	90.97	97.78
9	soln. recuperada de sulfato de aluminio + sulfato fresco	90.06	96.3
10	soln. recuperada de sulfato de aluminio + sulfato fresco	91.86	99.07
11	soln. recuperada de sulfato de aluminio + sulfato fresco	96.50	93.75
12	soln. recuperada de sulfato de aluminio + sulfato fresco	97.49	99.35
13	soln. recuperada de sulfato de aluminio + sulfato fresco	93.84	99.33

efectividad del coagulante recuperado es similar a los resultados obtenidos al emplear el sulfato fresco. También se puede apreciar que cuando se ocupó la mezcla de ambos tipos de coagulantes la remoción de turbiedad disminuyó hasta un 90% y en color alcanzó una remoción del 94% aproximadamente.

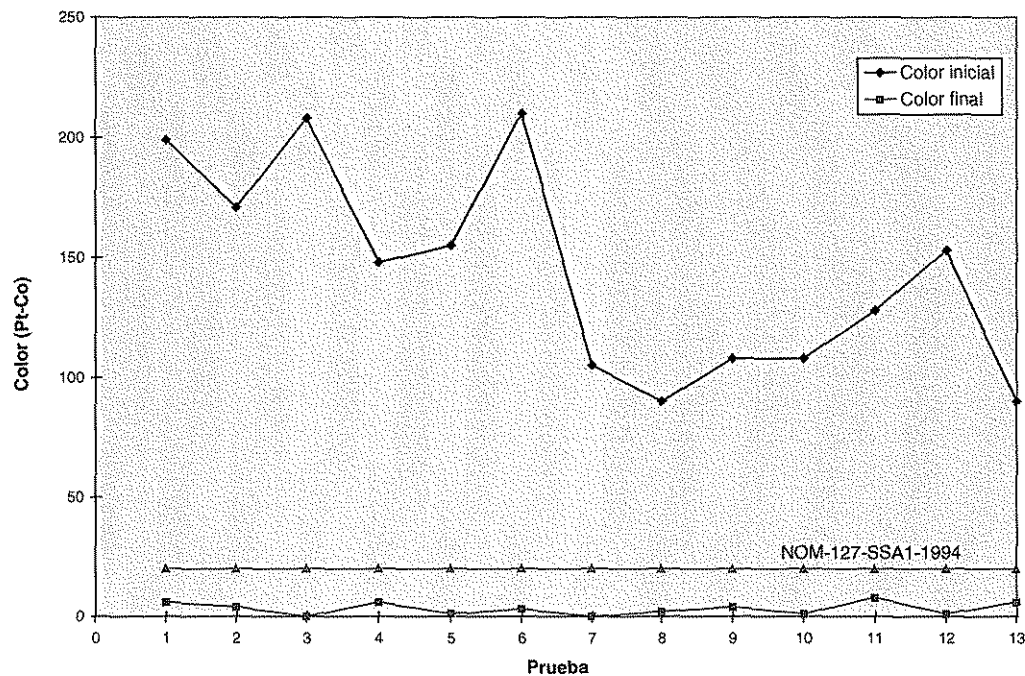
Las Gráficas 3.5 y 3.6 muestran los valores de la turbiedad y color del agua cruda y tratada, indicando el valor marcado por la norma para éstos parámetros. Se observó que la solución recuperada funciona mejor en agua con turbiedad y color altos (47 UTN y 208 Pt-Co).

Como se muestra en las gráficas, la turbiedad del agua cruda que ingresaba a la planta piloto variaba desde 11 hasta 47 UTN y a la salida el agua tenía una turbiedad de 0.73 a 1.26 UTN, presentando los remanentes más altos cuando la turbiedad y color en el agua cruda eran más bajos (12 UTN y 90 Pt-Co).



