



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL
LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN,
COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO**

Oscar Alejandro Morales Peña
Asesorado por el Ing. Jorge Mario Estrada Asturias

Guatemala, noviembre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL
LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN,
COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

OSCAR ALEJANDRO MORALES PEÑA

ASESORADO POR EL ING. JORGE MARIO ESTRADA ASTURIAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Hilda Palma de Martini
EXAMINADOR	Ing. Víctor Herbert de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL
LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN,
COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha junio de 2012

Oscar Alejandro Morales Peña



Guatemala, 30 de septiembre de 2,013

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ing. Monzón:

Por medio de la presente le informo que asesore al estudiante **Oscar Alejandro Morales Peña**, que se identifica con carnet número **2005 – 16080**, en su informe final de trabajo de graduación, titulado **“EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN, COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO”**. He revisado y dado como aprobado dicho informe final.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente.

Vo.Bo. Ing. Qco. Jorge Mario Estrada Asturias
Asesor

 **Jorge Mario Estrada Asturias**
Ingeniero Químico Col. 68
Profesor Titular
Escuela de Ing. Química USAC



Guatemala, 24 de octubre de 2013
Ref. EI.Q.TG-IF.069.2013

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-029-2012-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Oscar Alejandro Morales Peña**

Identificado con número de carné: **2005-16080**.

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN, COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Mario Estrada Asturias**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAII

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **OSCAR ALEJANDRO MORALES PEÑA** titulado: "EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN, COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.


Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, noviembre 2013

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE UN MÉTODO EXPERIMENTAL DE LIXIVIACIÓN A NIVEL LABORATORIO, PARA RECUPERAR ALUMINIO (III) EN SOLUCIÓN, COMO ALTERNATIVA PARA EL APROVECHAMIENTO DE UN RESIDUO**, presentado por el estudiante universitario: **Oscar Alejandro Morales Peña**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano



Guatemala, noviembre de 2013

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por ser mi guía y fortaleza durante mi vida y por permitirme culminar este logro tan importante.

Mis padres

Oscar Morales y Adela Peña, por su apoyo incondicional, gracias por su amor y su comprensión. Este logro también es de ustedes.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis amigos

Por todos los buenos momentos que compartimos y por sus consejos en situaciones en las que me han apoyado incondicionalmente.

Todo el personal técnico y administrativo del Laboratorio unificado de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”

Por la amistad y apoyo incondicional e invaluable que me brindaron en esta etapa de mi vida.

Ing. Jorge Mario Estrada

Por compartir sus conocimientos profesionales como asesor de este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
Hipótesis.....	XVIII
Justificación.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Lixiviación	1
1.2. Aprovechamiento de residuos	2
1.3. Recuperación de sulfato de aluminio.....	3
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Lixiviación	5
2.1.1. Preparación del sólido para el proceso de lixiviación	7
2.1.2. Variables que afectan la velocidad de lixiviación	8
2.1.2.1. Temperatura	8
2.1.2.2. Concentración de solvente	8
2.1.2.3. Tamaño de partícula	8
2.1.2.4. Porosidad.....	9
2.1.2.5. Agitación	9
2.1.2.6. Filtración	9

2.2.	Tratamiento del agua	10
2.2.1.	Sustancias químicas que se utilizan para el tratamiento del agua para consumo humano	12
2.3.	Coloides	13
2.3.1.	Coagulación	14
2.3.2.	Estabilidad y desestabilización de los coloides	15
2.4.	Coagulantes utilizados	21
2.4.1.	Química de la coagulación con aluminio (III)	23
2.4.2.	Captura en un precipitado de hidróxido metálico	25
2.4.3.	Factores que influyen en el proceso de coagulación	26
2.4.3.1.	Características físicas y químicas del agua	26
2.4.3.2.	Influencia del pH.....	28
2.4.3.3.	Influencia de la temperatura.....	29
2.4.3.4.	Tipo de coagulante.....	30
2.4.3.5.	Dosis de coagulante.....	30
2.4.3.6.	Concentración de coagulante.....	31
2.4.3.7.	Intensidad y tiempo de mezcla.....	31
2.5.	Floculación	31
2.5.1.	Consideraciones generales	33
2.5.2.	Naturaleza de la turbiedad	33
2.5.3.	Naturaleza de color	34
2.6.	Lodo	35
2.6.1.	Producción de lodos.....	35
2.6.2.	Características fisicoquímicas de los lodos.....	36
2.6.3.	Humedad del lodo	37
2.6.3.1.	Humedad libre	38
2.6.3.2.	Humedad ligada	39

