

01177 2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL

“RECUPERACION DE ALUMINIO DE UN LODO  
PROVENIENTE DE UNA PLANTA POTABILIZADORA  
QUE UTILIZA SULFATO DE ALUMINIO”.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERIA AMBIENTAL  
P R E S E N T A :  
LAURA OLIVIA SANCHEZ GUZMAN



DIRECTOR DE TESIS M. en I. LUCIANO SANDOVAL YOVAL

0271948

CUERNAVACA, MOR.

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

**RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE UN  
LODO PROVENIENTE DE UNA PLANTA  
POTABILIZADORA QUE UTILIZA  
SULFATO DE ALUMINIO**

# ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	ii
RESUMEN.....	iii
INTRODUCCIÓN.....	iv
JUSTIFICACIÓN.....	v
OBJETIVOS.....	vi
<b>1. FUENTES Y CARACTERÍSTICAS DEL AGUA CRUDA Y DE LOS LODOS.....</b>	<b>1</b>
1.1 CARACTERÍSTICAS DEL AGUA CRUDA .....	1
1.2 CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA .....	1
1.3 CRITERIOS DE CALIDAD PARA LA SELECCIÓN DE LA FUENTE .....	3
1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS .....	3
1.4.1 Agua de retrolavado de los filtros.....	5
1.4.2 Lodos de la coagulación .....	6
1.4.2.1 Sales de sulfato de aluminio.....	6
1.4.2.2 Sales de hierro .....	7
1.4.3 Lodos de plantas de ablandamiento.....	8
1.4.4 Precipitados de hierro y manganeso .....	9
1.5 CANTIDAD DE LODOS EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA .....	9
1.6 OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO DE LODOS .....	10
<b>2. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LODOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 ESPESAMIENTO .....	11
2.1.1 Espesamiento por gravedad .....	13
2.2 ACONDICIONAMIENTO .....	13
2.2.1 Acondicionamiento químico.....	15
2.2.1.1 Electrólitos minerales .....	15
2.2.1.2 Polielectrólitos.....	15
2.3 DESHIDRATACIÓN .....	16
2.3.1 Lagunas de secado .....	17
2.3.2 Lechos de secado de arena.....	18
2.3.3 Filtración a presión .....	20
2.3.4 Filtración al vacío .....	21
2.3.5 Filtros banda .....	24
2.3.6 Centrifugación .....	25
<b>3. RECUPERACIÓN DE ALUMINIO .....</b>	<b>27</b>
3.1 TIPOS DE ALUMINIO.....	29
3.2 QUÍMICA DE LOS COAGULANTES .....	30
3.3 VARIABLES QUE AFECTAN LA EXTRACCIÓN DEL ALUMINIO.....	31

3.3.1 Ácidos y bases utilizados en la recuperación .....	31
3.3.1.1 Tipos de ácido .....	33
3.3.2 Disolución del aluminio presente en el lodo .....	33
3.3.3 Evaluación estequiométrica .....	34
3.3.3.1 Pruebas a escala laboratorio .....	35
3.3.3.2 Pruebas a escala piloto .....	35
3.3.3.3 Pruebas a nivel planta.....	35
3.3.4 pH de la solución acidificada.....	36
3.3.5 Tiempo de contacto de la extracción ácida.....	36
3.4 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO EN LA SOLUCIÓN ÁCIDA.....	37
3.5 CALIDAD DEL COAGULANTE RECUPERADO.....	38
3.5.1 Color y materia orgánica .....	38
3.5.2 Hierro y manganeso.....	39
3.5.3 Contaminantes inorgánicos traza.....	40
3.6 REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS.....	41
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>43</b>
4.1 TÉCNICAS DE DETERMINACIÓN DE ALUMINIO.....	43
4.1.1 Espectrofotometría de Absorción Atómica (técnica de flama).....	43
4.1.2 Colorimetría.....	43
4.1.2.1 Espectrofotómetro Hach.....	44
4.1.2.2 Técnica de Snyder .....	44
4.1.3 Conductimetría .....	46
4.1.4 Determinaciones analíticas para los diferentes tipos de aluminio .....	48
4.1.4.1 Aluminio total .....	49
4.1.4.2 Aluminio extraíble.....	49
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA Y DEL LODO HOMOGÉNEO.....	50
4.2.1 Agua cruda.....	50
4.2.2 Lodo homogéneo .....	51
4.3 PRUEBAS DE TRATABILIDAD DE LODOS A NIVEL LABORATORIO .....	53
4.3.1 Lodo generado a partir de agua cruda (lodo sintético) .....	54
4.3.2 Lodo espesado sin polímero .....	55
4.3.3 Lodo espesado con polímero .....	56
4.4 PARÁMETROS DE CONTROL .....	57
4.4.1 Dosis de ácido sulfúrico .....	57
4.4.2 pH final de la solución.....	57
4.4.3 Condiciones de mezcla (tiempo de contacto).....	57
4.5 PRUEBAS DE LABORATORIO EN LA PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS”.....	58
4.5.1 Parámetros de control .....	58
4.6 RECUPERACIÓN DE ALUMINIO Y REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS.....	59
4.6.1 Recuperación de aluminio .....	59
4.6.2 Reducción del volumen .....	60
4.7 CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LODOS .....	60
4.8 CARACTERIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN ÁCIDA.....	61

<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>63</b>
5.1 SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS .....	63
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA Y DEL LODO HOMOGÉNEO.....	66
5.2.1 Agua cruda.....	66
5.2.2 Lodo homogéneo .....	68
5.3 PRUEBAS DE TRATABILIDAD DE LÓDOS A NIVEL LABORATORIO .....	73
5.3.1 Lodo sintético .....	73
5.3.2 Lodo espesado sin polímero .....	75
5.3.3 Lodo espesado con polímero .....	77
5.4 PARÁMETROS DE CONTROL .....	80
5.4.1 Dosis de ácido sulfúrico .....	80
5.4.2 pH final de la solución.....	81
5.4.3 Condiciones de mezcla (tiempo de contacto) .....	82
5.5 PRUEBAS DE LABORATORIO EN LA PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS” .....	83
5.5.1 Parámetros de control .....	83
5.5.1.1 Dosis de ácido sulfúrico .....	84
5.5.1.2 pH final de la solución .....	85
5.5.1.3 Condiciones de mezcla (tiempo de contacto).....	86
5.6 EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DEL ALUMINIO Y REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS.....	87
5.6.1 Recuperación de aluminio .....	87
5.6.2 Evaluación de la reducción de volumen .....	94
5.7 CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LODOS .....	95
5.8 CARACTERIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN RICA EN ALUMINIO .....	97
5.8.1 Turbiedad y color.....	97
5.8.2 Hierro y manganeso.....	101
5.8.3 Contaminantes inorgánicos traza.....	102
CONCLUSIONES.....	104
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXO A.....	110

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA .....	2
TABLA 1.2 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS LODOS .....	4
TABLA 1.3 LODOS DE HIERRO Y ALUMINIO .....	6
TABLA 1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS DE ALUMINIO.....	7
TABLA 1.5 CARACTERÍSTICAS DE LODOS DE HIERRO PROVENIENTES DE PLANTAS POTABILIZADORAS .....	7
TABLA 1.6 LODOS DE ABLANDAMIENTO CON CAL .....	8
TABLA 1.7 PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS TEÓRICOS .....	10
TABLA 2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS LAGUNAS DE SECADO .....	17
TABLA 2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS LECHOS DE SECADO DE ARENA.....	20
TABLA 2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FILTRACIÓN A PRESIÓN .....	21
TABLA 2.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FILTRACIÓN AL VACÍO.....	24
TABLA 2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS FILTROS BANDA .....	24
TABLA 2.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA CENTRIFUGACIÓN.....	26
TABLA 3.1 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO EN DIFERENTES LODOS CRUDOS .....	37
TABLA 3.2 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO EN EL SOBRENADANTE .....	37
TABLA 3.3 COLOR EN EL SOBRENADANTE EN FUNCIÓN DEL PH .....	38
TABLA 3.4 CONCENTRACIONES DE FE Y MN EN COAGULANTE COMERCIAL Y RECUPERADO .....	39
TABLA 3.5 CONCENTRACIÓN DE HIERRO EN EL COAGULANTE RECUPERADO .....	40
TABLA 3.6 CONCENTRACIÓN DE METALES EN LA SOLUCIÓN ÁCIDA .....	41
TABLA 3.7 REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LODOS DESPUÉS DE LA ACIDIFICACIÓN .....	41
TABLA 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS DE ALUMINIO POR DOS EQUIPOS.....	64
TABLA 5.2 CARACTERIZACIÓN DEL AGUA CRUDA DE LA PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS” .....	67
TABLA 5.3 CARACTERIZACIÓN DEL LODO A LA SALIDA DEL SEDIMENTADOR .....	68
TABLA 5.4 CARACTERIZACIÓN DEL LODO HOMOGÉNEO .....	69
TABLA 5.5 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS, PH Y ALUMINIO EN EL LODO SIN Y CON POLÍMERO .....	70
TABLA 5.6 ÁCIDO SULFÚRICO Y PH REQUERIDO EN LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO .....	80
TABLA 5.7 TIEMPO DE CONTACTO UTILIZADO EN EL LODO SEDIMENTADO SIN POLÍMERO.....	82
TABLA 5.8 TIEMPO DE CONTACTO UTILIZADO EN EL LODO SEDIMENTADO CON POLÍMERO .....	82
TABLA 5.9 TIEMPO DE CONTACTO UTILIZADO EN EL LODO SEDIMENTADO SIN POLÍMERO.....	83
TABLA 5.10 ÁCIDO SULFÚRICO Y PH REQUERIDOS EN LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO .....	84
TABLA 5.11 RECUPERACIÓN DE ALUMINIO CON UN TIEMPO DE CONTACTO DE 10 MINUTOS .....	86
TABLA 5.12 CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO Y SÓLIDOS EN EL AGUA CRUDA Y EN EL LODO .....	87
TABLA 5.13 REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE LODO HOMOGÉNEO CON Y SIN POLÍMERO POR ESPESAMIENTO Y ACIDIFICACIÓN .....	94
TABLA 5.14 CÁLCULO DE LODOS (BASE SECA) TEÓRICOS Y REALES .....	96
TABLA 5.15 TURBIEDAD Y COLOR DE LA SOLUCIÓN RICA EN ALUMINIO .....	97
TABLA 5.16 COMPARACIÓN DE TURBIEDAD Y COLOR VS PH Y SÓLIDOS .....	100
TABLA 5.17 CONCENTRACIÓN DE FE EN MUESTRAS DE AGUA, LODO Y SOLUCIÓN ÁCIDA .....	101
TABLA 5.18 CONCENTRACIÓN DE MN EN MUESTRAS DE AGUA, LODO Y SOLUCIÓN ÁCIDA .....	101
TABLA 5.19 METALES TRAZA PRESENTES EN EL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 OPCIONES PARA EL MANEJO DEL LODO PRODUCIDO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE .....	12
FIGURA 2.2 ESQUEMA DE UN ESPESADOR MECÁNICO .....	14
FIGURA 2.3 PLANTA Y SECCIÓN DE UN LECHO DE SECADO DE ARENA .....	19
FIGURA 2.4 ESQUEMA DE UN FILTRO PRENSA .....	21
FIGURA 2.5 DIAGRAMA DE UN FILTRO DE VACÍO DE TAMBOR ROTATORIO.....	23
FIGURA 2.6 ESQUEMA DE UN FILTRO BANDA .....	25
FIGURA 2.7 ESQUEMA DE UNA CENTRÍFUGA TAZÓN SÓLIDO DEL TIPO CÓNICO-GIRATORIO.....	26
FIGURA 3.1 PROCESO TÍPICO DE RECUPERACIÓN DE COAGULANTE .....	28
FIGURA 3.2 DIAGRAMA DE CONCENTRACIÓN VS. pH DE LAS ESPECIES DE ALUMINIO.....	31
FIGURA 4.1 PROCEDIMIENTO DE LABORATORIO DE LA TÉCNICA DE SNYDER.....	45
FIGURA 4.2 TREN DE TRATAMIENTO DE LA PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS” .....	51
FIGURA 4.3 TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS DE LA PLANTA POTABILIZADORA “LOS BERROS” .....	52
FIGURA 4.4 ESQUEMA DE LA TRATABILIDAD DE LODOS .....	54
FIGURA 5.1 BALANCE DE ALUMINIO TOTAL (ABSORCIÓN ATÓMICA Y HACH).....	74
FIGURA 5.2 BALANCE DE ALUMINIO EXTRAÍBLE (CONDUCTIMETRÍA Y HACH).....	75
FIGURA 5.3 BALANCE DE ALUMINIO EXTRAÍBLE Y TOTAL .....	76
FIGURA 5.4 BALANCE DE ALUMINIO EXTRAÍBLE (CONDUCTIMETRÍA Y HACH).....	77
FIGURA 5.5 BALANCE DE ALUMINIO EXTRAÍBLE Y TOTAL .....	79
FIGURA 5.6 BALANCE DE ALUMINIO EXTRAÍBLE (CONDUCTIMETRÍA Y HACH).....	79
FIGURA 5.7 BALANCE DE ALUMINIO EN EL LODO ESPESADO SIN POLÍMERO .....	92
FIGURA 5.8 RESULTADOS TOTALES DEL BALANCE DE ALUMINIO EN EL LODO ESPESADO SIN POLÍMERO ..	93

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 3.1 PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO VS REACTIVOS QUÍMICOS ADICIONADOS.....	32
GRÁFICA 3.2 PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO VS ÁCIDO SULFÚRICO ADICIONADO.....	34
GRÁFICA 3.3 REDUCCIÓN DE SÓLIDOS VS DISOLUCIÓN DEL ALUMINIO .....	42
GRÁFICA 4.1 CONDUCTIVIDAD Y pH VS ML DE ÁCIDO SULFÚRICO EMPLEADO .....	47
GRÁFICA 5.1 RELACIÓN DE CONCENTRACIONES BAJAS DE ALUMINIO.....	65
GRÁFICA 5.2 RELACIÓN DE CONCENTRACIONES ALTAS DE ALUMINIO .....	66
GRÁFICA 5.3 COMPARACIÓN DE SÓLIDOS EN EL LODO ESPESADO CON Y SIN POLÍMERO.....	71
GRÁFICA 5.4 CORRELACIÓN DE ALUMINIO Y SÓLIDOS TOTALES EN EL LODO HOMOGÉNEO.....	71
GRÁFICA 5.5 CORRELACIÓN DE ALUMINIO Y SÓLIDOS TOTALES EN EL LODO SIN POLÍMERO .....	72
GRÁFICA 5.6 CORRELACIÓN DE ALUMINIO Y SÓLIDOS TOTALES EN EL LODO CON POLÍMERO .....	72
GRÁFICA 5.7 RECUPERACIÓN DE ALUMINIO EN EL LODO ESPESADO SIN POLÍMERO .....	88
GRÁFICA 5.8 RECUPERACIÓN DE ALUMINIO EN EL LODO ESPESADO CON POLÍMERO .....	89
GRÁFICA 5.9 PORCENTAJES DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO EN EL LODO CON Y SIN POLÍMERO .....	89
GRÁFICA 5.10 CORRELACIÓN DE LODOS TEÓRICOS VS CALCULADOS.....	96
GRÁFICA 5.11 COMPARACIÓN DE TURBIEDAD EN LAS SOLUCIONES ÁCIDAS DEL LODO SIN POLÍMERO .....	98
GRÁFICA 5.12 COMPARACIÓN DE COLOR EN LAS SOLUCIONES ÁCIDAS DEL LODO SIN POLÍMERO .....	98
GRÁFICA 5.13 COMPARACIÓN DE TURBIEDAD EN LAS SOLUCIONES ÁCIDAS DEL LODO CON POLÍMERO....	99
GRÁFICA 5.14 COMPARACIÓN DE COLOR EN LAS SOLUCIONES ÁCIDAS DEL LODO CON POLÍMERO.....	99



## RESUMEN

En el presente trabajo se propone una tecnología para la recuperación de aluminio en lodos provenientes de plantas potabilizadoras, que además minimiza el volumen de éstos, facilitando así su manejo y disposición final. El estudio se llevó a cabo utilizando lodo proveniente de la Planta Potabilizadora “Los Berros” del Sistema Cutzamala, ubicada en el Estado de México. Las pruebas realizadas en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua demostraron que los lodos de dicha planta están constituidos por un 98% de agua y el restante 2% son sólidos en volumen, en especial arcilla. Estas características se encuentran a la salida del espesador de lodos.

Para la realización de este estudio primeramente fue necesario establecer una técnica de cuantificación de aluminio dentro de las cuales se incluyeron: Espectrofotometría de Absorción Atómica, colorimetría (Espectrofotómetro Hach y técnica de Snyder) y conductimetría. De éstas, se seleccionó la Espectrofotometría Hach por ser una técnica de fácil manejo, rápida, precisa y económica.

Con el propósito de verificar que la acidificación es un tratamiento factible para la recuperación del aluminio y reducción del volumen de lodos, se realizaron pruebas con diferentes tipos de muestras: lodo homogéneo, lodo espesado sin polímero y lodo espesado con polímero; utilizando ácido sulfúrico diluido y concentrado.

Después de seleccionada la técnica de análisis y los tipos de muestras a acidificar se procedió a realizar las pruebas a nivel laboratorio y se encontró que los parámetros de operación más importantes en la acidificación son: pH (2.7 a 3.4), dosis de ácido sulfúrico (5.5 a 6.4 kg/kg de aluminio recuperado) y tiempo de contacto (10 minutos). Posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio en la planta potabilizadora con el objetivo de corroborar los parámetros de control, obteniendo así un pH de 2.7 a 3.5, dosis de ácido sulfúrico de 5.1 a 5.8 kg/kg de aluminio recuperado y tiempo de contacto de 10 minutos.

Mediante la acidificación se logró la reducción del volumen de lodos hasta un 97%, obteniéndose una solución que contiene aproximadamente el 90% del aluminio adicionado al sistema, el cual puede ser utilizado nuevamente como coagulante en el tratamiento del agua. También cabe mencionar que el acondicionamiento con polímero mejora la deshidratación del lodo, la calidad del sobrenadante, acorta el tiempo de espesamiento y aumenta la concentración del aluminio recuperado.

Finalmente, fue necesario verificar la calidad del aluminio recuperado ya que ésta juega un papel importante en la viabilidad para su reuso. Para ello se realizó un análisis de turbiedad, color, hierro, manganeso, arsénico y un barrido de contaminantes inorgánicos traza tales como: Ag, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mg, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Tl, V y Zn. Se encontró que la concentración de éstos se incrementa al utilizar ácido sulfúrico diluido en relación con el ácido concentrado, puesto que el tiempo de contacto, en el primer caso, es de aproximadamente una hora y media lo que origina la disolución de contaminantes.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento para la obtención de agua para consumo humano implica la producción de lodos como subproducto, los cuales están frecuentemente en el intervalo de 0.3 a 1% del flujo de agua tratada. Este tipo de lodos proviene de la remoción de sólidos suspendidos presentes en el agua cruda y de reactivos adicionados.

El manejo, tratamiento y disposición de estos lodos, es un problema importante que en México aún no ha sido resuelto. La principal dificultad que se presenta en el manejo de estos residuos es su alto contenido de agua (99% aproximadamente), además de su baja capacidad de deshidratación, particularmente aquellos lodos que son producidos por el uso de sulfato de aluminio como coagulante.

El alto contenido de agua en este tipo de lodo implica el manejo de un gran volumen de residuos lo que repercute en costos elevados de transporte y disposición final. Durante el proceso de coagulación se obtienen precipitados hidróxidos conteniendo cantidades variables de materia orgánica, sílice, hierro, manganeso y microorganismos.

Debido al incremento en las restricciones para las descargas de lodo en aguas superficiales y en los costos de disposición, se han evaluado diversas tecnologías de tratamiento para facilitar el manejo y disposición de los lodos que sean efectivas y económicas. Dentro de las cuales destacan las siguientes: lagunas de secado, lechos de secado en arena, filtración a presión, filtración a vacío, filtros banda, centrifugación y acidificación (recuperación de coagulantes). De éstas es de importancia la acidificación, obteniendo como beneficio principal un lodo menos voluminoso, más concentrado y que puede ser más fácilmente deshidratado, logrando así un bajo costo de disposición final y recuperación del coagulante. La selección del sistema de deshidratación está en función del tipo de lodo a deshidratar y del espacio disponible.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en los dos primeros capítulos se presenta una revisión bibliográfica para identificar y caracterizar los diferentes tipos de lodos que se producen en las plantas potabilizadoras, así como las diferentes alternativas de tratamiento para reducir su volumen. Posteriormente, en el capítulo tres se detallan algunas investigaciones que se han realizado utilizando la acidificación como un tratamiento de recuperación del aluminio y reducción del volumen de lodos.

Como resultado del análisis de los capítulos anteriores se seleccionó la acidificación como una tecnología que minimiza el volumen de los lodos facilitando de esta manera su manejo y disposición, además de obtener una solución rica en aluminio que puede ser reusada en el sistema. En el capítulo cuatro se presenta la metodología para la acidificación de lodos y finalmente en el capítulo cinco se dan los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio y en la planta potabilizadora "Los Berros".

## JUSTIFICACIÓN

En México, existen aproximadamente 256 plantas potabilizadoras (CNA, 1997), sin embargo, solo operan 205 (80%), 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 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.

Actualmente, estos lodos son bombeados y almacenados en presas o en terrenos, provocando un severo daño al ambiente. La disposición de lodos líquidos o semilíquidos en este sistema de disposición es cada vez más difícil y los costos aumentan continuamente. Como resultado, se están desarrollando e implementando tecnologías que brinden soluciones acordes a las condiciones y necesidades de nuestro país en materia de disposición de lodos producidos en plantas de tratamiento de agua potable.

La planta potabilizadora a estudiar cuenta con una laguna de secado, la cual se encuentra actualmente saturada, lo que origina un desbordamiento de lodos hacia otras áreas y por lo tanto la deshidratación de los lodos es ineficiente, como se observa en la figura 1. Por lo anterior se eligió la acidificación como un tratamiento que presenta las siguientes ventajas: producción de un lodo con mayor consistencia sólida, reducción significativa del volumen de los mismos y con ello el ahorro en el transporte y disposición final.

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



Además, otra ventaja que presenta este tratamiento es la recuperación del aluminio presente en los lodos, el cual puede ser reutilizado en la planta como un coagulante, reduciendo así los costos de adquisición de un coagulante comercial.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL:**

Establecer los parámetros de control a nivel laboratorio para la recuperación de aluminio a partir de lodos provenientes de plantas potabilizadoras mediante una extracción ácida y al mismo tiempo evaluar la reducción del volumen de lodos.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Implementar una técnica para la determinación de aluminio contenido en un lodo proveniente de una planta potabilizadora.
- Determinar los parámetros más importantes e intervalos óptimos de operación que maximicen la recuperación del aluminio y la reducción del volumen de lodos.
- Establecer si el acondicionamiento previo con polímero influye en la reducción del volumen de lodos antes de su acidificación.
- Evaluar los contaminantes orgánicos e inorgánicos que son extraídos junto con el aluminio durante la acidificación y su posible interferencia en el tren de tratamiento del agua.

## **1. FUENTES Y CARACTERÍSTICAS DEL AGUA CRUDA Y DE LOS LODOS**

### **1.1 Características del agua cruda**

Las fuentes principales de suministro de agua pueden ser consideradas de la siguiente manera: aguas superficiales (ríos, lagunas, lagos) y aguas subterráneas. Cualquiera que sea la fuente de abastecimiento, contendrá impurezas tales como: sustancias minerales disueltas, gases disueltos, turbidez y sedimentos, color y materia orgánica, sabor, olor y microorganismos. La calidad del agua cruda varía dependiendo de su origen y de las condiciones del medio en que se encuentre, presentando características diferentes en cada caso y viéndose afectadas frecuentemente por los fenómenos naturales y artificiales.

Por lo general, los métodos que comúnmente se emplean en la práctica para el tratamiento del agua tienen como objetivo principal eliminar las “impurezas” o sustancias extrañas del agua. Aún, cuando se agreguen “productos químicos”, esto se hace con el propósito de eliminar cantidades mayores de materiales que las que se añaden.

Por lo anterior, es importante establecer un control de proceso, el cual es el conjunto de procedimientos que se emplea para determinar las características físicas y químicas del agua en una planta de tratamiento. De esta manera, se pueden estudiar las magnitudes de las transformaciones que sufre la calidad del agua durante los procesos de tratamiento, para ello sólo deben efectuarse aquellos análisis que sirvan para estudiar tales transformaciones o para controlar la calidad del agua tratada de manera que se asegure una eficiencia máxima. A continuación se señalan los criterios ecológicos de calidad del agua y los criterios para la selección de la fuente.

### **1.2 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua**

Son el marco de referencia en el que se precisan los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, o sus efectos como son color, olor o sabor, potencial de hidrógeno y sus niveles permisibles. Éstos permiten calificar a los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuentes de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, riego agrícola, uso pecuario, uso en la acuicultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. Dichos parámetros constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados.

Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua, toman los siguientes aspectos en consideración: las condiciones naturales de los cuerpos de agua, las cuales varían ampliamente en calidad y cantidad; el avanzado deterioro que presentan algunos de estos cuerpos; las condiciones ambientales necesarias para la existencia y desarrollo normal de los organismos en un ecosistema y los diversos efectos que ocasiona la variación de las características físicas, químicas y biológicas del agua en las especies que las habitan, así como los principales usos del agua (ver tabla 1.1).

Tabla 1.1 Criterios Ecológicos de Calidad del Agua

(Niveles máximos en mg/L excepto cuando se indique otra unidad)

Sustancia o parámetro	Fuente de abastecimiento de agua potable	Sustancia o parámetro	Fuente de abastecimiento de agua potable
Acenafeno	0.02	Etilbenceno	1.4
Ácido 2,4 diclorofenoxiacético	0.1	Fenol	0.3
Acrilonitrilo	0.0006	Fierro	0.3
Acroleína	0.3	Fluoranteno	0.04
Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> )	400.0	Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.5
Aldrin	0.00003	Fosfatos (como PO <sub>4</sub> )	0.1
Aluminio	0.02	Grasas y aceites	Ausente
Antimonio	0.1	Halometanos	0.002
Arsénico	0.05	Heptacloro	0.0001
Asbestos (fibras/L)	3000	Hexaclorobenceno	0.00001
Bario	1.0	Hexaclorobutadieno	0.004
Benceno	0.01	Hexaclorociclopentadieno	0.001
Bencidina	0.000001	Hexacloroetano	0.02
Berilio	0.00007	Hidrocarburos aromáticos polinucleares	0.00003
Bifenilos policlorados	0.0000008	Isofurona	5.2
BHC (Lindano)	0.003	Manganeso	0.1
Bis (2-cloroetil) éter	0.0003	Mercurio (Hg)	0.001
Bis (2-cloroisopropil) éter	0.03	Metoxicloro	0.03
Bis (2-etilhexil) ftalato	32.0	Níquel	0.01
Boro	1.0	Nitratos (NO <sub>3</sub> ) (como N)	5.0
Bromoforno	0.002	Nitritos (NO <sub>2</sub> ) (como N)	0.05
Bromuro de metilo	0.002	Nitrobenzono	20.0
Cadmio	0.01	2 Nitrofenol y 4 Nitrofenol	0.07
Carbono orgánico		n-Nitrosodifenilamina	0.05
-Extractable en alcohol	1.5	n-Nitrosodimetilamina	0.00001
-Extractable en cloroformo	3.0	Oxígeno disuelto	4.0
Cianuro (como CN <sup>-</sup> )	0.2	Olor	Ausente
Clordano (mezcla técnica de metabolitos)	0.003	Paration	0.00003
Clorobenceno	0.02	Pentaclorofenol	0.03
2, Clorofenol	0.03	Potencial Hidrógeno (pH)	5-9
Cloroformo	0.03	Plata	0.05
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.0	Plomo	0.05
Cloruro de metileno	0.002	Sabor	Característico
Cloruro de metilo	0.002	Selenio (como selenato)	0.01
Cloruro de vinilo	0.02	Sólidos disueltos	500.0
Cobre	1.0	Sólidos suspendidos	500.0
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	1000	Sólidos totales	1000.0
Color (unidades escala Pt-Co)	75.0	Sustancias activas al azul de metileno	0.5
Cromo hexavalente	0.05	Sulfatos (SO <sub>4</sub> )	500.0
DDD	0.0000002	Sulfuros (como H <sub>2</sub> S)	0.2
DDT	0.001	Talio	0.01
Diclorobencenos	0.4	Temperatura (°C)	Condiciones naturales
1,2 Dicloroetano	0.005	-p-Dioxina	0.0000000001
1,1 Dicloroetileno	0.0003	1,1,2,2-Tetracloroetano	0.002
1,2 Dicloroetileno	0.0003	Tetracloroetileno	0.008
2,4 Diclorofenol	0.03	Tetracloruro de carbono	0.004
1,2 Dicloropropileno	0.09	Tolueno	14.3
Dieldrin	0.0000007	Toxafeno	0.000007
Diethylftalato	350.0	1,1,1 Tricloroetano	18.4
1,2 Difetilhidracina	0.0004	1,1,2 Tricloroetano	0.006
2,4 Dimetilfenol	0.4	Tricloroetileno	0.03
Dimetilftalato	313.0	2,4,6 Triclorofenol	0.01
2,4 Dinitrofenol	0.07	Turbiedad (unidades escala de sílice)	Condiciones naturales
Dinitro-o-cresol	0.01	Zinc	5.0
2,4 Dinitrotoluceno	0.001	Radiactividad:	
Endosulfano (alfa y beta)	0.07	Alfa total (Bq/l)	0.1
Endrin	0.001	Beta total (Bq/l)	1.0

Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua en las fuentes de abastecimiento para agua potable y con fines recreativos, se enfocan a la protección de la salud humana, basándose en las propiedades carcinogénicas, tóxicas u organolépticas (color, olor o sabor) de las sustancias, así como en los efectos que éstas puedan causar a los organismos que se encuentran presentes en el agua. En este caso, los criterios no se refieren a la calidad que debe tener el agua para ser ingerida, sino a los niveles permisibles en el cuerpo de agua que se pretenda utilizar para proveer agua para consumo humano.

### 1.3 Criterios de calidad para la selección de la fuente

Para definir los criterios de calidad para la selección de la fuente, se recomienda seguir la clasificación de las aguas crudas en cinco grupos, los cuales han sido preparados con base en criterios establecidos conforme a las Guías Internacionales de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

**Grupo I.** Agua que necesita únicamente desinfección. Coliformes fecales menores a 20 NMP/100 ml.

**Grupo II.** Aguas que necesitan de tratamiento convencional, tales como coagulación, sedimentación, filtración rápida y desinfección o filtración lenta y desinfección. Coliformes fecales menores a 3,000 NMP/100 ml.

**Grupo III.** Aguas que necesitan tratamiento convencional como coagulación, sedimentación, filtración rápida y desinfección (pre y poscloración). Coliformes fecales menores a 4,000 NMP/100 ml.

**Grupo IV.** Aguas que no cumplen con los requisitos bacteriológicos expresados en los grupos anteriores. No se recomienda utilizar estas aguas como fuentes de abastecimiento ya que su tratamiento por métodos convencionales es inadecuado.

**Grupo V.** Aguas que no cumplan con uno o más de los requisitos físicos, químicos, radiológicos u orgánicos expresados en las guías.

### 1.4 Características de los lodos

El lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua potable está compuesto de materiales que son removidos del agua cruda y productos de la coagulación química. Estos contienen entre un 95 y un 99.5% de agua, así como sólidos inicialmente presentes en el agua o generados durante el tratamiento (Barraqué, 1979; CNA, 1991; Wang, *et al.* 1992). Elliot, *et al.* (1990) reportan que la característica común de estos lodos es que constituyen un residuo extremadamente líquido, de valor escaso o nulo, relativamente inerte y predominantemente inorgánico.

Las características del lodo dependen del origen del agua cruda, así como de los sistemas usados como tratamiento del agua y del lodo (ver tabla 1.2). Diferentes procesos de tratamiento generan diferentes tipos y volúmenes de lodo. En una planta en particular, las características pueden variar anual, estacional o diariamente debido a las fluctuaciones tanto de la composición del agua como de la cantidad de reactivos utilizados durante el tratamiento (Goto y Sato, 1986; Pontius, 1990; CNA, 1991).

**Tabla 1.2** Características físicas de los lodos (Pontius, 1990)

Tratamiento	Reactivo usado	Residuo producido	Apariencia física		Descripción
			Color	Sedimentación	
Ablandamiento Reactor precipitación	Cal y soda	CaCO <sub>3</sub> CaCO <sub>3</sub> +Mg(OH) <sub>2</sub>	Blanco* Blanco	Buena Regular	Sólidos sedimentables semejante a pasta dentrífica
Coagulación Sales de aluminio	Sulfato de aluminio	Al(OH) <sub>3</sub>	Café	Muy pobre	Consistencia chocolate espesa, viscosa, tixotrópica
Sales de hierro	Sales ferrosas o férricas	Fe(OH) <sub>3</sub>	Rojo/Café	Pobre	Cuando se seca pasa a bultos duros
Polímero	Polímero	Polímero	N/A	Pobre	Depende del polímero
Aeración	Aire hasta precipitar el Fe y Mn	Compuesto insoluble férrico y manganeso	Rojo/café	Buena	Sólidos con alto color; podría sedimentar, secar y agrietar
Ablandamiento por intercambio iónico	Resinas	Ácido o salmuera de la regeneración	Claro	N/A	Líquido; altos sólidos disueltos totales
Filtración Agua retrolavado	~	~	Café	Pobre a regular	Aglomeración del flóculo fino removido de la superficie del filtro
Tierra de diatomeas	~	Medio de filtración agotado	Blanco a bronce	Buena	Medio de filtración agotado con materia particulada removida del agua

\*Bronce/café si está presente el hierro

Con un abastecimiento de río en particular, la variación de la calidad del agua causa cambios significantes en las características físicas de los lodos. Otra propiedad puede estar presente en un lodo de sulfato de aluminio; por ejemplo, su naturaleza tixotrópica (se comporta como un líquido viscoso espeso cuando es agitado, pero sedimenta parecido al gel si la agitación cesa) causa complicaciones en el equipo de bombeo del lodo (Pontius, 1990).



También algunas condiciones anaeróbicas en la etapa de sedimentación impacta en las características y calidad del agua tratada. El hierro y manganeso asociados con el lodo pueden ser solubilizados si se presentan estas condiciones en el manto del lodo. Esta etapa anaeróbica puede desarrollarse rápidamente en aquellos sistemas de sedimentación que son limpiados manualmente y en épocas de invierno. Cuando el equipo de sedimentación es limpiado regularmente de manera mecánica, podrán permanecer las condiciones aeróbicas (Pontius, 1990).

Por lo tanto, cuando se evalúan las alternativas de uso o disposición del lodo, se debe determinar inicialmente la cantidad y características de dicho residuo y su intervalo de variación. Cada proceso de tratamiento genera un residuo específico, el residuo total para su tratamiento y disposición se facilita con la combinación de los desechos de uno o más procesos (Pontius, 1990; CNA, 1991).

Los diferentes tipos de lodos obtenidos de los procesos se derivan de:

- Desecho del agua de retrolavado de los filtros
- Lodos de aluminio o hierro generados en la etapa de coagulación
- Lodos de plantas de ablandamiento
- Precipitados de hierro y manganeso (Cornwell y Koppers, 1990).

A continuación se detallan cada uno de estos tipos de lodos.

#### ***1.4.1 Agua de retrolavado de los filtros***

El desecho del agua de retrolavado de los filtros puede ser de difícil manejo debido a su bajo contenido de sólidos aún después del espesamiento, la concentración de éstos puede variar de 50 a 400 mg/L. Una gran porción de los sólidos generados en esta etapa son difíciles de separar por gravedad sin la adición de un coagulante (Cornwell y Koppers, 1990; Crawford y Cline, 1990).

El agua de retrolavado representa típicamente del 2 al 5% del agua total procesada. La cantidad de sólidos depende de la eficiencia del filtro y de la cantidad de sólidos retenidos en el mismo y ésta última del pretratamiento suministrado. Cuando el agua floculada es aplicada directamente al filtro, la carga de sólidos aumenta y está en función de la dosis del coagulante y de la turbiedad del agua cruda. Cuando la sedimentación precede al filtro, las concentraciones de sólidos suspendidos que escapan de la etapa de sedimentación frecuentemente están en un intervalo de 4 a 10 mg/L (Crawford y Cline, 1990).

Si se aplica al filtro una concentración de sólidos suspendidos de 4 a 10 mg/L, el agua de retrolavado de los filtros podría contener de 16 a 38 kg de sólidos por 3,785 m<sup>3</sup> de agua procesada. Los sólidos del agua de retrolavado son difíciles de separar del líquido, sin embargo, con el uso de polímeros u otros coagulantes se puede recuperar más del 80% de agua. El agua recuperada es reprocesada a través de la planta de tratamiento o descargada en aguas superficiales (Crawford y Cline, 1990).

### 1.4.2 Lodos de la coagulación

El tratamiento de aguas superficiales para uso potable ha sido acompañado usando coagulantes inorgánicos para remover la turbiedad y otras trazas de contaminantes. Los lodos de plantas de tratamiento provenientes de un proceso de coagulación química tienen una concentración de sólidos del 0.5 al 5.0%. Estos sólidos son difíciles de espesar por gravedad hasta más de 3 a 4% (Cornwell, *et al.* 1987; Cornwell y Koppers, 1990; Saunders y Roeder, 1991).

Los lodos de aluminio o hierro son hidrofílicos y pobremente espesados y se describen como no-Newtonianos, voluminosos, sustancias gelatinosas compuestas principalmente de metal hidróxido y partículas orgánicas e inorgánicas, tales como arcilla, arena, color, coloides, microorganismos y otra materia removida del agua cruda. La caracterización de estos lodos se muestra en la tabla 1.3. El lodo sedimentado con hierro tiene una alta concentración de sólidos respecto a los de aluminio; mientras que la adición de polímero o cal incrementa la concentración de sólidos en ambos tipos de lodos (Albrecht, 1972; Fulton, 1974; AWWA, 1989).

**Tabla 1.3** Lodos de hierro y aluminio (Crawford y Cline, 1990)

% de contenido de sólidos	Características del lodo
0 - 5	Líquido
8 - 12	Esponjoso, semisólido
18 - 25	Arcilla blanda
40 - 50	Arcilla dura

El porcentaje de contenido de sólidos varía con la proporción del material removido del agua. Un agua con alta turbiedad usualmente resulta en lodos que son más concentrados y menos difíciles de deshidratar, mientras que el agua con baja turbiedad presenta lodos con mayor dificultad de deshidratación. Los lodos coagulados son biológicamente inertes, tienen bajo contenido orgánico biodegradable y presentan un pH cercano al neutro. (Crawford y Cline, 1990).

#### 1.4.2.1 Sales de sulfato de aluminio

Los lodos de hidróxidos metálicos son producidos por la coagulación de coloides y contaminantes contenidos en el agua cruda durante el tratamiento del agua potable. Éstos contienen grandes cantidades de agua ligada, creando una suspensión voluminosa de lodos, con baja concentración de sólidos y pobres propiedades de deshidratación (Young, 1968, Cornwell y Koppers, 1990; Crawford y Cline, 1990).

El lodo de aluminio generalmente es concentrado entre 0.5 y 5.0% (5 a 50 g/L) en tanques de sedimentación. Cuando el sulfato de aluminio  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14 H_2O]$  es adicionado al agua, se forma el hidróxido de aluminio  $[Al(OH)_3]$ . Por cada kilogramo de sulfato de aluminio adicionado, se forman 0.118 kilogramos de hidróxido de aluminio. La cantidad de aluminio que escapa del sedimentador y es atrapado en el filtro es dependiente del pH del agua cruda y de la dosis de coagulante aplicado (Crawford y Cline, 1990).

Cuando se considera la recuperación del sulfato de aluminio, el contenido de aluminio, los sólidos inorgánicos y orgánicos son de importancia. Diversas características reportadas de lodos de aluminio se muestran en la tabla 1.4 (Crawford y Cline, 1990).

**Tabla 1.4** Características de los lodos de aluminio (Crawford y Cline, 1990)

Fuente	Turbiedad del agua cruda (Jtu)	Dosis de sulfato de aluminio (mg/L)	Otro tipo de dosis (mg/L)	Sólidos en el lodo (kg/83,260 m <sup>3</sup> )	Sólido orgánico (%)	Aluminio total (mg/L)
Rochester	-	25	17*	95.34	-	-
Shoremont	-	18	7**	52.66	-	-
Kodak	-	24	10*	64.92	-	-
Sturgeon Point	-	15	-	45.40	-	-
Indianapolis	45	24	-	-	21	2400
Concord	42	41	-	-	46	2400
Tampa	0.6	100	-	-	33	3500
Moline	71	43	-	-	15	2950
Washington	18	20	-	-	42	3750

\* Arcilla

\*\* Arcilla, carbón, almidón

#### 1.4.2.2 Sales de hierro

Los coagulantes de hierro incluyen el sulfato férrico [Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>], sulfato ferroso (FeSO<sub>4</sub>-7H<sub>2</sub>O) y cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>), el precipitado formado es el hidróxido férrico [Fe(OH)<sub>3</sub>]. Existen pocos datos de las características de estos lodos debido al uso limitado de coagulantes de hierro en plantas de tratamiento de agua potable (Crawford y Cline, 1990; Saunders y Roeder, 1991).

En la tabla 1.5 se observa la variación en las características de cuatro tipos de lodos de hierro. La concentración de los sólidos totales varían de 20,000 a 50,000 mg/L, mientras que las concentraciones de hierro varían de 930 hasta 4,200 mg/L. El pH de los lodos de hierro es más alto que en los lodos de aluminio, varían de 7.4 a 8.5 (Saunders y Roeder, 1991).

**Tabla 1.5** Características de lodos de hierro provenientes de plantas potabilizadoras (Saunders y Roeder, 1991)

Parámetro	Kingsport (King, et al. 1975)	Kingsport (Pipeon, 1976)	St. Louis County (White y White, 1984)
Sólidos Totales	40,800 mg/L	20,000 mg/L (2.0%)	20,000 mg/L (2.0%)
Sólidos Volátiles	6,895 mg/L (17% de ST)	2,800 mg/L (14% de ST)	1,000 mg/L (5% de ST)
SS Totales	--	19,900 mg/L (1.99%)	19,800 mg/L (1.98%)
Concentración de hierro	2,350 mg/L	4,120 mg/L (20.6% de ST)	930 mg/L (4.65% de ST)
pH	7.6	7.4	8.5

Como es evidente, los datos presentados anteriormente no son intervalos de valores típicos para las diversas características de los lodos de plantas de tratamiento de agua potable, ya que algunos parámetros como el contenido de sólidos, concentración del metal coagulante, pH, filtrabilidad y propiedades de espesamiento varían considerablemente debido a las diferentes características del agua cruda, adición de compuestos químicos y operación de la planta (Saunders y Roeder, 1991)

### 1.4.3 Lodos de plantas de ablandamiento

El ablandamiento del agua con cal y/o sosa cáustica produce lodos de precipitados compuestos principalmente por carbonato de calcio con cantidades variables de otros constituyentes (sílice, hierro, óxidos de aluminio, hidróxido de calcio y magnesio, sulfato de calcio y otros). Las características de éstos varían en su contenido de sólidos como se observa en la tabla 1.6 (Young, 1968; Cornwell y Koppers, 1990; Crawford y Cline, 1990).