Gráfica 3.5 Turbiedad en el tratamiento del agua

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**Gráfica 3.6 Color aparente en el tratamiento del agua**

En cuanto a color, el agua ingresaba con 100 a 200 Pt-Co y salía con 0 a 8 unidades de color. Se observó que el agua tratada con el coagulante recuperado presentó las remociones más altas de color en comparación con los obtenidos al emplear el coagulante fresco.

La Ilustración 3.1 muestra el agua tratada en la planta piloto en donde se utilizó el coagulante recuperado.



**Ilustración 3.1 Agua tratada con coagulante recuperado**

Con lo anterior queda demostrado que es posible emplear la solución recuperada de aluminio como coagulante dado que su efectividad para eliminar color y turbiedad es similar a la del sulfato de aluminio fresco.

En las Tablas 3.26 y 3.27 se muestran los resultados de los análisis de metales traza en el agua cruda y tratada, respectivamente. Se analizaron 17 metales por absorción atómica; de los cuales, en el agua cruda, sólo el hierro y en algunas pruebas el manganeso se hallan en concentraciones relativamente altas; sin embargo, al final del tratamiento su concentración fue menor a 0.05 mg/L como se observa en los resultados del agua tratada. Los metales restantes: aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cobalto (Co), cobre (Cu), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se) y zinc (Zn), están presentes en cantidades traza (cumplen los límites establecidos en la NOM-127-SSSA1-1994) y permanecen sin cambio, es decir, en las concentraciones que ingresan en el agua, vuelven a salir igual en el agua tratada.

De los metales tóxicos como el arsénico (As), mercurio (Hg), cromo (Cr) y plomo (Pb) sus niveles están en concentraciones traza, con lo que se cumple con lo establecido por la Secretaría de Salud en la en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994.



Tabla 3.26 Análisis de metales traza por absorción atómica en el agua cruda

Prueba	Sb mg/L	Al mg/L	As mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Cd mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Cr mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Ni mg/L	Ag mg/L	Pb mg/L	Se mg/L	Zn mg/L	Hg mg/L
2	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.31	0.12	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
3	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.27	0.11	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
4	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.25	0.08	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
5	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.25	0.07	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
6	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.24	0.07	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
7	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.22	0.06	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
8	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.15	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
9	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.19	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
10	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.18	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
11	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.18	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
12	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.24	0.06	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
13	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	0.19	0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005

Tabla 3.27 Análisis de metales traza por absorción atómica en el agua tratada

Prueba	Sb mg/L	Al mg/L	As mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Cd mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Cr mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Ni mg/L	Ag mg/L	Pb mg/L	Se mg/L	Zn mg/L	Hg mg/L
2	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
3	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
4	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
5	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
6	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
7	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
8	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
9	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
10	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
11	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
12	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005
13	<0.0005	<1.0	<0.0005	<1.0	<0.03	<0.02	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.02	<0.10	<0.0005	<0.05	<0.0005

Límites permisibles para metales contenidos en la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994

Al mg/L	As mg/L	Ba mg/L	Cd mg/L	Cu mg/L	Cr mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Hg mg/L	Pb mg/L	Zn mg/L
0.20	0.040*	0.70	0.005	2.0	0.05	0.30	0.15	0.001	0.01	5.00

\*De acuerdo a la Modificación de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994.

### 3.3.4.1 Caracterización de la solución recuperada como coagulante

La Tabla 3.28 presenta la caracterización realizada a la solución recuperada en cada prueba en que se empleó en el tratamiento del agua dicha solución, la prueba 1 fue la primera recirculación, siendo en total nueve.