2.6.4.	Filtración de lodos por medios mecánicos	40
2.7.	Impacto ambiental causado por el lodo generado en plantas de potabilización	41
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	45
3.1.	Variables.....	45
3.2.	Delimitación del campo de estudio	45
3.3.	Recursos	45
3.3.1.	Recurso humano	46
3.3.2.	Infraestructura.....	46
3.4.	Recursos materiales disponibles	46
3.5.	Condiciones de operación	48
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	50
3.6.1.	Datos originales	50
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	61
3.7.1.	Datos calculados	61
3.8.	Análisis estadístico	81
4.	RESULTADOS	91
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	103
	CONCLUSIONES	109
	RECOMENDACIONES	111
	BIBLIOGRAFÍA.....	113
	APÉNDICES	115
	ANEXOS.....	139

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema del fenómeno de la coagulación.....	20
2.	Aglomeración de las partículas en un flóculo	26
3.	Curva de secado del lodo.....	38
4.	Diagrama de flujo del proceso de recuperación de aluminio (III)	49
5.	Porcentaje de extracción de aluminio (III), para tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de agitación.....	92
6.	Eficiencia de lixiviación, expresado como mg Al(III)/ml ácido sulfúrico, para tres concentraciones de ácido en función del tiempo de agitación.....	94
7.	Porcentaje de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres concentraciones de solución de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis de aplicada	96
8.	Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres concentraciones de solución de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis de aplicada	98
9.	Variación de pH, en la remoción de color y turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 %, y tres concentraciones de solución de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada.....	100

TABLAS

I.	Relación entre características del agua y la coagulación	27
II.	Análisis fisicoquímico al lodo crudo	50
III.	Análisis fisicoquímico lixiviado	51
IV.	Análisis fisicoquímico al lodo filtrado.....	51
V.	Cuantificación de metales pesados en lodo filtrado	52
VI.	Recuperación de aluminio (III), utilizando solución de ácido sulfúrico al 10 % v/v	52
VII.	Recuperación de aluminio (III), utilizando solución de ácido sulfúrico al 20 % v/v	53
VIII.	Recuperación de aluminio (III), utilizando solución de ácido sulfúrico al 30 % v/v	53
IX.	Recuperación de sulfato de aluminio, solución de ácido sulfúrico al 30 % v/v.... ..	54
X.	Análisis fisicoquímico al lodo lixiviado.....	55
XI.	Cuantificación de metales pesados en lodo lixiviado	55
XII.	Parámetros especificados en NMX-AA-122-SCFI-2006	56
XIII.	Cuantificación de metales pesados en solución de aluminio (III) recuperado.....	56
XIV.	Prueba de jarras (sulfato de aluminio 1 %)	57
XV.	Prueba de jarras (aluminio (III) recuperado 1 %)	58
XVI.	Prueba de jarras (aluminio (III) recuperado 2 %)	59
XVII.	Prueba de jarras (aluminio (III) recuperado 3 %)	60
XVIII.	Caracterización del agua para prueba de jarras	60
XIX.	Análisis fisicoquímico al lodo crudo	61
XX.	Análisis fisicoquímico al lixiviado	62
XXI.	Análisis fisicoquímico al lodo filtrado.....	62
XXII.	Cuantificación de metales pesados al lodo filtrado	63