**Tabla 1.6** Lodos de ablandamiento con cal (Crawford y Cline, 1990)

% de contenido de sólidos	Características del lodo
0 - 10	Líquido
25 - 35	Líquido viscoso
40 - 50	Consistencia semisólida, pasta dentrífica
60 - 70	Torta desmoronada

Coágulos orgánicos e inorgánicos constituyen una pequeña fracción de la masa de sólidos. Cuando se trata agua con alta turbiedad, ésta normalmente es removida por coagulación antes del ablandamiento, el lodo obtenido es biológicamente inerte como resultado de su alto pH y normalmente es más fácil de concentrar que los lodos coagulados. El contenido de sólidos de los lodos de cal está en el intervalo del 2 al 15% (Cornwell y Koppers, 1990; Crawford y Cline, 1990).

La cantidad de lodo producido por ablandamiento con cal varía dependiendo de la dureza y de las características químicas del agua cruda, así como de la calidad final deseada del agua. El volumen del lodo producido es mayor al obtenido por los procesos de coagulación. Los sólidos del lodo del ablandamiento con cal se concentran normalmente en el tanque de sedimentación al 10% (Cornwell, *et al.* 1987; Crawford y Cline, 1990).

Las características de deshidratación de este tipo de lodo varían con la cantidad de hidróxido de magnesio que ha sido capturado con el lodo, el cual deberá estar en el intervalo de 1 hasta 30%. Los lodos que son bajos en hidróxido de magnesio pueden ser deshidratados logrando tortas con 60% de sólidos, mientras que a altas concentraciones la torta de sólidos puede ser baja (20 a 25%). Los sólidos de hidróxido de aluminio son gelatinosos y similares en su naturaleza a los sólidos coagulados con aluminio o hierro. El sólido de carbonato de calcio es más cristalino y más fácil de deshidratar (Young, 1968; Crawford y Cline, 1990).

#### 1.4.4 Precipitados de hierro y manganeso

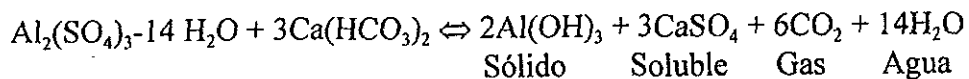
El hierro y el manganeso solubles son oxidados por aeración o mediante la adición de permanganato, cloro u ozono hasta formar precipitados tales como hidróxido férrico o dióxido de manganeso, que pueden ser removidos en procesos de sedimentación o filtración. El lodo producido es inerte y de color rojo o negro (Crawford y Cline, 1990).

Por cada miligramo por litro de hierro o manganeso en solución, se puede anticipar una producción de lodo de 1.5 a 2 mg/L. Sin embargo, puesto que las concentraciones de hierro y manganeso encontradas en el agua son típicamente bajas, el volumen del lodo de hierro y manganeso es mucho más bajo que el volumen del lodo de las etapas de coagulación y ablandamiento (Crawford y Cline, 1990).

Experiencias basadas en campo indican que el lodo de hierro y manganeso removidos en filtros por retrolavado seguido de una sedimentación de dos horas, permite la decantación y recirculación del agua de retrolavado hasta el influente de la planta de tratamiento. El volumen de lodo remanente varía considerablemente, los valores típicos son del 10 al 30% del volumen total de agua retrolavada (Crawford y Cline, 1990).

#### 1.5 Cantidad de lodos en el tratamiento del agua

La cantidad de lodo producido en forma de sólidos es calculado mediante un balance de sólidos y ecuaciones químicas apropiadas (estequiometría). La primera etapa consiste en la revisión de la cantidad de sólidos presentes en el lodo y la siguiente etapa es calcular el lodo que resulta de una cantidad dada de la sustancia química adicionada, para ello se utiliza la ecuación química y el peso molecular de dichas sustancias. Por ejemplo:



donde 594 g de sólidos son encontrados en la parte izquierda de la ecuación y 156 g son encontrados en la parte derecha (Pontius, 1990).

La tabla 1.7 muestra algunos ejemplos del cálculo de sólidos. La dosis a utilizar de cada sustancia química requerida podría ser determinada por pruebas de jarras para una nueva fuente o por registros de acuerdo a dosis mínimas, máximas y promedio. Finalmente, la producción de sólidos totales residuales pueden ser calculados usando el diseño estimado diariamente en la salida del agua final (Pontius, 1990).

En las etapas iniciales de la investigación dentro del tratamiento de una nueva fuente de agua, se requiere llevar a cabo revisiones cuidadosas del grado requerido del mismo y de sus opciones de tratamiento.

**Tabla 1.7 Producción de sólidos teóricos (Pontius, 1990)**

Sustancia química agregada	kg de sólidos producidos por kg de sustancia química
Sulfato de aluminio	0.26 como $Al(OH)_3$ *
Cloruro férrico	0.66 como $Fe(OH)_3$ *
Polímero	1.0
Cal	Permite 0.10 como fracción insoluble
Carbón activado en polvo	1.0

\* Depende de la forma hidratada del sulfato de aluminio o cloruro férrico

### 1.6 Objetivos del tratamiento de lodos

Según las disponibilidades de terreno, la naturaleza de los lodos, su aptitud para la deshidratación (contenido de materia seca, contenido de materia volátil, humedad, tiempo a la filtración, tiempo de succión capilar, resistencia específica a la filtración y compresibilidad) y los factores económicos (precio del terreno, mano de obra, energía, reactivos, amortización de las inversiones, exigencias sanitarias, etc.), podrán variar las soluciones más adecuadas de tratamiento de lodos, pero sus objetivos finales serán siempre los mismos (Tsang y Vesilind, 1990; Lotito, *et al.* 1993; Tosun, 1993; Vesilind, 1994):

- Reducción del volumen
- Deshidratación
- Recuperación y reuso del coagulante
- Disposición
- Transporte y manejo

A continuación se describen los diferentes métodos de tratamiento de lodos provenientes de plantas potabilizadoras.

## 2. MÉTODOS DE TRATAMIENTO DE LODOS

El objetivo del tratamiento es eliminar parcial o totalmente el agua que contienen los lodos y así disminuir su volumen para facilitar su manejo y disposición final (Ramalho, 1993).

Debido al incremento en el número de regulaciones y en los costos de disposición de lodos, se han investigado algunos tratamientos y técnicas de disposición de los mismos que sean efectivas y económicas. Entre los métodos de tratamiento para reducir el volumen de lodos se encuentran los siguientes: espesamiento, acondicionamiento, deshidratación y recuperación de coagulantes (AWWA, 1989; Saunders y Roeder, 1991).

Como se muestra en la figura 2.1, los lodos provenientes de la etapa de coagulación, retrolavado de los filtros y de la unidad de ablandamiento generalmente son espesados antes de su acondicionamiento y deshidratación. El acondicionamiento con polímero o recuperación del coagulante puede ser empleado antes de usar lagunas de secado, lechos de secado de arena, filtración a presión, filtración a vacío, filtros banda o centrifugación como tratamientos de deshidratación. Finalmente, la disposición final es llevada a cabo mediante descarga directa, relleno sanitario, aplicación en el terreno, laguna permanente y reutilización en planta de aguas residuales (Cornwell, *et al.* 1987; Saunders y Roeder, 1991).

### 2.1 Espesamiento

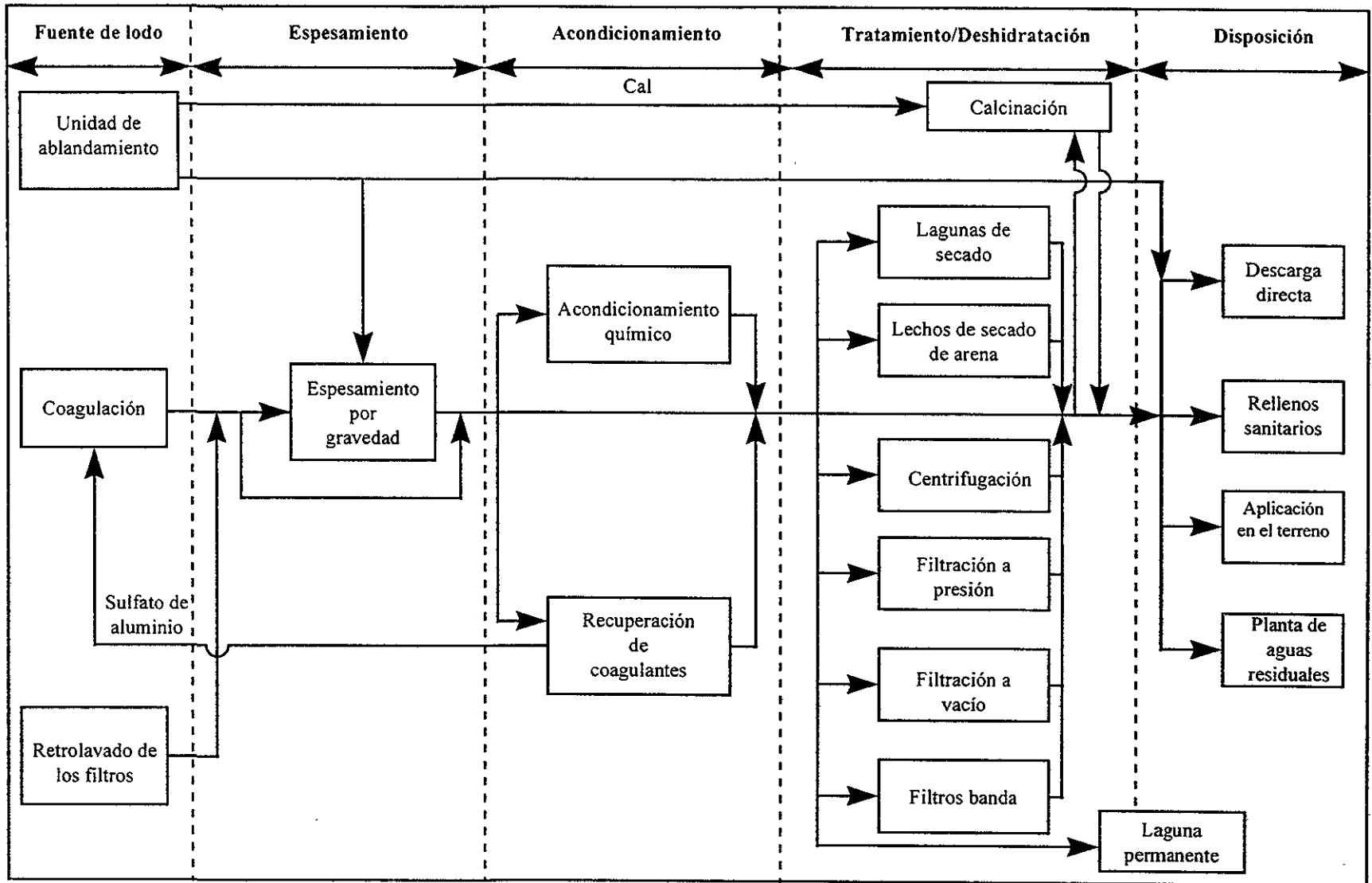
El espesamiento es un método de separación sólido/líquido empleado para incrementar el contenido de sólidos y reducir el volumen de lodos. Por este método se pueden concentrar los lodos provenientes del sedimentador (0.5 a 5.0%) hasta en un 15% después de ser espesados, de tal forma que aún puedan ser manejados hidráulicamente por bombeo (Albrecht, 1972; Pontius, 1990; Cheremisinoff, 1994).

El espesamiento es la primera fase y es la operación más simple para reducir el volumen de los lodos sin gran consumo de energía. El interés del espesamiento es principalmente:

- Reducir el volumen de los equipos de acondicionamiento y deshidratación mecánica.
- Mejorar el rendimiento de los dispositivos de deshidratación: lechos de secado, filtros al vacío, filtros banda, centrifugadoras y, sobre todo, filtros a presión (Ramalho, 1993).

A continuación se describe el espesamiento por gravedad.

Figura 2.1 Opciones para el manejo del lodo producido en plantas de tratamiento de agua potable  
(Young, 1968; Cornwell, *et al.* 1987; Saunders y Roeder, 1991)





### **2.1.1 *Espesamiento por gravedad***

El espesamiento por gravedad sin el uso adicional de productos químicos, es el método más simple para la concentración de los lodos. Es práctica común en plantas de tratamiento de agua llevar a cabo esta operación en tanques de sedimentación equipados con rastras, en donde el grado de espesamiento está determinado por el tiempo de permanencia del lodo en la tolva del mismo, el cual varía de 12 a 48 horas (Kemmer y McCallion, 1982; Cheremisinoff, 1994).

En el influente del espesador los sólidos se encuentran en el intervalo de 0.5 a 5%. La carga de los lodos recomendable para los espesadores es de 40 a 60 kg/m<sup>2</sup>/día, para velocidades de carga superficial máxima de 16 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día y la pendiente en la tolva es de 1:4 como mínimo (Kemmer y McCallion, 1982; Cheremisinoff, 1994).

En la figura 2.2 se muestra un diagrama esquemático de un espesador por gravedad. La suspensión lodosa se introduce en un depósito circular (espesador) que está equipado con paletas verticales de movimiento lento y con un tiempo de permanencia elevado. Los lodos se bombean continuamente del sedimentador al espesador en donde la velocidad de la suspensión es lo suficientemente baja, que permite que los sólidos se concentren en el fondo del tanque, de donde se extraen y el exceso de agua se derrame por la parte superior (Crawford y Cline, 1990; Pontius, 1990).

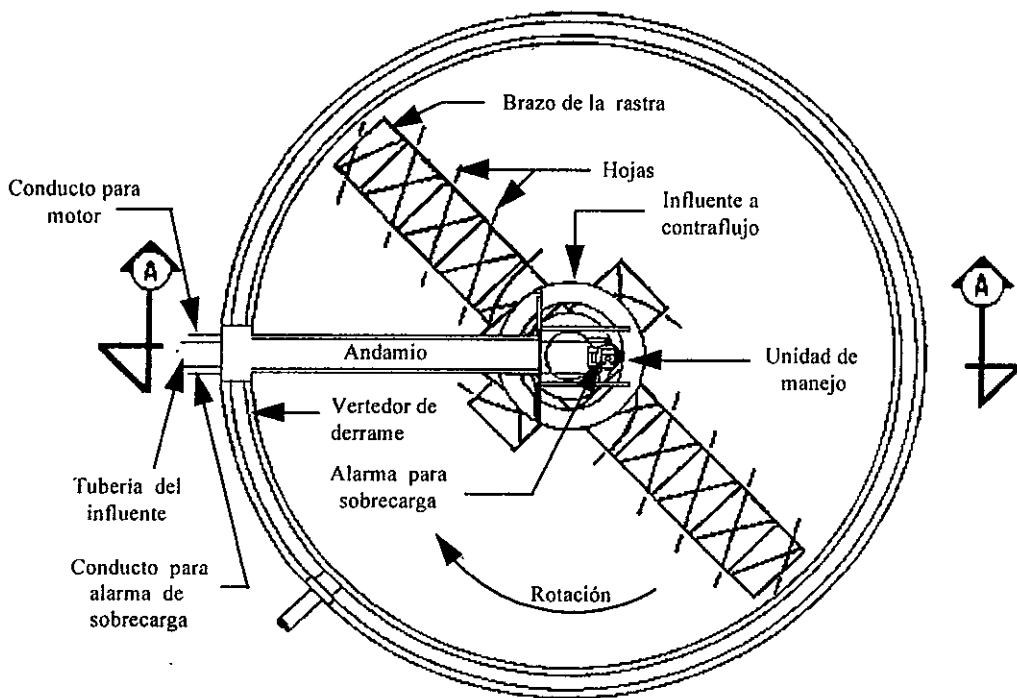
La remoción de los sólidos concentrados se controla para permitir que en el fondo de la tolva se mantenga una capa de lodo. Con este tipo de dispositivo se puede obtener una concentración de sólidos del 10% (Crawford y Cline, 1990; Pontius, 1990).

## **2.2 Acondicionamiento**

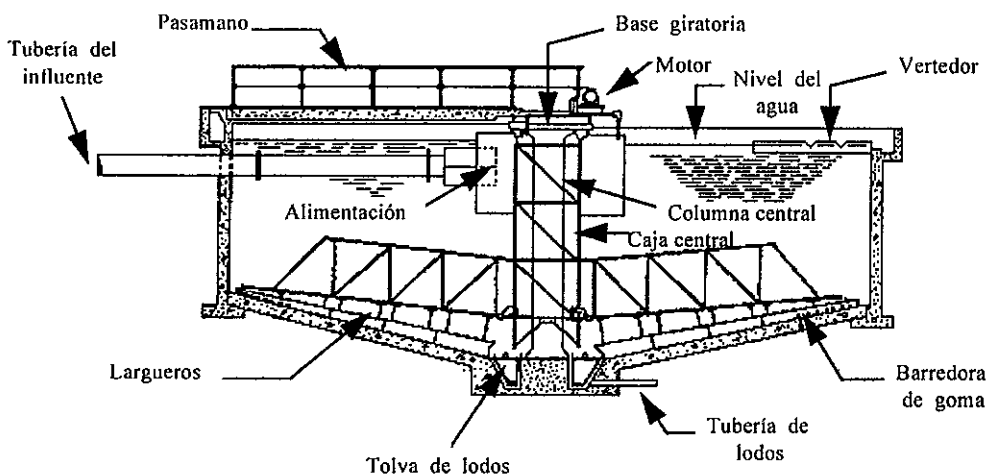
Aún espesados, los lodos contienen una gran proporción de agua: 80 a 90% si estas materias son minerales, pesadas y granuladas; por ello, es necesario acondicionar el lodo con el fin de mejorar sus características de deshidratación, de tal manera que sea drenable, filtrable o centrifugable. Un acondicionamiento adecuado del lodo es la base principal para el buen funcionamiento de una planta de deshidratación. Los métodos más comúnmente empleados son: el uso de sustancias químicas, tratamiento por calor, congelamiento y radiación (EPA, 1974; AWWA, 1989; CNA, 1991; Langer y Klute, 1993).

Entre los diferentes procesos de acondicionamiento, el tratamiento térmico es con mucho el más eficaz en lo que respecta a la disminución de humedad de las partículas. La floculación química, en la que intervienen electrólitos minerales reduce en menor medida pero a un menor costo el porcentaje de agua ligada. Este último tipo de acondicionamiento se describe a continuación (Barraqué, 1979; Metcal & Eddy, 1991; Rhyner, 1995).

**Figura 2.2** Esquema de un espesador mecánico  
 (SARH, 1974; Weber, 1979; Kemmer y McCallion, 1982; Cheremisinoff, 1994)



PLANTA



SECCIÓN A - A

### 2.2.1 Acondicionamiento químico

El acondicionamiento químico de los lodos conduce, por la aplicación de los fenómenos de coagulación y floculación, a la aglomeración de sólidos y liberación del agua adsorbida en éstos, con el empleo de productos químicos tales como: ácido sulfúrico y polímeros orgánicos, que modifican el valor del pH (Ruiz y Vila, 1986; Semon, 1987; Cornwell y Koppers, 1990).

El acondicionamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable son generalmente aplicables a lodos de hidróxido y del retrolavado de los filtros. Los parámetros que se utilizan para evaluar la efectividad del acondicionamiento incluyen: resistencia específica a la filtración, coeficiente de compresibilidad y tiempo de succión capilar (Cornwell, *et al.* 1987).

Los reactivos químicos que se utilizan son de dos orígenes: mineral u orgánico. Estos dos tipos de reactivos presentan su eficacia propia, especialmente por lo que se refiere a la disminución de la hidrófila de las partículas. La dosis óptima de polímero deberá estar determinada en laboratorio por medio de pruebas de jarras (SARH; 1974; Barraqué, 1979; Semon, 1987).

#### 2.2.1.1 Electrólitos minerales

Los electrólitos minerales de catión polivalente conducen a la formación de un flóculo relativamente fino y estable. La acción de los electrólitos de carácter anfótero (que se comportan como ácidos frente a bases y recíprocamente) es doble:

- Acción coagulante: su carga es, generalmente, opuesta a la de las partículas lodosas.
- Acción floculante: formación de hidróxidos complejos hidratados, que desempeñan el papel de un polímero mineral (Barraqué, 1979; Semon, 1987).

#### 2.2.1.2 Polielectrólitos

Son polímeros orgánicos de elevado peso molecular, generalmente poliacrilamidas, en los que se han introducido una serie de grupos funcionales que les confieren ciertas características. Se pueden distinguir tres clases principales de polielectrólitos: catiónicos, aniónicos y no iónicos, según tengan carga positiva, negativa o carezcan de ella (Ruiz y Vila, 1986).

Los polielectrólitos, productos orgánicos de síntesis mucho más eficaces, se utilizan en dosis menores que los reactivos minerales, pero su precio es más elevado y su empleo exige una mayor dilución. Estos productos están constituidos por cadenas largas macromoleculares y tienen por objeto:

- Una floculación extremadamente diferenciada por formación de puentes entre partículas, debido a las largas cadenas ramificadas.
- Una gran disminución de la resistencia específica del lodo (Barraqué, 1979).

Existe un gran número de polielectrólitos en el mercado mundial. La aplicación de polímeros para mejorar el acondicionamiento de lodos ha sido difundido, particularmente para los sistemas de deshidratación mecánica y requiere la selección del mejor polímero y la dosis óptima. Los polímeros catiónicos son eficaces, sobre todo, para el acondicionamiento de lodos con elevado contenido en materias orgánicas coloidales, en tanto que los polímeros aniónicos se emplean para suspensiones de carácter predominantemente mineral. Con lodos fuertemente protídicos (materias volátiles superiores al 80%), normalmente es necesario recurrir a polímeros fuertemente catiónicos y de elevado peso molecular (Cornwell, *et al.* 1987; Novak, *et al.* 1988).

Los polielectrólitos se adquieren en forma de polvo o de líquido muy viscoso. Su empleo exige una dilución antes de la dosificación. La concentración satisfactoria de la solución madre está comprendida, generalmente, entre 0.3 y 1%, con un óptimo del 0.5% para la mayoría de los productos.

En general, la floculación por medio de polielectrólitos es inmediata y el flóculo formado es voluminoso pero bastante frágil, por lo tanto, los puntos de inyección deberán preverse inmediatamente antes del sedimentador, con una mezcla completa pero breve (Barraqué, 1979; Semon, 1987; Novak, *et al.* 1988).

### 2.3 Deshidratación

El principal objetivo de la deshidratación del lodo es incrementar la concentración de sólidos en la torta por remoción del líquido. Para lodos inorgánicos se consiguen concentraciones del 70 al 80% los cuales pueden someterse a los procedimientos de manejo de sólidos (SARH, 1974; Weber, 1979; Knocke, 1993).

La deshidratación de lodos es una operación unitaria que utiliza medios naturales o físicos (mecánicos) para reducir el contenido de humedad presente en el lodo por alguna o varias de las siguientes razones:

- Los costos de transporte del lodo por camión hasta el lugar de su evacuación última son notablemente menores cuando se reduce el volumen de agua.
- El lodo deshidratado es, generalmente, más fácil de manipular que el lodo espesado o líquido. En la mayoría de los casos, el lodo deshidratado es susceptible de ser manipulado con tractores dotados de cucharas y paletas con cintas transportadoras.
- La deshidratación es generalmente necesaria antes de su disposición para eliminar el exceso de humedad.

La selección del sistema de deshidratación está en función del tipo de lodo a deshidratar y del espacio disponible. Para plantas pequeñas en donde la disponibilidad de terreno no es un problema, los lechos de secado o las lagunas son los tratamientos más frecuentemente seleccionados. Por el contrario, en instalaciones situadas en zonas de superficie limitada, se eligen en general, dispositivos de deshidratación mecánica (Metcalf & Eddy, 1985).

Los métodos más comúnmente usados para deshidratar mecánicamente los lodos incluyen la filtración al vacío, centrifugación y filtración a presión. A continuación, se describen los métodos que utilizan medios naturales para reducir el contenido de humedad y posteriormente se describirán los tratamientos que utilizan medios mecánicos (SARH, 1974; EPA, 1974; Ruiz y Vila, 1986; Cheremisinoff, 1994).

### 2.3.1 Lagunas de secado

Las lagunas de secado son el método más popular y aceptable de disposición de lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable. Sin embargo, éstas no son frecuentemente utilizadas como un método de deshidratación, sino como un tratamiento de espesamiento, almacenamiento y disposición final. En la tabla 2.1 se pueden observar las ventajas y desventajas de usar este tratamiento (Nebiker, *et al.* 1969; Cornwell, *et al.* 1987).

Existen claras diferencias entre las lagunas y los lechos de secado de arena. Las lagunas son generalmente construidas únicamente por encerramiento de una superficie de terreno por diques o por excavación en donde los lodos son vertidos continua o intermitentemente hasta su llenado, entonces se usa otra laguna, mientras se secan los lodos de la primera. Posteriormente, los lodos secos son removidos mecánicamente, disponiéndose nuevamente de la primera laguna para aceptar más lodos. La remoción del agua se lleva a cabo por decantación o por evaporación (Nebiker, *et al.* 1969).

**Tabla 2.1** Ventajas y desventajas de las lagunas de secado

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo consumo de energía</li> <li>• No requiere el uso de químicos</li> <li>• Baja sensibilidad a las características del lodo</li> <li>• No requiere personal calificado</li> <li>• Bajos consumos de capital donde hay disponibilidad de terreno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere extensas áreas de terreno</li> <li>• Sensibilidad a las variables climatológicas</li> <li>• Altos costos en la extracción del lodo seco</li> <li>• Baja concentración de sólidos en la torta: 10%</li> </ul>

Fuente: Kemmer y McCallion, 1982; WPCF, 1983; Cornwell, *et al.* 1987; Rhyner, 1995

En general, las lagunas se consideran como un proceso ineficiente. Sin embargo, donde el terreno es barato, es difícil justificar cualquier otro método de tratamiento. En pequeñas plantas donde se dispone de terrenos adecuados, el vertido de los lodos en lagunas ofrece la solución más económica para su disposición (Nebiker, *et al.* 1969; EPA, 1974).

### 2.3.2 Lechos de secado de arena

Los lechos de secado de arena se usan para la deshidratación de lodos espesados, reduciendo el contenido de humedad hasta un 70%. Esta práctica de deshidratación resulta económica solamente en poblaciones pequeñas o de tamaño medio, en las poblaciones superiores a 20,000 habitantes se deberán tener presentes otros métodos de deshidratación (Nebiker, *et al.* 1969; SARH, 1974; Cheremisinoff, 1994; Rhyner, 1995).

Como se observa en la figura 2.3, estos lechos están constituidos por una capa inicial de grava de 20 a 30 cm y posteriormente una capa de arena de 15 a 20 cm, sobre la cual se extienden los lodos. En el fondo de dichas capas se instalan colectores de desagüe de teja de junta abierta con mínimo 15 cm de grava sobre ellos y espaciados de seis en seis metros como máximo, en estos colectores se recibe el agua infiltrada y separada de los sólidos (SARH, 1974; Vesilind, 1980; Cheremisinoff, 1994).

Los lechos están rodeados de paredes bajas para retener el lodo y segmentados para permitir la operación independiente de cada lecho. Los lodos que se apliquen al lecho deben ser lo más espesos posibles y con una profundidad que varía generalmente de 20 a 30 cm, esta capa delgada permite que el lodo se seque más rápidamente permitiendo la remoción del lodo y el poder usar nuevamente el lecho (SARH, 1974).

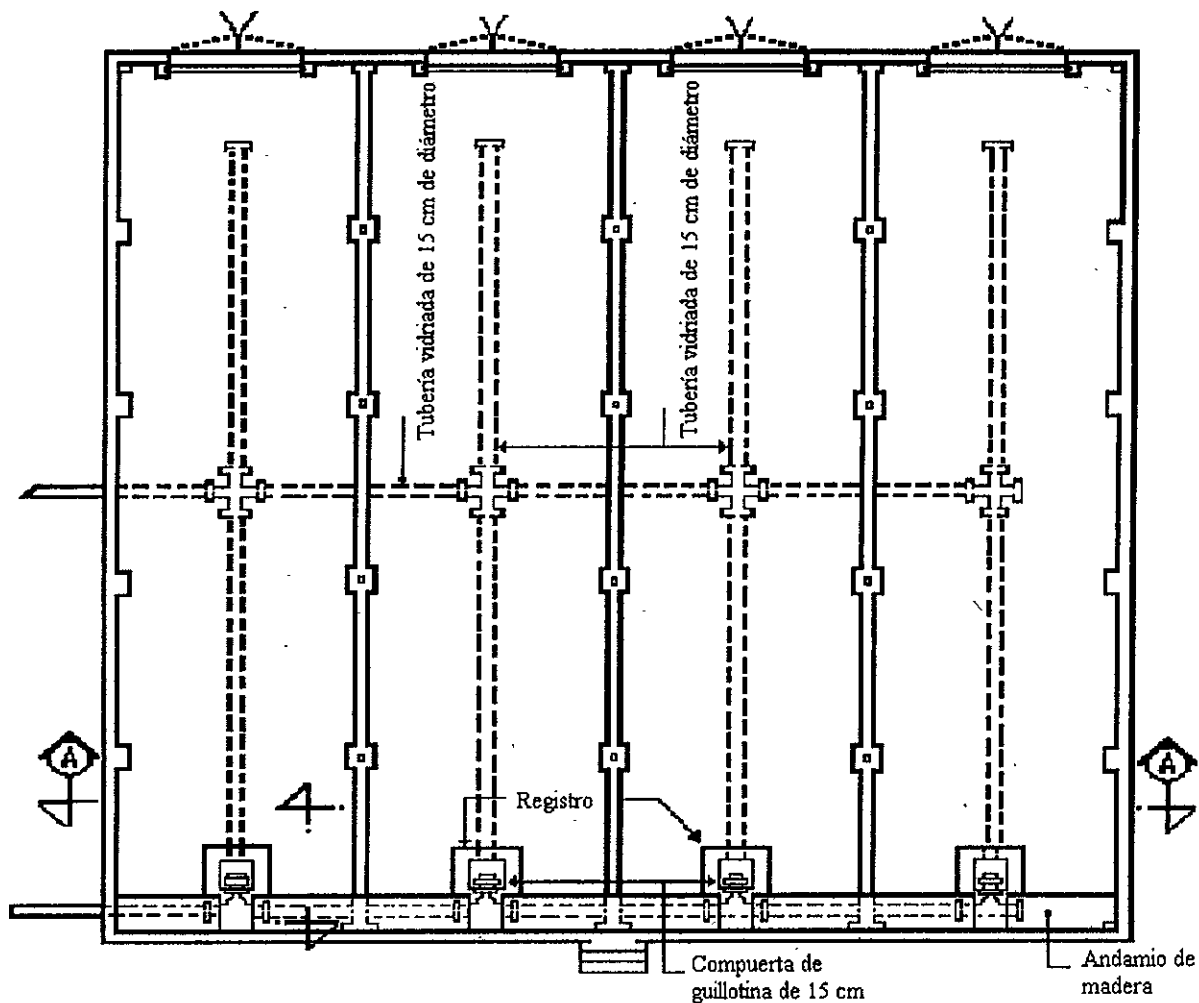
En los lechos de secado de arena actúan dos mecanismos:

1. Percolación (o infiltración) de agua a través del lecho de arena. La proporción de agua eliminada por este mecanismo es del 20 al 55%, dependiendo del contenido inicial de sólidos en el lodo, de las características de los sólidos y de la profundidad a la cual es puesto en los lechos. La percolación suele completarse de uno a tres días, resultando una concentración de sólidos del 15 al 25%.
2. Evaporación del agua a través de los mecanismos de radiación y convección. La velocidad de evaporación es más lenta que la percolación y depende de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

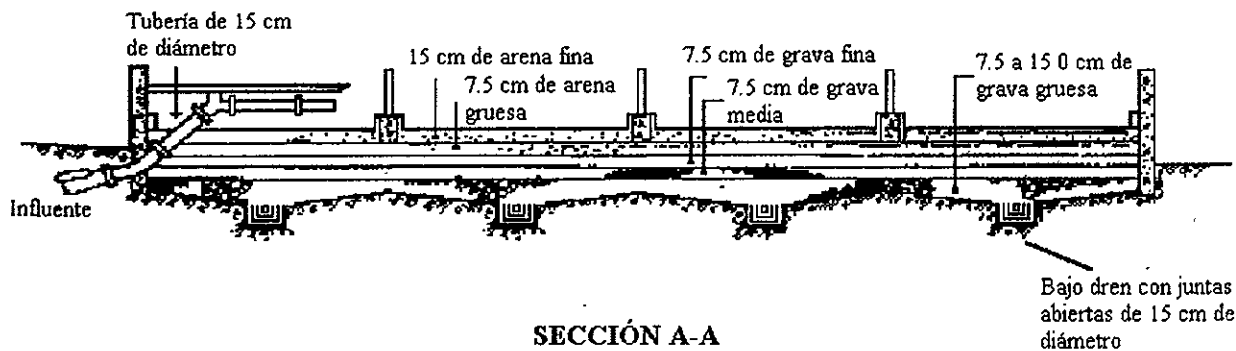
Después de que el agua ha sido filtrada y evaporada, el lodo queda con un contenido de humedad en equilibrio con la atmósfera (SARH, 1974; Vesilind, 1980; Cornwell, *et al.* 1987).

El área total de secado es repartida en lechos individuales de aproximadamente 6 m de ancho por 6 a 30 m de largo. El área del lecho debe estar cercado por un bordo no mayor de 30 cm de altura o estar arriba del nivel de terreno, para evitar entradas de agua superficial (CNA, 1994).

Figura 2.3 Planta y sección de un lecho de secado de arena  
(SARH, 1974; Vesilind, 1980, Chermisinoff, 1994)



PLANTA



SECCIÓN A-A

El lodo seco posee una textura compacta y agrietada, la extracción de éste se realiza manualmente con palas y transportándolos en carretillas, camiones o por una pala rascadora. Se dispondrán de manera que un camión pueda ser conducido a lo largo de los lechos para facilitar la carga. Debe reponerse la capa de arena que se pierde al limpiar los lechos (usualmente una vez cada tres años), procurando conservar el espesor adecuado (Weber, 1979; Metcalf & Eddy, 1985).

El costo inicial, de extracción del lodo y de sustitución de la arena, así como la necesidad de una gran superficie, imposibilitan el uso de lechos de secado en los grandes municipios. En la tabla 2.2 se presentan las ventajas y desventajas de los lechos de secado de arena.

**Tabla 2.2** Ventajas y desventajas de los lechos de secado de arena

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo de capital donde hay disponibilidad de terreno</li> <li>• No necesita personal calificado</li> <li>• Bajo consumo de energía y reactivos químicos</li> <li>• Insensible a las características del lodo</li> <li>• Relativamente alto contenido de sólidos en la torta del 20 al 25%</li> <li>• Ahorro en el costo de un tratamiento posterior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere extensas áreas de terreno</li> <li>• Sensibilidad a las variables climatológicas</li> <li>• Altos costos en la extracción del lodo seco</li> </ul>

Fuente: WPCF, 1983; Metcalf & Eddy, 1991; Cheremisinoff, 1994; Rhyner, 1995

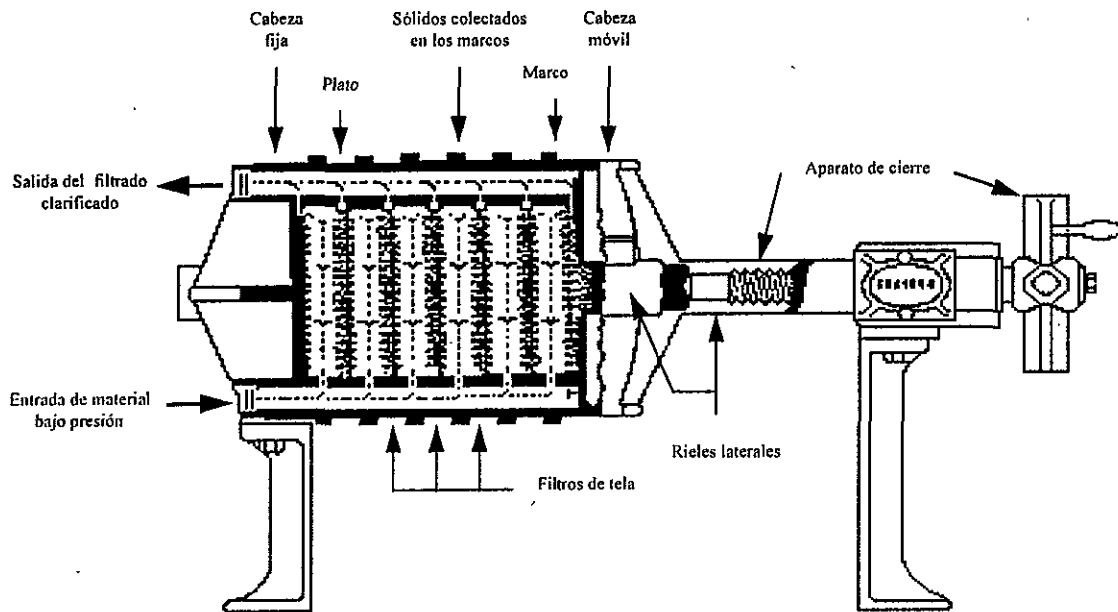
### 2.3.3 Filtración a presión

El filtro prensa es un medio eficaz para deshidratar los lodos acondicionados hasta un grado superior que el normalmente posible con los filtros al vacío. En la figura 2.4 se muestra un diagrama de un filtro prensa el cual tiene el siguiente funcionamiento: el filtro consiste en una serie de placas paralelas cubiertas en ambos lados por un paño filtrante y las placas se presionan juntas ya sea mecánica o hidráulicamente entre el extremo fijo y el móvil teniendo una forma apropiada para permitir el drenaje. El lodo se alimenta a presión dentro de la unidad y llena los espacios comprendidos entre las placas consecutivas, la presión fuerza al líquido a pasar a través del paño filtrante mientras que los sólidos se retienen formando una torta. Después de un periodo de tiempo (tiempo de prensado), el filtro prensa se abre y los sólidos deshidratados que se han acumulado se descargan. El filtrado se remueve continuamente en tanto que el lodo se seca (Weber, 1979; Vesilind, 1980; Pontius, 1990; Cheremisinoff, 1994).

Los filtros prensa son unidades que operan de manera intermitente y son aplicables para la deshidratación de lodos coagulados de hidróxidos metálicos y lodos de ablandamiento con cal, sin embargo, ha sido principalmente usado en lodos coagulados. Este tratamiento es aplicado frecuentemente para lodos difíciles de deshidratar debido a que la operación que se lleva a cabo es en batch y de esta manera puede capturar los sólidos bajo presión hasta que se alcanza la consistencia deseada del lodo. En la tabla 2.3 se observan las ventajas y desventajas de este tipo de tratamiento de deshidratación (Crawford y Cline, 1990).



Figura 2.4 Esquema de un filtro prensa (Vesilind, 1980; Cheremisinoff, 1994)



Cuando los lodos de sales de aluminio y hierro tienen un acondicionamiento previo con polímero, cal o tierra diatomácea, se alcanza un contenido final de sólidos en la torta del 35 al 45% con ciclos de 2½ hasta 22 horas, los ciclos típicos son de 8 horas. La vida útil de la tela filtrante varía entre 12 y 18 meses, según las características del lodo (Crawford y Cline, 1990).

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas de la filtración a presión

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menores requerimientos de terreno</li> <li>• Alta concentración de sólidos en la torta, 35 al 45%</li> <li>• Normalmente no requiere de acondicionamiento químico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de inversión</li> <li>• Operación discontinua</li> <li>• Requiere personal calificado</li> <li>• Limitación en la vida del material filtrante</li> <li>• Mantenimiento de los empaques</li> </ul>

Fuente: Cornwell, *et al.* 1987; Metcalf & Eddy, 1991

### 2.3.4 Filtración al vacío

Es una operación que generalmente se lleva a cabo en un tambor cilíndrico rotatorio, cuya superficie está cubierta con un medio filtrante que puede ser tela de algodón o fibra sintética, o una malla de alambre de acero. La tela filtrante forma parte de un tambor rotatorio separado en varias celdas, en las cuales se produce vacío. El cilindro gira semisumergido (15 a 20%) a una velocidad periférica del orden de 0.30 m/min, en el estanque o canal a través de los cuales escurre

el lodo. En la figura 2.5 se dan algunos detalles de la filtración al vacío (EPA, 1974; Kemmer y McCallion, 1982; Ramalho, 1993; Cheremisinoff, 1994).

A medida que el tambor gira, este medio proporciona un filtro continuo, procediendo a través de las siguientes etapas:

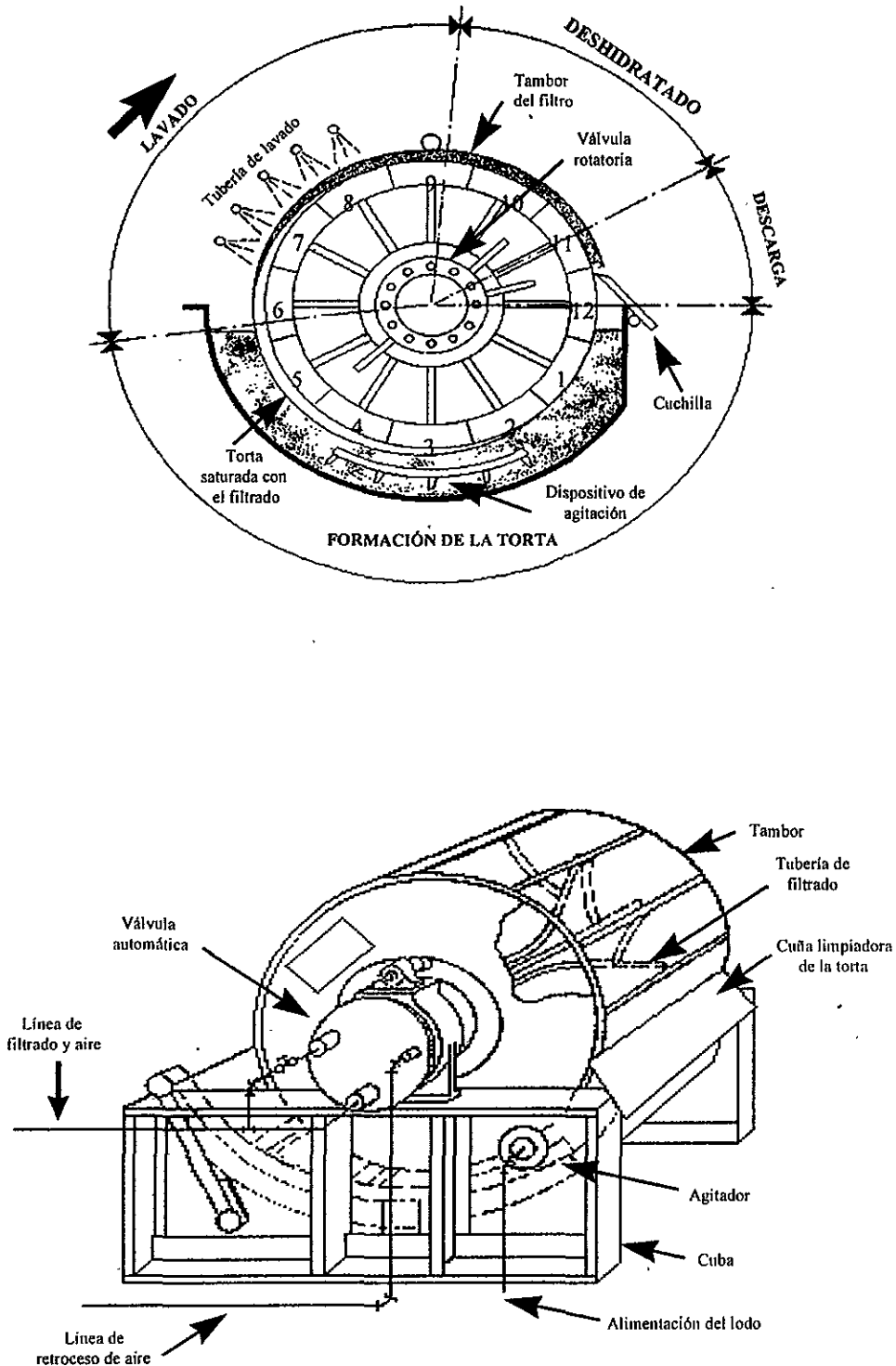
1. *Formación de la torta.* Durante esta etapa se sumerge el tambor en una tina que contiene el lodo y se practica el vacío. Los primeros sólidos que se depositan sobre el medio actúan como un filtro para la formación posterior de la torta. Por esta razón es recomendable que la torta se forme paulatinamente.
2. *Extracción del líquido o secado.* También se practica el vacío en esta etapa. Se extrae el agua de la torta del filtro a través del medio filtrante y pasa al interior del tambor y de allí a un receptor del filtrado.
3. *Remoción de la torta del filtro.*
4. *Lavado del medio.* Es la etapa final en el ciclo de la operación la cual puede efectuarse de un modo continuo o intermitente.