**Tabla 3.28 Caracterización del coagulante recuperado**

Prueba	pH	Turbiedad UTN	Color Pt-Co	Al mg/L	ST mg/L	SST mg/L
1	3.84	---	---	540	7.62	---
2	3.14	---	---	700	10.00	0.36
3	2.42	270	2320	1040	12.16	0.23
4	2.33	40	540	960	13.12	0.11
5	2.62	466	4080	1000	14.54	0.65
6	3.00	415	3120	1050	13.66	0.54
7	2.92	184	1760	900	11.22	0.23
8	3.35	154	1660	1000	12.08	---
9	2.80	160	1540	1150	14.73	0.34
10	2.92	164	1740	1200	15.24	0.42
11	2.50	214	2440	1440	17.98	0.44
12	2.48	273	2780	1480	19.57	0.44

Los parámetros que se analizaron fueron pH, turbiedad, color, aluminio, ST y SST. Se observó un incremento en la concentración de los parámetros a medida que aumentaba el número de ciclos de la solución. Así el color de la solución proveniente de coagulante fresco fue de 540 Pt-Co con una turbiedad de 40 UTN, mientras que la solución ácida obtenida cuando se empleó coagulante recuperado fue de 2320 Pt-Co y 270 UTN. De manera que al incrementarse el número de recirculaciones, la concentración en los parámetros medidos fue en aumento.

El pH final de la solución recuperada osciló entre 2.5 a 3.0, obteniéndose recuperaciones mayores de aluminio cuando el pH era menor a 3.0; sin embargo, la disolución de otros metales también se incrementó. En relación con el contenido de sólidos se observó que a partir del quinto ciclo comenzó a presentarse un aumento en su concentración.

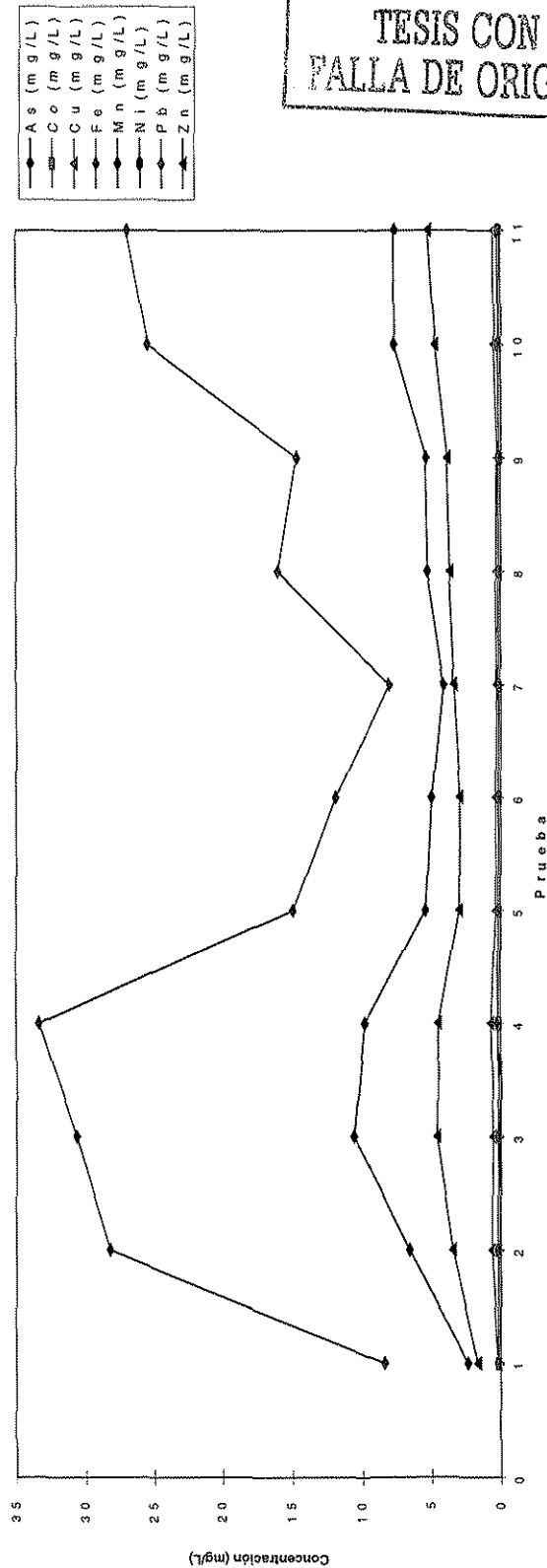
La Tabla 3.29 muestra las concentraciones halladas en la solución del coagulante recuperado en cada una de las pruebas. Los metales en concentraciones más altas fueron hierro, manganeso y zinc, los cuales presentaron un aumento en su concentración durante los primeros tres ciclos de la recirculación; sin embargo, después de mostrar un descenso en su concentración, posteriormente se observó una tendencia a aumentar conforme al número de recirculaciones. Esto también se observó en los demás metales aunque en menores cantidades (Gráfica 3.7). Los metales traza que permanecieron sin cambio en su concentración fueron bario (Ba), berilio (Be), cadmio (Cd), cromo (Cr), selenio (Se) y mercurio (Hg).