XXIII.	Porcentaje en peso de aluminio (III) (g Al(III)/g solución), variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM	63
XXIV.	Densidad y pH, variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM.....	64
XXV.	Porcentaje en peso de alúmina (g Al ₂ O ₃ /g solución), variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM	65
XXVI.	Aluminio (III) lixiviado (g/lote), variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM.....	66
XXVII.	Eficiencia de lixiviación, expresado como mg Al(III)/ml de ácido sulfúrico, en función del tiempo de agitación y la concentración de ácido sulfúrico	67
XXVIII.	Porcentaje en peso de aluminio (III) (g Al(III)/g solución), utilizando ácido sulfúrico al 30 % y variando el tiempo de agitación, a 100 RPM.....	68
XXIX.	Densidad y pH de soluciones de aluminio (III), utilizando ácido sulfúrico al 30 % y variando el tiempo de agitación, a 100 RPM.....	69
XXX.	Aluminio (III) lixiviado (g/lote) y porcentaje de extracción de aluminio (III), utilizando ácido sulfúrico al 30 % y variando el tiempo de agitación, a 100 RPM.....	70
XXXI.	Cuantificación de metales pesados en lodo lixiviado	70
XXXII.	Parámetros especificados en NMX-AA-122-SCFI-2006.....	71
XXXIII.	Cuantificación de metales pesados en solución de aluminio (III) recuperado	72
XXXIV.	Color y turbiedad de agua cruda	72
XXXV.	Prueba de jarras (sulfato de aluminio 1 %)	73
XXXVI.	Prueba de jarras (aluminio recuperado 1 %).....	74
XXXVII.	Prueba de jarras (aluminio recuperado 2 %).....	75
XXXVIII.	Prueba de jarras (aluminio recuperado 3 %).....	76

XXXIX.	Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo.....	76
XL.	Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo.....	77
XLI.	Análisis de varianza para el proceso de extracción de aluminio (III), utilizando tres concentraciones de ácido y tres tiempos de agitación.	77
XLII.	Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %	78
XLIII.	Análisis de varianza, para los datos de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %.....	79
XLIV.	Análisis de varianza, para los datos de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %.....	79
XLV.	Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %	80
XLVI.	Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores.....	82
XLVII.	Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores.....	83
XLVIII.	Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo.....	85
XLIX.	Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo.....	85
L.	Análisis de varianza para el proceso de extracción de aluminio (III) recuperado, utilizando tres concentraciones de ácido y tres tiempos de agitación	86
LI.	Análisis de varianza de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %.....	86

LII.	Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 % ...	87
LIII.	Porcentaje de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 % ...	88
LIV.	Análisis de varianza de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %	89
LV.	Porcentaje de recuperación de aluminio (III), gramos de aluminio (III) lixiviado y porcentaje en peso de recuperación de aluminio (III), en función del tiempo y la concentración de ácido sulfúrico.....	91
LVI.	Eficiencia de lixiviación, expresado como mg Al(III)/ml ácido sulfúrico, en función del tiempo de agitación y la concentración de ácido sulfúrico	93
LVII.	Porcentaje de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres diferentes concentraciones de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada	95
LVIII.	Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres diferentes concentraciones de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada	97
LIX.	Variación de pH, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres diferentes concentraciones de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada.....	99
LX.	Comparación de la calidad del aluminio recuperado contra las especificaciones descritas en NMX-AA-122-SCFI-2006	101

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Al	Aluminio
g	Gramo
Fe	Hierro
ml	Mililitro
N	Normalidad
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
v/v	Volumen/volumen

GLOSARIO

Alúmina	Nombre común del óxido de aluminio (Al_2O_3).
Análisis	Descomposición de un todo en partes para poder estudiar su estructura.
Anión	Ion con una carga global negativa.
Catión	Ion con una carga global positiva.
Coagulación	Proceso de desestabilización de partículas coloidales por la adición de un reactivo químico, llamado coagulante. Esto ocurre a través de la neutralización de las cargas.
Coloide	Dispersión de partículas de una sustancia (la fase dispersa) en un medio dispersante de otra sustancia.
Floculación	Proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su sedimentación.
Fóculo	Grumo de materia orgánica o inorgánica formado por agregación de sólidos en suspensión.

Ion	Átomo o grupo de átomos que tiene una carga neta positiva o negativa.
Lixiviación	Proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales.
Lodo	Sólidos con un contenido variable de humedad proveniente del tratamiento de aguas.
Muestra	Parte representativa, a analizar, de cualquier material.
Polímero	Compuesto que se distingue por su alta masa molar que puede llegar a miles o millones de gramos y está formado por muchas unidades que se repiten.
Residuo	El subproducto sólido, líquido o gaseoso generado en actividades de producción y consumo, que aún poseen algún valor económico, con ayuda de tecnología adecuada puede permitir su aprovechamiento.