Se crea un vacío de 30 a 65 cm de Hg para adherir a la tela una capa de sólidos de espesor suficiente. La capa de sólidos es removida del tambor mediante un raspador. El líquido que pasa al interior del tambor se drena y regresa al tren de tratamiento principal (Weber, 1979; Kemmer y McCallion, 1982; Ramalho, 1993).

La filtración al vacío es efectiva para la deshidratación de lodos de ablandamiento con cal. Rendimientos del 49 al 98 kg/m<sup>2</sup>h son típicas para lodos con alto contenido de hidróxido de magnesio y rendimientos de 196 a 441 kg/m<sup>2</sup>h han sido reportados para lodos con bajo contenido de hidróxido de magnesio. Aunque el contenido final de sólidos en la torta es típicamente del 40 al 50%, algunas aplicaciones han alcanzado concentraciones de sólidos de hasta el 70%. Si en este equipo se utiliza un acondicionamiento químico suplementario, la recuperación de sólidos esperada está en el intervalo del 96 al 99% (Crawford y Cline, 1990).

La filtración a vacío de lodos provenientes de la coagulación es frecuentemente inefectiva. La baja concentración de sólidos (aún después del espesamiento), la baja compresibilidad y la resistencia al flujo de agua a través del lodo resulta en bajos rendimientos y pobre recuperación de sólidos. Cuando el lodo es acondicionado con polímero y se tienen altas concentraciones de sólidos, la filtración al vacío puede concentrar el 20% de los sólidos. Cuando el lodo es muy pobre en concentración de sólidos se sugiere el uso de tierra diatomácea para alcanzar una concentración del 20% de sólidos en la torta. En la tabla 2.4 se observan las ventajas y desventajas de utilizar este tratamiento (Nebiker, *et al.* 1969; Crawford y Cline, 1990).

Figura 2.5 Diagrama de un filtro de vacío de tambor rotatorio (SARH, 1974; Cheremisinoff, 1994)



**Tabla 2.4** Ventajas y desventajas de la filtración al vacío

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menores requerimientos de terreno</li> <li>• Operación continua</li> <li>• No necesita mantenimiento continuo</li> <li>• Filtrado con bajo contenido de sólidos</li> <li>• Generalmente no requiere de acondicionamiento químico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes consumos de energía</li> <li>• Requiere personal especializado</li> <li>• Equipo ruidoso</li> <li>• No es eficiente para lodos producto de la coagulación con sales metálicas</li> </ul>

Fuente: WPCF, 1983; Metcalf & Eddy, 1991; Rhyner, 1995

### 2.3.5 Filtros banda

Un nuevo desarrollo ahora en competencia con la filtración al vacío son los filtros banda. Esta tecnología es aplicable principalmente para lodos crudos de aguas residuales y lodos digeridos, ciertos lodos de plantas de tratamiento de agua potable pueden, sin embargo, ser suficientemente adaptables para el uso de filtros banda (Pontius, 1990).

Estos filtros son de funcionamiento continuo y utiliza una combinación de gravedad, presión y desplazamiento para eliminar el agua de los lodos. Utilizan bandas permeables sin fin hasta que el lodo se comprime y tensiona perdiendo el agua, como se observa en la figura 2.6. Tres etapas de presión son frecuentemente seleccionadas. En la primera etapa, después del acondicionamiento, el lodo es drenado por gravedad a una consistencia no fluida. En la segunda, se aplica presión y gradualmente se incrementa y en la última etapa, la torta de lodo es tensionada y posteriormente deshidratada (Pontius, 1990; Ramalho, 1993).

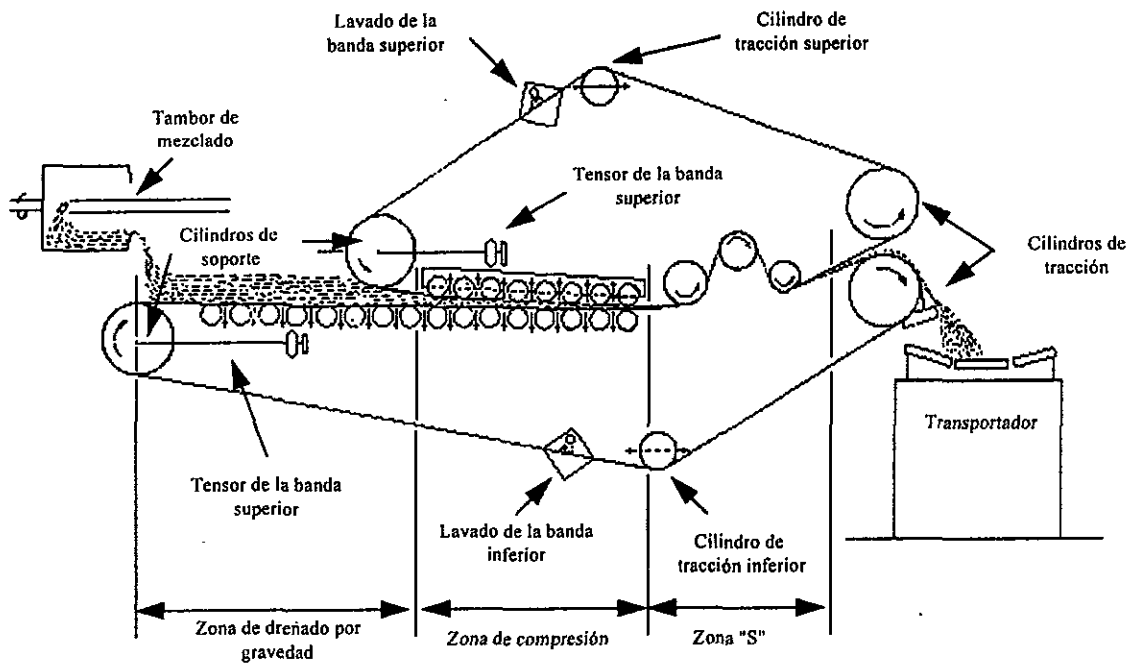
La presión puede aumentar hasta cerca de  $7 \text{ kg/cm}^2$ , con tiempos de residencia en el sistema de 20 minutos. Los filtros banda son aplicados a lodos coagulados y permiten obtener una torta de sólidos del 10 al 15% cuando se ha adicionado de 4.5 a 9 kg de polímero por tonelada de sólidos. En la tabla 2.5 se observan otras ventajas al usar estos filtros (Crawford y Cline, 1990; Ramalho, 1993).

**Tabla 2.5** Ventajas y desventajas de los filtros banda

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativamente alta concentración de sólidos en la torta del 15%</li> <li>• Requerimientos bajos de energía en comparación con los otros métodos mecánicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilidad a las características de alimentación del lodo</li> <li>• Limitación en la carga hidráulica</li> <li>• Corta vida de la banda del filtro</li> </ul>

Fuente: Cornwell, *et al.* 1987; Metcalf & Eddy, 1991; Rhyner, 1995

Figura 2.6 Esquema de un filtro banda (Vesilind, 1980)



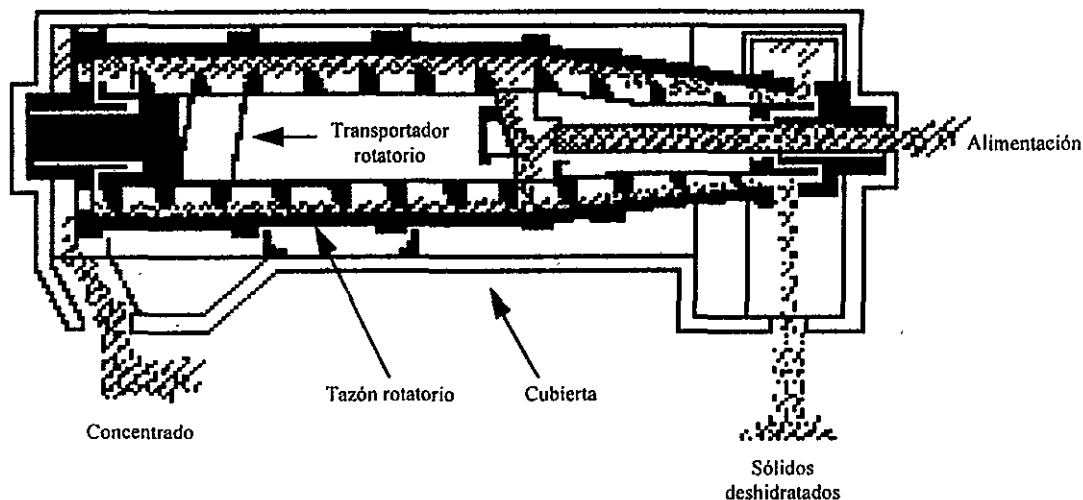
### 2.3.6 Centrifugación

Puede llevarse a cabo una operación de filtración usando una fuerza centrífuga, los filtros que utilizan esta fuerza se usan generalmente en la filtración de sólidos granulares o cristalinos con partículas gruesas y se producen tanto para operación continua como intermitente. Los tipos de centrifugadoras más usados son de canasta, de tazón sólido y de tobera-disco. Las dos primeras se emplean con frecuencia en la deshidratación de los lodos. Este tratamiento es por lo común el último paso en la separación de sólido/líquido, el cual se lleva a cabo mediante la sedimentación provocada por la fuerza centrífuga que incrementa la tasa de sedimentación de los sólidos (Vesilind, 1980; Kemmer y McCallion, 1982; Ramalho, 1993).

La centrifugadora de tazón sólido del tipo cónico-giratorio (ver figura 2.7) es un proceso continuo y opera bajo altas fuerzas de gravedad. El proceso consiste en una unidad giratoria que comprende un tazón y un transportador unidos por un sistema de engranes que hace que el tazón y el transportador giren en la misma dirección, pero con velocidades ligeramente distintas. La mayor parte de estas centrifugadoras operan entre 1,500 y 2,000 rpm y el transportador opera entre 50 y 150 rpm más lento (Kemmer y McCallion, 1982).

El lodo entra al tazón giratorio por un tubo de alimentación que se extiende a lo largo de la flecha hueca del transportador de tornillo giratorio y es distribuido a través de puertas dentro del tazón giratorio. El lodo forma un anillo concéntrico de líquido sobre la pared interna del tazón. Los sólidos se asientan en la periferia de la superficie del tazón giratorio en virtud de la fuerza centrífuga (Kemmer y McCallion, 1982).

**Figura 2.7** Esquema de una centrifuga tazón sólido del tipo cónico-giratorio (Weber, 1979; Kemmer y McCallion, 1982; Rhyner, 1995)



La unidad de centrifugación es simple y compacta. Los costos de inversión son generalmente más bajos que para la filtración al vacío. La recuperaciones alcanzadas de sólidos en lodos de sulfato de aluminio son del 90% sin acondicionamiento y del 98% con 0.454 a 0.909 kg de polímero por tonelada de sólido (Lancaster, Pa). En la tabla 2.6 se muestran algunas ventajas y desventajas de utilizar este tratamiento (Kemmer y McCallion, 1982; Crawford y Cline, 1990).

**Tabla 2.6** Ventajas y desventajas de la centrifugación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menores requerimientos de superficie</li> <li>• Bajos costos de operación</li> <li>• Normalmente no requiere de acondicionamiento químico</li> <li>• Alta concentración de sólidos en la torta (15%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de inversión y energía</li> <li>• Requiere especial soporte estructural</li> <li>• Alto costo de mantenimiento</li> <li>• Requiere personal calificado</li> </ul>

Fuente: WPCF, 1983; Cornwell, *et al.* 1987; Rhyner, 1995)

### 3. RECUPERACIÓN DE ALUMINIO

El concepto de usar un sistema de recuperación de aluminio de los lodos producidos en plantas potabilizadoras para su reuso como coagulante en el sistema de tratamiento de agua potable es un proceso ampliamente conocido. Roberts y Roddy señalaron en 1903 un proceso de recuperación de aluminio aplicando ácido sulfúrico, proceso que fue patentado por W. M. Jewell. En 1923, W. R. Mathis emitió otra patente básicamente para el mismo proceso de Jewell. Sin embargo, no fue sino hasta 1950 que se realizaron investigaciones en EUA, Gran Bretaña, Polonia y Japón (Chen, *et al.* 1976; Cornwell, *et al.* 1987).

La recuperación de aluminio está enfocada a dos objetivos diferentes, pero relacionados. El primero, es considerar la adición de un ácido o álcali como una técnica de acondicionamiento del lodo para mejorar la deshidratación y reducción del volumen del lodo. El segundo es maximizar la recuperación y reuso del aluminio con el propósito de minimizar el gasto de coagulantes comerciales (Saunders y Roeder, 1991).

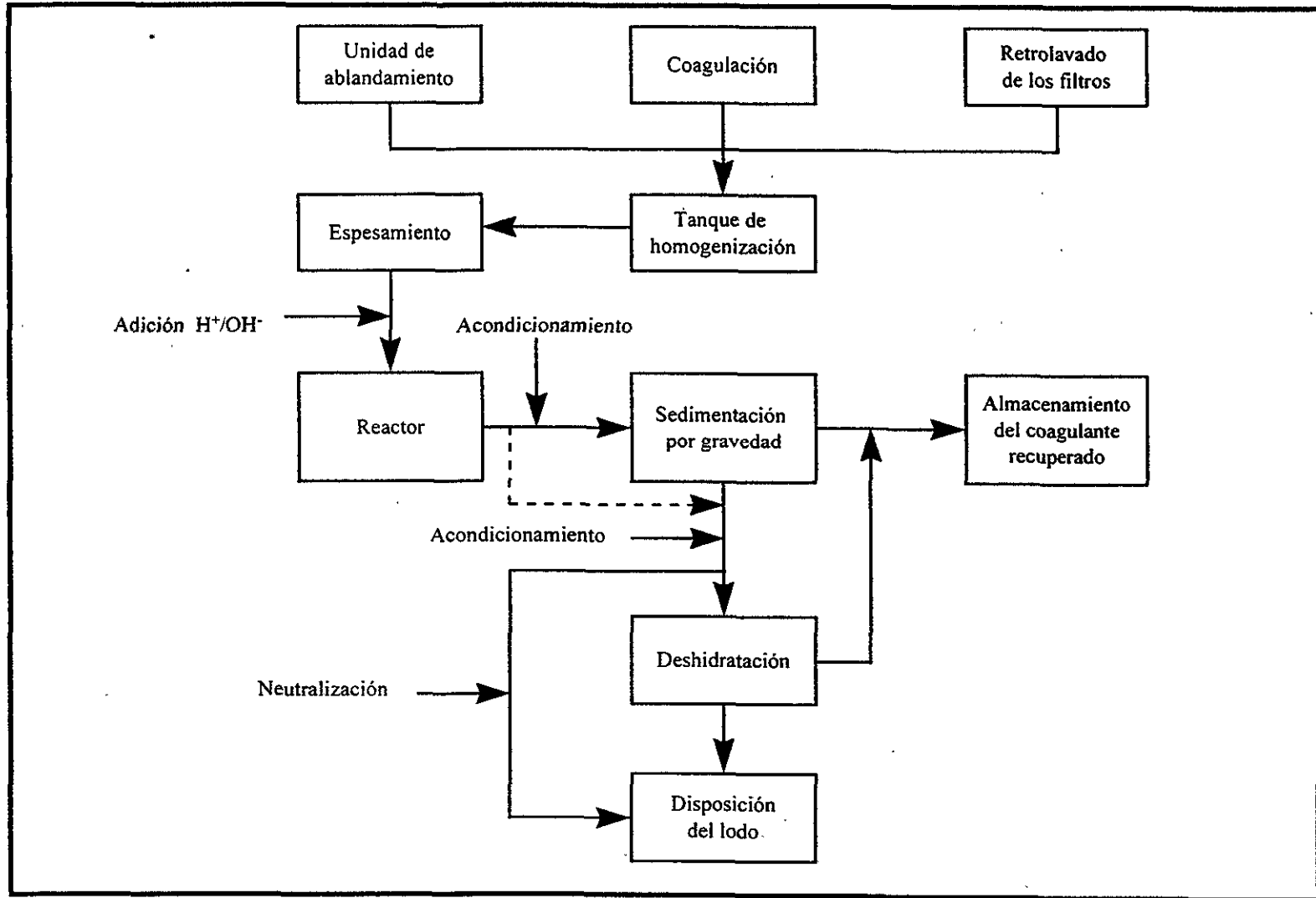
Dos factores juegan un papel importante en la evaluación para la recuperación del coagulante: 1) la fuente del aluminio contenido en los lodos del tratamiento del agua puede controlar la cantidad máxima del metal coagulante extraíble con la adición estequiométrica de ácido o base y 2) en la separación de sólidos, el volumen total del lodo está relacionado con la fracción del coagulante recuperado (Saunders y Roeder, 1991).

Aunque existen diversas variaciones, el esquema tradicional para la extracción de aluminio se muestra en la figura 3.1, en donde a los lodos generados de diferentes fuentes se les aplica el siguiente tratamiento: mezclado, espesamiento, adición de un ácido o álcali, separación por gravedad y finalmente la solución rica en aluminio es reciclada como coagulante. El lodo final puede o no ser neutralizado antes de su deshidratación, los sólidos de esta unidad son transportados para su disposición final (Fulton, 1974; Westerhoff, *et al.* 1978).

La viabilidad económica de los procesos de extracción de aluminio ha sido examinada como sistemas de recuperación, acondicionamiento y disposición del lodo. Por ejemplo, experiencias en Atenas indican que en términos de costo total de sustancias químicas para coagulación y extracción del lodo, la recuperación del coagulante es económica. En Japón, la extracción del aluminio para el acondicionamiento del lodo es una propuesta económica la cual se acentúa ligeramente por beneficios de la reutilización del coagulante. Esta viabilidad depende especialmente de la composición de la fuente de agua, dosis de coagulante, costos de tratamiento, surgimiento de regulaciones restrictivas de la calidad final del agua y disposición del lodo (Saunders y Roeder, 1991).

Las recuperaciones reportadas de aluminio son del 60 al 80% a pH de 3; sin embargo, algunos tipos de lodos requieren valores de pH tan bajos como 1 (Saunders y Roeder, 1991).

**Figura 3.1** Proceso típico de recuperación de coagulante en lodos de una planta de tratamiento de agua potable (Chen, *et al.* 1976; Cornwell, *et al.* 1987, Saunders y Roeder, 1991)





### 3.1 Tipos de aluminio

La adición de coagulantes de aluminio en el agua resulta primeramente en la formación de hidróxidos de aluminio, los cuales son rápidamente solubilizados cuando se adiciona un ácido o una base en el lodo. Por lo tanto, el lodo de aluminio producido en el tratamiento del agua contiene aluminio de dos distintas formas:

- 1) El aluminio asociado con los sólidos del agua cruda, tales como arcilla.
- 2) El aluminio proveniente de la adición de coagulantes (Fulton, 1974).

El aluminio presente en la arcilla está en la forma de óxidos de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), los cuales son más resistentes a la disolución que el hidróxido de aluminio [ $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ] producido en la coagulación y requieren un aumento en el tiempo de contacto y temperaturas elevadas para completar la disolución (Fulton, 1974).

Cuando la carga de sólidos en el agua cruda es alta comparada con los sólidos producidos por la adición del coagulante, los óxidos de aluminio representan una porción insignificante del aluminio total presente en el lodo. Estos óxidos pueden no ser disueltos a los valores de pH, temperatura y tiempos de contacto empleados en el proceso de recuperación de coagulantes. Consecuentemente, cuando grandes cantidades de óxido de aluminio están presentes, la disolución de aluminio al 100 % no puede ser alcanzado (Saunders y Roeder, 1991).

El proceso por el cual el aluminio es extraído de la bauxita para la producción de sulfato de aluminio comercial usa elevadas temperaturas, altas dosis de ácido y tiempos de contacto largos para la disolución eficiente de los óxidos de aluminio. Los procedimientos normalizados o estandarizados (APHA, 1985) de digestión con ácido nítrico y otros ácidos que son típicamente usados en la determinación del contenido total de metales, puede también ser usado en la disolución de la mayoría de los  $\text{Al}_2\text{O}_3$  encontrados en el lodo del agua cruda, esto es debido a las elevadas temperaturas y a la cantidad de ácido usado en este procedimiento. Además, concentraciones reportadas de aluminio total en lodos de plantas de tratamiento de agua medidas por digestión con ácido nítrico y otros ácidos incluye el aluminio que se adiciona con el coagulante [ $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ] y la mayoría del aluminio de los sólidos del agua cruda (Roberts y Roddy, 1960; Saunders y Shaw, 1988; Saunders y Roeder, 1991).

Cuando en un lodo predomina la forma  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  y es acondicionado con ácido o álcali, el aluminio es disuelto en productos polimerizados intermedios y productos hidrolizados de aluminio hidratado. Cuando esta solución se reusa como un coagulante, proporciona beneficios similares a los productos comerciales de aluminio. Además, al disminuir el contenido de  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  en el lodo se mejora significativamente la deshidratación del mismo, reduciendo su masa y volumen. Por lo tanto, la adición de ácidos o bases para el tratamiento de lodos ha sido usado para recuperar el coagulante y acondicionar el lodo (Saunders y Roeder, 1991).

### 3.2 Química de los coagulantes

La química acuosa del aluminio es compleja. Chen *et al.* (1976) utilizan un diagrama de concentración versus pH (pC-pH), el cual es una herramienta útil para la descripción de las especies metálicas en solución seguida de la adición de un coagulante en el agua tal como se muestra en la figura 3.2. Numerosas especies de aluminio cargadas positivamente [ $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$  y  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$ ] y cargadas negativamente [ $\text{Al}(\text{OH})_4^{-1}$ ] coexisten en equilibrio con el hidróxido de aluminio sólido [ $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ], el cual tiene una solubilidad mínima a un pH cercano a 6.2 (Saunders y Roeder, 1991).

El Al es un ion metálico que fácilmente se hidroliza, por ejemplo, cuando se adiciona sulfato de aluminio al agua se produce una coordinación inmediata del ion Al con seis moléculas de agua [ $\text{Al}(\text{H}_2\text{O}_6)^{+3}$ ]. La reacción de hidrólisis procede instantáneamente con la formación de numerosos monómeros cargados [ $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$ ], seguida por la formación de polímeros [ $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{+4}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{+5}$ ], ambos se aproximan o alcanzan el estado de equilibrio (Saunders y Roeder, 1991).

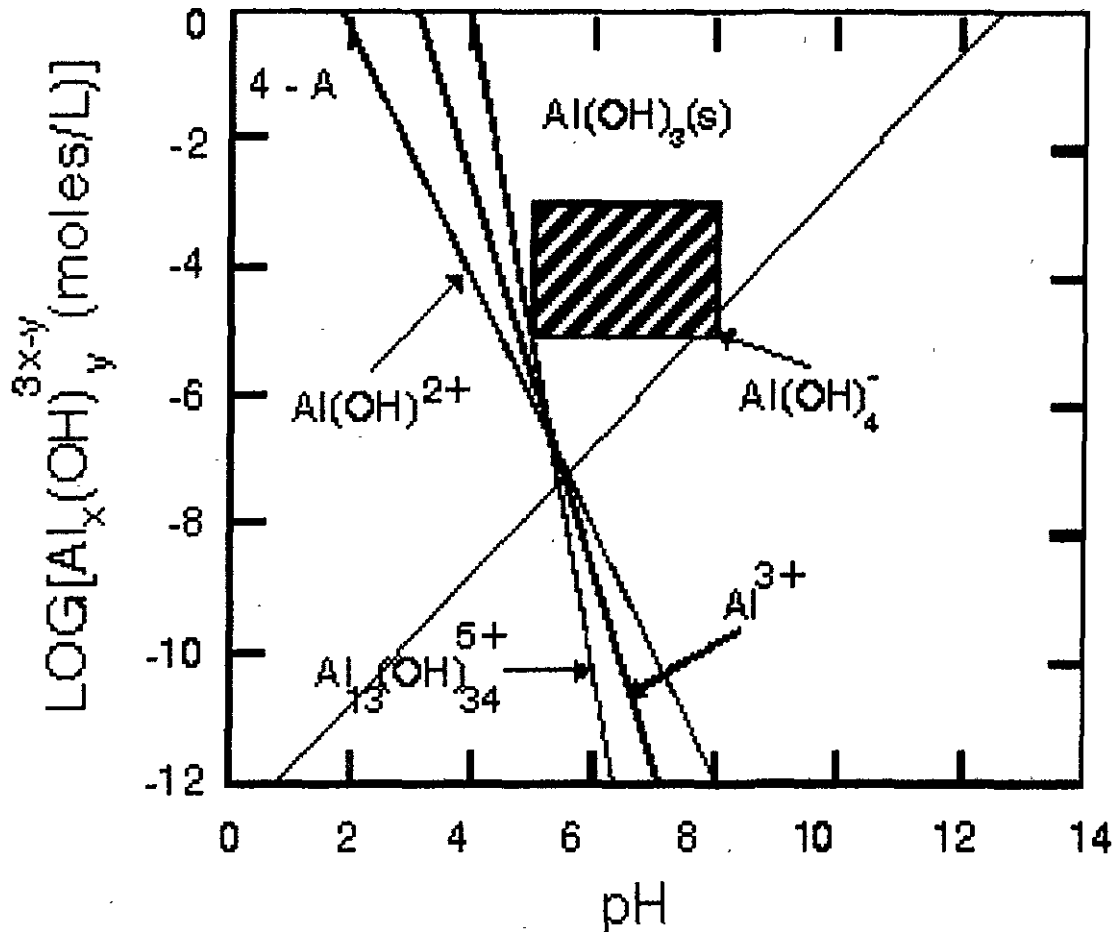
La existencia de diversos monómeros cargados y polímeros está en función del pH y de la concentración de Al y puede ser predecido basado en el diagrama pC-pH. Las concentraciones de aluminio expresadas en la figura 3.2 están en moles/L como aluminio, donde un mol de Al es equivalente a 27 g de Al. A un pH cercano a 6.2, en el cual la solubilidad del Al es mínima, sólo existen  $10^{-7}$  moles/L (2.7  $\mu\text{g/L}$ ) de Al en la forma soluble (Saunders y Roeder, 1991).

A pH = 4 coexisten numerosas especies de aluminio cargadas positivamente, tales como  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ ,  $\text{Al}^{+3}$  y productos de polimerización cargados positivamente pueden presentarse en concentraciones por arriba de  $10^{-2}$  moles/L (270 mg/L) como aluminio. Además, el dato de aluminio antes mencionado parece indicar que el producto sobrenadante está cerca de la saturación máxima del aluminio. Sin embargo, datos presentados por algunos investigadores indican que el valor de pH para la extracción efectiva del aluminio podría estar en el rango de 1 a 3 con recuperaciones del 99% de aluminio total (Saunders y Roeder, 1991).

Sin embargo, a pH = 7 la concentración máxima de aluminio soluble es aproximadamente  $10^{-3}$  moles/L (27 mg/L como Al). El  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  es la especie predominante en el rango de un pH alcalino, aunque otras especies cargadas negativamente existen en bajas concentraciones (Saunders y Roeder, 1991).

Una comparación del equilibrio de hierro, aluminio y la solubilidad muestra que el aluminio es significativamente más soluble que el hierro en el rango de pH neutro. Por ejemplo, a pH = 4 aproximadamente 270 mg/L de Al pueden estar presentes en solución, comparado a 44.8  $\mu\text{g/L}$  de Fe soluble a ese mismo pH. Además, en el punto de solubilidad mínimo para cada metal, 2.7  $\mu\text{g/L}$  y 0.558 ng/L de Al y Fe, respectivamente, pueden estar presentes en solución, con una diferencia de más de tres órdenes de magnitud. El pH de solubilidad mínima de Al es cerca de 6.2 comparada con aproximadamente 8 para Fe. En general, el Fe es fuertemente ácido y mucho menos soluble que el Al (Saunders y Roeder, 1991).

Figura 3.2 Diagrama de concentración vs. pH de las especies de aluminio en equilibrio con el hidróxido de aluminio sólido (Weber, 1972)



### 3.3 Variables que afectan la extracción del aluminio

Diversos parámetros operacionales presentan un efecto significativo en el grado de recuperación del aluminio. Estos parámetros incluyen: características del agua cruda, tipo de ácido o base, disolución del aluminio, evaluación estequiométrica, pH de la suspensión acidificada y tiempo de contacto de la extracción, los cuales son importantes definirlos ya que afectan la concentración del aluminio y la calidad final del coagulante recuperado. A continuación se describirán cada uno de estos parámetros (AWWA, 1989; Saunders y Roeder, 1991).

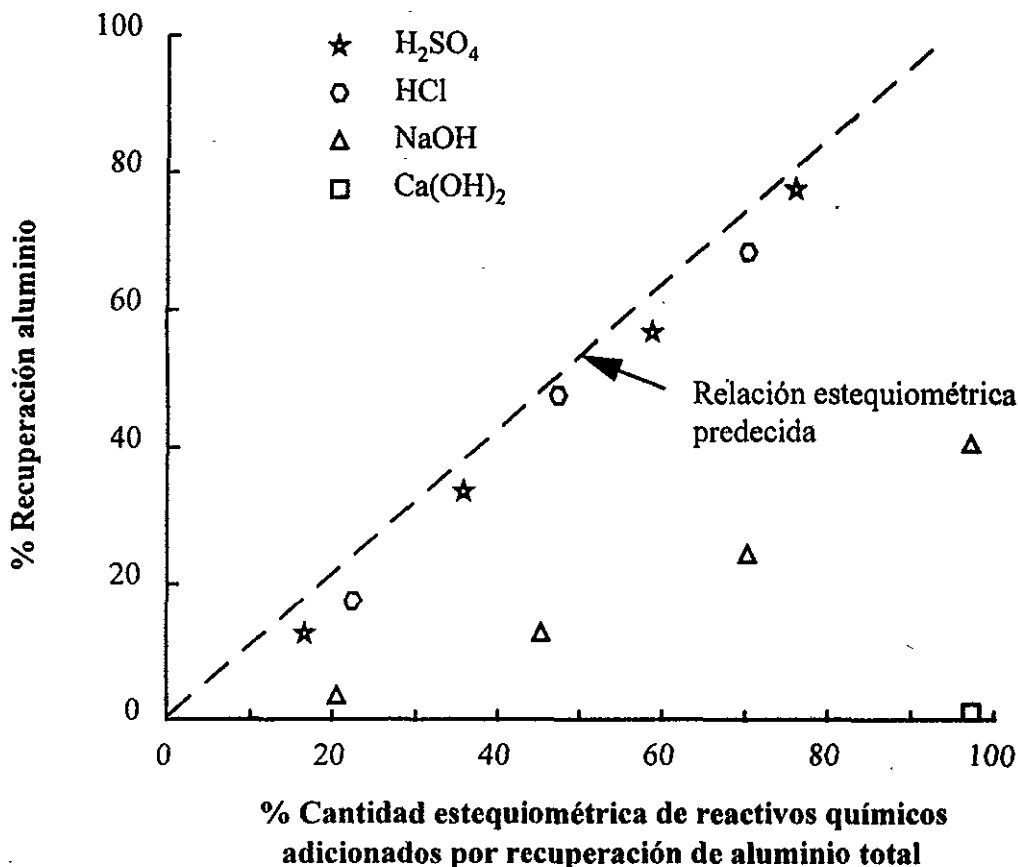
#### 3.3.1 Ácidos y bases utilizados en la recuperación

Si bien, la extracción con ácido sulfúrico es la más ampliamente aceptada, el uso de otros ácidos y bases tales como el ácido hidrociorhídrico, hidróxido de sodio e hidróxido de calcio también han sido considerados (Saunders y Roeder, 1991).

Comparada con la extracción ácida, las investigaciones experimentales con extracción alcalina es limitada. El hidróxido de sodio (NaOH) y la cal (CaO) han sido usadas como agentes de acondicionamiento para alcanzar el pH de la suspensión del lodo y disolver el aluminio presente en el mismo, el cual está en la forma de  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . De acuerdo a la figura 3.2, en el rango de pH alcalino, el aluminio solubilizado podría estar presente en la forma predominante como  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ . Las concentraciones de aluminio soluble pueden variar de 27 mg/L a un pH cercano a 10 hasta 2,700 mg/L a pH de 12, indicando el potencial para la recuperación alcalina (Saunders y Roeder, 1991).

La extracción de aluminio de suspensiones lodosas de plantas potabilizadoras han sido más exitosas acompañadas con ácido, principalmente el ácido sulfúrico. La extracción alcalina ha sido investigada en un limitado número de estudios con poco éxito, esto se puede observar en la gráfica 3.1 donde se muestran los resultados al evaluar diversos ácidos y bases en la demanda química hasta alcanzar la disolución del aluminio (Saunders y Roeder, 1991).

**Gráfica 3.1** Porcentaje de recuperación de aluminio vs. reactivos químicos adicionados (Cornwell, *et al.* 1987; Saunders y Roeder, 1991)

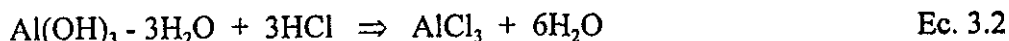


### 3.3.1.1 Tipos de ácido

Tanto el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) como el ácido clorhídrico (HCl) han sido investigados para su utilización en la recuperación de coagulantes. La reacción entre el ácido sulfúrico y el hidróxido de aluminio ha sido escrita de la siguiente manera (Bishop, *et al.* 1991; Fulton, 1974; Sengupta y Shi, 1992):



mientras que la reacción entre el ácido clorhídrico y el hidróxido de aluminio se escribe de la siguiente manera:



De la ecuación 3.1, se puede observar que el ácido sulfúrico estequiométrico requerido es de 1.5 mol/mol de Al, 1.1 kg/kg  $Al(OH)_3-3H_2O$  o 5.45 kg/kg de Al, mientras que el ácido clorhídrico estequiométrico (ecuación 3.2) requerido es de 3.0 moles/moles de Al, 0.80 kg/kg  $Al(OH)_3-3H_2O$  o 4.06 kg/kg de Al (Saunders y Roeder, 1991).

Debido a lo anterior, la sustitución de ácido clorhídrico por el ácido sulfúrico ha sido sugerido, puesto que la cantidad de ácido sulfúrico requerida es cerca de la mitad de la cantidad necesaria que utiliza el ácido clorhídrico para el ajuste del pH. En la gráfica 3.2 se muestra la disolución del aluminio con el uso de ácido sulfúrico en diferentes tipos de lodos (Albrecht, 1972).

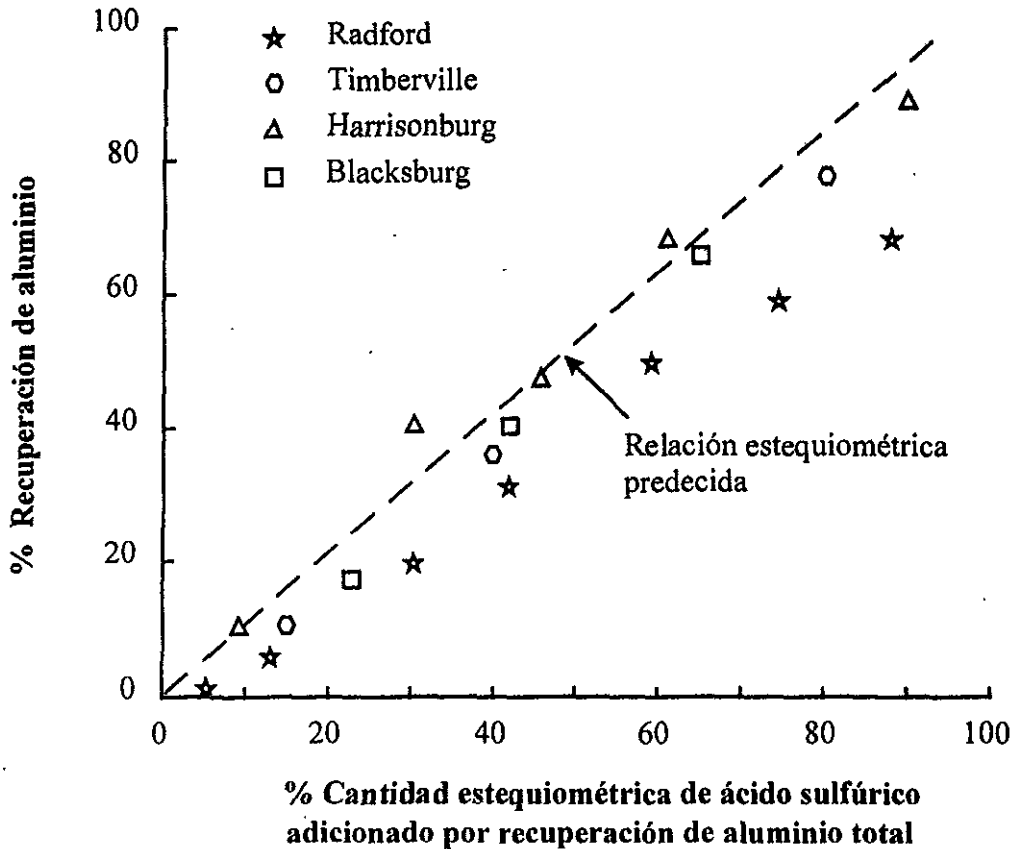
### 3.3.2 Disolución del aluminio presente en el lodo

La disolución del aluminio no se logra en su totalidad por dos razones:

- 1) Muchos otros materiales demandan ácido (sólidos presentes en el lodo producto de la coagulación), tales como: materia orgánica, óxidos e hidróxidos de hierro en concentraciones equivalentes a las del aluminio, manganeso y otros metales 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  $Al(OH)_3-3H_2O$  y/o  $Al_2O_3-nH_2O$ , puede tener un efecto dramático en su recuperación cuando el agua cruda contiene una concentración alta de sólidos (Saunders y Roeder, 1991).

El porcentaje de recuperación de aluminio total es del 65 al 90%.

**Gráfica 3.2** Porcentaje de recuperación de aluminio vs. ácido sulfúrico adicionado  
(Cornwell, *et al.* 1987)



### 3.3.3 Evaluación estequiométrica

La cantidad y concentración de ácido sulfúrico adicionado, varían 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 fijada con base a la cantidad de aluminio presente en el 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 puede ser normalizando la dosis de ácido con el aluminio total presente en el lodo (Saunders y Roeder, 1991).

Estos requerimientos de ácido estequiométrico están basados en la completa disolución de las especies sólidas de aluminio, representadas por  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , hasta aluminio soluble como  $\text{Al}$ . La existencia de productos de hidrólisis de aluminio pueden bajar la demanda de requerimiento ácido. Por ejemplo, la disolución de aluminio hasta la forma soluble de  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  puede requerir únicamente un tercio de la demanda de ácido discutida previamente para la disolución del  $\text{Al}$ . Sin embargo, la demanda de ácido puede ser afectada por la distribución de las especies de aluminio soluble seguida de la adición del ácido (Saunders y Roeder, 1991).

A continuación se muestran algunos resultados de evaluación estequiométrica en trabajos realizados a escala laboratorio, piloto y a nivel planta.

### 3.3.3.1 Pruebas a escala laboratorio

Isaac y Vahidi (1961) encontraron una dosis óptima de ácido de 3.95 kg/kg Al recuperado (teórico 2.37 kg/kg Al total), donde el 60% de aluminio total fue recuperado. Albrecht (1972) reporta una dosis de ácido de 4.94 kg/m<sup>3</sup> de lodo o 0.64 kg/kg de sólidos secos. Webster (1967) usó una dosis de ácido de 2.41 kg/kg a 4.14 kg/kg Al con una recuperación del 53 al 81% de aluminio total.

Saunders (1989) utilizó diferentes tipos de lodos con diversos resultados. El lodo proveniente de la planta de Chattahoochee presenta una concentración de 104.2 g/L de sólidos suspendidos totales (SST) y 4.904 g/L de aluminio, donde aproximadamente el 23% de los SST están como Al(OH)<sub>3</sub>-3H<sub>2</sub>O. La concentración de aluminio recuperado fue de 2.016 g/L, 41.1% del total, resultado de una dosis de ácido de 1.0 kg/kg Al total (0.025 kg/kg SST o 4.3 kg/m<sup>3</sup>). En un lodo de la planta de Quarles que tiene una concentración de SST de 97.4 g/L y una concentración de aluminio de 5.167 g/L, con aproximadamente el 25.9% de los SST como Al(OH)<sub>3</sub>-3H<sub>2</sub>O, se aplicó una dosis de ácido de 2.15 kg/kg Al (0.11 kg/kg SST o 11 kg/m<sup>3</sup>) la cual resultó en una recuperación de concentración de aluminio de 3.436 g/L, 66.5% del total. Un lodo de la planta de Candler tiene una concentración de 10.85 g/L de SST y 831 mg/L de aluminio, con el 37.6% de SST está presente como Al(OH)<sub>3</sub>-3H<sub>2</sub>O. Una dosis de 7 kg/kg Al (0.5 kg/kg SST o 5.5 kg/m<sup>3</sup>) da como resultado una concentración de aluminio recuperado de 566 mg/L, 68.1% del total.

### 3.3.3.2 Pruebas a escala piloto

A nivel piloto, Webster (1967) utilizó una dosis de 1.85 kg/m<sup>3</sup> de lodo para obtener una concentración de aluminio recuperado de 0.45 kg/m<sup>3</sup>. Este es equivalente a una dosis de ácido sulfúrico de 4.0 kg/kg de Al recuperado.

En una planta piloto de Surgeon Point, N.Y., Westerhoff y Daly (1974) y Gruninger (1975) trabajaron con lodos de la etapa de coagulación y retrolavado de filtros reportando dosis de ácido promedio de 0.37 kg/kg y 0.43 kg/kg de lodo seco respectivamente. Chen *et al.* (1976) reportan la recuperación de aluminio con respecto a la dosis estequiométrica de ácido adicionado.

### 3.3.3.3 Pruebas a nivel planta

Bishop *et al.* (1987) emplearon una dosis de ácido sulfúrico de 2.0 moles/moles Al (7.27 kg/kg Al) en Durham, N.C. En una acidificación batch a escala completa se usó una dosis de 0.6 kg/kg de sólido seco hasta obtener un pH aproximado de 2, resultando en una recuperación del 74 al 79% y una concentración de aluminio de 2.7 y 2.0 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.

Roberts y Roddy (1960) reportaron resultados de pruebas a escala laboratorio, piloto y a nivel planta en Tampa, obteniendo una demanda promedio de ácido de 4.1 kg/kg Al recuperado.