En el caso de los metales como el arsénico, plomo, mercurio y cromo, que son nocivos para la salud humana y que se disuelven junto con el aluminio durante la acidificación del lodo, los dos primeros mostraron una tendencia similar a la del hierro. La concentración del mercurio y el cromo fue igual en todos los ciclos, menor a 0.0005 mg/L para el primero y menor a 0.05 mg/L para el segundo.

Por tanto, la calidad del coagulante recuperado mostró que es factible de emplearse en el tratamiento del agua ya que no altera o afecta la calidad requerida para un agua potable en relación a los parámetros analizados, pudiéndose utilizar hasta nueve ciclos su recirculación.

Tabla 3.29 Análisis de metales por absorción atómica del coagulante recuperado en planta piloto

Prueba	Sb mg/L	Al mg/L	As mg/L	Ba mg/L	Be mg/L	Cd mg/L	Co mg/L	Cu mg/L	Cr mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Ni mg/L	Ag mg/L	Pb mg/L	Se mg/L	Zn mg/L	Hg mg/L
1	<0.0005	504.8	0.0145	<1.0	<0.03	<0.02	0.11	0.15	<0.05	8.35	2.31	0.17	<0.02	0.13	<0.0005	1.64	<0.0005
2	<0.0005	822.3	0.0895	<1.0	<0.03	<0.02	0.13	0.61	<0.05	28.18	6.56	0.20	0.02	0.17	<0.0005	3.46	<0.0005
3	<0.0005	941.0	0.1078	<1.0	<0.03	<0.02	0.14	0.55	<0.05	30.60	10.58	0.18	<0.02	0.18	<0.0005	4.59	<0.0005
4	<0.0005	1052.3	0.1025	<1.0	<0.03	<0.02	0.11	0.66	<0.05	33.31	9.77	0.16	0.02	0.20	<0.0005	4.48	<0.0005
5	<0.0005	896.5	0.0833	<1.0	<0.03	<0.02	0.11	0.33	<0.05	14.90	5.38	0.16	<0.02	0.15	<0.0005	2.97	<0.0005
6	<0.0005	777.9	0.0818	<1.0	<0.03	<0.02	0.09	0.35	<0.05	11.84	4.96	0.16	<0.02	0.15	<0.0005	2.94	<0.0005
7	<0.0005	818.6	0.0698	<1.0	<0.03	<0.02	0.09	0.26	<0.05	8.01	4.07	0.16	<0.02	0.13	<0.0005	3.34	<0.0005
8	<0.0005	941.0	0.0859	<1.0	<0.03	<0.02	0.10	0.32	<0.05	16.00	5.27	0.20	<0.02	0.15	<0.0005	3.66	<0.0005
9	<0.0005	985.5	0.0859	<1.0	<0.03	<0.02	0.11	0.25	<0.05	14.65	5.38	0.20	0.02	0.16	<0.0005	3.86	<0.0005
10	<0.0005	1171.2	0.1085	<1.0	<0.03	<0.02	0.13	0.48	<0.05	25.38	7.66	0.22	0.02	0.22	<0.0005	4.73	<0.0005
11	<0.0005	1275.2	0.1151	<1.0	<0.03	<0.02	0.14	0.49	<0.05	26.89	7.65	0.23	0.03	0.20	<0.0005	5.21	<0.0005



TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Gráfica 3.7 Metales traza en la solución recuperada analizados por absorción atómica

### 3.3.5 Demanda de ácido sulfúrico

El requerimiento estequiométrico de ácido sulfúrico para obtener un mol de  $Al^{+3}$  proveniente de los precipitados de aluminio ( $Al(OH)_3 - 3H_2O$ ) en el lodo es de 1.5 moles ó 5.44 kg de ácido/kg de aluminio. La relación estequiométrica se expresa en la siguiente reacción:



En la Tabla 3.30 se presenta la demanda de ácido sulfúrico con relación al aluminio recuperado en las pruebas en planta piloto de lodo.

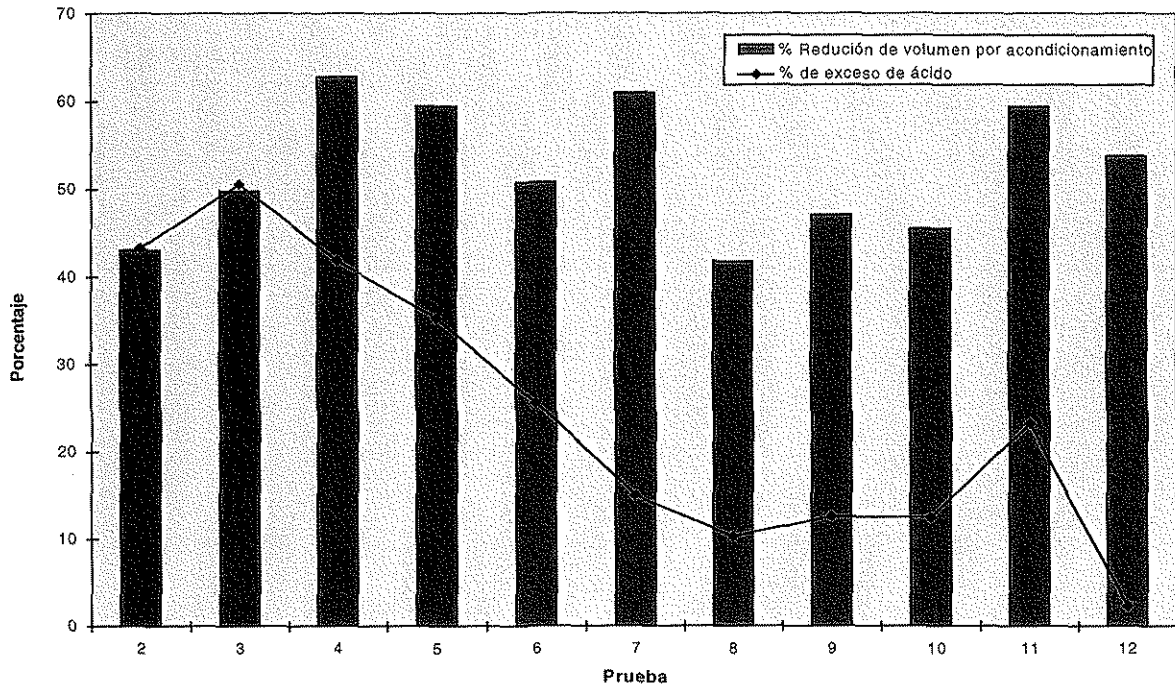
**Tabla 3.30 Determinación de la demanda de ácido sulfúrico en planta piloto**