RESUMEN

Esta investigación experimentó una alternativa para aprovechar el lodo generado en plantas de tratamiento de agua para consumo humano; el objetivo principal de la investigación fue evaluar un método experimental de lixiviación a nivel laboratorio, para la recuperación de aluminio (III) en solución.

Se evaluó un método de extracción por lixiviación, con soluciones de ácido sulfúrico, a diferentes concentraciones y diferentes tiempos de agitación, a escala laboratorio. La extracción se realizó por lotes, en tres etapas fundamentales que fueron: mezcla (mezcla de lodo con ácido sulfúrico diluido), agitación (agitación de la mezcla) y filtración (separación sólido-líquido de los materiales lixiviados).

En el experimento se obtuvo observaciones duplicadas en cada combinación de tratamientos. Se analizaron las soluciones resultantes por métodos volumétricos para determinar el porcentaje de aluminio extraído, y se identificaron las soluciones con el porcentaje de aluminio (III) adecuado para reutilizarlo como coagulante.

Se comparó la eficiencia de remoción de color y turbiedad, utilizando la solución de coagulante recuperada y el coagulante comercial, aplicándola en agua cruda de río.

Por último, se determinó la calidad de la solución de aluminio recuperada, según los requerimientos establecidos para el sulfato de aluminio para tratamiento de agua, según Norma NMX-AA-122-SCFI-2006.

OBJETIVOS

General

Evaluar un método experimental de lixiviación a nivel laboratorio, para la recuperación de aluminio (III), como alternativa para el aprovechamiento del lodo generado en plantas potabilizadoras.

Específicos

1. Cuantificar el porcentaje de extracción de aluminio, en función de la concentración de ácido sulfúrico y del tiempo de lixiviación.
2. Determinar la eficiencia del proceso de lixiviación, en función de la concentración de ácido sulfúrico y del tiempo de lixiviación.
3. Comparar la eficiencia de remoción de color y turbiedad, utilizando la solución de aluminio obtenida y el sulfato de aluminio comercial.
4. Determinar la calidad de la solución de aluminio recuperada, según los requerimientos establecidos para el tratamiento de agua, según Norma NMX-AA-122-SCFI-2006

Hipótesis

Es posible el aprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua para consumo humano, mediante la recuperación de aluminio (III) en solución (por medio de lixiviación con ácido sulfúrico) y reutilizarla como coagulante líquido.

Hipótesis nulas

H_0 : No hay diferencias significativas en el porcentaje de extracción de aluminio (III), mediante la variación en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido), en función del tiempo de reacción.

H_0 : No existe diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbiedad y color, utilizando la solución de coagulante recuperado contra eficiencia de remoción de un coagulante comercial.

$$\mu_1 = \mu_2$$

Hipótesis alternas

H_a : Sí hay diferencias significativas en el porcentaje de extracción de aluminio (III), mediante la variación en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo de reacción.

H_a : Sí existe diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbiedad y color, utilizando la solución de coagulante recuperado contra eficiencia de remoción de un coagulante comercial.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

Justificación

La inadecuada disposición final de los lodos en Guatemala, justifica la realización de estudios para el aprovechamiento de dichos residuos, para mitigar los impactos negativos generados al medio ambiente. Considerando que este tipo de residuo generalmente presenta un alto contenido de aluminio, este proyecto propone un método experimental de lixiviación a escala laboratorio, para recuperar el aluminio contenido en el residuo (lodo) y utilizarlo como coagulante.

Por lo tanto se debe evaluar el proceso de lixiviación, como operación unitaria puede estudiarse y analizarse en distintas escalas de operación. Siendo siempre el fin convencional buscar resultados exitosos, incrementando la eficiencia de la extracción. Para conseguir eficiencias altas, generalmente se hace un escalamiento desde el nivel más pequeño hasta el más grande, a partir de un experimento de laboratorio o planta piloto, hasta una unidad de escalamiento completa a nivel industrial.

Por lo tanto, sin la existencia de un modelo micro que brinde resultados importantes, obteniendo una alta eficiencia de extracción, sería mucho más difícil conseguir el mismo fin en unidades de escalamiento mayores. Si se logran determinar modelos a escala laboratorio, será posible por medio de correlaciones, extrapolar para llevar la operación unitaria a niveles mayores.