### 3.3.4 pH de la solución acidificada

La adición de ácido en el proceso de extracción es generalmente controlada por la medición del pH de la solución después de agregar la cantidad estequiométrica de ácido (1.5 mol/mol Al). El pH y la recuperación de aluminio varían debido a las diferentes características del lodo (Saunders y Roeder, 1991).

Chen *et al.* (1976) concluyeron que mientras la recuperación de aluminio podría ser máxima a un pH consistente para un lodo, este pH óptimo no podría ser trasladado a otros tipos de lodos. Por ejemplo: para un lodo de la planta de Hemphill se requirió una dosis de 2.45 kg/m<sup>3</sup> para obtener un pH de 2, y para un lodo de Quarles se requirió una dosis de 11.76 kg/m<sup>3</sup> para el mismo pH. Sin embargo, a valores de pH menores de 2.5, las concentraciones de recuperación de aluminio en la mayoría de los lodos se maximiza.

El pH de las extracciones ácidas varían de 1.8 a 3, si se alcanza el valor óptimo de recuperación de aluminio. Sin embargo, los valores de pH cercanos a 4 pueden ser óptimos si se tiene como primer objetivo el acondicionamiento del lodo (Saunders y Roeder, 1991).

Roberts y Roddy (1960) indican que el pH óptimo varía con la alcalinidad del agua cruda, así, aguas con alta alcalinidad requieren un pH menor para recuperar el aluminio. El rango de pH fue entre 1.5 y 2.5 para alta y baja alcalinidad del agua, respectivamente.

Isaac y Vahidi (1961) concluyeron que un pH óptimo podría ser de 3, por debajo de éste, el color de la solución se incrementa drásticamente afectando la calidad del coagulante recuperado. Las recuperaciones obtenidas de aluminio fueron del 60 al 65%.

Sletcha y Culp (1967) reportaron que a pH de 2 la recuperación de aluminio es casi completa y establecieron que el hidróxido de aluminio se disuelve completamente a pH de 2.5 a 3.0. Ocasionalmente tuvieron valores de pH de 1.8 a 2.0 y recuperaciones cerca del 95%.

### 3.3.5 Tiempo de contacto de la extracción ácida

El tiempo de contacto del ácido ha sido identificado como un parámetro importante en la extracción ácida de los coagulantes y puede tener un efecto dramático en el porcentaje de extracción del aluminio. Cornwell y Susan (1979) encontraron que con un tiempo de contacto de aproximadamente 5 minutos se obtiene un 80% del equilibrio, mientras que el 100% se obtuvo cerca de los 20 minutos. El equilibrio lo definieron como el punto donde no se disuelve más aluminio.

Isaac y Vahidi (1961) así como Cornwell y Susan (1979) concluyeron que un tiempo de contacto de 15 minutos fue suficiente para obtener un equilibrio estequiométrico. Westerhoff y Daily (1974) reportaron tiempos óptimos de contacto en un proceso a escala completa de recuperación en Japón de 10 a 20 minutos.



### 3.4 Concentración de aluminio en la solución ácida

Los coagulantes de sulfato de aluminio comercial contienen de 50 a 60 g/L de aluminio (aproximadamente 8.25% de  $Al_2O_3$ ). Las concentraciones del metal coagulante en la recuperación del aluminio son determinadas principalmente por el contenido total de aluminio en el lodo a ser extraído y el pH de la extracción. En la tabla 3.1 se puede observar que las concentraciones de aluminio para extracciones ácidas reportadas en la literatura varían en el intervalo de 360 a 3,700 mg/L como Al (Saunders y Roeder, 1991).

**Tabla 3.1** Concentración de aluminio en diferentes lodos crudos (Saunders y Roeder, 1991)

% de sólidos en el lodo seco	Concentración de aluminio (mg/L)		Referencia
	Lodo crudo	Sobrenadante	
1.54	2,570	740 - 1,590	Isaac y Vahidi (1961)
0.64	644	360 - 545	Webster (1967)
4 - 6	---	3,700	Gruninger (1975)
1 - 3	---	2,380	Gruninger (1975)
4	---	2,330	Gruninger (1975)
2.4	---	2,000	Bishop <i>et al.</i> (1987)
3.35	---	2,700	Saunders (1989)

Westerhoff (1973) reportó que el coagulante recuperado está más diluido que el sulfato de aluminio comercial por un factor de 15. Webster (1967), Isaac y Vahidi (1961) y Saunders (1989) reportaron que la concentración de aluminio en el sobrenadante está en función del pH. Webster (1967) reporta concentraciones de aluminio del 360 al 545 mg/L de Al (56 a 85% del Al total en el lodo) en el sobrenadante líquido después de la extracción ácida ( $H_2SO_4$ ) de un lodo que contenía 0.64% de sólidos y aproximadamente 644 mg/L de aluminio total (ver tabla 3.2).

**Tabla 3.2** Concentración de aluminio en el sobrenadante en función del pH (Saunders y Roeder, 1991)

Líquido sobrenadante mg/L como Al	pH	Referencia
360	3.77	Webster (1967)
434	3.65	Webster (1967)
473	3.50	Webster (1967)
426	3.21	Webster (1967)
523	2.98	Webster (1967)
545	2.64	Webster (1967)
607	3.40	Isaac y Vahidi (1961)
1,197	2.95	Isaac y Vahidi (1961)
1,444	2.20	Isaac y Vahidi (1961)

Fulton (1974) determinó que la concentración de aluminio depende también de la concentración de los sólidos suspendidos y concluye que la concentración del lodo después de espesamiento por gravedad podrían ser mayores al 2% de sólidos lo que permitiría obtener una concentración de aluminio suficiente para la coagulación después de la acidificación.

### 3.5 Calidad del coagulante recuperado

La calidad del coagulante recuperado juega un papel importante en la viabilidad para el reuso del producto recuperado. Ésta se evalúa principalmente con base en el contenido de aluminio, materia orgánica, color, hierro, manganeso y trazas de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Sin embargo, otros dos factores están relacionados con la calidad del coagulante recuperado:

- 1) El contenido de aluminio es importante si el producto se utilizara para remover color y coloides en plantas de tratamiento de agua potable.
- 2) Los contaminantes que son reciclados en el proceso de tratamiento pueden afectar la cantidad requerida de compuestos químicos y como consecuencia la calidad final del agua tratada.

Al igual que los coagulantes comerciales, el coagulante recuperado contiene contaminantes orgánicos e inorgánicos que pueden ser transferidos al agua tratada cuando éstos se adicionan al agua cruda para facilitar la remoción de la materia soluble y suspendida que puede potencialmente impactar la salud humana o la calidad estética del agua tratada. Estos contaminantes son removidos del agua y concentrados en el lodo para su tratamiento y disposición final. Sin embargo, la recuperación de coagulantes presenta un potencial para disolver o liberar estos contaminantes (AWWA, 1989; Saunders y Roeder, 1991).

#### 3.5.1 Color y materia orgánica

Cornwell y Susan (1979) concluyen que un incremento en la materia orgánica puede causar un incremento en el color del sulfato de aluminio recuperado resultante.

Isaac y Vahidi (1961) reportan los efectos del color en el sobrenadante líquido recuperado en función del decremento del pH para un lodo de sulfato de aluminio\* acondicionado con ácido sulfúrico obtenido según se muestra en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Color en el sobrenadante en función del pH (Saunders y Roeder, 1961)

pH	% de 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

\* Sólidos totales en el lodo = 1.55%; sólidos volátiles totales = 0.65% y aluminio total = 0.26%

Fulton (1974) expone que una solución ácida de aluminio recuperado con alto contenido de color proviene de un lodo crudo que contiene grandes cantidades de material orgánico suspendido y que este color, al ser reutilizada la solución puede no ser transferido al agua tratada pero podría ser removido junto con otro material orgánico durante el proceso de la coagulación.

### 3.5.2 Hierro y manganeso

Ambos metales son solubles a pH bajo, por esta razón están identificados como los principales contaminantes en la recuperación del aluminio, debido a esto es importante considerarlos ya que pueden causar un deterioro en la calidad del agua tratada (Saunders y Roeder, 1991).

Concentraciones de hierro y manganeso en productos comerciales fueron reportados por tres investigadores. Cornwell y Westerhoff (1982) reportaron una concentración de hierro de 850 mg/L, mientras que para el manganeso las concentraciones varían de 1.0 a 1.8 mg/L. Bishop *et al.* (1987) reportaron concentraciones de hierro y manganeso de 1.16 mg/L y 1.7 mg/L, respectivamente y Saunders (1989) reporta concentraciones de hierro entre 1.845 y 2.08 mg/L. En la tabla 3.4 se muestran las variaciones en concentraciones de hierro y manganeso encontradas por varios investigadores en coagulantes comerciales y sulfato de aluminio recuperado.

**Tabla 3.4** Concentraciones de hierro y manganeso en coagulante comercial y recuperado (Saunders y Roeder, 1961)

Producto	pH	Fe mg/L	Mn mg/L	Referencia
Comercial	---	1.16	1.7	Bishop <i>et al.</i> (1987)
Comercial	---	850	1.8 - 7.0	Cornwell y Westerhoff (1982)
Comercial	---	2,080	---	Saunders (1989)
Comercial	---	1,845	---	Saunders (1989)
Recuperado	2.1 - 0.25	300 - 800	---	Wang y Yang (1975)
Recuperado	2.0	292	255	Bishop <i>et al.</i> (1987)
Recuperado	3.8 - 2.6	2.4 - 14	---	Webster (1967)
Recuperado	2.0	92 - 1,885	18.5 - 200	Saunders (1989)

En general, las concentraciones de hierro en el coagulante recuperado fueron iguales o menores que las encontradas en los productos comerciales.

Isaac y Vahidi (1961) reusaron durante seis ciclos un coagulante recuperado para investigar el posible aumento de hierro en el aluminio recuperado. Una dosis constante (volumen de ácido/volumen de lodo) fue empleado, lo que causó un cambio en la recuperación de aluminio en cada ciclo. Dosis de sulfato de aluminio fresco fueron también adicionadas para facilitar la remoción consistente de color en cada ciclo. En la tabla 3.5 se puede observar 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.

Wang y Yang (1975) concluyeron que el hierro puede estar en estado férrico, causando la formación de flóculos de hierro que favorece la coagulación. La concentración de hierro en el agua coagulada es mínima debido a que su solubilidad es menor a pH neutro y precipita en forma de hidróxidos durante el proceso de coagulación. Éstos son removidos en la etapa de filtración, obteniendo un agua tratada con los niveles de hierro establecidos (Saunders y Roeder, 1991).

Tabla 3.5 Concentración de hierro en el coagulante recuperado (Saunders y Roeder, 1961)

Ciclo	Coagulante adicionado, mg/L de Al			Fe, mg/L	pH
	Comercial	Recuperado	Total	Recuperado	
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
4	2.4	4.1	6.5	14.0	2.9
5	1.4	4.0	5.4	14.0	2.4
6	1.9	4.1	6.0	17.5	2.6

### 3.5.3 Contaminantes inorgánicos traza

Desafortunadamente el proceso de recuperación de sulfato de aluminio por acidificación es vulnerable a la concentración de ciertas impurezas en la recirculación del aluminio recuperado. Esta situación presenta un problema potencial serio ya que podría causar la degradación del agua proveniente de la etapa de filtración. Estas impurezas potenciales se clasifican dentro de tres categorías:

- 1) Material inerte removido durante el pretratamiento convencional del agua (proceso físico) como parte de un compuesto complejo hidróxido. El cambio radical del hidróxido por acidificación puede liberar estos materiales los cuales no pueden sedimentar durante la etapa de separación en la recuperación del aluminio. Como resultado, el material inerte podría ser recirculado a la planta con el aluminio recuperado.
- 2) Impurezas capaces de ser reconvertidas a la forma soluble en el proceso de acidificación tales como el hierro, manganeso y otros metales. Estos materiales pueden ser disueltos a pH's bajos en la reacción y pueden ser concentrados o recirculados.
- 3) Impurezas propias del ácido sulfúrico (Westerhoff, 1973; Westerhoff, *et al.* 1978)

Los contaminantes inorgánicos removidos del agua cruda durante el tratamiento y contenida en el lodo de la coagulación pueden ser reciclados a través del proceso de recuperación del coagulante, ya que una fracción de estos metales traza también se disuelven en dicho proceso (Saunders y Roeder, 1991).

Bishop *et al.* (1987) realizaron la extracción del aluminio a nivel planta en Durham, N. C. adicionando 2.082 L (3.81 kg) de ácido sulfúrico concentrado a 2.994 kg de lodo seco, obteniendo un pH de 2.1. Esto fue equivalente a una dosis de 2 mol/mol de Al recuperado (7.27 kg/kg de Al). El análisis de metales se presenta a continuación (tabla 3.6).

Aunque en el coagulante recuperado la concentración de contaminantes inorgánicos es alta, en el agua a tratar hay un factor de dilución que permite utilizar el coagulante durante varios ciclos.

**Tabla 3.6** Concentración de metales en la solución ácida (Saunders y Roeder, 1991)

Metal	Concentración mg/L	Metal	Concentración mg/L
Aluminio (Al)	1,970	Potasio (K)	6.1
Plata (Ag)	< L.D.	Magnesio (Mg)	5.5
Arsénico (As)	1.1	Manganeso (Mn)	255
Bario (Ba)	0.3	Sodio (Na)	6.5
Calcio (Ca)	2.8	Níquel (Ni)	0.06
Cadmio (Cd)	< L.D.	Plomo (Pb)	0.03
Cromo (Cr)	0.6	Selenio (Se)	< L.D.
Cobre (Cu)	0.6	Silicio (Si)	8.5
Hierro (Fe)	292	Zinc (Zn)	1.7
Mercurio (Hg)	0.002		

L.D. Límite de detección

### 3.6 Reducción del volumen de lodos

El lodo producido de la etapa de coagulación es generalmente difícil de deshidratar debido a las características mencionadas anteriormente. El tratamiento de éstos con ácido permite obtener una reducción en el volumen de sólidos para su posterior manejo y la recuperación del aluminio. La reducción de los sólidos es el resultado de la disolución del aluminio y otros constituyentes solubles en el lodo durante la extracción ácida (AWWA, 1989; Saunders y Roeder, 1991).

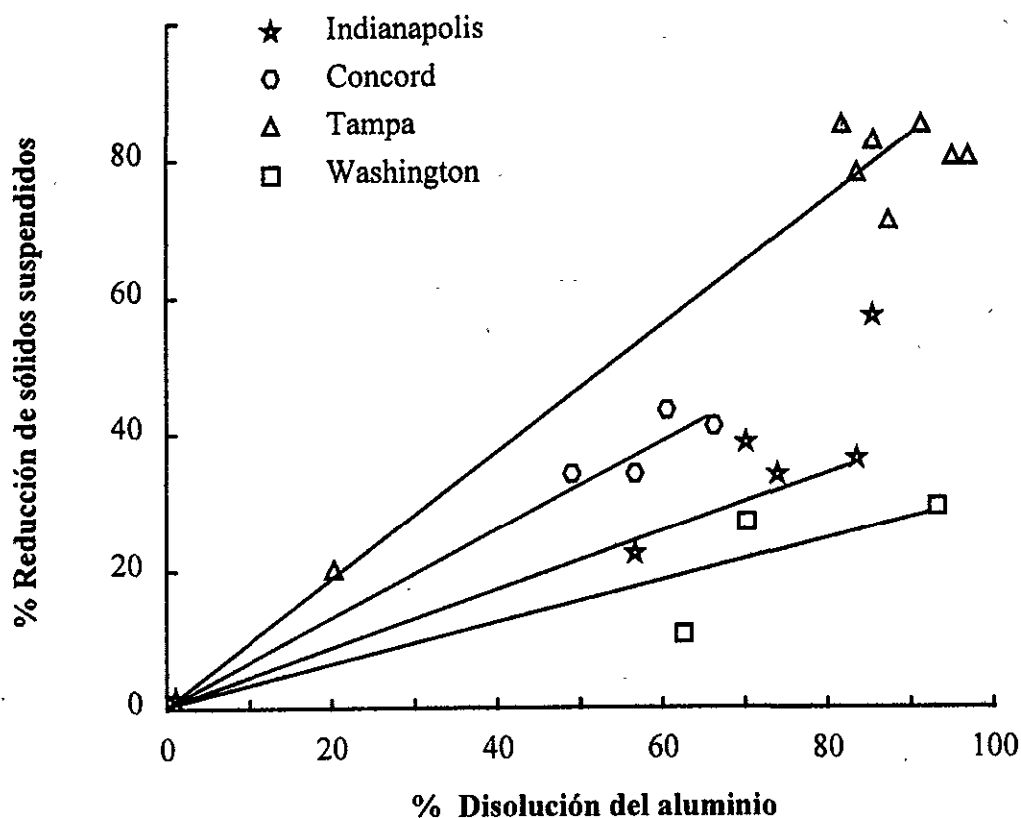
La acidificación de lodos de hidróxido de aluminio resulta en considerables reducciones en el volumen del lodo residual. La extracción ácida disuelve el hidróxido de aluminio gelatinoso y libera el agua ligada asociada con el lodo. El volumen de los sólidos remanentes es por lo tanto reducido y decrece el volumen del lodo para su disposición. Como se observan en los resultados de la tabla 3.7, se obtienen reducciones en el volumen de lodos del 36 al 92.5% (Saunders y Roeder, 1991).

**Tabla 3.7** Reducción del volumen de lodos después de la acidificación (Saunders y Roeder, 1991)

% Reducción del volumen	pH	Sólidos en el agua cruda
Webster 1967		
80.0	3.77	~
82.0	3.65	~
88.5	3.50	~
90.0	3.21	~
91.0	2.98	~
92.5	2.64	~
White y White 1984		
41.0	~	10.6
54.0	~	9.6
50.0	~	3.8
36.0	~	4.5
36.0	~	2.5
36.0	~	3.6
88.0	~	1.6

Cornwell y Susan (1979) concluyen que la reducción del volumen de lodos es directamente proporcional al porcentaje de disolución de aluminio. Esto es un resultado esperado puesto que los sólidos del lodo están constituidos en su mayoría por sólidos de hidróxido de aluminio. En la gráfica 3.3 se muestra la reducción del lodo obtenido seguida de la disolución del aluminio.

Gráfica 3.3 Reducción de sólidos vs. disolución del aluminio (Saunders y Roeder)



La separación de sólidos también es un factor limitante para obtener la máxima recuperación del coagulante. En combinación, la porción del metal coagulante total solubilizado por adición de ácido y la porción de líquido recuperable a través de la separación de sólidos, controlan la cantidad de coagulante recuperado. Por ejemplo, si se tiene un 90% de disolución del metal y 70% del volumen de líquido es recuperado, la recuperación del metal coagulante podría ser del 63% ( $0.90 \times 0.70 \times 100$ ) del metal coagulante total en el lodo. Además, ambos porcentajes de la disolución del metal y el grado de separación de sólidos alcanzado podrían controlar la máxima cantidad de coagulante primario que puede ser recuperado (Saunders y Roeder, 1991).

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Técnicas de determinación de aluminio

Para el estudio de la recuperación del aluminio de un lodo proveniente de una planta de tratamiento de agua potable, es necesario contar con técnicas analíticas que permitan definir tanto la calidad del aluminio recuperado, así como la eficiencia de los procesos que intervienen en la recuperación. Esto implica el empleo de técnicas de alta exactitud, precisión y repetibilidad, por lo que a continuación se describirán algunos métodos analíticos factibles para la determinación del aluminio.

#### 4.1.1 *Espectrofotometría de Absorción Atómica (técnica de flama)*

Está considerada como una de las mejores técnicas para la determinación cuantitativa de la concentración de más de 67 elementos metálicos y semimetálicos en cualquier material que pueda ser disuelto o puesto en suspensión. En el caso de la determinación de aluminio el intervalo de detección es de 1 a 100 mg/l.

La Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA) es una técnica instrumental que consiste en aspirar la solución de la muestra a través de un nebulizador que genera un aerosol fino dentro de una cámara de mezclado. Aquí, el aerosol de la muestra se mezcla con los gases combustible y oxidante, y posteriormente es arrastrado hacia el quemador en donde ocurre la combustión y atomización de la muestra.

La radiación de la fuente se enfoca sobre la celda de muestreo, que es la flama, la cual rompe los enlaces químicos entre las moléculas dejando átomos individuales. En estas condiciones, los átomos pueden absorber radiación visible o ultravioleta, la cantidad de luz que absorben los átomos de un elemento dado será función de la concentración de ese elemento en la muestra.

#### 4.1.2 *Colorimetría*

La colorimetría es un término general que se aplica a los procedimientos espectrofotométricos que emplean luz visible. Esta técnica es probablemente uno de los métodos más importantes del análisis cuantitativo y se basa en la absorción de luz visible por una sustancia disuelta.

Los métodos físicos de colorimetría, analizan la distribución de la longitud de onda de cualquier sustancia coloreada, transparente u opaca.

El método colorimétrico aplicado al análisis químico, consiste fundamentalmente en tratar una disolución de una sustancia con un reactivo que de manera tal, produzca un color con intensidad proporcional a la cantidad de sustancia presente en la disolución. Tiende a medir en términos absolutos el color de la muestra y compararla con estándares numéricos de absorción predeterminados.

#### 4.1.2.1 Espectrofotómetro Hach

Un espectrofotómetro es un instrumento utilizado para hacer mediciones cuantitativas de la transmisión de la luz a diferentes longitudes de onda. Cuando una radiación compuesta de distintos tipos de longitudes de onda, se pasa a través de una sustancia, parte de la radiación será absorbida y el resto será transmitida o reflejada.

Para llevar a cabo la determinación de aluminio mediante esta técnica se realizan los siguientes pasos (Método Aluminum):

- 1) Ajustar el pH de la muestra de 3.5 a 4.5 con Hidróxido de Sodio (NaOH).
- 2) Emplear una longitud de onda de 522 nm.
- 3) Tomar un volumen de 50 ml de muestra en una probeta.
- 4) Adicionar ácido ascórbico en polvo agitando hasta disolverlo.
- 5) Agregar el reactivo de AluVer 3 y agitar por un minuto la muestra.
- 6) Pasar 25 ml de la mezcla a una celda (muestra con el analito a determinar).
- 7) Al volumen restante se le agrega el reactivo Bleaching 3 agitando vigorosamente por 30 segundos (blanco).
- 8) Esperar el tiempo de reacción requerido (15 minutos).
- 9) Después del tiempo transcurrido, leer el blanco.
- 10) Finalmente leer la muestra preparada en el paso 6, la lectura proporcionada por el equipo es la concentración de aluminio en la solución. Las unidades están dadas en mg/L de Al.

El intervalo de análisis del Espectrofotómetro Hach es de 0.0 a 0.8 mg/L.

#### 4.1.2.2 Técnica de Snyder

Se basa en la extracción con ácido sulfúrico en exceso, valorando con NaOH. El procedimiento de esta técnica es el siguiente:

- 1) Una cantidad conocida de lodo se deshidrata totalmente (103-105 °C por 24 horas), hasta obtener un polvo.
- 2) Aproximadamente 11 g de este polvo se refluja con 20 ml de ácido sulfúrico diluido por dos horas (digestión débil).
- 3) La solución después del reflujo se filtra y afora a 200 ml.
- 4) Se toma una alícuota de 10 ml y se agregan 10 ml de fluoruro de potasio (KF), 90 ml de agua destilada y 5 gotas de fenolftaleína.
- 5) Se titula con NaOH, registrando los ml gastados (A)
- 6) El blanco se prepara tomando 50 ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y siguiendo los pasos del 3 al 5, registrando los ml de NaOH gastados (B).

En la figura 4.1 se muestra de manera esquemática el procedimiento de laboratorio anteriormente descrito.



ml de NaOH gastados para el blanco (B) = 36.7 ml

La alúmina extraíble se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Muestra 1: } \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{(36.4 - 3.3) * 0.1 * 0.017 * 2000}{11.002} = 10.229\%$$

$$\text{Muestra 2: } \text{Al}_2\text{O}_3 = \frac{(36.7 - 3.4) * 0.1 * 0.017 * 2000}{11.061} = 10.236\%$$

Sabemos que:

Muestra 1: 100%  $\text{Al}_2\text{O}_3 \Rightarrow 52.941\%$  Al, entonces 10.229%  $\text{Al}_2\text{O}_3 \Rightarrow 5.415\%$  Al

Muestra 2: 100%  $\text{Al}_2\text{O}_3 \Rightarrow 52.941\%$  Al, entonces 10.236%  $\text{Al}_2\text{O}_3 \Rightarrow 5.419\%$  Al

La cantidad de aluminio presente en la muestra es de:

$$\text{Muestra 1: } \left( \frac{5.415}{100} \right) * 11.002 \text{ g} = 0.596 \text{ g Al}$$

$$\text{Muestra 2: } \left( \frac{5.419}{100} \right) * 11.061 \text{ g} = 0.599 \text{ g Al}$$

$$\text{Cantidad total de Al presente: } 0.596 + 0.599 = 1.195 \text{ g}$$

Para obtener la concentración de aluminio en el lodo homogéneo se divide entre el volumen inicial de la muestra:

$$\left[ \right] = \frac{1.195 \text{ g Al}}{22.33 \text{ L}} = 0.054 \text{ g Al / L} = 54 \text{ mg Al / L}$$

### 4.1.3 Conductimetría

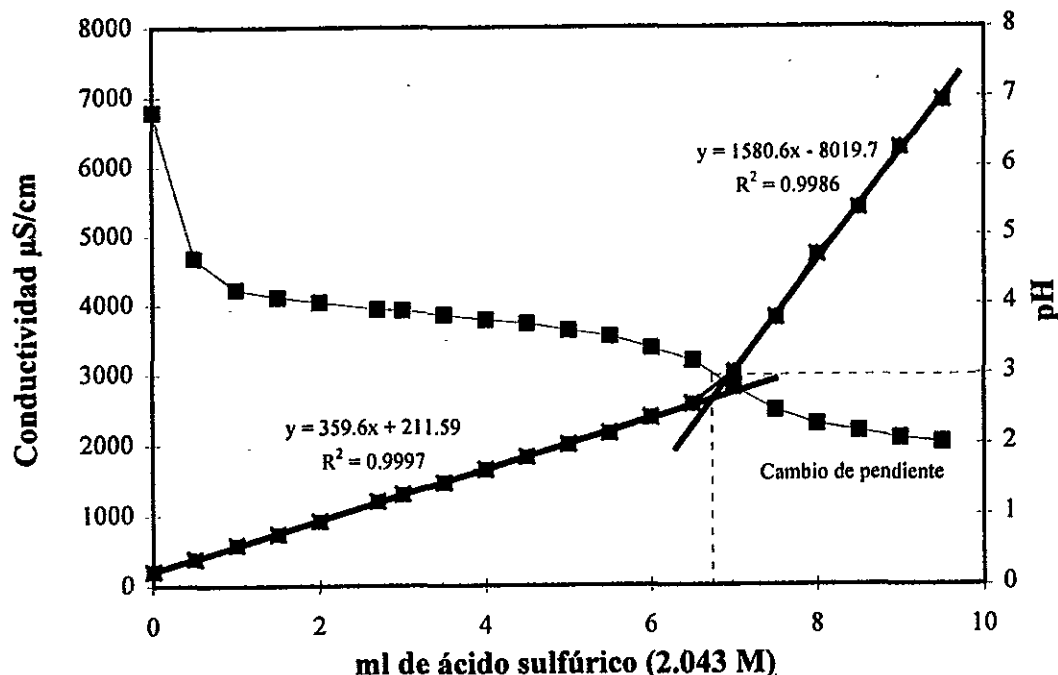
Consiste en una acidificación paulatina (digestión débil) del lodo con ácido sulfúrico diluido (2.00 M aproximadamente) hasta un pH cercano a 2 (tiempo de contacto de 1.5 h aproximadamente), así a cierta dosis de ácido se obtiene un pH y una conductividad estables en la solución. Posteriormente se grafican los valores de la conductividad vs. mililitros de ácido gastados, obteniendo una recta que presentará un cambio de pendiente (ver gráfica 4.1), este cambio proporcionará el requerimiento estequiométrico de ácido para extraer el aluminio y mediante esta relación se podrá calcular la concentración de  $\text{Al}^{+3}$  extraíble presente en el lodo.

Para calcular la cantidad de aluminio presente en la muestra (solo el extraíble) se considera que la relación es estequiométrica como se muestra a continuación:



es decir, que cada tres moles de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reaccionan con dos moles de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y que el ácido reacciona únicamente con este último.

**Gráfica 4.1** Conductividad y pH vs. ml de ácido sulfúrico empleado



Por ejemplo: A una muestra de 500 ml de lodo espesado se le añaden aproximadamente 6.74 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2.043 M, hasta el punto de equivalencia, el cual se determinó a partir de la gráfica 4.1, se tiene entonces que:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2 \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:  
 $C_1$  = Concentración inicial del ácido  
 $V_1$  = Volumen utilizado de ácido  
 $C_2$  = Concentración final del ácido  
 $V_2$  = Volumen de la muestra

$$C_2 = \frac{C_1 V_1}{V_2} = \frac{(2.043 \text{ M})(6.74 \text{ ml})}{500 \text{ ml}} = 0.028 \text{ mol / L de H}_2\text{SO}_4$$

como 0.028 moles de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  reaccionan con 0.018 moles de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y un mol de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  tiene un mol de aluminio:

$$0.018 \text{ mol/L} * 27 \text{ g Al/mol Al} = 0.486 \text{ g Al/L o } 486 \text{ mg/L}$$

Posteriormente se realiza la acidificación con ácido concentrado ya que de esta manera se hará a nivel planta, ésta se hace con el volumen estequiométrico calculado a partir del volumen gastado de ácido diluido. A continuación se muestra un ejemplo a partir de los datos anteriores.

Se tienen las siguientes especificaciones del ácido sulfúrico:

$$\begin{aligned} \text{Concentración} &= 2.043 \text{ mol/L} \\ \text{P. M.} &= 98 \text{ g/mol} \\ \rho &= 1.83 \text{ g/ml} \\ \text{Pureza} &= 97\% \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = (2.043 \text{ mol/L}) (98 \text{ g/mol}) = 200.214 \text{ g/L}$$

Se gastaron 6.74 ml de ácido diluido:

$$(200.214 \text{ g/L}) (6.74 \text{ ml}) \left( \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \right) = 1.3494 \text{ g}$$

Tomando en cuenta la densidad del ácido sulfúrico y su pureza se obtienen los ml de ácido sulfúrico concentrado que se deben adicionar a un volumen dado de lodo:

$$\frac{1.3494 \text{ g}}{1.83 \text{ g/ml}} = \left( \frac{0.7374 \text{ ml} * 100}{97} \right) = 0.7602 \text{ ml de H}_2\text{SO}_4 \text{ concentrado}$$

Se deberá agregar 0.8 ml de ácido inmediatamente registrando los valores de pH, conductividad, temperatura y tiempo de contacto.

#### 4.1.4 Determinaciones analíticas para los diferentes tipos de aluminio

En el apartado 3.1 se citaron los tipos de aluminio existentes en un lodo proveniente de la etapa de coagulación. Para determinar la concentración de aluminio total presente en el sistema o solamente el adicionado, se requiere básicamente de la disponibilidad de equipo, reactivos, tiempo y principalmente de que tan importante es obtener un balance global de aluminio presente en el tren de tratamiento. Para ello es necesario conocer la concentración de aluminio total en el lodo producido, la cual se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Al}_{\text{total}} = \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{Al}^{+3} + \text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O} \quad \text{Ec.4.4}$$

Agua cruda
Coagulante

De la ecuación anterior se observa que existen diferentes formas de aluminio que pueden ser determinadas analíticamente, por lo que se establece a continuación las técnicas más adecuadas para la cuantificación del aluminio total y aluminio disuelto.

#### 4.1.4.1 Aluminio total

Para determinar la concentración de aluminio total que es el asociado con los sólidos del agua cruda, tal como la arcilla ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) y el aluminio adicionado del coagulante  $[(\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})]$ , se requiere de una digestión fuerte con ácido nítrico (se selecciona este ácido debido a que está normalizado en el Methods Standard), que libera el aluminio presente en la arcilla. La solución digerida es posteriormente filtrada y ésta última es analizada en Absorción Atómica (AA) o por medio del Espectrofotómetro Hach.

Por lo general, se requerirá hacer diluciones, debido a que los intervalos de lectura de ambos equipos es menor a 100 y 1 mg/L respectivamente. Este factor de dilución y el obtenido por la digestión se deberán tomar en cuenta para los cálculos finales de concentración.

#### 4.1.4.2 Aluminio extraíble

Este tipo de aluminio es determinado tanto por conductimetría y Snyder, con estas técnicas se realiza una digestión débil con ácido sulfúrico la cual libera solo el aluminio adicionado como coagulante, la solución ácida obtenida también puede ser analizada por Espectrofotometría Hach y Espectrofotometría de Absorción Atómica.

De la misma manera que la determinación del aluminio total, se requerirá realizar diluciones las cuales deberán ser tomadas en consideración para los cálculos finales.

En resumen, la determinación del aluminio se lleva a cabo de la siguiente manera:

##### a) Aluminio total:

- Digestión fuerte de 45 ml de muestra con 5 ml de ácido nítrico concentrado.
- Filtración y aforo a 50 ml de la muestra digerida.
- Análisis con el Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

##### b) Aluminio extraíble:

- Acidificación débil con ácido sulfúrico.
- Sedimentación de la muestra durante media hora.
- Separación de las dos fases.
- La solución ácida se analiza por el Espectrofotómetro Hach.

## 4.2 Caracterización del agua cruda y del lodo homogéneo

Las pruebas realizadas en este trabajo se llevaron a cabo a partir de agua cruda y lodo provenientes de la Planta Potabilizadora "Los Berros" del Sistema Cutzamala ubicada en el Estado de México, la cual suministra agua potable a las ciudades de Toluca y México. En la planta se lleva a cabo un tratamiento convencional, tal como coagulación, sedimentación, filtración rápida y desinfección para la remoción de los contaminantes presentes en el agua.

La planta recibe aproximadamente 15 m<sup>3</sup>/s de agua proveniente de las presas: Valle de Bravo, Guadalupe Victoria y Chilesdo como fuente de suministro de agua superficial. Este flujo se distribuye en cinco módulos denominados B, C, D, E y F, cada uno de los cuales está a su vez constituido por dos floculadores, cuatro sedimentadores y ocho filtros rápidos de arena, además, los sedimentadores cuentan con equipos de recolección en continuo de los lodos (sifones). Al final, el agua tratada en los cinco módulos es almacenada en un cárcamo de donde es enviada para su distribución (ver figura 4.2).

La composición del agua varía en diferentes periodos y sobre un intervalo amplio, éste es esencialmente el caso de las corrientes superficiales que muestran cambios en época de lluvias y a menudo presentan variaciones de hora en hora. Con respecto a esto, cabe destacar que cuando se suministra agua proveniente de la presa Chilesdo, la concentración de sólidos en el influente a la planta aumenta drásticamente.

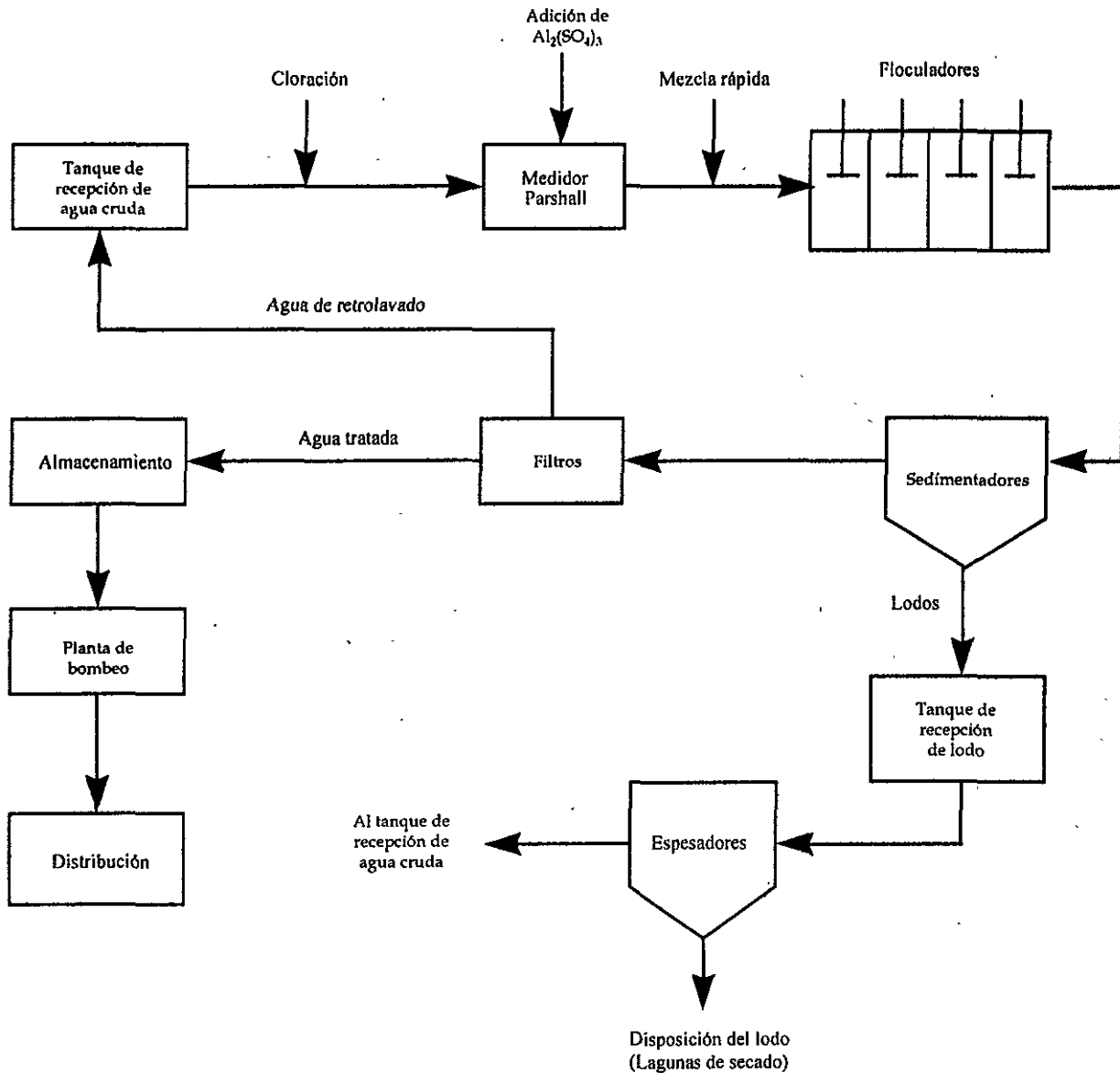
### 4.2.1 Agua cruda

Las características del agua cruda tienen un impacto dramático en la producción de lodos y por consiguiente en la calidad del coagulante recuperado y la viabilidad para su reuso. La concentración del metal coagulante en la recuperación es directamente dependiente de los sólidos suspendidos totales (SST) contenidos en el lodo crudo y de la fracción del metal coagulante en los SST. Sin embargo, un alto contenido de SST en el lodo crudo es deseable para maximizar el contenido del metal coagulante presente en el producto recuperado.

Debido a lo anterior, es necesario que el agua cruda sea caracterizada a través del tiempo para definir los parámetros que deben ser analizados, así como el grado de tratamiento requerido en conformidad con el uso que se le va a dar.

Para el propósito de este trabajo, los parámetros establecidos para caracterizar el agua cruda son los siguientes: temperatura, turbiedad, color, pH, alcalinidad, acidez, dureza total, dureza de calcio, sólidos totales, sólidos volátiles totales, aluminio disuelto, aluminio total, hierro total, manganeso total y metales traza. Los primeros ocho parámetros constituyen la calidad mínima requerida como fuente de abastecimiento del agua cruda, los sólidos se caracterizan para realizar el cálculo de los lodos producidos en la planta, el aluminio es de interés para la recuperación del mismo y los parámetros restantes son monitoreados para observar el impacto que causan en la acidificación de los lodos.

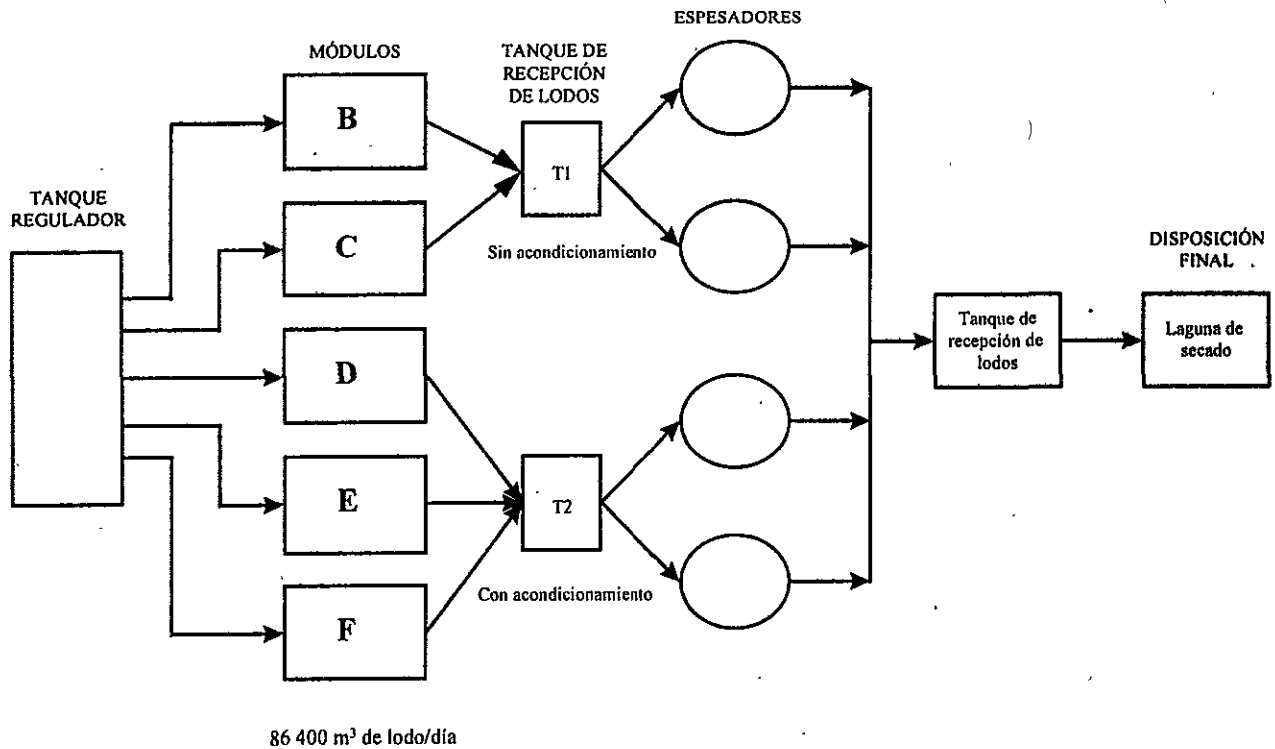
Figura 4.2 Tren de tratamiento de la planta potabilizadora “Los Berros”



#### 4.2.2 Lodo homogéneo

En la figura 4.3 se muestra el tratamiento que se le aplica al lodo generado en la planta potabilizadora. Como se observa, los lodos provenientes de los módulos B y C son almacenados en un tanque de recepción de donde son vertidos a un espesador y los del D, E y F a diferencia de los módulos anteriores, reciben un acondicionamiento químico con polímero (FLOMEX 83704), posteriormente son mezclados en un segundo tanque de recepción y vertidos en otros espesadores. La planta produce  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  de lodo, por lo que cada módulo genera  $200 \text{ L/s}$  de lodo proveniente de los sedimentadores. Posteriormente los lodos con y sin acondicionamiento son almacenados en un cárcamo para ser bombeados y depositados en una laguna de secado.