Prueba	Al en la soln. kg	Al en el lodo ácido kg	Al total kg	mol total Al	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> * mL	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Kg	Normalización			
							mol ácido/mol Al	kg ác. kg Al	% en exceso	
									mol	kg
2	0.04151	0.01022	0.05173	1.916	250	0.4039	2.15	7.81	43.43	43.29
3	0.05990	0.01061	0.07051	2.612	358	0.5784	2.26	8.20	50.69	50.54
4	0.04820	0.01094	0.05894	2.183	283	0.4573	2.13	7.73	42.03	41.87
5	0.04260	0.01000	0.05260	1.948	240	0.3878	2.03	7.37	35.42	35.28
6	0.08117	0.01512	0.09629	3.566	408	0.6592	1.89	6.85	25.76	25.63
7	0.03654	0.00729	0.04383	1.623	170	0.2747	1.73	6.27	15.12	15.00
8	0.04820	0.01470	0.06290	2.330	234	0.3781	1.66	6.01	10.41	10.30
9	0.06107	0.01794	0.07901	2.926	300	0.4847	1.69	6.14	12.69	12.58
10	0.06528	0.01512	0.08040	2.978	305	0.4928	1.69	6.13	12.59	12.48
11	0.04694	0.01152	0.05846	2.165	243	0.3926	1.85	6.72	23.37	23.24
12	0.06616	0.01584	0.08199	3.037	283	0.4573	1.54	5.58	2.43	2.33
<b>Promedio</b>							1.87	6.80	24.90	24.78

\*Se empleó ácido sulfúrico con una pureza del 88.3% y  $\rho = 1.84$  g/mL

Normalizando la cantidad de aluminio recuperado por ácido gastado se observa que la demanda de ácido sulfúrico promedio fue de 6.9 kg de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por 1 kg de Al. Esto representa un 25% de exceso de ácido sulfúrico, en relación con el requerido estequiométricamente (5.44 kg/kg Al), esta cantidad de ácido se empleó para alcanzar una recuperación cerca del 90% del aluminio extraíble del lodo.

La demanda de ácido durante las tres primeras pruebas fue alta debido posiblemente al inicio de la operación y control de la planta piloto, lo cual también se observó en la baja reducción del volumen de lodo acondicionado en estas pruebas (Gráfica 3.8), hecho que posiblemente afectó el consumo de ácido, una vez solucionado el acondicionamiento del lodo el porcentaje de reducción de volumen de lodo aumentó y disminuyó el exceso de ácido utilizado.



Gráfica 3.8 Efecto del exceso de ácido sobre la reducción de volumen de lodo por acondicionamiento

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CONCLUSIONES

De la realización del presente trabajo, las conclusiones que se obtuvieron fueron las siguientes:

- El tren de tratamiento de lodos seleccionado a nivel laboratorio está compuesto por 4 procesos: espesamiento, acondicionamiento químico, acidificación y separación de fases por sedimentación (Tratamiento 1). La etapa de espesamiento previa a un acondicionamiento del lodo aumenta la concentración de sólidos en el lodo, mejora su deshidratación en el proceso de acidificación y aumenta la concentración del aluminio disuelto. Los resultados obtenidos a escala laboratorio fueron de 98.5% en la reducción de volumen de lodo y 91.6% en la recuperación de aluminio, mientras que aplicando el Tratamiento 2 (acondicionamiento químico, acidificación y separación de fases por sedimentación) la reducción de volumen fue de 97.6% y una recuperación de 87.6% de aluminio.
- Se escaló el tratamiento seleccionado a nivel piloto para un caudal de 4L de lodo homogéneo/min. Los equipos que conforman el diseño de la planta piloto son: un espesador de lodos, unidad de acondicionamiento químico con sedimentador, unidad de acidificación y un separador de fases. La planta fue hecha de acrílico y emplea agitadores de acero con controladores de velocidad y bombas dosificadoras.
- El tratamiento del lodo en escala piloto redujo el volumen de lodo en un 98.2% con una recuperación del 89.9% de aluminio.
- Es posible emplear la solución recuperada como coagulante dado que su efectividad para eliminar color y turbiedad es similar a la del sulfato de aluminio fresco. Remueve en proporciones iguales la turbidez del agua, con una mayor efectividad en la remoción de color y en términos generales funciona mejor con turbiedad y color mayores a 50 UTN y 210 Pt-Co.
- 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.
- Se realizaron nueve ciclos de recirculación del coagulante recuperado, en los cuales la calidad del agua tratada no se alteró por el aumento de algunos metales en la solución como hierro, manganeso y zinc. Por tanto, es factible reciclar el coagulante recuperado para la potabilización del agua, lo que permite ahorrar el uso de coagulante fresco.
- La demanda de ácido sulfúrico a escala piloto fue de 6.8 kg/kg de aluminio recuperado, representando un 25% en exceso del requerimiento estequiométrico (5.44 kg ácido/kg aluminio).