La recuperación de sulfato de aluminio se convierte en un proceso de aprovechamiento de un residuo, que puede tener resultados exitosos en su aplicación para la reutilización de coagulantes regenerados por lixiviación con solventes ácidos, proponiendo así un método de Producción más Limpia.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más valiosos y de mayores usos con que cuenta el ser humano. Es fundamental como medio de subsistencia, ya que sin ella no es posible ninguna forma de vida. Si bien es cierto, la potabilización del agua es necesaria, pero como cualquier proceso industrial, genera subproductos o residuos; estos residuos son llamados lodos, y resultan de la adición y reacción de uno o más compuestos químicos.

El responsable directo de la formación de lodo, es el sulfato de aluminio, ya que las sales de aluminio son utilizadas ampliamente para el tratamiento de agua. En Guatemala el sulfato de aluminio es utilizado en grandes cantidades, y representa un gasto considerable en la producción de agua potable a partir de fuentes de agua superficiales.

Los lodos resultantes de dicho tratamiento, presentan dificultades para ser tratados o dispuestos adecuadamente. Las prácticas para la disposición de dichos residuos aun es un problema que no se ha solucionado totalmente, ya que algunas de estas prácticas consisten en descargar estos residuos a cuerpos de aguas superficiales, evacuarlos a terrenos baldíos o descargarlos al alcantarillado sanitario, para ser tratado conjuntamente con las aguas residuales.

En esta investigación, se propone una alternativa para el aprovechamiento del lodo, mediante la recuperación de una solución de aluminio (III), utilizando la lixiviación como el proceso más adecuado para extraer el aluminio del lodo.

1. ANTECEDENTES

Entre los antecedentes encontrados se presenta una reseña del tema de lixiviación, aprovechamiento de residuos y la recuperación de aluminio a partir de lodo generado en plantas de potabilización.

1.1. Lixiviación

En los últimos años, se han realizado trabajos de graduación referentes al tema de lixiviación, principalmente para la obtención de distintos compuestos a partir de materiales vegetales y en menor cantidad, utilizando materiales inorgánicos.

Se realizó un estudio de tesis en la escuela de Ingeniería Química, denominado *Estudio experimental de la operación unitaria de separación sólido-líquido a nivel laboratorio, mediante la evaluación de diversos parámetros de interacción influyentes y de respuesta*, realizado por Claudia Montenegro, en el 2009, asesorada por el Ing. César García; el material de trabajo fue el mangle rojo.

Genaro Barrera, en el 2008, realizó la investigación denominada *Lixiviación de colorantes del tipo flavonoides contenidos en la corteza de la especie forestal Aliso (Alnus arguta (Schltdl.) Spach)*, utilizando dos solventes para su extracción, a nivel laboratorio, asesorado por la Inga. Telma Cano Morales.

Se llegó a concluir que existe diferencia significativa en las propiedades fisicoquímicas del extracto tintóreo obtenido de la corteza del aliso (*Alnus arguta* (Schltdl.) Spach) en función de cada extracción sucesiva y según la solución extractora utilizada.

Mónica Pivaral Soto, en el 2008, realizó la investigación titulada *Estudio técnico a nivel planta piloto para la extracción de hierro(III) - $Fe_2(SO_4)_3$ -, por lixiviación con ácido sulfúrico a partir de hematita proveniente de la mina Quebrada María, Camotán, Chiquimula*, asesorado por el Ing. Mariano J. Eskenasy. Se llegó a concluir; que existe variación significativa en el porcentaje de extracción de hierro en hematita en relación con la variación en la concentración de coadyuvante (ácido sulfúrico).

1.2. Aprovechamiento de residuos

El tema del aprovechamiento de residuos ha cobrado un gran interés en los últimos años, en dicha temática se han realizado los siguientes estudios:

Ednar Ramírez, en el 2007, asesorado por Licda. Ruth Eugenia, realizó el estudio de tesis *Evaluación de la planta de tratamiento de aguas de una industria farmacéutica nacional, según el reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos y propuesta para el aprovechamiento de desechos*. Los resultados obtenidos demostraron que utilizando el lodo como fertilizante orgánico, se lograría mejorar la actividad microbiológica de un sustrato; que el agua residual se puede utilizar como agua para fertirriego de cultivos intensivos y extensivos debido a sus características químicas y el procesamiento del lodo para transformarlo en abono orgánico comercial, resulta rentable según el método de toma de decisiones utilizado.