**Figura 4.3** Tren de tratamiento de lodos de la planta potabilizadora “Los Berros”



De acuerdo a la figura 4.3, con el objetivo de evaluar la deshidratación del lodo generado en la planta potabilizadora se eligieron dos fuentes:

- 1) Lodo proveniente a la salida del sedimentador (lodo homogéneo)
- 2) Lodo proveniente de la etapa de espesamiento

Las primeras pruebas se llevaron a cabo con el lodo proveniente del espesador, sin embargo, las características de éstos cambiaban drásticamente debido a variaciones en el agua cruda y principalmente a que se mezclaban los lodos provenientes de los procesos con y sin acondicionamiento con polímero por lo que no se tenían resultados confiables.

Por lo anterior, se descartó esta fuente y se trabajó a nivel laboratorio con cuatro tipos de lodos:

- 1) Lodo generado a partir de la coagulación del agua cruda (lodo sintético).
- 2) Lodo homogéneo proveniente del sedimentador.

- 3) Lodo espesado por gravedad durante 30 minutos a nivel laboratorio a partir de un volumen dado de lodo homogéneo proveniente de la planta potabilizadora (lodo espesado sin polímero).
- 4) Lodo acondicionado (polímero BL-5368) a nivel laboratorio a partir de un volumen de lodo homogéneo (lodo espesado con polímero).

A continuación se muestra la metodología para el estudio a nivel laboratorio de la recuperación de aluminio y reducción del volumen de lodos, el cual se llevó a cabo en el Área de Potabilización del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y en la planta potabilizadora "Los Berros".

### 4.3 Pruebas de tratabilidad de lodos a nivel laboratorio

Después de caracterizar el agua cruda y el lodo homogéneo, el siguiente paso fue realizar pruebas de espesamiento, acondicionamiento y acidificación a nivel laboratorio. El objetivo fue determinar que tan efectivos son estos tratamientos en conjunto para disminuir el volumen del lodo y obtener un alto porcentaje de recuperación del aluminio. Los resultados de estas pruebas fueron la base para establecer los parámetros bajo los cuales se realizaron las pruebas de laboratorio en la planta potabilizadora "Los Berros".

Con el fin de monitorear la concentración del aluminio desde su adición al agua hasta su presencia en el lodo final se realizaron pruebas acidificación en el laboratorio del IMTA a cuatro tipos de lodos:

1. Lodo sintético generado a partir de agua cruda proveniente de "Los Berros" + acidificación
2. Lodo homogéneo + acidificación
3. Lodo espesado sin polímero + acidificación
4. Lodo espesado con polímero + acidificación

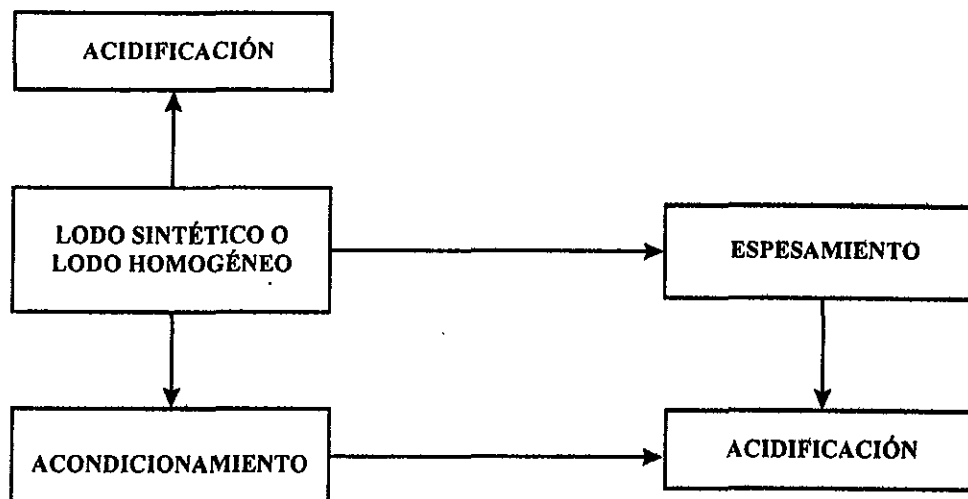
En la figura 4.4 se presentan los trenes de tratamiento para la acidificación de estos lodos.

En estas pruebas se determinó a cada muestra de lodo los siguientes parámetros:

- pH durante la acidificación
- Conductividad y temperatura durante la acidificación
- Dosis del ácido sulfúrico añadidos a la solución
- Volumen del lodo producido y sobrenadante
- Color y turbiedad a los sobrenadantes
- Aluminio, hierro y manganeso disueltos a los sobrenadantes



Figura 4.4 Esquema de la tratabilidad de lodos



A continuación se describe la metodología de acidificación para cada uno de estas líneas de tratamiento.

#### 4.3.1 Lodo generado a partir de agua cruda (lodo sintético)

Esta prueba se llevó a cabo utilizando un volumen de 300 L de agua cruda de la planta potabilizadora, la cual presentó las siguientes características:

Turbiedad	= 23.30 UNT*
Color aparente	= 50.00 Pt-Co*
pH	= 7.23*
Sólidos totales	= 0.20 g/L**
Aluminio total	= 2.40 mg/L**
Aluminio disuelto	= 0.175 mg/L**

\* Datos proporcionados por el personal de operación de la planta potabilizadora

\*\* Datos obtenidos en el Laboratorio de Potabilización

Como dato adicional, durante el muestreo, en el sistema se dosificaba 30 mg/L de sulfato de aluminio al agua cruda.

Con la cantidad anteriormente especificada de agua cruda, se generó lodo bajo las siguientes condiciones específicas de operación:

Coagulante	= 30 mg/L sulfato de aluminio
Mezcla rápida	= 100 rpm; 1 min
Floculación	= 25 rpm; 10 min
Sedimentación	= 1 hora

A partir de esta prueba se obtienen dos fases: el sobrenadante y el lodo sintético, a estas dos muestras se le determinaron sólidos totales y aluminio.

Posteriormente se realizó la acidificación de 500 ml del lodo sintético, utilizando 0.86 ml de ácido sulfúrico 2.15 M. Después de la acidificación hasta un pH cercano a 2, el lodo acidificado se dejó sedimentar por gravedad durante treinta minutos en embudos de separación de 500 ml. Al sobrenadante obtenido se le hizo determinaciones de aluminio, turbiedad y color, mientras que el volumen de lodo sedimentado se midió con el objetivo de comparar el porcentaje de reducción de éste con el lodo espesado acidificado. El objetivo de realizar la acidificación de este lodo es conocer el aporte inicial de aluminio extraíble en el tren de tratamiento.

El volumen restante de lodo generado a partir del agua cruda se deja espesar por treinta minutos con el fin de obtener un lodo espesado similar al que se produce en la planta a la salida de los espesadores (B y C). Además, el lodo debe concentrarse para simplificar el manejo subsecuente del mismo y al mismo tiempo aumentar la concentración de aluminio y así asegurar la eficiencia del sulfato de aluminio recuperado. Los parámetros analizados en el lodo fueron: sólidos totales y reducción del volumen.

Finalmente se realizó la acidificación de 500 ml del lodo espesado utilizando 5.77 ml de  $H_2SO_4$  2.15 M. El lodo espesado acidificado se deja sedimentar por 30 minutos para la posterior caracterización de las dos fases obtenidas.

#### **4.3.2 Lodo espesado sin polímero**

El objetivo de esta prueba de espesamiento y acidificación es obtener una mayor reducción del volumen del lodo y recuperación de aluminio. Para esta prueba se utilizaron 42.37 L de lodo homogéneo proveniente de los módulos B y C de la planta potabilizadora "Los Berros", al cual se le determinaron los siguientes parámetros: sólidos totales, pH y aluminio total.

A partir de 23.33 L de lodo se siguieron tres caminos de caracterización del aluminio:

- 1) Aproximadamente 500 ml de lodo se apartaron para su digestión con  $HNO_3$  y posterior análisis de aluminio total en Absorción Atómica y Hach. Esta caracterización es con el fin de realizar un balance de aluminio en el tren de tratamiento.
- 2) Un volumen específico de lodo (20.70 L) se dejó sedimentar por gravedad durante media hora, al lodo espesado obtenido se le aplicó la técnica de Snyder (ver figura 4.1) para la determinación de aluminio extraíble.
- 3) Se realizó la acidificación débil de 500 ml de lodo homogéneo en la cual se consumieron 0.64 ml de ácido y a continuación se caracterizaron las dos fases obtenidas de este tratamiento.

Posteriormente un volumen de 19.04 L de lodo homogéneo se dejó sedimentar por treinta minutos para obtener un lodo similar al que se produce a la salida de los espesadores y se caracterizaron las dos fases obtenidas.

Finalmente se realizó la acidificación de 500 ml de lodo espesado utilizando 9.36 ml de  $H_2SO_4$  2.15 M para establecer la recuperación de aluminio y comparar la reducción del volumen del lodo homogéneo y del lodo espesado sin polímero acidificados.

### 4.3.3 Lodo espesado con polímero

El acondicionamiento con polímero del lodo espesado tiene como finalidad aumentar la concentración de sólidos y como consecuencia reducir el volumen de lodos.

El desarrollo de esta prueba se realizó de la siguiente manera: se utilizó lodo homogéneo (62 L) proveniente de la planta potabilizadora caracterizándolo previamente.

Se acidificó 1 L de este lodo utilizando 3.79 ml de  $H_2SO_4$  2.15, caracterizando las dos fases obtenidas en esta etapa. Al mismo tiempo se realizó la digestión por horno de microondas para analizar el aluminio total presente en el lodo homogéneo.

Para producir lodo espesado con polímero se trataron 57.0 L de lodo homogéneo mediante pruebas de jarras, esto con la finalidad de obtener un lodo similar al que se produce a la salida de los espesadores (módulos D, E y F). Las condiciones de operación fueron las siguientes:

Polímero BL-5368	=	1 mg/L
Mezcla rápida	=	100 rpm; 10 seg
Floculación	=	25 rpm; 5 min
Sedimentación	=	3 min

Como resultado de esta operación se obtuvo 48.78 L de sobrenadante al que se le determinaron los siguientes parámetros: sólidos totales y volátiles, aluminio disuelto, hierro total y disuelto, manganeso total y disuelto.

Además se obtuvo 8.22 L de lodo espesado con polímero. A éste se le realizaron las siguientes pruebas: sólidos totales, volátiles y reducción del volumen de lodo. Es importante hacer notar que en esta prueba se elimina la etapa de sedimentación natural de media hora y se sustituye por la de acondicionamiento. A partir de este lodo se realiza la caracterización del aluminio extraíble mediante dos técnicas: Snyder y Absorción Atómica.

Finalmente se realiza la acidificación de 500 ml del lodo espesado el cual requirió 12.84 ml de  $H_2SO_4$  2.15 M. Se determinó el aluminio extraíble y la reducción del volumen de lodos.

Una vez que se tienen los resultados de cada una de las pruebas se procede a realizar un balance de aluminio extraíble y total en cada etapa del tratamiento, es decir, en la coagulación, espesamiento, acondicionamiento y acidificación y se calcula el porcentaje de recuperación del aluminio. Este balance se efectúa en el lodo sintético (u homogéneo) y en los lodos espesados con y sin polímero.

#### 4.4 Parámetros de control

Para obtener los parámetros de control en la recuperación del aluminio, se realizaron primeramente pruebas de laboratorio con lodo sintético, homogéneo y lodo espesado con y sin polímero. De estas pruebas se definieron tres parámetros de control: dosis de ácido sulfúrico, pH final de la solución y tiempo de contacto, la metodología de estas pruebas se muestra a continuación.

##### 4.4.1 Dosis de ácido sulfúrico

La cantidad y concentración de ácido sulfúrico adicionado varían debido a las diferentes características del lodo. En este estudio, la metodología de la dosificación del ácido es la siguiente:

- Preparación de ácido sulfúrico diluido 2.00 M (aproximadamente)
- Se agrega ácido de forma paulatina hasta alcanzar un pH cercano a 2 registrando el pH, la conductividad, la temperatura y los mililitros gastados de ácido.
- La muestra acidificada se deja sedimentar durante treinta minutos.
- Se realiza el análisis de aluminio en el sobrenadante, esto es con la finalidad de poder realizar el seguimiento de la disolución del aluminio y poder establecer las necesidades reales de ácido.

##### 4.4.2 pH final de la solución

El pH final de la solución es el que se obtiene cuando el aluminio extraíble en el lodo ha sido totalmente disuelto por el  $H_2SO_4$  diluido y conductimétricamente corresponde al cambio de pendiente de la curva conductividad vs. ml  $H_2SO_4$ , como se mostró en la gráfica 4.1.

En este trabajo, se establece un pH de 2 aproximadamente para las pruebas realizadas con ácido sulfúrico concentrado.

##### 4.4.3 Condiciones de mezcla (tiempo de contacto)

Una vez establecido el pH de operación y la manera de obtener la cantidad de ácido sulfúrico requerido, se procedió a determinar el tiempo de contacto necesario para extraer la máxima cantidad de aluminio del lodo con  $H_2SO_4$  concentrado.

Se han definido en trabajos realizados diferentes tiempos de contacto para obtener una alta recuperación de aluminio, debido a esto se realizan tres pruebas de acidificación utilizando diferentes tiempos de contacto. A continuación se describen cada una de estas pruebas.

### *a) Primera prueba*

En esta prueba se utilizó lodo espesado sin polímero, el cual contenía 670 mg/L de aluminio extraíble (determinado mediante el Espectrofotómetro Hach). Esta prueba se llevó a cabo manejando dos tiempos de contacto: 5 y 10 minutos. La cantidad estequiométrica requerida de ácido sulfúrico concentrado para 500 ml de lodo fue de 1.20 ml.

### *b) Segunda prueba*

Se realizó utilizando un lodo espesado con polímero con una concentración de aluminio de 905 mg/L. En esta prueba se trabajó con cuatro tiempos de contacto (6.5, 10, 15.5 y 20 minutos). La cantidad requerida de ácido sulfúrico concentrado para 500 ml de lodo fue de 1.52 ml.

### *c) Tercera prueba*

Esta prueba se llevó a cabo con la finalidad de poder aumentar el porcentaje de recuperación, y, consiste en agregar el ácido concentrado a diferentes intervalos de tiempo. Se utilizó lodo espesado sin polímero, el cual contenía 620 mg/L de aluminio. La cantidad estequiométrica requerida de ácido sulfúrico concentrado para 500 ml de lodo fue de 1.05 ml.

## **4.5 Pruebas de laboratorio en la planta potabilizadora “Los berros”**

### **4.5.1 Parámetros de control**

Con la finalidad de corroborar los parámetros que se establecieron en las pruebas realizadas en el laboratorio del IMTA, se llevaron a cabo las pruebas de recuperación de aluminio en las instalaciones de la planta potabilizadora “Los Berros”.

Para realizar estas pruebas de laboratorio se eligieron tres tipos de lodos:

1. Lodo homogéneo. Lodo proveniente de la etapa de sedimentación.
2. Lodo espesado sin polímero. Proveniente de los sedimentadores de los módulos B y C en los cuales no se lleva a cabo ningún tratamiento químico, con un posterior espesamiento en el laboratorio.
3. Lodo espesado con polímero. Proveniente de los módulos D, E y F los cuales se mezclan para su posterior acondicionamiento con polímero (tratamiento químico en la planta) y espesamiento por gravedad en el laboratorio.

En total se realizan nueve pruebas (2/10/97 al 8/10/97) de tratabilidad algunas de las cuales se hicieron por duplicado. En los días 6 y 7 se realizó el muestreo de lodo a dos diferentes horas para hacer pruebas de repetibilidad, es importante mencionar que las pruebas de los días 7 (repetida) y 8 se llevaron a cabo en el laboratorio del IMTA. Además, se almacenaron muestras de agua cruda y lodo homogéneo con la finalidad de determinar aluminio total por Absorción

Atómica y Hach (digestión previa con  $\text{HNO}_3$ ) en el IMTA. También se almacenaron soluciones acidificadas de las últimas dos pruebas para analizar aluminio, hierro, manganeso, por Absorción Atómica y metales traza por Plasma Acoplado Inductivamente.

Cabe aclarar que se realizaron determinaciones de aluminio disuelto y total al agua cruda, para poder establecer si existe un aporte de este elemento en el sistema.

Una vez realizada la acidificación a cada uno de los tipos de lodos y conocida la cantidad requerida de ácido sulfúrico para lodos espesados con y sin polímero (ver sección 4.1.3), se realizaron pruebas de acidificación con el ácido concentrado. A las muestras obtenidas de estas acidificaciones se les determinó los parámetros siguientes:

- Volumen de lodo final
- Turbiedad del sobrenadante
- Color del sobrenadante

Con estas pruebas se determina el intervalo óptimo de dosis de ácido sulfúrico, el pH y el tiempo de contacto, estos resultados se comparan con los obtenidos en el laboratorio del IMTA.

#### **4.6 Recuperación de aluminio y reducción del volumen de lodos**

Como se ha establecido anteriormente, la técnica de acidificación permite recuperar el aluminio presente en el lodo, pero la gran ventaja de este proceso es reducir el volumen del mismo para facilitar su disposición y manejo. El ácido disuelve el hidróxido de aluminio y libera el agua ligada al lodo, por ello, el volumen de sólidos se reduce significativamente para su disposición final. A continuación se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la recuperación de aluminio y reducción del volumen de lodos.

##### **4.6.1 Recuperación de aluminio**

En los puntos 4.1 y 4.3 se establecieron las técnicas de determinación de aluminio y el procedimiento de acidificación para los diferentes tipos de lodo, por lo que en esta sección se describirá cómo se realizan los cálculos para establecer el porcentaje de recuperación del aluminio. El procedimiento es el siguiente:

- a) Se determina la concentración de aluminio presente en el lodo por acidificación paulatina con ácido sulfúrico diluido, como ya se describió en la sección 4.1.3 y se obtiene la cantidad requerida de ácido concentrado para un volumen dado de muestra de lodo.

En este paso, el lodo espesado reacciona con el  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para producir una solución de sulfato de aluminio, a veces se requiere un exceso de ácido para que ocurra la hidrolización completa del material orgánico y bajar el pH.

- b) Se realiza la acidificación de otra muestra del mismo lodo pero con la cantidad de ácido sulfúrico concentrado calculado anteriormente y un tiempo de contacto específico.

- c) Se determina la concentración de aluminio en la solución y se compara con la obtenida en el inciso a), para obtener el porcentaje de recuperación del aluminio.

#### 4.6.2 Reducción del volumen

Para determinar la reducción del volumen de lodos se realizan los siguientes pasos:

- a) Se toma una muestra de lodo sin polímero y otra de lodo con polímero y se dejan sedimentar por espacio de media hora, esto con la finalidad de simular la operación de los espesadores de la planta.
- b) Se miden los volúmenes de la solución clarificada y el lodo sedimentado en ambos casos y se calcula el porcentaje de reducción.
- c) Ambos lodos se acidificaron con  $H_2SO_4$  diluido. Una vez obtenida la dosis óptima de ácido sulfúrico diluido se realiza la acidificación con la cantidad estequiométrica de ácido concentrado.
- d) Finalmente se miden los volúmenes de la solución ácida clarificada y del lodo espesado con y sin polímero y se calcula el porcentaje de reducción de este último en ambos casos.

El porcentaje final de reducción de volumen debe comprender tanto el obtenido por espesamiento como por la acidificación.

#### 4.7 Cálculo de la generación de lodos

Es importante estimar la cantidad teórica de lodos (base seca) que se producen diariamente o a determinada hora en la planta, para ello se utilizan los valores de turbiedad y la ecuación siguiente:

$$S = 0.0036 Q [(x * Al) + (b * UT)] \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde:

- S = Cantidad teórica de lodos generados, base seca (ton/h)  
 Q = Gasto de agua tratada ( $m^3/s$ )  
 Al = Dosis de sulfato de aluminio (mg/L)  
 x = Relación estequiométrica de sulfato de aluminio que se convierte hidróxido de aluminio = 0.44  
 b = Relación entre turbiedad y generación de residuos = 1.25  
 UT = Turbiedad del agua cruda (UNT)

De la ecuación anterior se conocen los siguientes parámetros: Q, Al y UT y se definen los valores de x y b. Si se asume que por cada mol de sulfato de aluminio  $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O]$  adicionado se producen dos moles de  $Al(OH)_3$ , entonces el valor de x es 0.26. Sin embargo, más realísticamente, cada mol de aluminio produce dos moles de  $Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$ . El adicionar tres moles de agua es requerido para llenar el número coordinado de aluminio, en este caso, el valor de x es 0.44. La experiencia muestra una mejor correlación entre la dosis de sulfato de aluminio y producción de sólidos usando el valor de 0.44 (Bishop, *et al.* 1987; AWWA, 1989).

La relación entre la turbiedad y los sólidos suspendidos es reflejada en el valor de b, el cual es difícil de definir. El valor de b varía entre 0.5 y 2 (Bishop, *et al.* 1987; AWWA, 1989).

También es importante estimar la producción de lodos reales, la cual toma como base los sólidos totales del lodo producido en los sedimentadores. Para la determinación de éstos se utiliza la siguiente fórmula:

$$S_R = ST * Q * 0.0036 \quad \text{Ec. 4.6}$$

Donde:

$S_R$  = Cantidad real de lodos generados, base seca (ton/h)

Q = Gasto de lodo producido en los sedimentadores ( $m^3/s$ )

ST = Sólidos totales del lodo (g/L)

#### 4.8 Caracterización de la solución ácida

Caracterizar la solución ácida obtenida es importante debido a que la calidad del coagulante recuperado se evalúa en base al contenido de aluminio, materia orgánica, turbiedad, color, hierro, manganeso y trazas de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Además, los contaminantes pueden estar presentes en la solución y ser reciclados en el tren de tratamiento. Los parámetros y técnicas utilizadas para caracterizar el coagulante recuperado son:

- Hierro (mg/L). Espectrofotómetro de Absorción Atómica, técnica de flama.
- Manganeso (mg/L) Espectrofotómetro de Absorción Atómica, técnica de flama.
- Turbiedad (FTU). Espectrofotómetro Hach.
- Color (Pt-Co). Espectrofotómetro Hach.
- Metales traza. Plasma Acoplado Inductivamente (PAI).

El hierro es importante caracterizarlo porque aunque en pequeña cantidad no es un problema, en cantidades grandes se puede convertir en coagulante predominante, situación indeseable debido a que si existiese alcalinidad insuficiente para reaccionar, éste pasaría sin reaccionar y sería acarreado finalmente a la entrada del agua cruda.



Además, cuando se recircula la solución ácida, el cloro oxida el hierro y manganeso de tal manera que son precipitados en el lodo junto con el aluminio y se acumulan, al acidificar por varios ciclos se obtienen mayores concentraciones de hierro y manganeso que pueden afectar la calidad de la solución ácida.

Los metales tienden a hidrolizarse completamente y pueden impartirle color a la solución recuperada de sulfato de aluminio. Este color no puede ser transferido al efluente de la planta de tratamiento de agua ya que es removido en el proceso de coagulación, sin embargo, de igual manera que el hierro y manganeso puede acumularse e intensificarse.

Finalmente algunos metales traza están presentes en el lodo de la coagulación y por lo tanto pueden ser extraídos durante la acidificación ya que estos también se disuelven a pH's bajos.

Una vez establecida la metodología para seleccionar la técnica de determinación de aluminio, caracterización del agua cruda y del lodo homogéneo, pruebas de acidificación a nivel laboratorio y en la planta potabilizadora "Los Berros", recuperación de aluminio, reducción del volumen de lodo, cálculo de la generación de lodos y caracterización de la solución ácida; se procede a presentar los resultados obtenidos en cada uno de estos puntos.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Selección de la técnica de análisis

La técnica que se elige para la determinación de aluminio fue la que requirió menor costo de equipo, reactivos y tiempo de análisis así como mayor facilidad de manejo de la técnica. A continuación se muestran las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas estudiadas para la determinación de aluminio.

*Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA):* Es uno de los métodos analíticos modernos cuyas ventajas son la exactitud, rapidez, especificidad y sensibilidad para la determinación de trazas de metales en multicomponentes. Sin embargo, es una técnica costosa, requiere de personal calificado y es conveniente leer varias muestras consecutivas ya que no es operativo ni costeable analizar solamente una.

*Espectrofotómetro Hach:* Es una técnica fácil de implementar y el análisis se realiza en un tiempo relativamente corto, además no es costosa, sin embargo, se requiere la adquisición del equipo como inversión inicial.

*Conductimetría:* Es una técnica fácil de implementar y realizar, sin embargo, la concentración de aluminio puede ser sobrestimada ya que parte del ácido consumido es demandado por los otros contaminantes presentes en el lodo como hierro, manganeso y materia orgánica.

*Snyder:* Es relativamente fácil de implementar aunque laboriosa y su realización toma dos días. Las concentraciones de aluminio no son precisas, ya que al igual que la técnica de conductimetría, la solución ácida obtenida presenta concentraciones de otros contaminantes que son extraíbles.

Considerando las ventajas y desventajas de las técnicas analíticas citadas anteriormente, se seleccionó la técnica del Espectrofotómetro Hach como el método de análisis de fácil manejo y económico para la determinación del aluminio extraíble.

Debido a que la Espectrofotometría de Absorción Atómica es una técnica acreditada, validada y certificada por SINALP (Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Prueba), ésta se utilizó para establecer la confiabilidad de las lecturas realizadas por el Espectrofotómetro Hach. Se compararon los resultados obtenidos de 48 muestras por un método estadístico (prueba de hipótesis). En la tabla 5.1 se presentan los resultados obtenidos por los dos equipos.

A partir de estos resultados se utiliza la prueba de hipótesis la cual nos lleva a concluir si el promedio de las lecturas de cada equipo son similares o diferentes. Los datos que se obtienen de la tabla 5.1 son los siguientes: a partir de una muestra aleatoria de tamaño  $n_1 = n_2 = 48$  se obtienen  $\mu_1 = 423.10$ ,  $\sigma_1 = 367.41$  y  $\mu_2 = 387.14$ ,  $\sigma_2 = 323.71$  para el Espectrofotómetro Hach y Absorción Atómica respectivamente. Se elige un nivel de significancia de 0.01 para contrastar si hay una

diferencia en el promedio verdadero de lectura obtenido con los dos instrumentos (para más detalles del método estadístico ver anexo A).

**Tabla 5.1** Resultados obtenidos de aluminio por dos equipos

Muestra	Hach	EAA	Muestra	Hach	EAA
Al (mg/L)			Al (mg/L)		
1	28.6	29.3	25	280.5	286.0
2	26.4	29.6	26	275.0	288.8
3	26.4	32.6	27	297.0	305.3
4	52.3	54.3	28	297.0	311.3
5	46.8	54.9	29	375.0	385.0
6	79.2	82.5	30	402.0	480.0
7	85.8	87.3	31	436.0	530.0
8	79.0	87.5	32	452.0	550.0
9	71.0	87.5	33	620.0	590.0
10	85.8	88.0	34	499.0	610.0
11	92.4	90.8	35	660.0	670.0
12	94.0	112.5	36	690.0	710.0
13	114.4	116.2	37	730.0	760.0
14	118.8	118.3	38	700.0	780.0
15	123.2	121.2	39	745.0	790.0
16	150.0	122.5	40	695.0	820.0
17	127.6	129.3	41	795.0	860.0
18	133.1	137.5	42	810.0	870.0
19	165.0	168.3	43	830.0	960.0
20	253.0	265.1	44	855.0	980.0
21	258.5	266.2	45	890.0	1000.0
22	302.5	275.0	46	870.0	1020.0
23	253.0	277.8	47	1155.0	1300.0
24	302.5	278.3	48	1155.0	1340.0

### Desarrollo del cálculo de la prueba de hipótesis:

#### Datos:

*Equipo 1 (EAA):*

$$\begin{aligned} n_1 &= 48 \\ \mu_1 &= 423.10 \\ \sigma_1 &= 367.41 \end{aligned}$$

*Equipo 2 (Hach):*

$$\begin{aligned} n_2 &= 48 \\ \mu_2 &= 387.14 \\ \sigma_2 &= 323.71 \end{aligned}$$

#### Hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0; & \quad \mu_1 = \mu_2, & \quad \mu_1 - \mu_2 = 0 \\ H_1; & \quad \mu_1 \neq \mu_2 \end{aligned}$$

Estadístico:

$$z_{\text{calculada}} = (\mu_1 - \mu_2) - \delta / [(\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2)]^{1/2} = (423.10 - 387.14) - 0 / [(86.84)^2/48 + (83.62)^2/48]^{1/2}$$

$$z_{\text{calculada}} = 35.96/17.40 = 2.0666$$

Nivel de confianza  $\alpha = 0.01$

Zona de rechazo de  $H_0$ :  $1 - \alpha/2 = 1 - 0.01/2 = 1 - 0.005 = 0.995$

A partir de tablas estadísticas de distribución normal se calcula el valor de z:

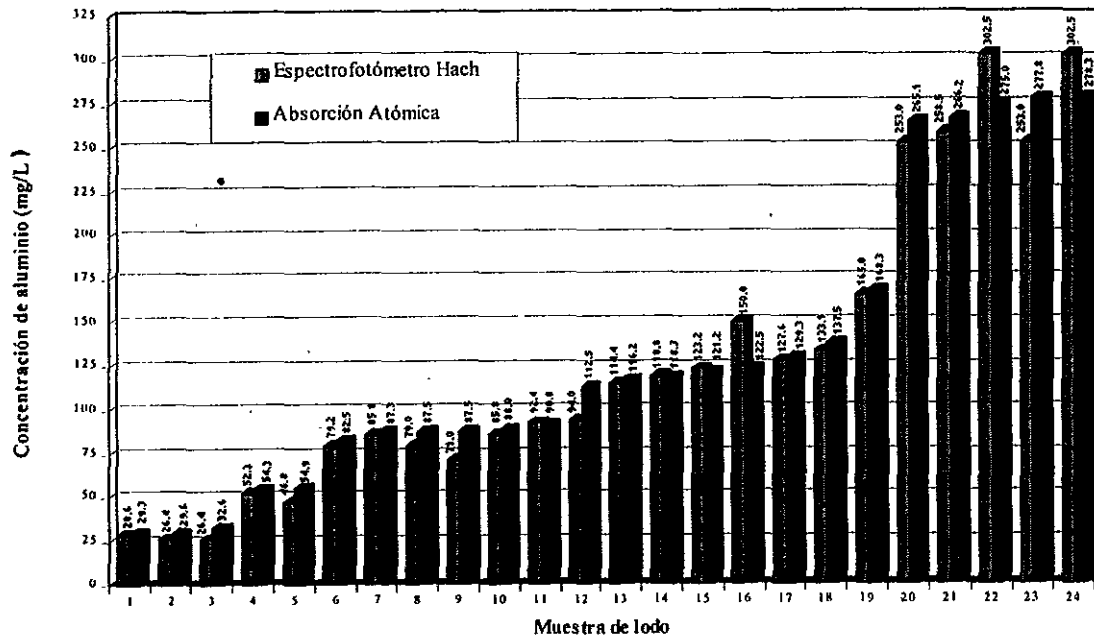
$$z(0.01) = z(0.995) = 2.57$$

Comparación:

Si  $z_{\text{calculada}} > z_{\alpha/2}$  se rechaza  $H_0$   
 Aceptas  $H_1$  si  $z_{\text{calculada}} > z_{\alpha/2}$  (tablas)  
 $2.0666 > 2.57$  {Falso} Se acepta  $H_0$

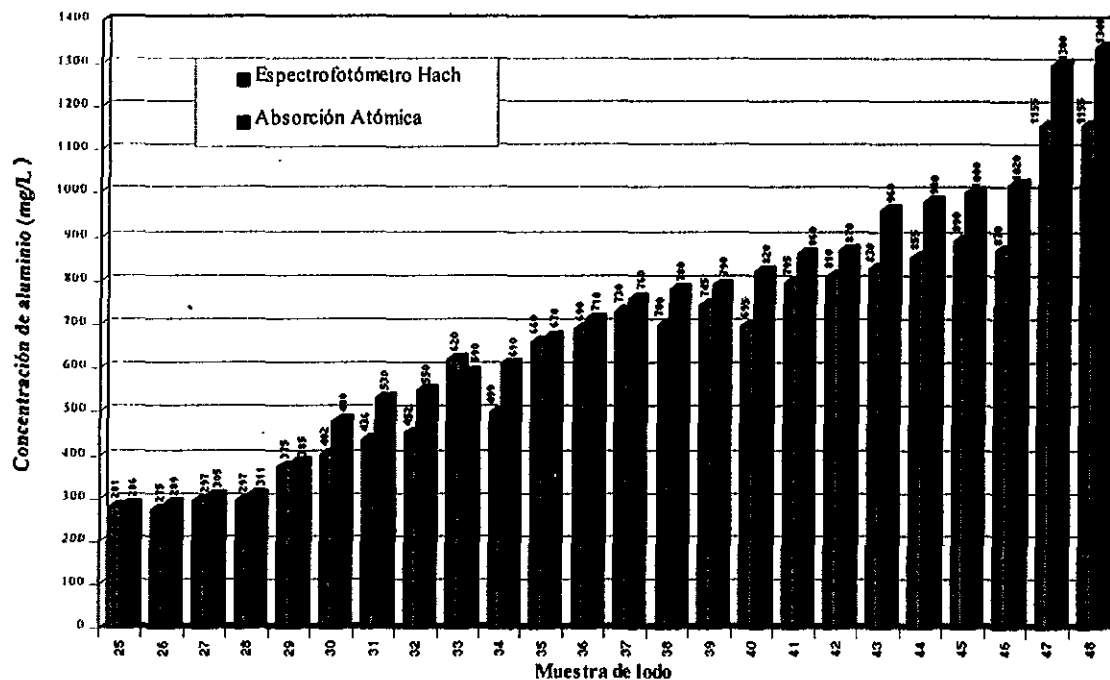
Según la información estadística disponible, se concluye que los dos equipos utilizados para la determinación de aluminio tienen la misma confiabilidad de análisis. En la gráfica 5.1 se presenta de manera esquemática esta comparación a concentraciones bajas de aluminio.

Gráfica 5.1 Relación de concentraciones bajas de aluminio



En esta gráfica se puede observar que a bajas concentraciones de aluminio las dos técnicas presentan resultados similares (obteniéndose un 96.5% de similitud en la determinación de aluminio mediante las dos técnicas), a continuación se presenta la comparación de los dos equipos a concentraciones altas (gráfica 5.2).

**Gráfica 5.2** Relación de concentraciones altas de aluminio



El porcentaje de similitud en las dos técnicas utilizadas para altas concentraciones es del 91.1%. Por lo tanto, se puede concluir que el Espectrofotómetro Hach es una técnica precisa comparable con la de Absorción Atómica para la determinación de aluminio en un intervalo de concentración de 0 a 1000 mg/L.

## 5.2 Caracterización del agua cruda y del lodo homogéneo

### 5.2.1 Agua cruda

En la tabla 5.2 se presenta la caracterización del agua cruda de la planta potabilizadora "Los Berros", donde el análisis de concentración de aluminio es importante ya que se realizó un balance total de aluminio en el sistema.

Tomando como base los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (ver sección 1.2), los criterios de selección de la fuente y la caracterización de la tabla 5.2, además del tren de tratamiento que opera en la planta potabilizadora "Los Berros", el agua cruda es apta para su uso como fuente de abastecimiento de agua potable y se clasifica dentro del grupo II (ver sección 1.3).

**Tabla 5.2** Caracterización del agua cruda de la planta potabilizadora “Los Berros”

Fecha de la prueba	T* °C	Turb.* UNT	Color* Pt-Co	pH*	Alc.* mg/L CaCO <sub>3</sub>	Acidez* mg/L CaCO <sub>3</sub>	Dureza <sub>total</sub> * mg/L CaCO <sub>3</sub>	Dureza <sub>calcio</sub> * mg/L CaCO <sub>3</sub>	ST mg/L	SVT mg/L	Al <sub>disuelto</sub> mg/L	Al <sub>total</sub> mg/L	Fe <sub>total</sub> mg/L	Mn <sub>total</sub> mg/L
22/08/97	~	23.3	50.0	7.23	~	~	~	~	0.20	~	0.175	2.40	~	~
09/09/97	~	78.5	120	7.30	98.28	1.3	68.4	37.8	1.150	0.075	0.36	6.53	2.32	0.242
01/10/97	18.2	13.2	73	6.93	95.1	1.3	79.2	44.9	~	~	~	~	~	~
02/10/97	19.4	30.6	115	7.22	98.3	1.3	73.7	45.6	0.365	~	4.40	17.60	5.45	0.358
03/10/97	19.3	48.8	120	7.12	89.3	1.2	68.3	40.2	0.263	0.053	2.20	10.07	3.52	0.264
04/10/97	19.5	75.1	153	7.17	91.8	1.2	76.1	43.7	0.208	0.050	0.43	2.04	0.92	0.143
05/10/97	19.5	57.3	94	7.16	93.7	1.2	83.0	47.5	0.373	0.038	1.50	18.21	6.49	0.336
06/10/97	19.0	14.1	32	7.06	85.7	1.3	73.7	39.9	0.151	0.046	0.08	< 1.00	0.46	0.132
07/10/97	18.6	15.8	37	7.17	92.4	1.2	76.2	42.3	0.186	0.054	0.36	1.60	0.76	0.143
08/10/97	~	~	~	~	~	~	~	~	0.575	0.275	~	18.65	6.71	0.363

T = Temperatura

Turb. = Turbiedad

Alc. = Alcalinidad

Dureza<sub>total</sub> = Dureza total

Dureza<sub>calcio</sub> = Dureza de calcio

ST = Sólidos totales

SVT = Sólidos volátiles totales

Al<sub>disuelto</sub> = Aluminio disuelto (determinado por el Espectrofotómetro Hach)

Al<sub>total</sub> = Aluminio total (previa digestión fuerte con HNO<sub>3</sub> y posterior análisis por Absorción Atómica, método de flama).

Fe<sub>total</sub> = Hierro total (determinado de igual manera que el aluminio total)

Mn<sub>total</sub> = Manganeseo total (determinado de igual manera que el aluminio total)

\* Datos proporcionados por el personal de la planta potabilizadora “Los Berros”.

Las muestras son promedios diarios, excepto ST, SVT, Al, Fe y Mn que son determinaciones puntuales.

~ Análisis no realizado

De la tabla anterior se puede observar que los valores de T, pH, alcalinidad, acidez, dureza total y dureza de calcio son muy similares para las diferentes muestras de agua cruda. Cabe destacar que cuando la concentración de sólidos aumenta, la cantidad de aluminio, hierro y manganeso también se incrementa. No se puede hacer una comparación de estos parámetros con la turbiedad y el color ya que estos últimos son promedios diarios obtenidos en los cinco módulos por el personal de la planta potabilizadora.

### 5.2.2 Lodo homogéneo

El lodo subproducto de la potabilización del agua fue caracterizado para conocer su composición antes de aplicar cualquier tratamiento. En la tabla 5.3 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del lodo sintético (u homogéneo) en las pruebas iniciales de laboratorio. Los datos obtenidos de esta caracterización muestran que el lodo está constituido principalmente por sólidos fijos, destacando el aluminio, hierro y sílice, además se observó que existe poca presencia de materia orgánica la cual se ve reflejada en una baja concentración de sólidos volátiles.

**Tabla 5.3** Caracterización del lodo a la salida del sedimentador

Fecha de muestreo	pH	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Si (mg/L)	ST (g/L)	STF (g/L)	STV (g/L)
02/06/97	7.14	50.0	~	46.0	0.575	0.47	0.105
16/06/97	7.09	~	~	~	0.923	~	~
23/06/97	7.15	23.0	5.61	19.0	0.443	~	~
16/07/97	6.51	157.0	34.38	98.90	2.025	2.025	0
19/08/97	6.90	88.7	~	~	1.080	~	~
26/08/97	7.28	118.6	27.23	~	1.380	0.780	0.600
09/09/97	7.00	290.6	68.57	~	4.350	3.750	0.600

~ Análisis no realizado

En la tabla 5.4 se presenta la caracterización del lodo homogéneo durante el tiempo en que se realizaron las pruebas de acidificación a nivel laboratorio y en la planta potabilizadora "Los Berros". Debido a que las características del agua cruda varían considerablemente, es de esperar que éstas causen un impacto en la producción del lodo homogéneo. Se observa que la concentración de los metales presentes es directamente proporcional a la concentración de sólidos. Esto es un resultado esperado puesto que los sólidos del lodo están constituidos en su mayoría por sólidos de hidróxido de aluminio.

Después del espesamiento del lodo como se mencionó en el apartado 4.3.2 y 4.3.3 para lodos sin y con polímero es importante determinar los siguientes parámetros en dichos lodos: ST, SF, SV, pH y aluminio disuelto (ver tabla 5.5). Esto es necesario ya que de esta manera se puede determinar el comportamiento del lodo en cada etapa del tratamiento.

**Tabla 5.4** Caracterización del lodo homogéneo

Fecha de muestreo	Sólidos g/L			pH	Aluminio mg/L			Fe <sub>total</sub> mg/L	Mn <sub>total</sub> mg/L	As mg/L
	ST	STF	STV		Al <sub>disuelto</sub>	Al <sub>total</sub>				
						AA	Hach			
19/08/97	1.080	~	~	6.90	~	88.7	86.5	~	~	~
26/08/97	1.380	0.780	0.600	7.28	50.0	118.6	118.8	27.23	0.97	~
09/09/97	4.350	3.750	0.600	7.00	137.5	290.6	275.0	68.57	3.45	~
02/10/97	3.150	~	~	6.90	132.5	276.7	302.5	61.47	2.89	0.0433
03/10/97	1.815	1.482	0.333	6.55	76.0	163.9	173.3	32.67	1.93	0.0270
04/10/97	0.736	0.586	0.150	6.75	35.3	54.6	49.5	10.62	1.32	0.0145
05/10/97	3.610	3.022	0.588	6.89	120.0	298.7	286.0	68.48	3.03	0.0409
06/10/97	0.444	0.328	0.116	7.34	19.0	31.1	26.4	6.44	1.00	0.0093
06/10/97REP*	0.440	0.326	0.114	7.14	31.0	29.8	24.2	5.12	1.25	0.0095
07/10/97	0.994	0.731	0.263	6.95	85.0	82.5	79.2	16.01	2.31	0.0214
07/10/97REP**	0.875	0.550	0.325	6.81	80.0	~	~	~	~	~
8/10/97***	2.825	2.150	0.675	6.63	107.5	265.7	255.8	62.70	2.20	0.0349

ST = Sólidos totales

SF = Sólidos fijos

SV = Sólidos volátiles

Al<sub>disuelto</sub> = Aluminio disuelto (determinado por el Espectrofotómetro Hach)

Al<sub>total</sub> = Aluminio total (previa digestión fuerte con HNO<sub>3</sub> y posterior análisis por Hach y Absorción Atómica, método de flama).

Fe<sub>total</sub> = Hierro total (previa digestión fuerte con HNO<sub>3</sub> y posterior análisis por Absorción Atómica, método de flama).

Mn<sub>total</sub> = Manganeso total (previa digestión fuerte con HNO<sub>3</sub> y posterior análisis por Absorción Atómica, método de flama).