## RECOMENDACIONES

- En los últimos ciclos se observó una disminución en la efectividad de la solución en el tratamiento de agua al tener un pH menor a 3. Por lo anterior se debe tener un mayor control en el pH de la extracción, la dosis de ácido sulfúrico y el tiempo de contacto.
- Es importante señalar que no se pudo continuar con las recirculaciones de la solución recuperada hasta obtener el número de ciclos en el que se podría seguir utilizando dicha solución; es decir, hasta observar algún impacto en la calidad del agua tratada por el incremento de impurezas en dicha solución, esto debido a falta de recursos para seguir manteniendo las operaciones a nivel piloto; por tanto, se recomienda continuar este aspecto de la investigación.
- Se demostró que técnicamente es factible a nivel piloto utilizar el tren de tratamiento propuesto; sin embargo, hace falta un estudio económico para conocer si es factible su aplicación a nivel planta.
- La cantidad de ácido adicionado varía de acuerdo a las características de cada lodo, por lo que la dosis hallada para un lodo de una planta potabilizadora puede ser diferente a otro; por tanto es necesario realizar una caracterización del lodo para determinar la demanda de ácido, así como también las condiciones para el acondicionamiento del mismo.



## REFERENCIAS

APHA, AWWA, WEF. 1992. Standard Methods. For the Examination of Water and Wastewater. Greenbert E. A., Clesceri S. L., Eaton D. A. (editores). APHA, AWWA, WEF.

Borchardt A. Jack; Redman J. William; Gordon E. Jones; Sprague T. Richard, **Sludge an its ultimate disposal**, Editorial Ann Arbor Science, 1981, pp. 31-62.

Hach Company. **Manual de procedimientos del espectrofotómetro DR/2000**. Técnica adaptada por FWPCA Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. 1988, pp. 509-510.

**Modificación a la 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 el agua para su potabilización. Diario Oficial de México, 22 de noviembre de 2000.

**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 el agua para su potabilización. Diario Oficial de México, 18 de enero de 1996.

Programa Regional de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, Ciclo: Tratamiento. Serie Filtración Rápida. Manual III. Teoría. **CEPIS**, OPS, Perú. 1992, pp. 1,11, 13-14, 37,40-41.

Ramalho S. Rubens, **Tratamiento de Aguas Residuales**, Barcelona, España, Editorial Reverté S.A., 1991, pp. 128-146.

Shovlin G. Marjorie *et al*, **Aluminum in Drinking Water and Alzheimer's Disease: A Resource Guide**, 1993, AWWA Research Foundation and the American Water Works Association, pp. 29-33.

Unda Opazo Francisco, **Ingeniería Sanitaria Aplicada a Saneamiento y Salud Pública**. Editorial Limusa, 1993, pp. 131-134.

**USEPA**. National Interim Primary Drinking Water Regulation. Water Supply, EPA-570/9-76-003. 1976.

Weber J. Walter, **Control de la Calidad del Agua. Procesos Físicoquímicos**, Barcelona, España, Editorial Reverté S. A., 1979, pp. 124-135, 142-143.

Zeta-Meter, Inc., **Everything you want to know about Coagulation & Flocculation**, E.U.A, 1993, 4ª edición.