En la Facultad de Agronomía, Estuardo Villatoro en el 2005, estudió el *Efecto de lodos provenientes de plantas de tratamiento sobre maíz dulce (Zea mays L. var. Rugosa)*, los resultados obtenidos demostraron que los lodos, comparando con los resultados que se obtendrían utilizando una fertilización solo con urea, pueden ser utilizados como un fertilizante orgánico, en sustitución o en combinación de la fertilización química en los suelos, en el cultivo de maíz dulce.

1.3. Recuperación de sulfato de aluminio

Hay países de Latinoamérica que han realizado investigaciones técnicas del tema, todos ellos utilizaron la lixiviación como el proceso adecuado para extraer el sulfato de aluminio; a continuación algunas investigaciones realizadas:

Miguel Martínez (UNAM, 2002) y Blanca Jiménez (UAM, 2002), estudiaron la *Recuperación de sulfato de aluminio de lodos provenientes de un tratamiento avanzado*. Los resultados obtenidos demostraron que es factible recuperar hasta un 70 % del coagulante utilizado.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, realizó estudios a nivel planta piloto para reducir el volumen en plantas de potabilización, por medio del espesamiento, acondicionamiento y acidificación, demostrando que es factible reducir en un 91 % el volumen de lodo a disponer, y además se obtiene un beneficio adicional al recuperar cerca del 90 % del coagulante presente en el mismo.

Colombia es otro país que busca alternativas para desechar, reciclar y/o aprovechar este tipo de residuos; en el 2003, Julián Gallo realizó el estudio de tesis denominado *Reutilización de lodos de planta de potabilización*, donde se obtuvo la factibilidad técnica de reutilizar los lodos de plantas de potabilización como ayudante del proceso de coagulación-floculación de lixiviados.

Por otro lado el estudio *Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua*, publicado en 2005 por un grupo de ingenieros químicos colombianos, demuestran la factibilidad técnica y económica de recuperar hasta un 70 % de coagulante. En los casos antes mencionados, el sulfato de aluminio recuperado es de calidad y concentración comparables a las del comercial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Lixiviación

Muchos compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran como mezclas de diferentes componentes en un sólido. Para separar el soluto deseado o eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, esta se pone en contacto con una fase líquida.

Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, o permite una separación de los componentes originales del sólido. Este proceso se llama lixiviación líquido-sólido o simplemente, lixiviación. La operación unitaria se puede considerar como una extracción, aunque el término también se refiere a la extracción líquido-líquido.

El proceso general consiste en los siguientes pasos: el disolvente se transfiere del volumen de solución a la superficie del sólido. Después, dicho disolvente penetra o se difunde en el sólido.

El soluto se disuelve en el disolvente, por lo tanto el soluto se difunde a través de la mezcla de sólido y disolvente hasta la superficie de la partícula, finalmente, el soluto se transfiere a la solución general.

Los numerosos fenómenos que se presentan en este proceso hacen poco práctico y casi imposible aplicar una teoría definida a la acción de lixiviación.

En general, la velocidad de transferencia del disolvente de la solución general hasta la superficie del sólido es bastante rápida, y la velocidad hacia el interior del sólido puede ser rápida o lenta. Sin embargo, en la mayoría de los casos estas no son las etapas que limitan a velocidad del proceso total de lixiviación.

Los procesos de lixiviación son de uso común en la industria metalúrgica, por ejemplo los metales útiles suelen encontrarse en mezclas con grandes cantidades de constituyentes indeseables, y la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles.

Las sales de cobre se disuelven o se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias por medio de soluciones de ácido sulfúrico o amoniacal.

Las sales de cobalto y níquel se lixivian de sus minerales con mezclas de ácido sulfúrico-amoniaco-oxígeno. La lixiviación de oro a partir de sus minerales, se basa en el uso de una solución acuosa de cianuro de sodio.