As = Arsénico (previa digestión fuerte con HNO<sub>3</sub> y posterior análisis por Absorción Atómica, método de generador de hidruros)

~ Análisis no realizado

\* Muestreo en el mismo día pero a diferente hora

\*\* Muestreo el mismo día pero a diferente hora, prueba realizada en el IMTA

\*\*\* Prueba realizada en el IMTA



De la tabla 5.4 se observa que para el lodo homogéneo los ST están en un intervalo de 0,440 a 4.350 mg/L (0.044 a 0.435% lodo base seca) donde el 75% está constituido por sólidos fijos, sin embargo, estos lodos representan un alto contenido de agua. El pH de este lodo está dentro de un rango neutro (6.5 a 7.4), mientras que la concentración del aluminio está en un intervalo de 24 a 300 mg/L. La concentración de hierro y manganeso es directamente proporcional a la del aluminio. Debido a que no se cuenta con los límites máximos permisibles de contaminación de metales en lodos de plantas potabilizadoras, no se puede decir si estos valores son altos.

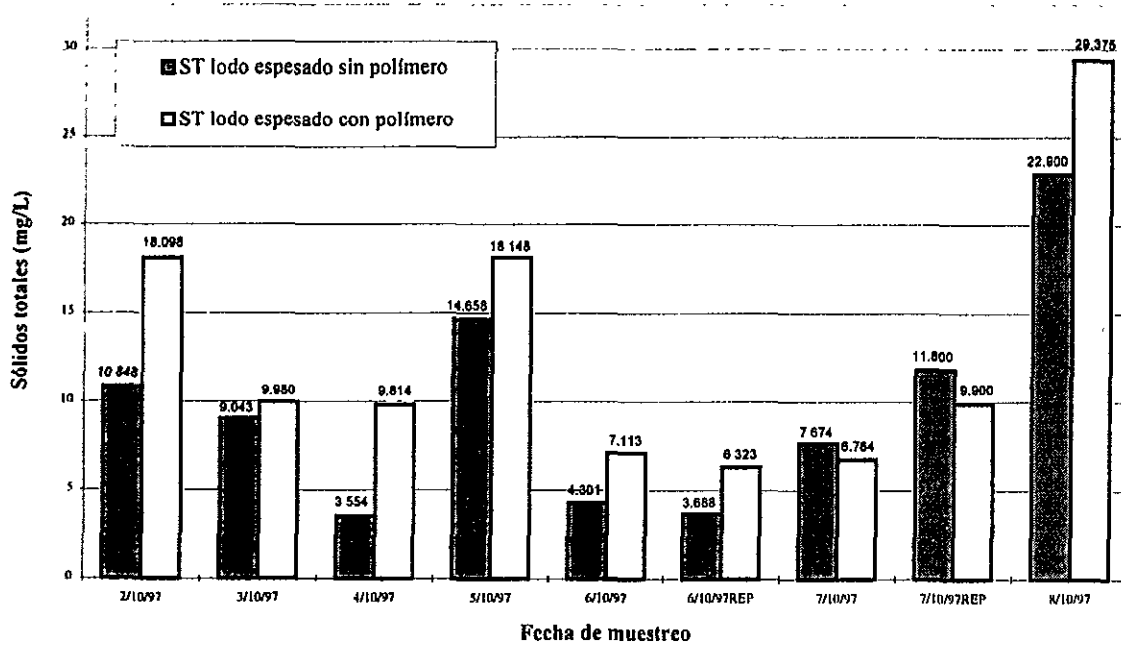
**Tabla 5.5** Concentración de sólidos, pH y aluminio en el lodo espesado sin y con polímero

Fecha de muestreo	Sólidos g/L			pH <sub>inicial</sub>	Aluminio (mg/L)
	ST	STF	STV		Al <sub>diseño</sub>
<b>Lodo espesado sin polímero</b>					
02/10/97	10.848	~	~	6.48	640.0
03/10/97	9.043	7.065	1.978	6.79	490.0
04/10/97	3.554	2.859	0.695	6.51	420.0
05/10/97	14.658	12.228	2.430	7.01	590.0
06/10/97	4.301	3.121	1.180	7.36	300.0
06/10/97 REP	3.688	2.754	0.934	7.05	315.0
07/10/97	7.674	6.094	1.580	6.99	580.0
07/10/97 REP	11.800	9.275	2.525	7.00	1000.0
08/10/97	22.900	21.175	1.725	6.68	1000.0
<b>Lodo espesado con polímero</b>					
09/09/97	27.075	22.450	4.625	6.38	940.0
02/10/97	18.098	~	~	7.03	980.0
03/10/97	9.980	7.752	2.228	6.65	580.0
04/10/97	9.814	7.916	1.898	6.60	880.0
05/10/97	18.148	15.023	3.125	7.04	700.0
06/10/97	7.113	5.315	1.798	7.26	480.0
06/10/97 REP	6.323	4.517	1.806	7.02	530.0
07/10/97	6.764	5.234	1.530	7.04	500.0
07/10/97 REP	9.900	7.950	1.950	7.26	800.0
08/10/97	29.375	26.625	2.750	6.86	1300.0

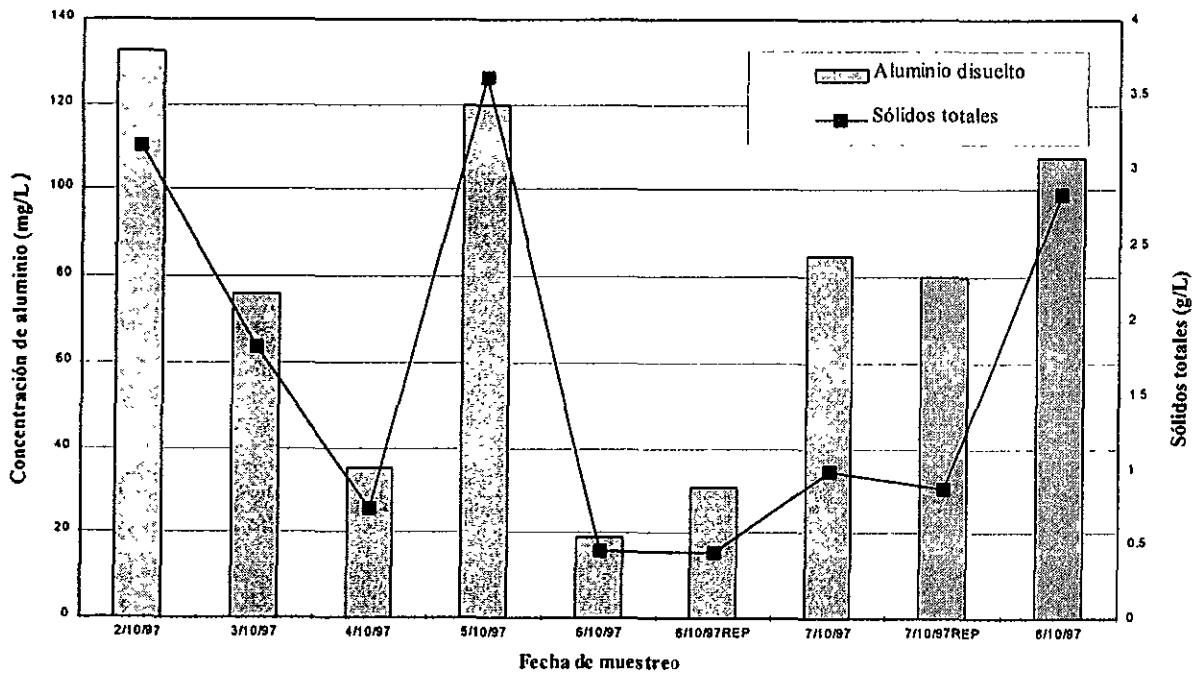
~ Parámetro no determinado

Para poder manejar y disponer un menor volumen de lodo en la planta potabilizadora, éste es sometido a un espesamiento donde el lodo producido en los módulos D, E y F se le adiciona polímero. En el lodo producido en los módulos B y C (el espesamiento se efectúa sin polímero) se obtienen intervalos de concentración de ST entre 3.554 y 22.900 mg/L (0.354 a 2.290% lodo base seca) y una concentración de aluminio de 310 a 1020 mg/L. En presencia de polímero, los ST varían entre 6.323 y 29.375 mg/L (0.632 a 2.938% lodos base seca) y una concentración de 500 a 1300 mg/L de aluminio. Con estos resultados se tienen dos observaciones: 1) el espesamiento con polímero aumenta la concentración de sólidos y 2) la concentración de aluminio presente en el lodo espesado es directamente proporcional a la concentración de los sólidos totales. En la gráfica 5.3 se presenta la primera observación y en las gráficas 5.4, 5.5 y 5.6 se comparan los resultados de la concentración del aluminio con los sólidos totales.

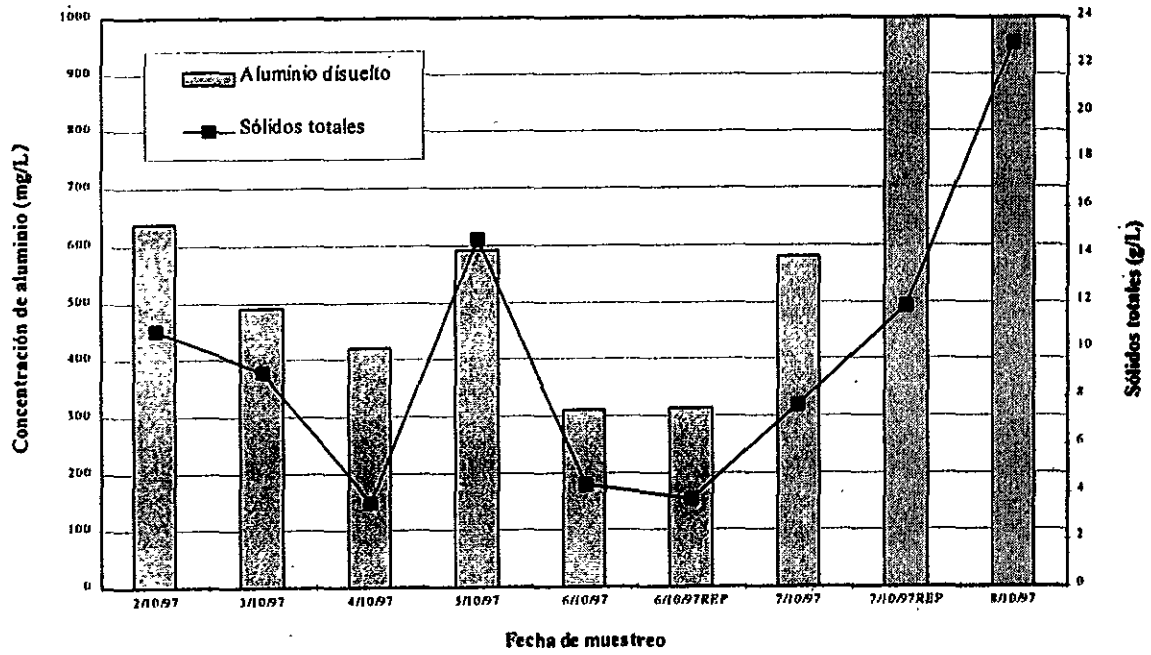
Gráfica 5.3 Comparación de sólidos en el lodo espesado con y sin polímero



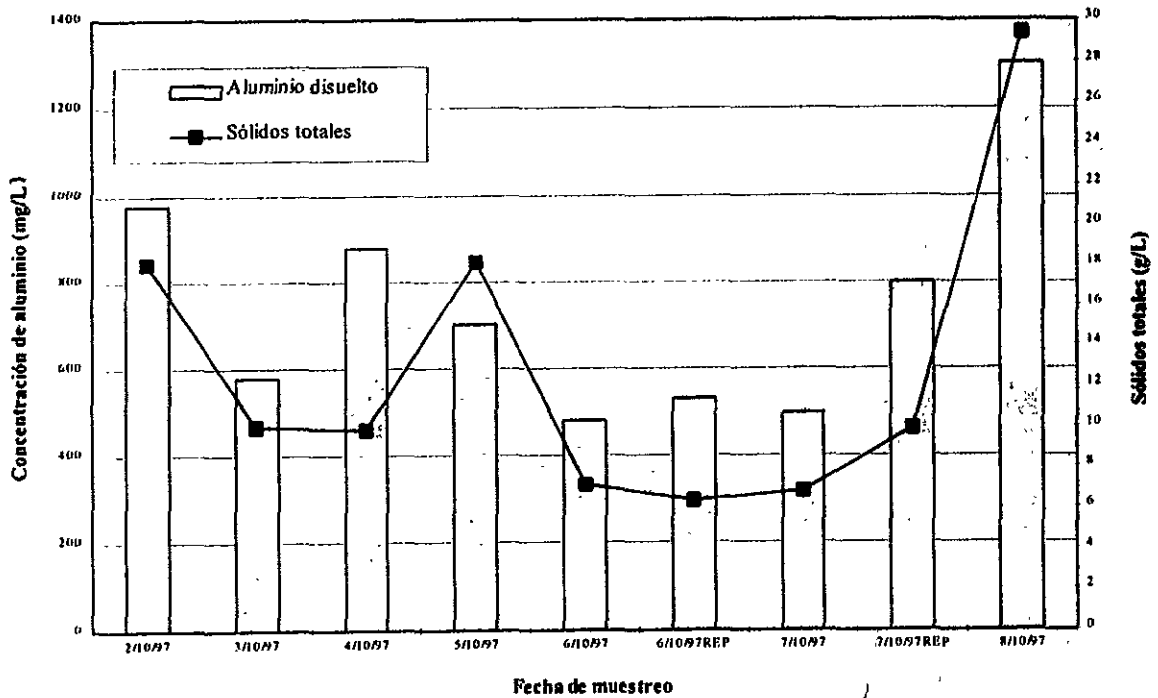
Gráfica 5.4 Correlación de aluminio y sólidos totales en el lodo homogéneo



Gráfica 5.5 Correlación de aluminio y sólidos totales en el lodo sin polímero



Gráfica 5.6 Correlación de aluminio y sólidos totales en el lodo con polímero



De la gráficas anteriores se observa que en los resultados de dos días de pruebas se obtienen concentraciones más altas de sólidos y aluminio disuelto en el lodo sin polímero. Es importante aclarar que el acondicionamiento químico que se realiza en la planta potabilizadora "Los Berros" no presenta un gradiente de mezcla adecuado para la disolución del polímero en el lodo lo que resulta que el tren de tratamiento del lodo sin y con acondicionamiento sea casi el mismo, por lo que se obtienen concentraciones similares o mayores de sólidos en el lodo espesado sin polímero y variaciones en la correlación de sólidos totales y aluminio.

### 5.3 Pruebas de tratabilidad de lodos a nivel laboratorio

#### 5.3.1 Lodo sintético

Como se mencionó en la sección 4.3.1, el lodo sintético es el que se generó a partir de agua para reproducir las condiciones de la planta. A partir de la prueba de jarras, se obtuvo 290.9 L de agua tratada (sobrenadante), a la cual se le determinaron los siguientes parámetros:

Sólidos totales	= 0.16 g/L
Aluminio disuelto	= 0.44 mg/L
Aluminio total	= 1.92 mg/L

y 10 L de lodo sintético (equivalente al que sale de los sifones). La muestra para determinar aluminio total se digirió en horno de microondas con un posterior análisis por Absorción Atómica y Hach. Los resultados fueron:

Sólidos totales	= 1.08 g/L
Aluminio total:	
Absorción Atómica	= 88.70 mg/L
Hach	= 86.53 mg/L

A continuación se presentan los resultados de la acidificación con ácido sulfúrico del lodo sintético:

Aluminio extraíble:	
Conductimetría	= 66.78 mg/L
Hach	= 50.00 mg/L
Volumen de lodo final	= 10 ml
Reducción de volumen	= 98%

Podemos observar que el valor de aluminio determinado por conductimetría es más alto, esto es debido a que otros metales demandan ácido por lo que la concentración de aluminio extraíble es sobrestimada. Por otro lado, el Espectrofotómetro Hach solo mide el aluminio presente en la muestra ya que dentro de los reactivos que se utilizan para su análisis nos ayuda a eliminar las posibles interferencias que pueden existir por la presencia de otros metales.

Posteriormente un volumen de 8.3 L de lodo se dejó espesar por media hora, los resultados obtenidos fueron:

Volumen final de lodo espesado	= 1.17 L
Sólidos totales	= 7.18 g/L
Reducción de volumen	= 85.9%

Los resultados de la acidificación del lodo espesado se muestran a continuación:

Aluminio extraíble:	
Conductimetría	= 446.25 mg/L
Hach	= 380.00 mg/L
Volumen final de lodo	= 110 ml
Reducción de volumen	= 78%

La reducción total del volumen del lodo englobando el obtenido en la sedimentación y en la acidificación, da una reducción final del 96.9%.

En la figura 5.1 se presenta el balance de aluminio total determinando éste por las técnicas de Hach y Absorción Atómica (previa digestión con  $\text{HNO}_3$ ). El balance de aluminio extraíble se llevó a cabo utilizando los resultados obtenidos de los métodos de conductimetría y Hach, los cuales se muestran en la figura 5.2. Este tipo de análisis nos indica la cantidad de aluminio total (el que contiene el agua más el que se adiciona) presente en el lodo a estudiar, del cual no todo es extraíble.

Figura 5.1 Balance de aluminio total (Absorción Atómica y Hach)

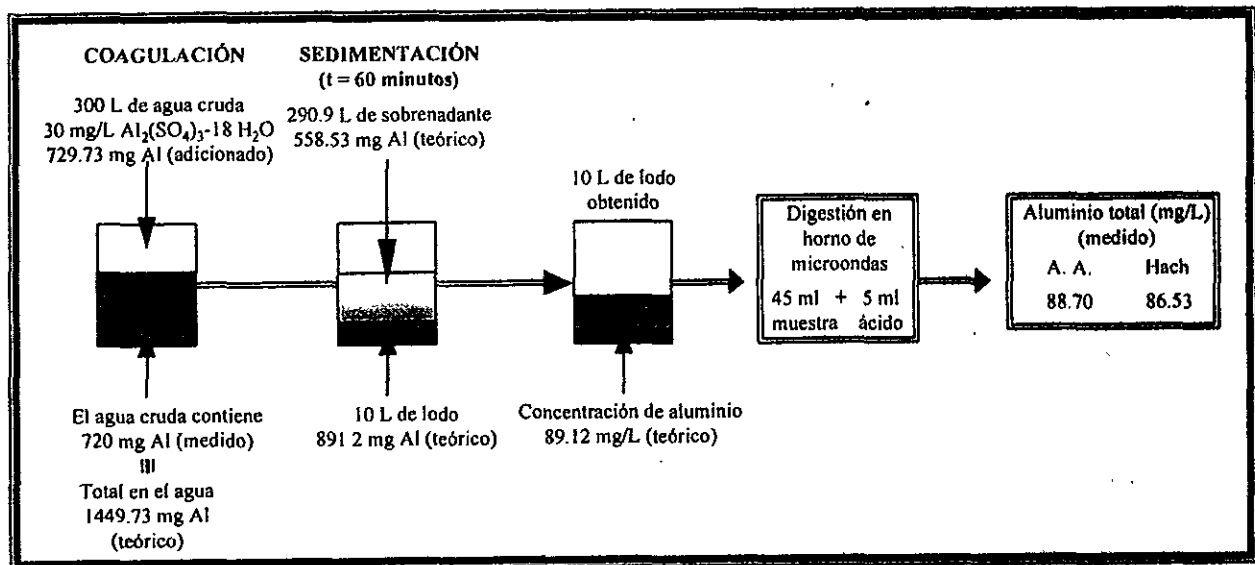
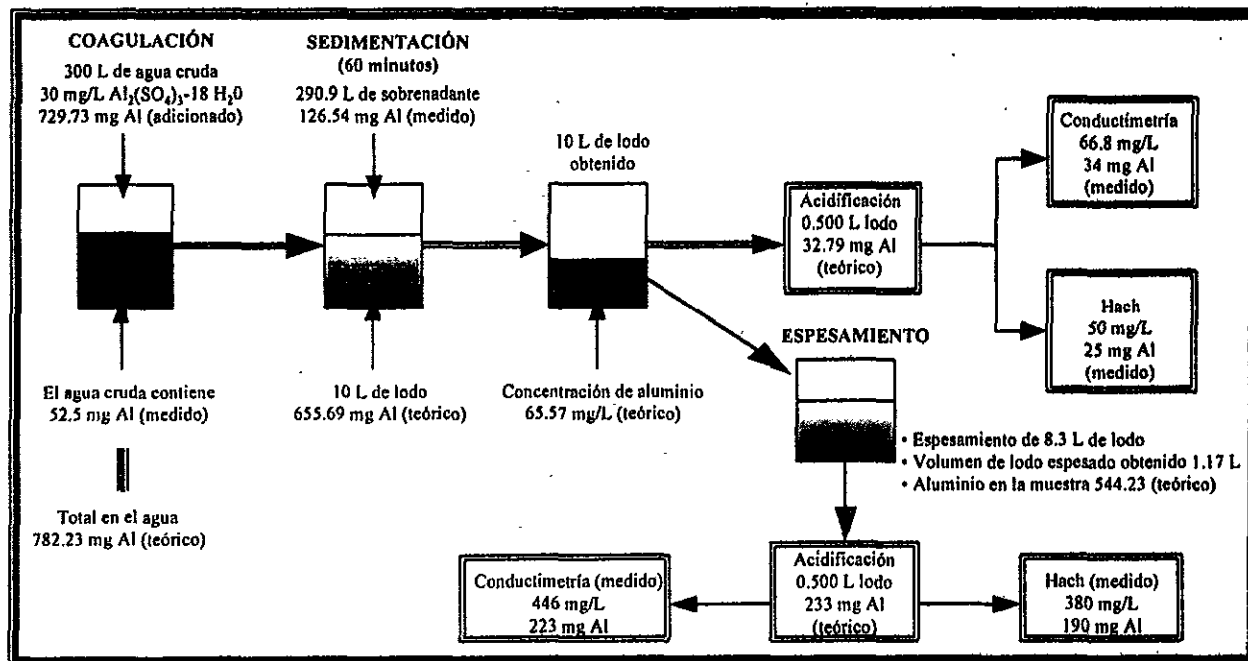


Figura 5.2 Balance de aluminio extraíble (Conductimetría y Hach)



### 5.3.2 Lodo espesado sin polímero

A continuación se presentan las características del lodo homogéneo:

Volumen de lodo	= 42.37 L
Sólidos totales	= 1.38 g/L
pH	= 7.23
Aluminio total:	
Absorción Atómica	= 119.0 mg/L
Hach	= 119.0 mg/L

Los resultados de la acidificación del lodo homogéneo se muestran a continuación:

Aluminio extraíble:	
Absorción Atómica	= 50.77 mg/L*
Hach	= 47.50 mg/L
Snyder	= 53.52 mg/L
Conductimetría	= 49.72 mg/L
Volumen de lodo final	= 4.00 ml
Reducción de volumen	= 99.2%

\* Resultado obtenido analizando la solución ácida obtenida de la técnica de Snyder

Un volumen de 19.04 L de lodo homogéneo se dejó espesar por media hora. Los resultados fueron los siguientes:

Volumen del sobrenadante = 17.86 L  
 ST del sobrenadante = 0.30 g/L  
 Volumen de lodo espesado = 1.18 L  
 ST del lodo espesado = 12.38 g/L  
 Reducción de volumen = 93.8%

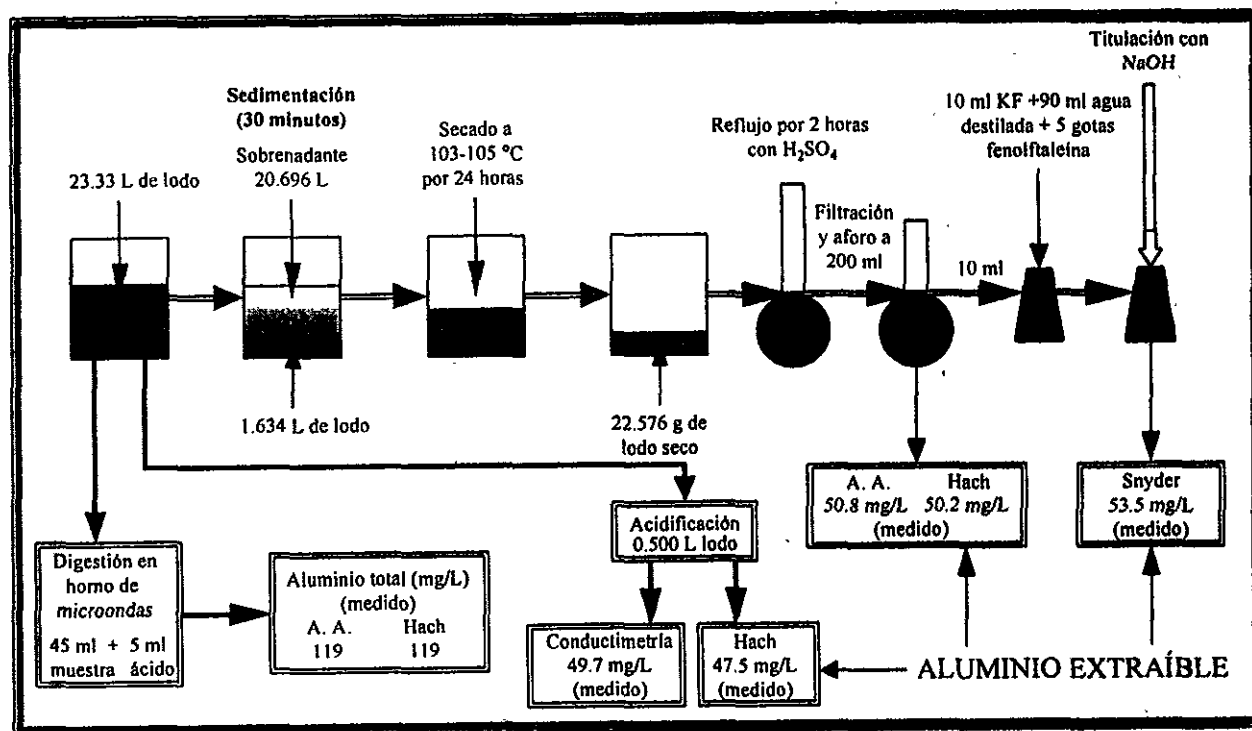
A continuación se presentan los resultados de la prueba de acidificación del lodo espesado:

Aluminio extraíble:  
 Conductimetría = 723.48 mg/L  
 Hach = 690.00 mg/L  
 Volumen de lodo acidificado = 140 ml  
 Reducción de volumen = 72%

La reducción total del volumen del lodo englobando el obtenido en el espesamiento y en la acidificación es del 98.3%.

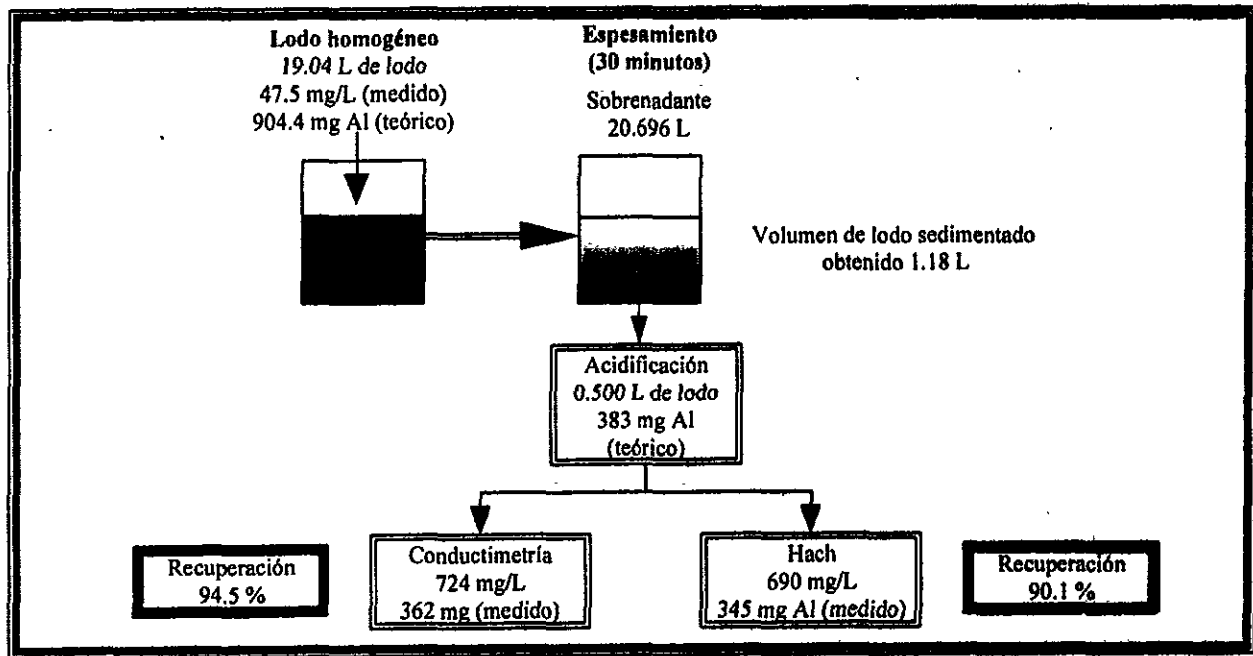
Para realizar el balance de aluminio total y extraíble de este lodo se tomaron en cuenta las características descritas anteriormente. En la figura 5.3 se presenta el cálculo del balance de aluminio extraíble obtenido mediante la técnica de Snyder, la solución ácida obtenida en este método también se analizó por Absorción Atómica y Hach.

Figura 5.3 Balance de aluminio extraíble y total



Posteriormente se realizó el balance de aluminio disponible del lodo después de su espesamiento tomando en cuenta los resultados obtenidos de las técnicas de conductimetría y Hach (ver figura 5.4).

**Figura 5.4 Balance de aluminio extraíble (Conductimetría y Hach)**



### 5.3.3 Lodo espesado con polímero

Las características del lodo homogéneo se muestran a continuación:

Sólidos totales	= 4.35 g/L
Sólidos volátiles	= 0.60 g/L
pH	= 7.00
Aluminio total:	
Absorción Atómica	= 290.60 mg/L
Hach	= 275.00 mg/L

La acidificación del lodo homogéneo presentó la siguientes características en la solución ácida:

Aluminio extraíble:	
Conductimetría	= 146.85 mg/L
Hach	= 145.00 mg/L
Hierro disuelto:	
Absorción Atómica	= 6.00 mg/L
Manganeso disuelto:	
Absorción Atómica	= 1.14 mg/L
Volumen final de lodo	= 29 ml
Reducción de volumen	= 97.1%



Se obtuvo lodo espesado con polímero producido a partir del lodo homogéneo. Las características del sobrenadante obtenido de las pruebas de jarras fueron los siguientes:

Sólidos totales	=	1.10 g/l
Sólidos volátiles	=	0.31 g/L
Aluminio disuelto	=	0.0 mg/L
Hierro total	=	< 0.05 mg/L
Hierro disuelto	=	< 0.05 mg/L
Manganeso total	=	0.26 mg/L
Manganeso disuelto	=	0.27 mg/L

y los resultados de la caracterización del lodo espesado con polímero fueron los siguientes:

Sólidos totales	=	27.08 g/L
Sólidos volátiles	=	4.63 g/L
Volumen de lodo	=	8.22 L
Reducción de volumen	=	85.6 %

Se realizó la acidificación de este lodo, los resultados de la caracterización de esta muestra se observan a continuación. Adicionalmente se realizó la determinación de aluminio extraíble por la técnica de Snyder.

Aluminio extraíble:	
Conductimetría	= 969.15 mg/L
Hach	= 940.00 mg/L
Snyder*	= 140.00 mg/L
Absorción Atómica	= 129.00 mg/L*
Volumen final de lodo	= 150 ml
Reducción de volumen	= 70%

\* Este análisis fue obtenido a partir de la solución producto del reflujo.

La reducción total del volumen del lodo englobando el obtenido en el espesamiento y en la acidificación es del 95.7%.

Para el balance de aluminio extraíble y total del lodo espesado con polímero, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos de las técnicas de Snyder, Hach y Absorción Atómica (ver figura 5.5). En la figura 5.6 se presenta el balance de aluminio extraíble del lodo espesado con polímero. El porcentaje de recuperación del aluminio extraíble se realizó a partir del aluminio teórico de la muestra y de los resultados del análisis por conductimetría y Hach. En la tabla 5.6 se puede observar un resumen de los resultados de las tres pruebas de tratabilidad.

Figura 5.5 Balance de aluminio extraíble y total

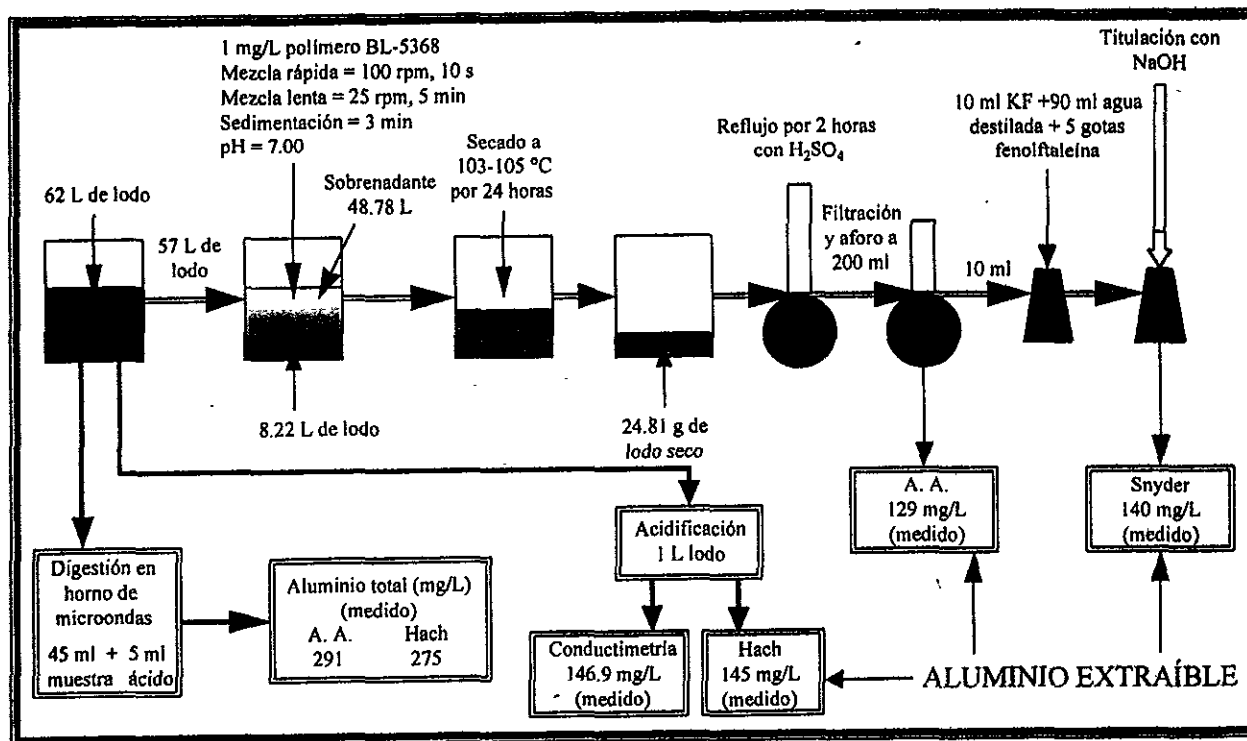
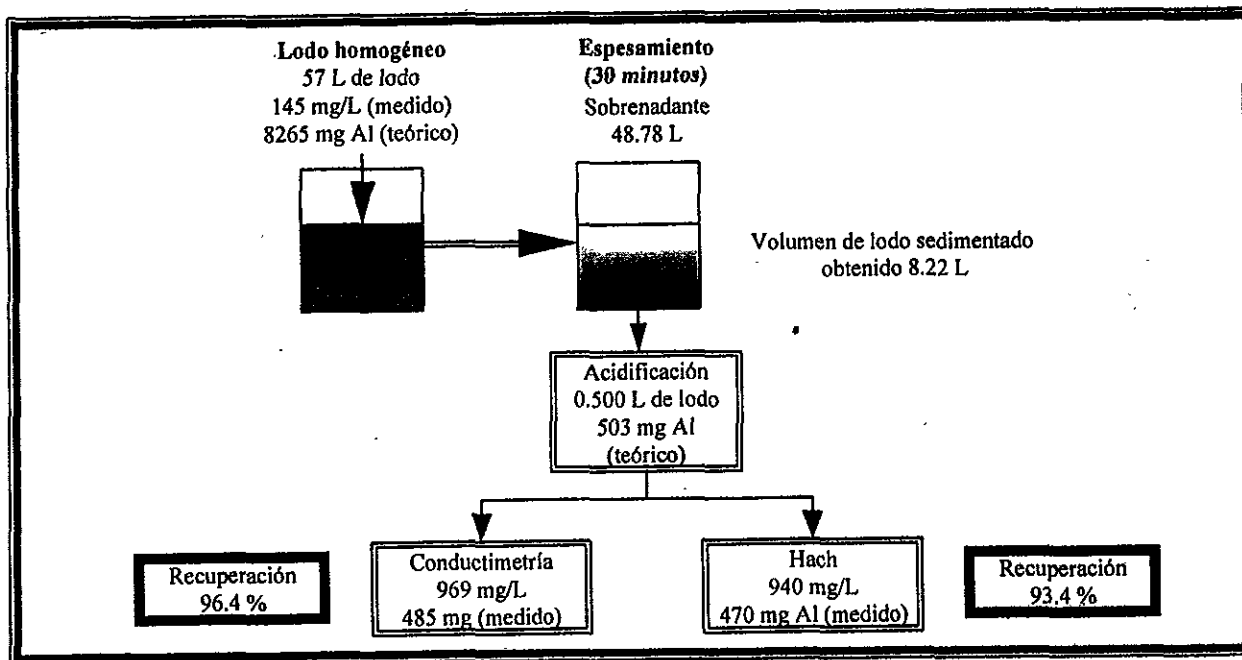


Figura 5.6 Balance de aluminio extraíble (Conductimetría y Hach)



De los resultados anteriores se observa que la recuperación de aluminio por conductimetría es por lo general mayor a la obtenida por el Espectrofotómetro Hach. Sin embargo, por las dos técnicas se obtienen recuperaciones mayores al 80%.

## 5.4 Parámetros de control

Tomando como base los resultados de recuperación de aluminio de las tres pruebas anteriores (tabla 5.6) se procederá a establecer los siguientes parámetros de control: dosis de ácido sulfúrico, pH final de la solución y condiciones de mezcla (tiempo de contacto).

**Tabla 5.6** Ácido sulfúrico y pH requerido en la recuperación de aluminio

Prueba	pH	ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> gastados	ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> cambio	Al (mg/L)		Vol. lodo utilizado	Vol. lodo final	g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /L lodo	kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /kg Al recuperado
		2.15 M		Cond.	Hach	ml			
<b>Lodo homogéneo</b>									
22/08/97	3.50	2.80	0.86	66.8	50.0	500	10.0	0.3624	7.2481
26/08/97	3.50	3.40	0.58	44.8	40.0	500	~	0.2444	6.1103
27/08/97	3.93	4.50	0.64	49.7	47.5	500	4.0	0.2697	5.6778
02/09/97	3.18	3.00	0.56	43.1	42.5	500	9.0	0.2360	5.5526
02/09/97 DUP	3.84	3.10	0.49	38.1	37.5	500	9.0	0.2065	5.5063
09/09/97	3.31	13.00	3.79	146.9	145.0	1000	31.0	0.7986	5.5073
09/09/97 DUP	3.28	9.00	3.55	137.5	135.0	1000	30.0	0.7480	5.5406
09/09/97 TRIP	3.31	9.00	3.38	131.0	130.0	1000	28.0	0.7122	5.4782
15/09/97	3.39	8.50	2.90	112.2	120.0	1000	30.0	0.6110	5.0919
15/09/97 DUP	3.43	8.50	2.48	96.0	102.5	1000	33.0	0.5225	5.0979
24/09/97	3.78	6.75	1.95	75.5	90.0	1000	33.0	0.4109	4.5652
24/09/97 DUP	3.73	6.70	1.99	76.9	90.0	1000	31.5	0.4193	4.6588
<b>Lodo espesado sin polímero</b>									
22/08/97	3.25	8.50	5.77	446.2	380.0	500	110	2.4315	6.3986
26/08/97	2.94	13.00	9.36	723.5	690.0	500	140	3.9443	5.7164
02/09/97	2.68	13.50	9.92	767.6	720.0	500	186	4.1803	5.8060
02/09/97 DUP	2.83	14.50	10.74	831.0	730.0	500	220	4.5258	6.1998
04/09/97	3.41	12.50	6.80	526.0	~	500	105	2.8655	~
15/09/97	2.94	14.00	9.89	765.8	670.0	500	99	4.1676	6.2204
15/09/97	3.04	15.00	9.79	757.8	670.0	500	100	4.1255	6.1575
24/09/97	3.05	11.50	7.95	615.1	600.0	500	115	3.3501	5.5836
24/09/97 DUP	3.22	16.00	8.37	648.0	720.0	500	~	3.5271	4.8988
<b>Lodo espesado con polímero</b>									
11/09/97	2.75	16.50	12.84	994.0	940.0	500	128	5.4108	5.7561
11/09/97 DUP	3.19	21.50	12.37	957.7	900.0	500	150	5.2127	5.7919

A continuación se muestran los resultados que se obtienen en estos parámetros.

### 5.4.1 Dosis de ácido sulfúrico

De la tabla 5.6 se observa que cuando se acidifica el lodo homogéneo se requiere un volumen promedio de 6.52 ml de ácido sulfúrico diluido para extraer el aluminio presente en el lodo y para el lodo espesado se gasta como promedio 13.17 ml. Por lo anterior, se hace necesario utilizar ácido concentrado para la recuperación del aluminio ya que de esta manera solo se gastaría 1.93 y 8.73 ml para el lodo homogéneo y espesado respectivamente.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

De lo anterior se podría concluir que sería mejor utilizar el lodo homogéneo para realizar las pruebas de recuperación de aluminio ya que se gastaría menor dosis de ácido ya sea diluido o concentrado, sin embargo, la desventaja que presenta es que se extrae una menor cantidad de aluminio (40 a 145 mg/L), debido a esto será recomendable hacer las pruebas con lodo espesado para la recuperación de aluminio ya que se trabajará con un menor volumen de agua y se estaría extrayendo una mayor concentración de aluminio disuelto (380 a 730 mg/L), estos resultados son específicos para estas pruebas en particular.

Además, se observó que esta prueba tarda alrededor de 1 a 1.5 horas, lo que podría hacerla tediosa si se realizara a nivel planta, por lo tanto, sólo se recomienda efectuarla a nivel laboratorio para conocer la dosis de ácido, y en planta agregar el ácido en forma concentrada. Esto favorece a la solución obtenida, ya que contendrá menos cantidad de agua y por lo tanto será más concentrada en aluminio; además, la calidad del coagulante recuperado será relativamente más alta debido a que el tiempo de contacto con el  $H_2SO_4$  concentrado es menor.

A los dos tipos de lodos se les determinó la media aritmética en relación a su demanda de ácido, los resultados fueron los siguientes:

Tipo de lodo	$\bar{X}$
Lodo homogéneo	5.50 kg/kg Al recuperado
Lodo espesado sin polímero	5.87 kg/kg Al recuperado

Se observa que el lodo homogéneo es el que presenta la menor demanda de ácido en comparación con el lodo espesado que presenta una demanda cercana a 6 kg/kg Al recuperado. Como se trabajará con lodos espesados es conveniente fijar la demanda de ácido dentro de un intervalo de 5.5 a 6.4 kg/kg Al recuperado.