- Albrecht A. E., "**Disposal of alum sludges**", 1972, Journal American Water Works Association, Vol. 64, No 1, pp. 46-52.
- Arup K. Sengupta and Bo Shi, "**Selective alum recovery by liquid ion exchange**", 1992, Journal American Water Works Association, Vol. 84, No 1, pp. 96-103.
- Bishop M. Mark, Cornwell A. David, Rolan A. T., and Bailey L. Thomas, "**Testing of alum recovery for solids reduction and reuse**", 1987, Journal American Water Works Association. Vol. 79, No 6, pp. 76-83.
- Chen Ben H. H., Paul H. King and Clifford W. Randall, "**Alum recovery from representative water-treatment plant sludges**", April 1976, Journal American Water Works Association, U.S. A., pp. 24-27.
- CNA, **Inventario de Plantas Potabilizadoras en México**, 1997, Gerencia de Proyectos de Agua Potable y Saneamiento, Cd. de México, 21997.
- Cornwell A. David, James A. Susan, "**Characteristics of acid-treated alum sludge**", 1979, Journal American Water Works Association, Vol. 71, No 10, pp. 604-608.
- Fulton P. George, "**Recover alum to reduce waste-disposal cost**", May 1974, Journal American Water Association, Vol. 666, No 5, pp. 312-318.
- Gruninger M. Robert, "**Disposal of waste alum sludge from water treatment plants**", 1975, Journal Water Pollution Control Federation. Vol. 47, No 3, pp. 543-552.
- Moran J. Robert, Roddy P. Charles, "**Recovery and reuse of alum sludge at Tampa**", July 1960, Journal American Water Works Association, Vol. 52, No 7, pp. 857-866.
- Pera I. Llibre Joan, "**Recuperación en una planta piloto del sulfato de aluminio de un fango aluminoso producido por una potabilizadora**", 1991, Tecnología del Agua, Año XI, Vol. 79, No 6, pp. 76-83.
- P. C. G. Isaac and Vahidi I., "**The recovery of alum sludge**", 1961, Proc. Soc. Water Treatment and Examination, Vol. 10, No 91.
- Sandoval L., Flores L. M., Montellanos L., Morán M. A., Rubí R., Sánchez L. O., Santana M. L., Vázquez S., Martín A., "**Tratabilidad de los lodos producidos en la coagulación con sulfato de aluminio en la potabilización del agua**", Anuario 1997, IMTA, pp. 73-78.
- Saunders F. Michael and Roeder L. Michael, "**Coagulant recovery: a critical assessment**", 1991, AWWA, American Water Works Association Research Foundation, Cap. II.

---

Saunders F. Michael and Randall C. Shaw, "**Aluminum reclamation by acidic extraction of aluminum - anodizing sludges**", March 1988, Journal Water Pollution Control Federation, VO. 60, No 3, pp. 369-378.

Slechta A. F. and Culp G. L.. "**Water reclamation studies at the South Tahoe Public Utility District**". May 1967, Journal Water Pollution Control Federation, Vol. 39, No 5, pp. 787-792.

Sturmm, W. O'Melia, C. R., "**Stiochiometry coagulation**", 1968, Journal American Water Works Association, Vol. 60, pp. 514-539.

Wang L. K., Yang J. K., "**Total waste recycle system for water purification plant using alum as primary coagulant**", Res. Recovery and Cons., Vol. 1, pp. 67-84.

Webster J. A., "**Operational and experimental experience at Daer Water Treatment Works, with especial reference to the use of activated silica and the recovery of alum from sludge**". 1966, Journal Institute Water Engineering. Vol. 20, pp. 167-198.

Westerhoff P. Garret, Cornwell A. David, "**A new approvech to alum recovery**", 1978. Journal American Water Works Association, Vol. 70, No 12, pp. 709-714.

Westerhoff P. Garret, "**Alum recycling**", December 1973, Water and Wastes Engineering, U.S.A., pp. 31-38, 48.