El equipo de lixiviación puede ser de etapas o de contacto continuo; algunas industrias requieren un tipo especial de equipo, pero en general las dos técnicas usadas son: rociar el líquido sobre el sólido o sumergir el sólido completamente en el líquido; el equipo usado en cada caso depende mucho de la forma física de los sólidos y del costo.

Partículas trituradas (grandes) son tratadas en lechos fijos por métodos de percolación, partículas molidas (finamente divididas) son puestas en suspensión en tanques llenos de solvente por medio de agitación.

2.1.1. Preparación del sólido para el proceso de lixiviación

El método de preparación del sólido depende en alto grado de la proporción del constituyente soluble presente, de su distribución en el material sólido original, de la naturaleza del sólido, que puede estar constituido por células vegetales o el material soluble estar totalmente rodeado por una matriz de materia insoluble, y del tamaño de partícula original.

Si la materia soluble está rodeada de una matriz de materia insoluble, el disolvente se debe difundir hacia el interior para ponerse en contacto y disolver el material soluble, y después difundirse hacia afuera.

Esto ocurre en muchos procesos hidrometalúrgicos, en los que se lixivian sales metálicas de minerales metálicos.

En estos casos se procede a una trituración y molienda previa de los materiales para aumentar la velocidad de lixiviación, pues de esta manera las porciones solubles quedan más accesibles a la acción del disolvente.

Si la sustancia soluble está contenida en el sólido o ampliamente distribuida en la totalidad del sólido, la acción de lixiviación del disolvente forma canales pequeños.

Esto hace que el paso de disolvente adicional resulte más fácil, por lo cual se puede prescindir de la molienda a tamaños muy pequeños. La molienda de las partículas es innecesaria cuando el material soluble está disuelto en una solución adherida al sólido. Entonces se puede emplear un simple lavado similar al de precipitados químicos.

2.1.2. Variables que afectan la velocidad de lixiviación

La velocidad de lixiviación es afectada por variables de temperatura, concentración de solvente, tamaño de partícula, porosidad, agitación y filtración, tal como se describe a continuación.

2.1.2.1. Temperatura

Al aumentar la temperatura se aumenta la velocidad porque la solubilidad es mayor, el aumento de temperatura es muy usado en procesos de reacción química.

La temperatura máxima para cada sistema está limitada por: el punto de ebullición del solvente, el punto de degradación del producto o del solvente, solubilidad de impurezas y por economía.

2.1.2.2. Concentración de solvente

La concentración del solvente es importante para soluciones acuosas, debido a la saturación y a la existencia de reacciones químicas; es de poca importancia cuando la extracción es controlada por difusión.

2.1.2.3. Tamaño de partícula

La reducción de partículas tiene gran importancia, porque aumenta el área de contacto y disminuye el tiempo necesario para la extracción, sobre todo para sólidos de baja porosidad.

2.1.2.4. Porosidad

La porosidad permite que el líquido penetre a través de los canales formados por los poros dentro del sólido, aumentando así el área activa para la extracción.

2.1.2.5. Agitación

La agitación da una mayor eficiencia en la extracción debido a que disminuye la película de fluido que cubre la superficie del sólido en reposo y que actúa como una resistencia a la difusión. Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto. La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. Un motor eléctrico impulsa al propulsor agitador, que está montado en un eje.

2.1.2.6. Filtración

En la filtración, las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan mecánica o físicamente, usando un medio poroso que retiene las partículas en forma de fase separada que permite el paso del filtrado sin sólidos. Las filtraciones comerciales cubren una amplia gama de aplicaciones.

Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (del orden de micrómetros) o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida. En algunos casos, se requiere una eliminación completa de las partículas sólidas y en otros, basta con una eliminación parcial.

El equipo industrial de filtración difiere del de laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos.

2.2. Tratamiento del agua

El agua cruda contiene diversas sales, así como materiales orgánicos microscópicos, tales como: grava, arena gruesa, arena fina, arcilla, bacterias, partículas coloidales, etc. Por consiguiente, es necesario llevar a cabo algunos procesos de tratamientos para purificar el agua y ponerla en óptimas condiciones para el consumo humano.

El tratamiento de agua puede subdividirse en dos etapas fundamentales: clarificación y desinfección. La etapa de clarificación, consiste en la eliminación de partículas finas. Se subdivide en coagulación, floculación y sedimentación y/o filtración.