#### 5.4.2 pH final de la solución

A los dos tipos de lodos nuevamente se les determinó la media aritmética ( $\bar{X}$ ) con respecto al pH, los resultados fueron los siguientes:

Tipo de lodo	$\bar{X}$
Lodo homogéneo	3.52
Lodo espesado sin polímero	3.04

Como se puede observar, el lodo homogéneo es el que presenta el pH más alto al cual se disuelve el aluminio disuelto, en comparación con el lodo espesado que presenta un pH final aproximado de 3, esto nos indica que no es necesario llegar a un pH de 2 para disolver todo el aluminio presente en el lodo. Por otro lado, no se puede obtener el promedio del lodo con polímero ya que sólo se tienen dos datos.

Por lo anterior, se puede establecer que para acidificar un lodo espesado será conveniente llevar la solución a un pH dentro el intervalo de 2.7 a 3.4 unidades de acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 5.6, bajo el cual se podrá maximizar la disolución del aluminio disponible en el lodo.

### 5.4.3 Condiciones de mezcla (tiempo de contacto)

Anteriormente se mencionó que se requiere trabajar con  $H_2SO_4$  concentrado para extraer el aluminio, para esto es necesario conocer el tiempo de contacto óptimo para la extracción y además que este tiempo no se prolongue hasta una hora ya que sería un tiempo muy largo para hacerlo a escala completa. Se realizaron tres pruebas para conocer el tiempo de contacto óptimo.

#### a) Primera prueba

En esta prueba se trabajó con dos tiempos de contacto. A continuación se presentan los resultados de esta prueba.

**Tabla 5.7** Tiempo de contacto utilizado en el lodo espesado sin polímero

Tiempo de contacto (min)	pH	Dosis de $H_2SO_4$ ml	Volumen de lodo obtenido (ml)	Tiempo (min:seg)	Aluminio (mg/L)	
					Hach	%Recuperación
5	2.98	1.20	156.0	4:45	450	67.2
10	3.17	1.20	136.5	10:13	590	88.1

Un tiempo de contacto de 10 minutos proporciona una mayor extracción de aluminio y se obtiene un menor volumen de lodos, esto último es deseable para manejar volúmenes de lodo menores para su disposición. Además, el pH final se encontró dentro del intervalo establecido en la sección 5.4.2.

#### b) Segunda prueba

En esta prueba se extendió el tiempo de contacto. Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 5.8** Tiempo de contacto utilizado en el lodo espesado con polímero

Tiempo de contacto (min)	pH	Dosis de $H_2SO_4$ ml	Volumen de lodo obtenido (ml)	Tiempo (min:seg)	Aluminio (mg/L)	
					Hach	%Recuperación
6.5	2.51	1.52	~	6:30	760	84.0
10	2.61	1.52	182	10:01	820	90.6
15.5	2.58	1.52	152	15:38	820	90.6
20	2.75	1.52	163	20:05	800	88.4

Esta prueba confirma los resultados de la anterior, un tiempo de contacto de 10 minutos resulta en una mayor extracción de aluminio aunque la desventaja es que se obtiene un mayor volumen de lodos. El incrementar el tiempo a 15 o 20 minutos no repercute en un mayor porcentaje de extracción, sin embargo si disminuye el volumen de lodos.

### 3) Tercera prueba

En esta prueba se fijó un tiempo de contacto de 15 minutos, la diferencia es que la aplicación del ácido sulfúrico concentrado se lleva a cabo a diferentes intervalos de tiempo hasta llegar al tiempo fijado. Los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 5.9** Tiempo de contacto utilizado en el lodo espesado sin polímero

Tiempo de contacto (min)	Dosis de $H_2SO_4$	No. Dosis	Volumen de lodo obtenido (ml)	Al (mg/L)	% Rec.	pH final
1.0	1.05	10	123	570	91.9	2.80
2.0	1.05	5	142	560	90.3	2.96
2.5	1.05	4	134	540	87.1	2.93
5.0	1.05	3	134	530	85.5	2.83

Estos resultados no fueron satisfactorios, debido a que el porcentaje de extracción fue muy similar a los obtenidos en las pruebas anteriores. Por lo tanto, se concluye que la recuperación de aluminio no aumenta al agregar el ácido a diferentes intervalos de tiempo, ya que se obtienen los mismos porcentajes adicionando  $H_2SO_4$  en un tiempo de contacto determinado hasta un pH dado.

Resumiendo los resultados, los parámetros de control son:

- Dosis de  $H_2SO_4$  concentrado = 5.5 a 6.4 kg/kg Al recuperado
- pH final de la solución = 2.7 a 3.4 unidades
- Tiempo de contacto = 10 minutos

Con estos parámetros se puede reducir el volumen del lodo homogéneo en un 97% y extraer hasta un 90% el aluminio que contiene el lodo espesado con y sin polímero.

## 5.5 Pruebas de laboratorio en la planta potabilizadora "Los Berros"

### 5.5.1 Parámetros de control

En la sección 5.4 se establecieron los parámetros de control para la recuperación del aluminio obtenidos a partir de lodo sintético y provenientes de la planta potabilizadora. En esta sección se realiza la verificación de estos parámetros llevando a cabo las pruebas de acidificación con lodo homogéneo y acondicionado obtenidos directamente de la planta y realizando las pruebas el mismo día del muestreo.

Tomando como base los resultados de recuperación de aluminio presentados en la tabla 5.10 se realizó la verificación de los siguientes parámetros de control establecidos:

- Dosis de ácido sulfúrico
- pH final de la solución
- Condiciones de mezcla (tiempo de contacto)

Tabla 5.10 Ácido sulfúrico y pH requeridos en la recuperación de aluminio

Prueba	pH <sub>i</sub>	pH <sub>f</sub>	pH <sub>cambio</sub>	ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> gastados	ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> cambio	Al (mg/L)		g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /L lodo	kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> / kg Al recuperado
						Cond.	Hach		
<b>Lodo homogéneo</b>									
2/10/97	6.90	2.04	3.75	13.0	3.37	124.0	132.5	0.6747	5.0922
3/10/97	6.55	2.03	3.64	6.5	2.10	77.2	76.0	0.4204	5.5322
4/10/97	6.75	2.00	3.72	5.5	1.17	42.8	35.3	0.2343	6.6360
5/10/97	6.89	2.03	3.58	13.5	3.31	121.7	120.0	0.6627	5.5226
5/10/97DUP	6.85	2.03	3.51	6.0	1.90	139.4	145.0	0.7608	5.2470
6/10/97	7.34	2.03	3.72	3.5	0.62	22.6	19.0	0.1241	6.5333
6/10/98REP	7.14	2.06	4.20	7.5	0.86	31.5	31.0	0.1722	5.5543
7/10/97	6.95	2.00	3.40	7.0	2.43	89.5	85.0	0.4865	5.7238
7/10/97REP	6.81	2.05	3.77	7.5	1.97	72.6	80.0	0.3958	4.9472
8/10/97	6.63	2.01	3.17	6.5	2.95	109.0	107.5	0.5927	5.5131
<b>Lodo espesado sin polímero</b>									
2/10/97	6.48	2.00	3.18	15.0	8.85	651.0	640.0	3.5438	5.5372
2/10/97DUP	6.38	1.99	2.83	11.5	8.60	632.7	630.0	3.4437	5.4662
3/10/97	6.79	2.02	3.00	9.5	6.74	495.8	490.0	2.6989	5.5079
4/10/97	6.51	1.99	3.01	8.5	6.08	447.2	420.0	2.4346	5.7967
5/10/97	7.01	2.04	3.17	14.0	8.19	602.1	590.0	3.2795	5.5585
6/10/97	7.36	2.01	3.52	6.0	3.90	286.6	300.0	1.5617	5.2056
6/10/98DUP	7.12	2.07	3.26	5.5	3.95	290.6	310.0	1.5817	5.1022
6/10/97REP	7.05	2.04	3.33	8.0	4.31	316.9	315.0	1.7258	5.4789
7/10/97	6.99	2.02	3.12	11.0	7.92	582.2	580.0	3.1714	5.4679
7/10/97REP	7.00	2.05	3.09	19.5	12.81	945.2	1000.0	5.1471	5.1471
7/10/97RD	6.70	2.00	3.03	15.6	12.38	913.3	900.0	4.9743	5.5270
8/10/97	6.68	2.06	2.71	17.5	14.52	1071.3	1000.0	5.8341	5.8341
<b>Lodo espesado con polímero</b>									
2/10/97	7.03	2.06	3.00	20.0	14.04	1032.7	980	5.6220	5.7367
3/10/97	6.65	2.00	2.95	11.5	8.06	593.1	580	3.2274	5.5646
4/10/97	6.60	1.99	2.94	16.0	12.74	937.0	880	5.1015	5.7971
5/10/97	7.04	2.02	3.05	17.0	10.17	747.7	700	4.0724	5.8176
6/10/97	7.26	2.03	3.13	8.7	6.55	481.7	480	2.6228	5.4642
6/10/97DUP	7.17	2.06	3.02	9.0	6.58	484.0	480	2.6348	5.4892
6/10/98REP	7.02	2.05	3.26	11.3	7.01	515.8	530	2.8070	5.2962
7/10/97	7.04	2.04	3.10	9.5	6.91	508.3	500	2.7670	5.5339
7/10/97REP	7.26	2.02	2.87	11.5	7.42	782.8	800	4.2591	5.3239
8/10/97	6.86	2.06	2.70	22.0	18.29	1349.6	1300	7.3489	5.6530

NOTA: En las pruebas del 2/10/97 al 7/10/97 se utilizó ácido a una concentración de 2.043 M y en el resto de las pruebas se utilizó una concentración de 2.05 M.

### 5.5.1.1 Dosis de ácido sulfúrico

Para la acidificación del lodo homogéneo se requiere un volumen promedio de 7.65 ml de ácido sulfúrico diluido para extraer el aluminio presente en el lodo y para el lodo espesado sin y con polímero se gastan como promedio 11.80 y 13.65 ml de ácido respectivamente. Estos resultados confirman el hecho de que es necesario utilizar ácido concentrado para la recuperación del

aluminio ya que de esta manera se gastaría 8.19 y 9.78 ml para el lodo espesado sin y con polímero respectivamente.

De la tabla 5.10 se observa que al hacer las pruebas con el lodo homogéneo se recupera una menor cantidad de aluminio (19 a 145 mg/L en estas pruebas), mientras que si se trabaja con lodo espesado se extrae aluminio en un intervalo de concentración de 300 a 1300 mg/L.

A los tres tipos de lodos se les determinó la media aritmética de la muestra en relación a la demanda de ácido. A continuación se muestra una comparación con las pruebas de laboratorio.

Tipo de lodo	$\bar{X}$	
	Laboratorio	Planta
Lodo homogéneo	5.50 kg/kg Al recuperado	5.63 kg/kg Al recuperado
Lodo espesado sin polímero	5.87 kg/kg Al recuperado	5.47 kg/kg Al recuperado
Lodo espesado con polímero	~	5.57 kg/kg Al recuperado

A diferencia de los resultados obtenidos en el laboratorio, en esta ocasión el lodo homogéneo presentó una mayor demanda de ácido, en comparación con los dos lodos espesados. Esto significa que se estarían gastando cantidades de ácido similares en los tres tipos de lodos, aunque la ventaja del lodo espesado es que se estaría obteniendo una mayor concentración de aluminio. La dosis de ácido sulfúrico para el lodo espesado se encuentra en el intervalo de 5.1 y 5.8 kg/kg Al recuperado.

Es importante hacer notar que para la disolución del aluminio en el lodo acondicionado con polímero se requiere mayor volumen de ácido sulfúrico concentrado debido a que existe una mayor concentración de sólidos.

#### 5.5.1.2 pH final de la solución

Se determinó la media aritmética de los datos de pH a los tres tipos de lodos. A continuación se muestra una comparación con las pruebas de laboratorio.

Tipo de lodo	$\bar{X}$	
	Laboratorio	Planta
Lodo homogéneo	3.52	3.65
Lodo espesado sin polímero	3.04	3.10
Lodo espesado con polímero	~	3.00

El lodo homogéneo nuevamente presentó un pH más alto al cual se disuelve el aluminio extraíble, en comparación con los lodos espesados que presentan un pH final de aproximadamente tres unidades. Al igual que en las pruebas realizadas en el laboratorio, también se observa que no es necesario llegar a un pH de 2 para la extracción del aluminio. Por lo anterior se establece un intervalo de trabajo de pH de 2.7 a 3.5 unidades para lodo espesado con y sin polímero.



### 5.5.1.3 Condiciones de mezcla (tiempo de contacto)

Una vez establecido dosis de ácido sulfúrico y el pH de operación, se procedió a comprobar el tiempo de contacto de 10 minutos utilizando ácido sulfúrico concentrado.

Esta prueba se realizó utilizando lodo espesado con y sin polímero, de los cuales en la tabla 5.11 se muestra su contenido de aluminio, así como el porcentaje de recuperación.

**Tabla 5.11** Recuperación de aluminio con un tiempo de contacto de 10 minutos

Fecha de muestreo	Lodo espesado sin polímero					Lodo espesado con polímero				
	ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc./L <sub>lodo</sub>	Aluminio mg/L			pH final	ml H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc./L <sub>lodo</sub>	Aluminio mg/L			pH final
		Muestra	Rec.	% Rec.			Muestra	Rec.	% Rec.	
2/10/97	2.0388	640	550	85.94	3.06	3.2341	980	820	83.67	2.70
3/10/97	1.5528	490	390	79.59	3.34	1.8575	580	530	91.38	3.06
4/10/97	1.4006	420	410	97.62	2.53	2.9343	880	820	93.18	2.77
5/10/97	1.8856	590	500	84.75	3.37	2.3417	700	600	85.71	3.17
6/10/97DUP	0.9100	310	290	93.55	2.88	1.5157	480	480	100.00	2.72
6/10/97 REP	0.9923	315	285	90.48	3.80	1.6154	530	500	94.34	3.69
7/10/97	1.8232	580	540	93.10	3.72	1.5918	500	470	94.00	3.70
7/10/97 RD	2.8603	900	820	91.11	3.27	2.4515	800	760	95.00	2.36
8/10/97	3.3550	1000	980	98.00	2.99	4.2266	1300	1340	103.08	2.90
<b>PROMEDIO</b>				90.46	3.22				93.37	3.01

De estos resultados se observa que un tiempo de contacto de 10 minutos proporciona recuperaciones de aluminio del 90% para el lodo espesado sin polímero y del 93% para el lodo con polímero y el pH final promedio del lodo sin y con polímero fue de 3.22 y 3.01 respectivamente, los cuales prácticamente están dentro del intervalo establecido en el punto anterior (2.7 a 3.5 unidades).

Resumiendo los resultados, los parámetros de control fueron:

- Dosis de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado = 5.1 a 5.8 kg/kg Al recuperado
- pH final de la solución = 2.7 a 3.5 unidades
- Tiempo de contacto = 10 minutos

Comparando estos valores con los establecidos en el laboratorio se aprecia una reducción en el intervalo de operación de la demanda de ácido, manteniéndose el pH y el tiempo de contacto. Por lo anterior, se concluye que las condiciones de operación mejoraron, ratificando así que con estos parámetros se puede extraer hasta un 90% del aluminio presente en un lodo espesado con y sin polímero.

## 5.6 Evaluación de la recuperación del aluminio y reducción del volumen de lodos

## 5.6.1 Recuperación de aluminio

En la tabla 5.12 se observan los resultados de recuperación de aluminio obtenidos en las nueve pruebas realizadas en la planta potabilizadora "Los Berros". También se incluyen las determinaciones de aluminio disuelto y total del agua cruda que entra al sistema de potabilización, para poder establecer si existe un aporte de este elemento al mismo y se muestran los sólidos volátiles y totales del agua cruda y de los diferentes tipos de lodos. Es conveniente recordar que los resultados de porcentaje de recuperación de aluminio citados en esta tabla, toman como base la acidificación con ácido diluido.

Tabla 5.12 Concentración de aluminio y sólidos en el agua cruda y en el lodo

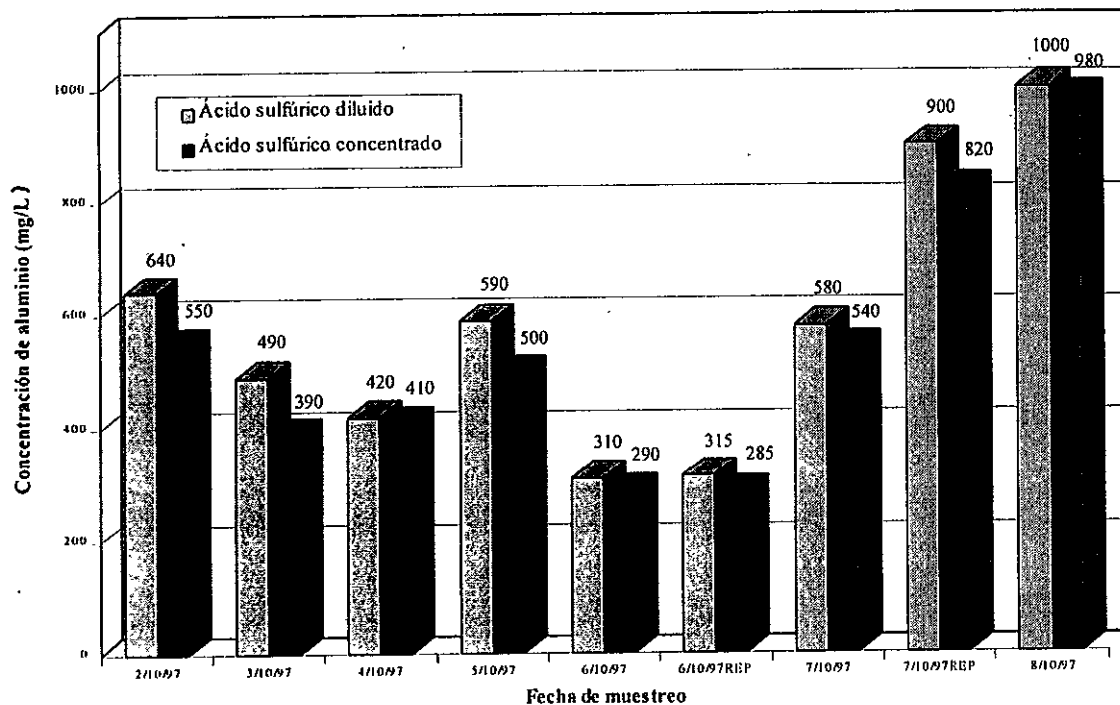
	g/L		Aluminio (mg/L)						
			Acidif. Diluida		Acidif. Conc.		Disuelto	Total	
	ST	SVT	Cond.	Hach	Hach	%Rec.	Hach	Hach	A.A.
<b>2/10/97</b>									
Agua cruda	0.365	~					4.40		17.60
Lodo homogéneo	3.150	~	124.0	132.5				302.5	276.7
Lodo sed. s/p	10.848	~	632.7	640.0	550.0	85.9			
Lodo sed. c/p	18.098	~	1032.7	980.0	820.0	83.7			
<b>3/10/97</b>									
Agua cruda	0.263	0.053					2.20		10.07
Lodo homogéneo	1.815	0.333	77.2	76.0				173.3	163.9
Lodo sed. s/p	9.043	1.978	495.8	490.0	390.0	79.6			
Lodo sed. c/p	9.980	2.228	593.1	580.0	530.0	91.4			
<b>4/10/97</b>									
Agua cruda	0.208	0.050					0.43		2.04
Lodo homogéneo	0.736	0.150	42.8	35.3				49.5	54.6
Lodo sed. s/p	3.554	0.695	447.2	420.0	410.0	97.6			
Lodo sed. c/p	9.814	1.898	937.0	880.0	820.0	93.2			
<b>5/10/97</b>									
Agua cruda	0.373	0.038					1.50		18.21
Lodo homogéneo	3.610	0.588	121.7	120.0				286.0	298.7
Lodo sed. s/p	14.658	2.430	602.1	590.0	500.0	84.7			
Lodo sed. c/p	18.148	3.125	747.7	700.0	600.0	85.7			
<b>6/10/97</b>									
Agua cruda	0.151	0.046					0.08		<1.00
Lodo homogéneo	0.444	0.116	22.6	19.0				26.4	31.1
Lodo sed. s/p	4.301	1.180	286.6	310.0	305.0	93.5			
Lodo sed. c/p	7.113	1.798	481.7	480.0	500.0	100.0			
<b>6/10/97 REP</b>									
Agua cruda	0.160	0.030					0.07		<1.00
Lodo homogéneo	0.440	0.114	31.5	31.0				24.2	29.8
Lodo sed. s/p	3.688	0.934	316.9	315.0	295.0	90.5			
Lodo sed. c/p	6.323	1.806	515.8	530.0	510.0	94.3			

7/10/97									
Agua cruda	0.186	0.054					0.36		1.60
Lodo homogéneo	0.994	0.263	89.5	85.0				79.2	82.5
Lodo sed. s/p	7.674	1.580	582.2	580.0	550.0	93.1			
Lodo sed. c/p	6.764	1.530	508.3	500.0	480.0	94.0			
7/10/97 REP									
Agua cruda	0.0375	0.000					~		~
Lodo homogéneo	0.875	0.325	72.6	80.0				~	~
Lodo sed. s/p	11.800	2.525	945.2	900.0	860.0	91.1			
Lodo sed. c/p	9.900	1.950	782.8	800.0	780.0	95.0			
8/10/97									
Agua cruda	0.575	0.275					~		18.65
Lodo homogéneo	2.825	2.150	109.0	107.5				255.8	265.7
Lodo sed. s/p	22.900	1.725	1071.3	1000.0	980.0	98.0			
Lodo sed. c/p	29.375	2.750	1349.6	1300.0	1340.0	103.1			

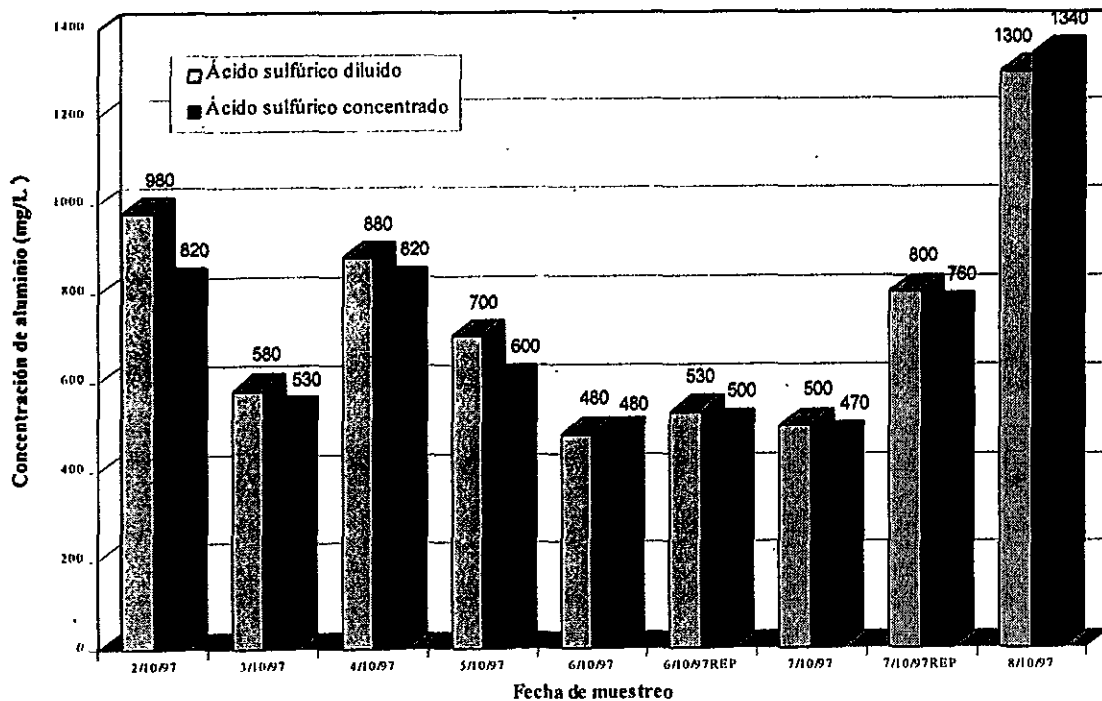
NOTA: En las pruebas del 2/10/97 al 7/10/97 se utilizó ácido a una concentración de 2.043 M y en el resto de las pruebas se utilizó una concentración de 2.05 M.

Al comparar las determinaciones de aluminio de la tabla 5.12 se obtienen las gráficas 5.7 y 5.8 las cuales muestran las concentraciones de aluminio (medidas por Hach) de la acidificación diluida y concentrada y para el lodo espesado con y sin polímero, para así evaluar los porcentajes de recuperación (ver gráfica 5.9).

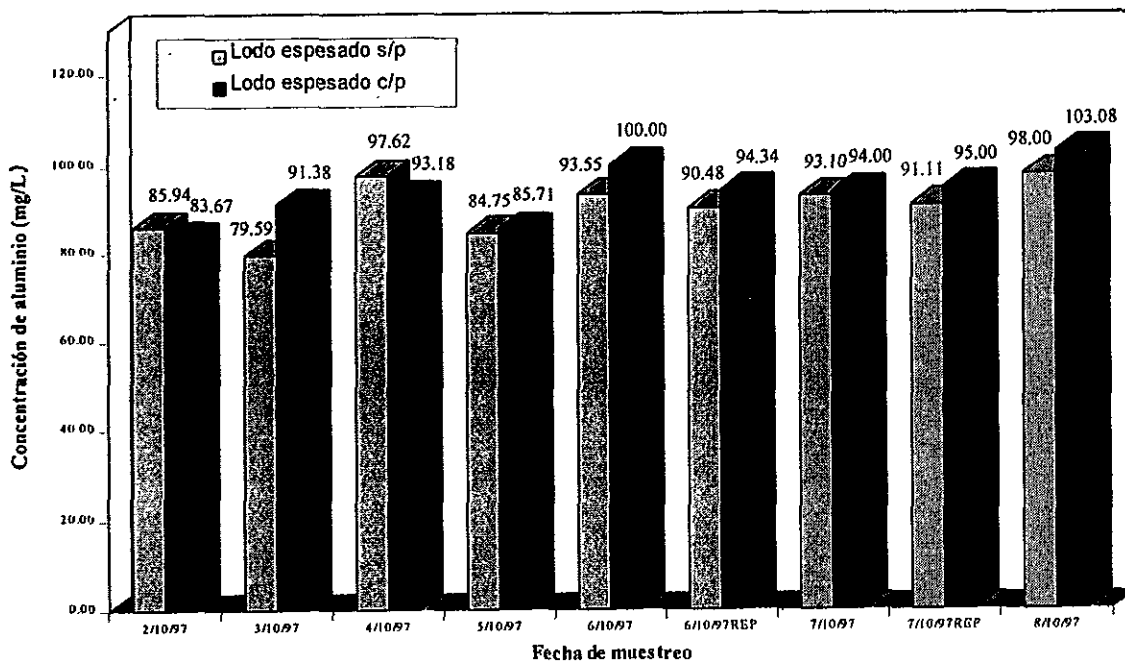
Gráfica 5.7 Recuperación de aluminio en el lodo espesado sin polímero



Gráfica 5.8 Recuperación de aluminio en el lodo espesado con polímero



Gráfica 5.9 Porcentajes de recuperación de aluminio en el lodo con y sin polímero



De las gráficas anteriores se concluye lo siguiente:

- a) La concentración de aluminio en la solución ácida diluida y concentrada de lodo sin polímero en promedio fue de 583 y 529 mg/L respectivamente, con un porcentaje de recuperación del 90.46% en promedio.
- b) La concentración de aluminio en la solución ácida diluida y concentrada de lodo con polímero en promedio fue de 750 y 702 mg/L respectivamente, con un porcentaje de recuperación del 93.37% en promedio.
- c) La concentración de aluminio en la solución ácida concentrada es mayor en un 25% cuando se utiliza acondicionamiento con polímero, debido a que éste ayuda a obtener un lodo más espeso y por consiguiente más concentrado en sólidos y demás constituyentes.

Es importante mencionar que no existe mucha diferencia en los resultados obtenidos de aluminio cuando se utiliza ácido sulfúrico diluido y concentrado, esto es muy bueno ya que cuando se trabaje a escala completa con ácido concentrado estaríamos extrayendo un alto porcentaje de recuperación de aluminio.

A continuación se presenta un ejemplo del balance general de aluminio en el sistema de tratamiento, en el que se tomó como referencia el gasto de agua tratada de la planta y la dosis de coagulante adicionado.

- a) Se analizó el aluminio disuelto en el agua cruda y en el agua tratada, se calculó el aportado por el sulfato de aluminio (48 mg/L) y se determinó cual es la concentración retenida en el sistema. Se tomó como ejemplo los resultados del día 2/10/97. Las características del agua fueron:

Agua cruda	= 4.4 mg/L Al
Agua tratada	= 0.08 mg/L Al (promedio de tres determinaciones)
Sulfato de aluminio	= 4.36 mg/L Al

El aluminio total en el sistema es:

$$4.4 + 4.36 - 0.08 = 8.68 \text{ mg/L}$$

- b) Se realizó un cálculo por módulo en la planta de tratamiento, debido a que cada uno de ellos opera con diferente flujo. Se considera que cada módulo genera 200 L/s de lodo homogéneo y el flujo de agua es de 3.4 y 3.1 m<sup>3</sup>/s, en los módulos B y C respectivamente (datos proporcionados por el personal de operación de la planta).

Modulo B:  $8.68 \text{ mg Al/L} * 3.4 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ L/1 m}^3 = 29,512 \text{ mg Al/s}$

$$29,512 \text{ mg Al/s} / 200 \text{ L/s} = 147.56 \text{ mg Al/L de lodo homogéneo}$$

Modulo C:  $8.68 \text{ mg Al/L} * 3.1 \text{ m}^3/\text{s} * 1000 \text{ L/1 m}^3 = 26,908 \text{ mg Al/s}$

$$26,908 \text{ mg Al/s} / 200 \text{ L/s} = 134.54 \text{ mg Al/L de lodo homogéneo}$$

Debido a que los lodos de estos módulos se mezclan, se calculó la concentración teórica promedio de aluminio en el lodo homogéneo:

$$\text{Concentración teórica de Al} = (147.56 + 134.54)/2 = 141.05 \text{ mg Al /L}$$

c) Se realizó la acidificación de la mezcla de los dos lodos para determinar la concentración real de aluminio, dando como resultado:

141.30 mg Al /L, que es casi igual a la teórica.

d) Posteriormente se tomó una muestra del mismo lodo y se dejó sedimentar por espacio de media hora, obteniendo así el porcentaje de reducción.

Volumen de lodo homogéneo	= 22.44 L/s
Volumen de lodo sedimentado	= 7.11 L/s
Porcentaje de reducción	= 68.3

e) Como son dos módulos se tiene un flujo conjunto de 400 L/s de lodo homogéneo y ya que el porcentaje de reducción es del 68.3% por sedimentación, se tiene entonces que:

$$400 \text{ L/s} * (1-0.683) = 126.8 \text{ L/s de lodo sedimentado}$$

y la concentración de aluminio de:

$$(29,512 + 26,908) \text{ mg Al/s} / 126.8 \text{ L/s} = 444.95 \text{ mg Al/L de lodo sedimentado}$$

f) Se realizó la acidificación del lodo sedimentado para determinar la concentración de aluminio y ésta fue:

640 mg Al /L de lodo sedimentado. Un 40% mayor al teórico.

Las diferencias entre las concentraciones teóricas y las medidas probablemente se deben a dos factores:

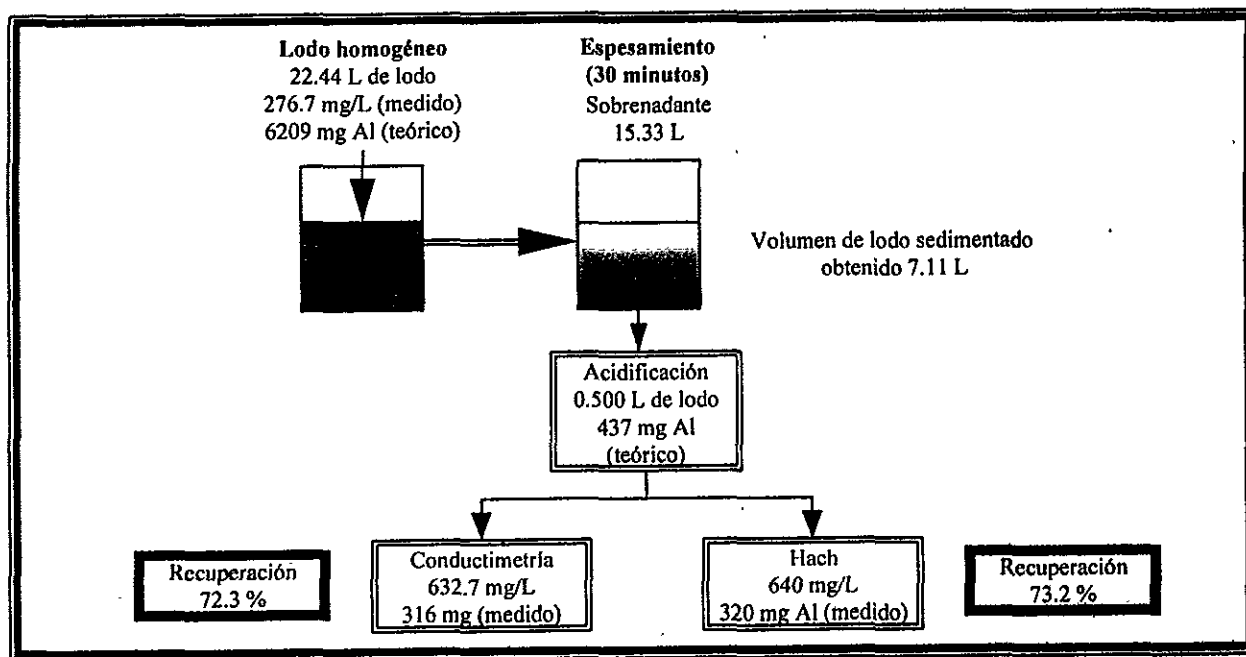
1) En la medición del caudal de agua cruda existen variaciones que no coinciden con el de dosificación del coagulante que reporta el personal de la planta; por lo que se puede sugerir que el flujo real se desconoce.

2) La cantidad adicionada de sulfato de aluminio está en función de la variabilidad en la turbiedad del agua cruda, sin embargo, en el transcurso de un día (datos de la prueba 2/10/97) se observan cambios drásticos en la calidad del agua, donde existen intervalos en la turbiedad de 9.8 a 52.5 UTN, y durante el cual se reporta una misma dosis de sulfato de aluminio (40 mg/L) a un flujo constante. Lo anterior, demuestra que no existe una correlación entre dosis y turbiedad, por lo que se concluye que este balance de aluminio realizado a partir de los datos proporcionados por el personal de la planta no es el adecuado.

Aunado a esto, cuando se comparan los resultados de los sólidos totales, la turbiedad y la dosis de sulfato de aluminio de las nueve pruebas, se puede apreciar que existe un comportamiento similar entre la turbiedad y los sólidos totales, el cual no corresponde al comportamiento de la dosificación de sulfato de aluminio adicionado al sistema.

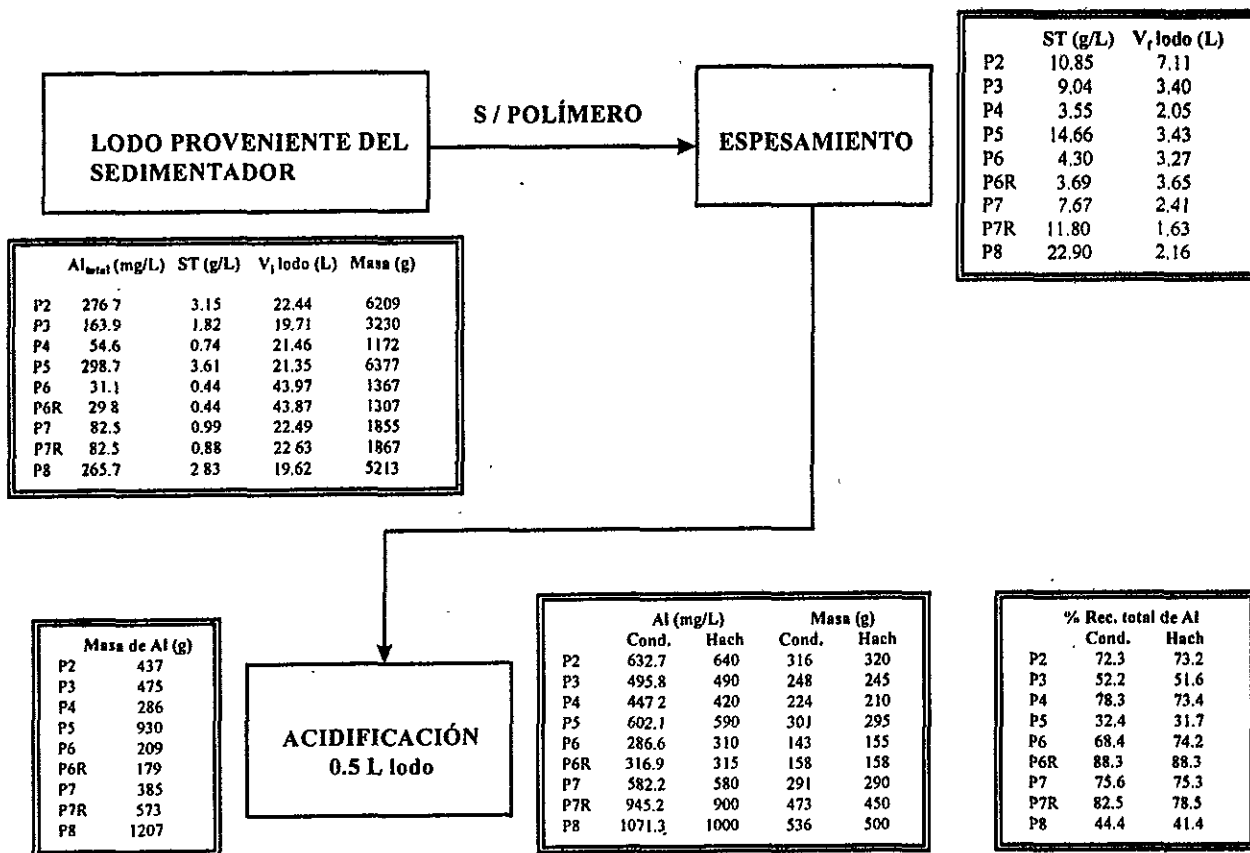
Debido a que los datos de caudal y dosis de sulfato de aluminio utilizados en el balance anterior no son confiables, a continuación se procede a realizar el balance de aluminio (figura 5.7) en el lodo espesado sin polímero de la prueba del 02/10/98 considerando el aluminio total del lodo homogéneo. En la figura 5.8 se presentan los resultados del balance de aluminio en el lodo espesado sin polímero.

Figura 5.7 Balance de aluminio en el lodo espesado sin polímero



Debido a que en estas pruebas no se midió el aluminio al sobrenadante del espesamiento ni el acumulado en el lodo acidificado, no se puede hacer un balance general de todo el sistema de tratamiento. Por ello, se decide efectuar el balance a partir del aluminio total (aluminio adicionado como coagulante y el extraído de las arcillas) presente en el lodo homogéneo.

Figura 5.8 Resultados totales del balance de aluminio en el lodo espesado sin polímero



De la figura 5.8 se observa que el porcentaje de recuperación total promedio de aluminio por conductimetría es del 66.0% y por Espectrofotometría Hach es del 65.3%. Estos porcentajes son relativamente bajos, sin embargo, en el balance estamos considerando los óxidos de aluminio que son extraídos mediante una digestión fuerte en la entrada al sistema de tratamiento de los lodos. Mientras que la acidificación con ácido sulfúrico solo disuelve el aluminio adicionado y no estamos tomando en cuenta el aluminio en el sobrenadante del espesamiento y el del lodo acidificado.

Nuevamente se observa que existe una correlación entre la concentración del aluminio total y los sólidos presentes en el lodo, aunque no se observa lo mismo con relación a los sólidos totales y el volumen final de espesamiento.

Por otro lado, no se puede realizar el balance del lodo espesado con polímero ya que no es posible muestrear en la planta lodo homogéneo antes de su acondicionamiento.



### 5.6.2 Evaluación de la reducción de volumen

En la tabla 5.13 se presentan los resultados obtenidos aplicando ácido sulfúrico diluido y concentrado a lodos espesados con y sin polímero.

Para determinar el porcentaje final de reducción de volumen se utilizaron los valores obtenidos de la acidificación con ácido diluido para compararlo con el ácido concentrado, ya que de esta manera se llevará a cabo el proceso en la planta. Los resultados se presentan en la tabla 5.13.

**Tabla 5.13 Reducción del volumen de lodo homogéneo con y sin polímero por espesamiento y acidificación**

	mg/L		Sedimentación (1/2 h)			Acidificación diluida			Acidificación concentrada			Global % Red <sub>r</sub>
			Volumen (L)			Volumen (ml)			Volumen (ml)			
	ST	SVT	Inicial	Final	%Red.	Inicial	Final	%Red.	Inicial	Final	%Red.	
<b>2/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	10.85	~	22.44	7.11	68.3	500	92.0	81.6	500	138	72.4	91.3
Lodo sed. c/p	18.10	~	22.99	3.99	82.6	500	112.0	77.6	500	170	66.0	94.1
<b>3/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	9.04	1.98	19.71	3.40	82.7	500	67.0	86.6	500	90	82.0	96.9
Lodo sed. c/p	9.98	2.23	22.20	6.18	72.2	500	82.0	83.6	500	90	82.0	95.0
<b>4/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	3.55	0.70	21.46	2.05	90.4	500	38.5	92.3	500	46	90.8	99.1
Lodo sed. c/p	9.81	1.90	23.86	2.58	89.2	500	68.0	86.4	500	96	80.8	97.9
<b>5/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	14.66	2.43	21.35	3.43	83.9	500	67.0	86.6	500	100	80.0	96.8
Lodo sed. c/p	18.15	3.13	20.74	7.36	64.5	500	83.0	83.4	500	148	70.4	89.5
<b>6/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	4.30	1.18	43.97	3.27	92.6	500	45.0	91.0	500	46	90.8	99.3
Lodo sed. c/p	7.11	1.80	44.58	2.16	95.2	500	78.0	84.4	500	87	82.6	99.2
<b>6/10/97 REP</b>												
Lodo sed. s/p	3.69	0.93	43.87	3.65	91.7	500	44.0	91.2	500	54	89.2	99.1
Lodo sed. c/p	6.32	1.81	44.32	2.32	94.8	500	90.0	82.0	500	112	77.6	98.8
<b>7/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	7.67	1.58	22.49	2.41	89.3	500	58.0	88.4	500	88	82.4	98.1
Lodo sed. c/p	6.76	1.53	24.75	1.45	94.1	500	55.0	89.0	500	85	83.0	99.0
<b>7/10/97 REP</b>												
Lodo sed. s/p	11.80	2.53	22.63	1.63	92.8	500	108.0	78.4	500	158	68.4	97.7
Lodo sed. c/p	9.90	1.95	19.75	0.75	96.2	350	49.0	86.0	335	68	79.7	99.2
<b>8/10/97</b>												
Lodo sed. s/p	22.90	1.73	19.62	2.16	89.0	500	150.0	70.0	500	193	61.4	95.8
Lodo sed. c/p	29.38	2.75	22.01	1.34	93.9	500	165.0	67.0	500	214	57.2	97.4

De la tabla anterior se observó lo siguiente:

- El espesamiento natural por espacio de media hora reduce el volumen en ambos lodos de un 86 a un 87%.
- La reducción del volumen de lodo espesado por acción de la acidificación diluida para la muestra sin polímero fue de un 85.1% y para la muestra con polímero de 82.1%, ligeramente menor. El acondicionamiento del lodo debe aumentar la reducción del volumen de éstos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, la adición del polímero no se realiza de la manera correcta por lo que se tienen porcentajes de recuperación similares en el lodo con y sin acondicionamiento.
- La acidificación del lodo espesado con ácido concentrado produce menor reducción de volumen, debido a que el tiempo de contacto sólo es de 10 minutos comparado con la acidificación diluida, esta diferencia es del 7%. Así, para el lodo sin polímero la reducción fue de un 79.7% y para el acondicionado de 75.5%, presentando nuevamente un porcentaje ligeramente menor. Aunque la acidificación con ácido sulfúrico diluido aumenta la reducción del volumen de lodos, no es conveniente utilizarlo a escala completa debido a que el tiempo de contacto sería muy grande y el volumen requerido para la extracción del aluminio es mayor, esto último trae como consecuencia que los costos de la recuperación del aluminio se eleve.
- Conjuntando la operación de espesamiento y acidificación con ácido concentrado se obtiene la reducción final del volumen, obteniendo así un lodo sin polímero con un porcentaje promedio final del 97.1% y con polímero del 96.7%.

De acuerdo a estos resultados se observó que la reducción de la cantidad de lodos juega un papel importante para diseñar el tamaño de los reactores de acidificación.

### 5.7 Cálculo de la generación de lodos

Para el cálculo del lodo seco teórico y del lodo seco real se utilizaron las ecuaciones 4.3 y 4.4 respectivamente. Para el último caso, se consideró que cada sifón maneja un flujo de 50 L/s, se tienen en la planta cuatro sifones por módulo lo que representa un flujo de 200 L/s, debido a que hay cinco módulos, el flujo total de generación de lodos es de 86,400 m<sup>3</sup>/día (ver figura 4.3). Los resultados de un monitoreo diario se observan en la tabla 5.14.

Debido a que la determinación de los sólidos totales es un valor puntual, la cantidad de lodos obtenida sólo es comparable con los lodos teóricos calculados para la misma hora. El valor real no puede ser extrapolado debido a que los sólidos varían cada hora, esto puede ser comprobado al observar las variaciones que se tuvieron en la turbiedad. Al comparar los volúmenes totales diarios de lodos teóricos durante los siete días que se realizaron las pruebas de tratabilidad en la planta, se obtuvieron resultados desde 38.883 hasta 151.134 ton/día, éstos se calcularon mediante la suma total de los volúmenes de lodo seco teórico en un día.

Tabla 5.14 Cálculo de lodos (base seca) teóricos y reales

Hora	Gasto de lodo* m <sup>3</sup> /s	Turbiedad del agua* UNT	Sólidos totales del lodo g/L	Sulfato* mg/L	Lodo seco teórico** ton/h	Lodo seco calculado*** ton/h
<i>Prueba 1 (2/10/97)</i>						
10:00	15.5	52.5	3.16	48	4.840	11.376
<i>Prueba 2 (3/10/97)</i>						
9:00	15.7	96.6	1.82	44	7.919	6.552
<i>Prueba 3 (4/10/97)</i>						
8:00	14.9	29.9	0.74	42	2.996	2.664
<i>Prueba 4 (5/10/97)</i>						
11:00	15.8	160.0	3.61	45	12.502	12.996
<i>Prueba 5 (6/10/97)</i>						
9:00	15.2	10.9	0.45	26	1.372	1.620
<i>Prueba 5 (6/10/97) REP</i>						
18:00	14.0	9.4	0.44	26	1.169	1.584
<i>Prueba 6 (7/10/97)</i>						
11:00	15.8	16.6	1.00	26	1.831	3.600

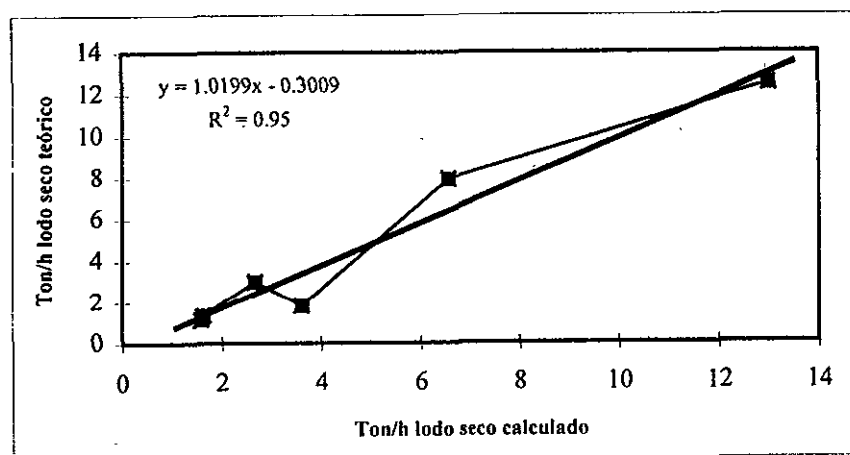
\* Datos proporcionados por el personal de la planta potabilizadora "Los Berros"

\*\* Calculado según la ecuación 4.3

\*\*\* Calculado a partir de la ecuación 4.4

En la gráfica 5.10 se observa que la correlación de lodos teóricos y calculados es buena, por lo que se puede concluir que la ecuación 4.3 puede ser utilizada para calcular los volúmenes de lodos (base seca) que se generarían en la planta diariamente conociendo la turbiedad del agua cruda, el cual es un parámetro más rápido y fácil de determinar que los sólidos totales.

Gráfica 5.10 Correlación de lodos teóricos vs. calculados



## 5.8 Caracterización de la solución rica en aluminio

### 5.8.1 Turbiedad y color

Éstos contaminantes son removidos del agua cruda y concentrados en el lodo. Sin embargo, la recuperación del aluminio mediante la extracción ácida disuelve la materia orgánica presente en el lodo la cual se ve reflejada en concentraciones altas de turbiedad, color e hidrólisis de metales, por ello es necesario caracterizar estos parámetros en la solución ácida. En la tabla 5.15 se muestran los valores de turbiedad y color monitoreados en la solución obtenida durante la acidificación de los lodos.

**Tabla 5.15** Turbiedad y color de la solución rica en aluminio

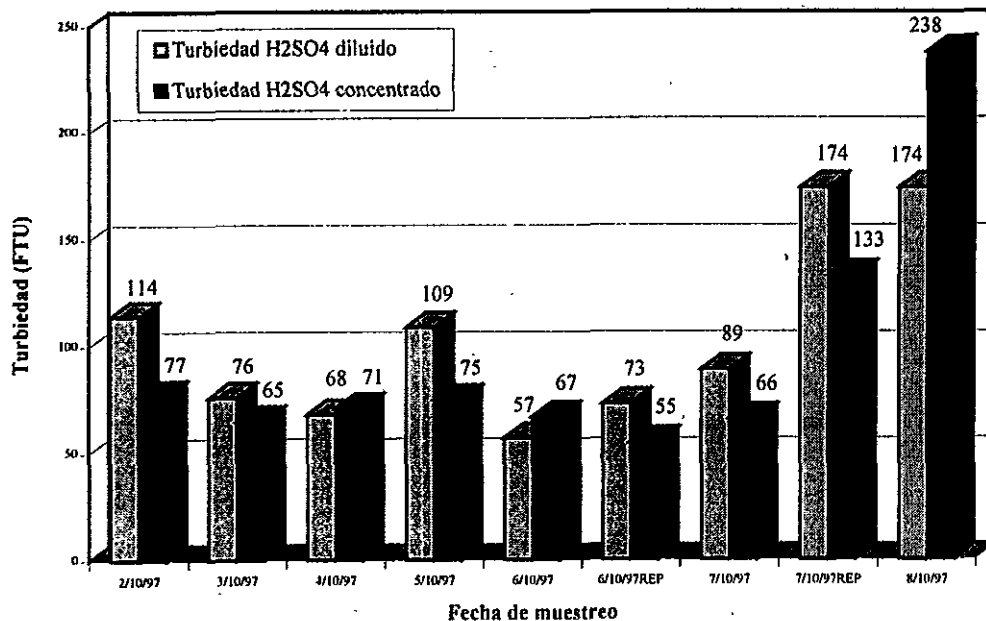
Muestra	2/10/97				3/10/97			
	Acidificación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido*		Acidificación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.**		Acidificación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido*		Acidificación con H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc.**	
	Turbiedad (FTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (FTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (FTU)	Color (Pt-Co)	Turbiedad (FTU)	Color (Pt-Co)
Lodo homogéneo	37	198	---	---	20	100	---	---
Lodo espesado s/p	114	660	77	401	76	388	65	335
Lodo espesado c/p	158	940	147	580	92	473	88	453
	4/10/97				5/10/97			
Lodo homogéneo	14	73	---	---	28	141	---	---
Lodo espesado s/p	68	307	71	354	109	740	75	377
Lodo espesado c/p	108	640	112	580	145	740	94	485
	6/10/97				6/10/97 REP			
Lodo homogéneo	11	59	---	---	21	112	---	---
Lodo espesado s/p	57	287	67	340	73	384	55	286
Lodo espesado c/p	103	525	101	515	124	805	123	740
	7/10/97				7/10/97 REP			
Lodo homogéneo	33	170	---	---	21	104	---	---
Lodo espesado s/p	89	449	66	334	174	880	133	720
Lodo espesado c/p	75	381	59	295	175	1220	164	940
	8/10/97				PROMEDIO			
Lodo homogéneo	32	169	---	---	24	125	---	---
Lodo espesado s/p	174	1100	238	1300	104	577	94	494
Lodo espesado s/p	231	1220	180	900	135	772	119	610

\* Tiempo de contacto de 1.5 horas aproximadamente

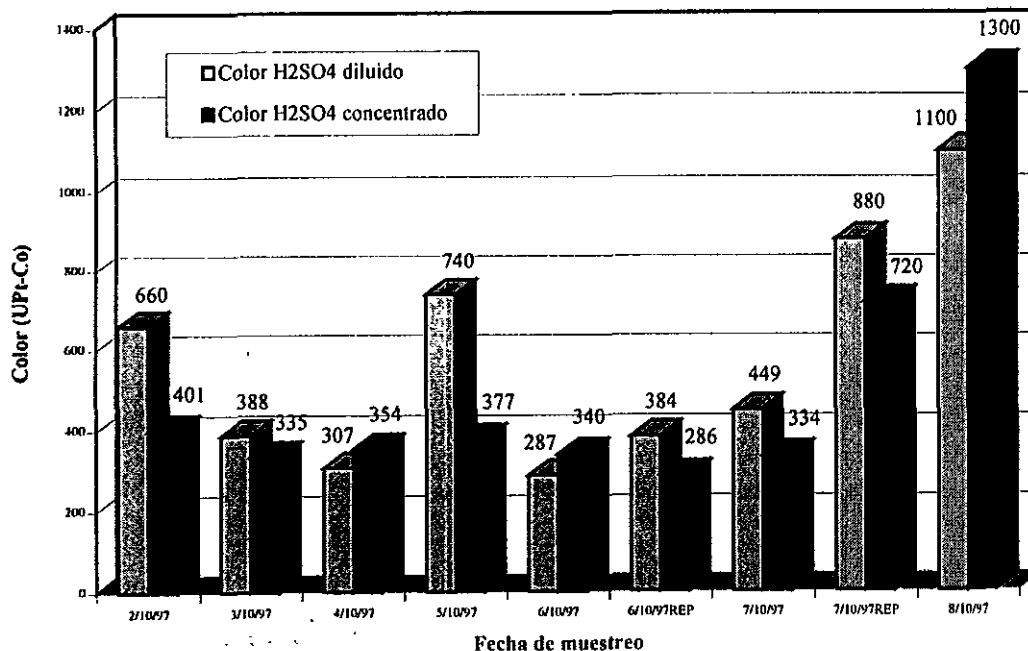
\*\* Tiempo de contacto de 10 min

De la tabla anterior se observa que los parámetros de turbiedad y el color son más bajos en el lodo homogéneo y mayores en el lodo espesado con polímero, más adelante se presenta una posible respuesta de éstas concentraciones. A continuación se presenta una comparación de estos resultados (ver gráficas 5.11 a 5.14).

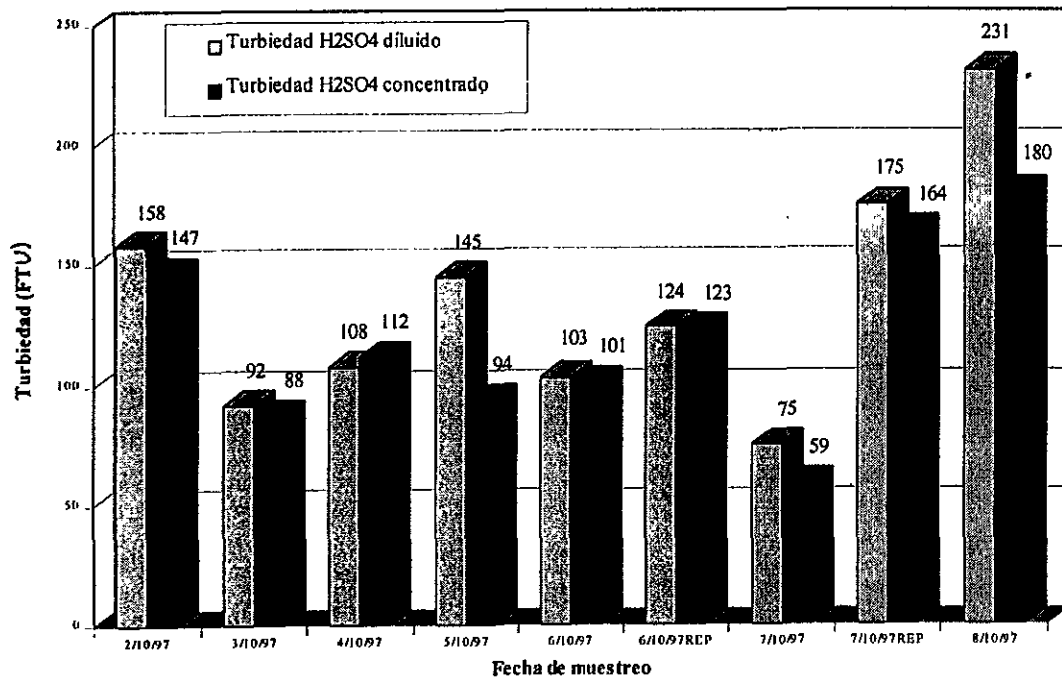
**Gráfica 5.11** Comparación de turbiedad en las soluciones ácidas diluida y concentrada del lodo sin polímero



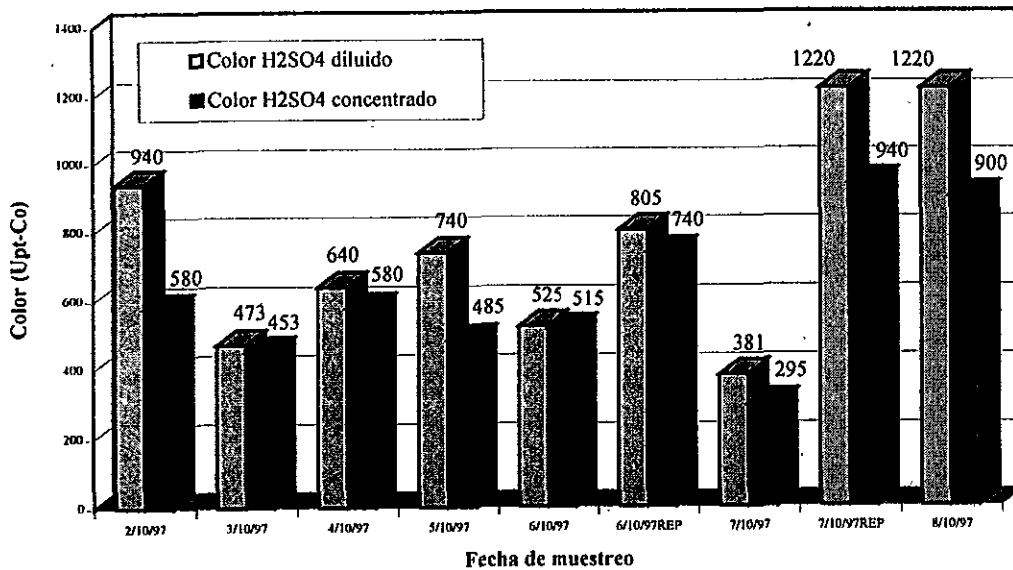
**Gráfica 5.12** Comparación de color en las soluciones ácidas diluida y concentrada del lodo sin polímero



**Gráfica 5.13** Comparación de turbiedad en las soluciones ácidas diluida y concentrada del lodo con polímero



**Gráfica 5.14** Comparación de color en las soluciones ácidas diluida y concentrada del lodo con polímero



De las gráficas anteriores se observa que la turbiedad y el color obtenidos durante la acidificación paulatina con ácido diluido, son relativamente más elevados que al acidificar con ácido concentrado. Esto indica que tiempos de contacto cortos favorecen solo la extracción del aluminio, mientras que periodos largos favorecen la disolución de la materia orgánica lo que incrementa considerablemente la turbiedad y el color.

Sin embargo, también se debe considerar que exista menor turbiedad y color en algunas muestras acidificadas con ácido sulfúrico diluido ya que el tiempo de contacto largo favorece que el lodo se compacte en mayor proporción y que se libere el agua ligada al lodo, por ello, el volumen de sólidos se reduce significativamente existiendo menor concentración de sólidos suspendidos en el sobrenadante que le imparten turbiedad y color al agua, mientras que en la acidificación con ácido concentrado se tiene un mayor volumen de lodos lo que trae como consecuencia una mayor turbiedad y color en el coagulante recuperado. Además, existe una correlación entre los sólidos con la turbiedad y el color. A medida que aumentan los sólidos se incrementa la turbiedad y el color y viceversa, esta correlación se puede observar en los resultados dados en la tabla 5.16.

**Tabla 5.16** Comparación de turbiedad y color vs. pH y sólidos

Fecha de muestreo	pH	ST (mg/L)	Turbiedad (UTN)		Color (Pt-Co)	
			H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc
<b>Lodo homogéneo</b>						
2/10/97	3.75	3.15	37	~	198	~
3/10/97	3.64	1.82	20	~	100	~
4/10/97	3.72	0.74	14	~	73	~
5/10/97	3.58	3.61	28	~	141	~
6/10/97	3.72	0.44	11	~	59	~
6/10/97 REP	4.2	0.44	21	~	112	~
7/10/97	3.40	0.99	33	~	170	~
8/10/97	3.17	2.15	32	~	169	~
<b>Lodo espesado sin polímero</b>						
2/10/97	3.18	10.85	114	77	660	401
3/10/97	3.00	9.04	76	65	388	335
4/10/97	3.01	3.55	68	71	307	354
5/10/97	3.17	14.66	109	75	740	377
6/10/97	3.52	4.30	57	67	287	340
6/10/97 REP	3.33	3.69	73	55	384	286
7/10/97	3.12	7.67	89	66	449	334
8/10/97	2.71	22.90	174	238	1,100	1,300
<b>Lodo espesado con polímero</b>						
2/10/97	3.00	18.10	158	147	940	580
3/10/97	2.95	9.98	92	88	473	453
4/10/97	2.94	9.81	108	112	640	580
5/10/97	3.05	18.15	145	94	740	485
6/10/97	3.13	7.11	103	101	525	515
6/10/97 REP	3.26	6.32	124	123	805	740
7/10/97	3.10	6.76	75	59	381	295
8/10/97	2.70	29.38	231	180	1,220	900

De éstos resultados se concluye que el color y la turbiedad en la solución ácida, es ocasionada principalmente por la materia orgánica, de la cual se ha comprobado su presencia a través de los sólidos volátiles, y a una pequeña cantidad de sólidos suspendidos.

### 5.8.2 Hierro y manganeso

Al acidificar el lodo con ácido sulfúrico hasta un pH de 3, el hierro y el manganeso también se solubilizan. Por esta razón es importante caracterizar la solución ácida obtenida ya que si se reusa como coagulante, la presencia de éstos elementos pueden deteriorar la calidad del agua tratada. En la tabla 5.17 y 5.18 se presentan los resultados obtenidos de hierro y manganeso respectivamente en muestras de agua cruda, lodo homogéneo y soluciones ácidas.

**Tabla 5.17** Concentración de hierro en muestras de agua, lodo y solución ácida

Fecha de la prueba	Concentración de Fe mg/L						
	A.C.	L.H.	SLHA	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc
2/10/97	5.45	61.47	~	~	~	~	~
3/10/97	3.52	32.67	~	~	~	~	~
4/10/97	0.92	10.62	~	~	~	~	~
5/10/97	6.49	68.48	~	~	~	~	~
6/10/97	0.46	6.44	~	~	~	~	~
6/10/97 REP	0.36	5.12	~	~	~	~	~
7/10/97	0.76	16.01	2.60	10.80	1.14	10.50	1.22
8/10/97	6.71	62.71	5.30	22.90	8.10	28.70	11.10

**Tabla 5.18** Concentración de manganeso en muestras de agua, lodo y solución ácida

Fecha de la prueba	Concentración de Mn mg/L						
	A.C.	L.H.	SLHA	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluido	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc
2/10/97	0.358	2.89	~	~	~	~	~
3/10/97	0.264	1.93	~	~	~	~	~
4/10/97	0.143	1.32	~	~	~	~	~
5/10/97	0.336	3.03	~	~	~	~	~
6/10/97	0.132	1.26	~	~	~	~	~
6/10/97 REP	0.121	1.25	~	~	~	~	~
7/10/97	0.143	2.31	0.38	0.63	0.41	0.54	0.36
8/10/97	0.363	2.20	0.51	1.35	1.14	3.00	2.50

A.C. = Agua cruda

L.H. = Lodo homogéneo

SLHA = Sobrenadante de lodo homogéneo acidificado

SLEA s/p = Sobrenadante de lodo espesado acidificado sin polímero

SLEA c/p = Sobrenadante de lodo espesado acidificado con polímero



En estas tablas se observa un dato interesante, cuando el lodo con y sin polímero son acondicionados con ácido sulfúrico concentrado, se obtienen concentraciones menores de hierro y manganeso que si se utiliza el ácido diluido. Esto reafirma que, tiempos de contacto mayores permiten la disolución de otros metales, principalmente el hierro y manganeso; mientras que en tiempos de contacto menores sólo se favorece la disolución del aluminio.

### *5.8.3 Contaminantes inorgánicos traza*

Como principales constituyentes metálicos en la solución ácida se encuentran el aluminio, hierro y manganeso. Sin embargo, existen otros metales que están presentes en el agua cruda y por consiguiente son concentrados en los lodos y posteriormente extraídos en la acidificación. Con la finalidad de conocer la concentración de estos metales se realiza un barrido de 23 metales traza por plasma acoplado inductivamente (PAI). Los análisis se hicieron a las siguientes muestras: agua cruda, lodo homogéneo, solución acidificada y agua tratada. Los resultados se muestran en la tabla 5.19.

En términos generales el agua cruda contiene ocho metales (Al, As, Ca, K, Mg, Na, Pb y Zn) presentes en concentraciones por abajo de la norma NOM-127-SSA1-1994. Sin embargo, se observa una acumulación de los mismos en el lodo y por lo tanto en la solución ácida. Algunos metales que destacan por su alta concentración en comparación con el resto son: aluminio y zinc. Sin embargo, esto no presenta un inconveniente mayor, mientras el factor de dilución con el agua a tratar los mantenga por abajo de la norma y los ciclos de recirculación del coagulante se controlen con base en la concentración de estos contaminantes

Es conveniente hacer notar que en el agua tratada existen cuatro metales que no fueron removidos en el sistema, éstos son calcio, potasio, magnesio y sodio, la presencia de los cuatro últimos es debida a que el sistema de tratamiento de "Los Berros" no cuenta con una unidad para su remoción.

En estos resultados se puede observar que el sobrenadante del lodo acidificado con ácido concentrado presenta menores concentraciones de metales traza que el sobrenadante acidificado con ácido diluido, esto se asocia también al tiempo de contacto utilizado en cada una de estas pruebas.

**Tabla 5.19 Metales traza presentes en el sistema de tratamiento**

Metal mg/L	Agua tratada	A.C.	L.H.	SLHA	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc	A.C.	L.H.	SLHA	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil	SLEA s/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> dil	SLEA c/p H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> conc
Ag	< 0.1	0.137	0.119	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.536	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Al	0.23	1.68	79.50	81.4	*	485	*	439	15.25	240.0	95.9	*	*	*	*
As	< 0.0005	0.0011	0.0214	0.0199	0.1012	0.0150	0.1058	0.0282	0.0021	0.0349	0.0118	0.0586	0.0127	0.0708	0.0186
Ba	< 0.1	< 0.1	0.177	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.577	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Be	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Ca	12.90	17.45	16.50	18.20	56.20	39.60	38.10	36.30	15.95	22.55	23.10	74.70	74.60	80.50	77.30
Cd	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Co	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cr	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Cu	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.152	< 0.1
K	3.48	3.30	3.93	3.83	6.01	5.64	5.47	5.28	3.62	5.25	5.11	12.50	9.86	13.00	11.40
Mg	5.99	5.61	6.39	6.57	12.20	9.70	9.35	9.51	6.26	8.39	7.25	14.10	14.60	15.10	14.10
Mo	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Na	12.20	11.14	10.20	14.60	16.20	16.80	11.50	13.80	11.35	11.20	12.00	13.00	13.10	12.60	15.10
Ni	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Pb	< 0.1	< 0.1	0.164	0.113	0.786	0.674	0.671	0.598	< 0.1	0.434	0.142	1.140	1.070	1.43	1.32
Sb	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Se	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.102	0.218
Tl	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
V	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.11	< 0.1	< 0.1	0.100	< 0.1	0.175	< 0.1	0.152	< 0.1	0.191	< 0.1
Zn	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.376	0.245	0.299	0.242	< 0.1	0.196	< 0.1	0.369	0.364	0.452	0.419

\* Lectura fuera de rango

A.C. = Agua cruda

L.H. = Lodo homogéneo

SLHA = Sobrenadante de lodo homogéneo acidificado

SLEA s/p = Sobrenadante de lodo espesado acidificado sin polímero

SLEA c/p = Sobrenadante de lodo espesado acidificado con polímero

## CONCLUSIONES

- La determinación de aluminio mediante Espectrofotometría Hach es de fácil manejo, rápida y económica, además es precisa en un rango de concentración de 0 a 1000 mg/L.
- Los parámetros de operación de mayor importancia para la recuperación del aluminio, así como para la reducción del volumen de lodos son: pH (2.7 a 3.5), dosis de ácido sulfúrico (5.1 a 5.8 kg/kg de Al) y tiempo de contacto (10 minutos).
- Con los parámetros establecidos, el espesamiento natural seguido de la acidificación proporciona reducciones de volumen de lodo de hasta el 97%, y permite obtener una solución rica en aluminio cuando se acidifica (90%).
- La concentración de sólidos totales en la muestra es directamente proporcional a la concentración de aluminio presente en la solución acidificada y los mililitros de  $H_2SO_4$  gastados para la disolución del aluminio.
- El acondicionamiento del lodo con polímero mejora la deshidratación del lodo, la calidad del sobrenadante, acorta el tiempo de sedimentación y aumenta la concentración del aluminio con respecto al espesamiento natural.
- Existe una correlación entre el cálculo de los lodos teóricos y calculados, por lo que se puede aplicar la ecuación 4.3 para obtener los volúmenes de lodos que se generarían en la planta potabilizadora "Los Berros".
- La calidad del coagulante recuperado aumenta cuando se utiliza ácido sulfúrico concentrado puesto que con éste se disminuye el tiempo de contacto y la cantidad de contaminantes en la solución ácida.

## **RECOMENDACIONES**

- Los parámetros de control establecidos en este trabajo son específicos para las características del lodo proveniente de la planta potabilizadora "Los Berros", por lo que se recomienda realizar diferentes pruebas de laboratorio cuando se trabaje con lodos provenientes de otras plantas.
- Evaluar un tren de tratamiento (acondicionamiento, espesamiento, deshidratación o una combinación de ambos) que maximice la extracción de aluminio y la reducción del volumen de lodos.
- Realizar nuevamente pruebas de tiempo de contacto que asegure una máxima extracción del aluminio recuperado y a la misma vez una alta reducción en el volumen de lodos, sin que se disminuya la calidad en cuanto a turbiedad y color de la solución ácida obtenida.
- Una vez obtenido el sobrenadante acidificado, realizar pruebas de sedimentación para conocer el tiempo óptimo para obtener una solución ácida con baja turbiedad y color.
- Verificar que el coagulante recuperado pueda ser utilizado en un sistema de tratamiento de agua potable y comparar su eficiencia con un coagulante comercial.
- Realizar el balance del aluminio disuelto y total determinando el aluminio en todos los puntos posibles del tren de tratamiento.
- Una vez verificada la eficacia del coagulante recuperado, se recomienda realizar pruebas con varios ciclos de recuperación de aluminio y considerar que el ácido sulfúrico disuelve otros contaminantes que pueden afectar la calidad del agua tratada.
- Realizar un análisis de costo de la recuperación de coagulantes con otros sistemas de deshidratación de lodos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Albrecht, A. Disposal of alum sludges. *Journal American Water Works Association*. Vol. 64, No. 1, pp. 46-52, 1972.
2. American Water Works Association (AWWA). *Sludge: Handling and Disposal*. pp. 154, 1989.
3. Barraqué, Christian, *et al.* *Manual Técnico del Agua*. Degremont. Cuarta Edición. pp. 1216, 1979.
4. Bishop, Mark; Rolan, A. T.; Bailey, Tom and Cornwell, David. Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. *Journal American Water Works Association*. Vol. 79, No. 6, pp. 76-83, 1987.
5. Bishop, Mark; Cornwell, David; Rolan, A. T. and Bailey, Thomas. Mechanical dewatering alum solids and acidified solids: an evaluation. *Journal American Water Works Association*. Vol. 83, No. 12, pp. 50-55, 1991.
6. Chen, Ben; King, Paul and Randall, Clifford. Alum recovery from representative water-treatment-plant sludges. *Journal American Water Works Association*. pp. 204-207. Abril, 1976.
7. Cheremisinoff, Paul. *Sludge Management and Disposal*. Water Management and Supply. Ed. Prentice-Hall. Water and Wastewater Treatment Guidebooks. pp. 204, 1994.
8. Comisión Nacional del Agua (CNA). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Curso: *Plantas de tratamiento de aguas residuales por lodos activados*, 1991.
9. Cornwell, David and Susan, James. Characteristics of acid-treated alum sludges. *Journal American Water Works Association*. Vol. 71; No. 10, pp. 604-608, 1979.
10. Cornwell, David; Bishop, Mark; Gould, Randy and Vandermeijden, Carel. *Water Treatment Plant Waste Management*. Handbook of Practice. American Water Works Association Research Foundation. pp. 431, 1987.
11. Cornwell, David and Koppers, Hay. *Slib, Schlamm, Sludge. Handling and Disposal*. American Water Works Association Research Foundation. Cooperative Research Report. pp. 305, 1990.
12. Crawford, Harold and Cline, Gretlyn. *Water Treatment Plant Design*. American Society of Civil Engineers. American Water Works Association. Second Edition. Ed. McGraw-Hill. pp. 598, 1990.

13. Environmental Protection Agency. *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal*. U. S. Technology Transfer. EPA 625/1-74-006. pp. 11-14, 1974.
14. Fulton, George. Recover alum to reduce waste-disposal costs. *Journal American Water Works Association*. pp. 312-319. May, 1974.
15. Goto, K. and Sato, A. Compression characteristics of alum sludge and pressure loss in the cake under constant rate dewatering. *Water Supply*. Vol. 4, pp. 367-376, 1986.
16. Kemmer, Frank and McCallion, John. *Manual del Agua*. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Nalco Chemical Company. Ed. McGraw-Hill. pp. 1-1 a 43-20, 1982.
17. Knocke, W. R.; Dishman, C. M. and Miller, G. F. Measurement of chemical sludge floc density and implications related to sludge dewatering. *Water Environment Research*. Vol. 65, pp. 705-800, 1993.
18. Langer, S. J. and Klute, R. Rapid mixing in sludge conditioning with polymers. *Water Science Technology*. Vol. 28, No. 1, pp. 233-242, 1993.
19. Lotito, V.; Mininni, G.; Spinosa, L. and Lore', F. Developments in laboratory evaluation of sewage sludges dewaterability. *Water Science Technology*. Vol. 28, No. 1, pp. 103-108, 1993.
20. Metcalf and Eddy. *Wastewater Engineering. Treatment Disposal and Reuse*. Third Edition. De. Mc Graw Hill. pp. 1334, 1991.
21. Moran, Roberts and Roddy, Charles. Recovery and reuse of alum sludge at Tampa. *Journal American Water Works Association*. pp. 857-866. July, 1960.
22. Nebiker, J. H.; Sanders, T. G. and Adrian, D. D. An investigation of sludge dewatering rates. *Journal Water Pollution Control Federation*. Vol. 41, No. 8, Part 2, pp. r255-266, 1969.
23. Novak, John; Prendeville, John and Sherrard, Joseph. Mixing intensity and polymer performance in sludge dewatering. *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 114, No. 1, pp. 190-198, 1988.
24. Pontius, Frederick. *Water Quality and Treatment*. A Handbook of Community Water Supplies. American Water Works Association. Fourth Edition. Ed. McGraw-Hill. pp. 1194, 1990.
25. Ramalho, R. S. Tratamiento de aguas residuales. De. Reverté, S. A. pp. 705, 1993.
26. Rhyner, Charles; Schwartz, Leander; Wenger, Robert and Kohrell, Mary. *Waste Management and Resource Recovery*. Ed. Lewis Publishers, 1995.

27. Roberts, J. M. and Roddy, C. P. Recovery and reuse of alum sludge at Tampa. *Journal American Water Works Association*. Vol. 52, pp. 857-866, 1960.
28. Ruiz, Rafael y Vila, Ma. José. Solución a algunos problemas de floculación de fangos mediante el uso conjunto de floculantes aniónicos y catiónicos. *Tecnología del Agua*. Año VI, No. 27, 1986.
29. Saunders, Michael and Roeder, Michael. *Coagulant Recovery: A Critical Assessment*. Subject Area: Water Treatment and Operations. American Water Works Association Research Foundation. pp. 264, 1991.
30. Semon, Jeannette. *Operation and Maintenance of Sludge Dewatering Systems*. Manual of Practice No. OM-8. Prepared by Task Force on Sludge Thickening, Conditioning and Dewatering. Water Pollution Control Federation. pp. 231, 1987.
31. Sengupta, Arup and Shi, Bo. Selective alum recovery from clarifier sludge. *Journal American Water Works Association*. Vol. 84, No. 1, pp. 96-103, 1992.
32. Tosun, Ismail; Yetis, Ulku; Willis, Max and Chase, George. Specific cake resistance: myth or reality?. *Water Science Technology*. Vol. 28, No. 1, pp. 91-101, 1993.
33. Tsang, K. R. and Vesilind, P. Aarne. Moisture distribution in sludges. *Water Science Technology*. Vol. 22, No. 12, pp. 135-142, 1990.
34. Vesilind, Aarne. *Treatment and Disposal of Wastewater Sludges*. Ed. Ann Arbor Science. pp. 319, 1980.
35. Vesilind, P. Aarne. The role of water in sludge dewatering. *Water Environment Research*. Vol. 66, No. 1, pp. 4-11, 1994.
36. Wang, M. C.; Hull, J. Q.; Jao, M.; Dempsey, B. A. and Cornwell, D. A. Engineering behavior of water treatment sludge. *Journal of Environmental Engineering*. Vol. 118, No. 6, pp. 848-864, 1992.
37. Water Pollution Control Federation. *Sludge Dewatering*. Manual of Practice 20. Prepared by Task Force on Sludge Dewatering. pp. 161, 1983.
38. Weber Jr., Walter. *Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos*. Ed. Reverté, S. A. pp. 1-654, 1979.
39. 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. *Journal Institute Water Engineering*. Vol. 20, pp. 167, 1967.

40. Westerhoff, Garret. Alum recycling. *Water and Wastes Engineering*. pp. 28-30,48. December, 1973.
41. Westerhoff, G. P. and Daly, M. P. Water Treatment plant waste disposal. Parts 1, 2 and 3. *Journal American Water Works Association*. Vol. 66, pp. 319, 379, 441, 1974.
42. Westerhoff, Garret and Cornwell, David. A new approach to alum recovery. *Journal American Water Works Association*. Vol. 70, No. 12, pp. 709-714, 1978.
43. Young, E. F. Water treatment plant sludge disposal practices in the United Kingdom. *Journal American Water Works Association*. Vol. 60, No. 6, pp. 717-732, 1968.



## ANEXO A

### A.1 PRUEBAS DE HIPÓTESIS

#### A.1.1 Generalidades e importancia de los ensayos de hipótesis

Existen múltiples problemas en los cuales, en vez de estimar el valor de un parámetro, debemos decidir si una afirmación relativa a un parámetro es verdadera o falsa. A la declaración generalmente se le denomina *hipótesis*, y al procedimiento de toma de decisión acerca de la verdad o falsedad de la hipótesis se le denomina *prueba de hipótesis*. Los procedimientos de éstas dependen de utilizar la información de una muestra aleatoria proveniente de la población de interés. Si esta información es consistente con la hipótesis, entonces podría concluirse que es verdadera; sin embargo, si la información no es consistente con la hipótesis, se podría concluir que ésta es falsa. Este es uno de los aspectos más útiles de la inferencia estadística, ya que muchos tipos de problemas de decisión pueden expresarse como problemas de prueba de hipótesis.

#### A.1.2 Hipótesis nula ( $H_0$ ) o hipótesis alternativa ( $H_1$ )

Una hipótesis estadística es una declaración acerca de la distribución probabilística de una variable aleatoria. Las hipótesis estadísticas a menudo involucran a uno o más parámetros de esta distribución.

Es importante recordar que las hipótesis son siempre declaraciones acerca de la distribución o de la población que se esté estudiando, no declaraciones acerca de la muestra.

Si se desea decidir si un parámetro ( $\mu_1$ ) es o no de un valor especificado ( $\mu_2$ ), la hipótesis nula  $H_0$  es:

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ , y la hipótesis alternativa  $H_1$  es:

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$

Cuando la hipótesis alternativa especifica valores de  $\mu_1$  que pueden ser mayores o menores a  $\mu_2$ , se le denomina hipótesis alternativa bilateral. En algunas situaciones puede desearse expresar una hipótesis alternativa unilateral de la siguiente manera:

$H_1 : \mu_1 > \mu_2$ , conocida como prueba de cola derecha, o

$H_1 : \mu_1 < \mu_2$ , conocida como prueba unilateral de cola izquierda

El valor del parámetro ( $\mu$ ) de la población especificado es la hipótesis nula y se determina empleando una de tres formas. La primera, puede ser el resultado de la experiencia anterior, del conocimiento del proceso o de experimentos anteriores, cuando esto sucede, entonces el objetivo de la prueba es determinar si la situación experimental ha cambiado. La segunda puede determinarse a partir de alguna teoría o modelo relativo al proceso que se estudia, en este caso la prueba es para verificar la teoría modelo. Y el tercer caso, es cuando el valor del parámetro de la

población es el resultado de consideraciones externas, tales como especificaciones de diseño, ingeniería o de obligaciones de contrato, en esta situación la prueba de hipótesis es una prueba de cumplimiento.

Las hipótesis alternativas casi siempre especifican que la media de la población (o cualquier otro parámetro que pueda ser de interés) no es igual ni mayor que o menor que el valor supuesto en la hipótesis nula. En cualquier problema, la elección de una alternativa apropiada depende sobre todo de lo que deseamos poder probar, o mejor aún, de dónde queremos poner el peso de la prueba.

### A.1.2.1 Procedimiento de prueba de hipótesis

Para probar la hipótesis se debe tomar una muestra aleatoria, calcular un estadístico de prueba adecuado a partir de los datos muestrales, y utilizar entonces la información contenida en este estadístico de prueba para tomar una decisión.

El procedimiento específico de las hipótesis relativas a dos medias consiste en cinco pasos consecutivos:

1. Se establece la hipótesis de prueba ( $H_0$  y  $H_1$ ). Formulemos una hipótesis nula y una hipótesis alterna apropiada que aceptamos cuando la hipótesis nula debe ser rechazada.
2. Se calcula el estadístico de prueba, para ello se utiliza el siguiente teorema: si las distribuciones de dos variables aleatorias independientes, tienen medias  $\mu_1$  y  $\mu_2$  y las varianzas  $\sigma_1^2$  y  $\sigma_2^2$ , la distribución de su suma tiene por media  $\mu_1 + \mu_2$  (ó  $\mu_1 - \mu_2$ ) y por varianzas  $\sigma_1^2 + \sigma_2^2$ .

$$Z_{\text{calculada}} = (\mu_1 - \mu_2) - \delta / [(\sigma_1^2/n_1) + (\sigma_2^2/n_2)]^{1/2}$$

La razón de trabajar con valores estándar, o valores de  $z$ , radica en que nos permiten formular criterios aplicables a una gran variedad de problemas. Si como antes  $z_\alpha$  es tal que el área bajo la curva normal estándar a su derecha sea  $\alpha$ , las regiones críticas, es decir el conjunto de valores  $z$  para las cuales rechazamos la hipótesis nula  $\mu_1 = \mu_2$ , se indican en la tabla siguiente:

**Tabla A.1** Regiones críticas para probar  $\mu_1 = \mu_2$   
(Población normal y  $\sigma$  conocida, o grandes muestras)

Hipótesis Alternativa	Rechazamos la hipótesis nula si:
$\mu_1 < \mu_2$	$z < -z_\alpha$
$\mu_1 > \mu_2$	$z > z_\alpha$
$\mu_1 \neq \mu_2$	$z < -z_{\alpha/2}$ ó $z > z_{\alpha/2}$

3. Se fija la confianza ó nivel de significancia ( $\alpha$ ) que se va a utilizar. Especificamos la probabilidad de un error Tipo I (ver sección siguiente); si es posible, conveniente o necesario podemos especificar también las probabilidades de errores de Tipo II para alternativas particulares.

La probabilidad de un error Tipo I, se denomina también nivel de significancia, y comúnmente está fijado en  $\alpha = 0.05$  o  $\alpha = 0.01$ . El valor que elijamos en cualquier problema determinado tendrá que depender de los riesgos o consecuencias de cometer un error Tipo I.

4. De las tablas se obtiene el valor para definir la zona de rechazo y de aceptación de la hipótesis nula, es decir  $z_\alpha$  (región crítica), en este caso, para muestras grandes, tablas de distribución normal.
5. Se compara estas regiones con el estadístico calculado y se determina si la hipótesis nula se acepta o se rechaza, según los criterios de la tabla 1.

### A.1.3 Errores tipo I y tipo II

En la prueba de hipótesis estadística se pueden cometer los siguientes errores:

	Se acepta H	Se rechaza H
H es verdadera	Decisión correcta	Error de tipo I
H es falsa	Error de tipo II	Decisión correcta

Si la hipótesis H es verdadera y se acepta, o falsa y se rechaza, la decisión será correcta en ambos casos. Si se la rechaza y es verdadera, se rechaza erróneamente; y si es falsa y se acepta, se la acepta erróneamente.

Para juzgar las ventajas de cualquier criterio de decisión es esencial conocer las probabilidades de cometer los errores tipo I y tipo II. Denotamos estas probabilidades por  $\alpha$ , las cual es la probabilidad de cometer el error tipo I (un rechazo erróneo); y  $\beta$  la probabilidad de cometer un error tipo II (una aceptación errónea).