El agua consta de tres tipos principales de impurezas: físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico, se puede hablar que los sólidos totales que son impurezas del agua se pueden clasificar como partículas no filtrables o en suspensión, filtrables o disueltas y una tercera posibilidad es el caso intermedio que corresponde a los coloides.

Un material coloidal puede tardar 755 días en sedimentar por tanto es importante cambiar esta condición. Para comprender mejor el estudio del proceso de clarificación del agua se introduce el concepto de turbiedad y color. La desinfección del agua tiene por finalidad la eliminación de los microorganismos patógenos contenidos en ella.

La desinfección del agua es necesaria como uno de los últimos pasos en la planta de tratamiento de agua potable, para prevenir que esta sea dañina para la salud. Muchas veces, tratándose de agua de manantiales naturales o de pozo, la desinfección es el único tratamiento que se le da al agua para obtener agua potable. La desinfección puede hacerse por medios químicos o físicos.

Los compuestos químicos más utilizados para la desinfección del agua son:

- Hipoclorito de sodio (NaClO), ácido hipocloroso (HClO), clorito de sodio (NaClO_2). El cloro es uno de los elementos más comunes para la desinfección del agua, se puede aplicar para la desactivación de la actividad de la gran mayoría de los microorganismos, y es relativamente barato.
- Dióxido de cloro (ClO_2)
- Ozono (O_3)
- Halógenos: yodo
- Metales: cobre (Cu^{2+}), plata (Ag^+)
- Permanganato de potasio (KMnO_4)
- Jabones y detergentes
- Sales de amonio
- Peróxido de hidrógeno
- Flúor

Medios físicos, electrofísicos y/o fisicoquímicos: los procesos físicos más utilizados para la desinfección del agua son:

- Generación de ácido hipocloroso mediante proceso hidrólisis sin aditivos
- Luz ultravioleta

- Fotocatálisis
- Radiación electrónica
- Rayos gamma
- Calor

Los desinfectantes no solo deben matar a los microorganismos sino que deben además tener un efecto residual; esto significa que se mantienen como agentes activos en el agua después de la desinfección, para prevenir el crecimiento de los microorganismos en las tuberías, provocando la recontaminación del agua.

2.2.1. Sustancias químicas que se utilizan para el tratamiento del agua para consumo humano

En el proceso de tratamiento se utilizan diversos tipos de materiales químicos para la purificación de agua; a continuación se explica detalladamente la composición de los mismos, así como su función en el proceso, los materiales químicos son los siguientes:

- Cal hidratada: es aplicada para obtener un pH óptimo de coagulación y floculación, corregir la acidez del agua para que pueda utilizarse en el consumo humano.
- Sulfato de aluminio: está destinado para tratar la turbiedad del agua.
- Polielectrolito: tiene una misma función que el sulfato de aluminio, es usada para altas turbiedades su costo es más bajo en relación con el sulfato de aluminio. Sin embargo no puede usarse como coagulante primario.

- Sulfato de cobre: es el material químico que permite eliminar las algas.
- Cloro gaseoso: es el elemento que elimina la contaminación bacteriológica.
- Hipoclorito: es el cloro granular, por consiguiente, tiene la misma función del cloro.
- Silicio fluoruro de sodio: es aplicado para prevenir las caries.

2.3. Coloides

El agua consta de tres tipos principales de impurezas: físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico se puede decir que los sólidos totales que son impurezas del agua se pueden clasificar como partículas no filtrables o en suspensión, filtrables o disueltas y una tercera posibilidad es el caso intermedio que corresponde a los coloides.

En general los coloides no tienen un límite fijo de tamaño y se suelen estudiar bajo un enfoque fisicoquímico desde el punto de vista de sus propiedades.

Un material coloidal puede tardar 755 días en sedimentar, por tanto es importante cambiar esta condición.

Los coloides forman suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural; también son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida; estas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie.

Estas cargas llamadas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos, acompañados de una débil cantidad de iones positivos.

Dos propiedades de las superficies que tiene importancia especial en los coloides son:

- Tendencia a concentrar las sustancias en la superficie del medio que los rodea, el fenómeno de adsorción.
- Tendencia a desarrollar carga en relación al medio circundante, dando lugar a las propiedades electrocinéticas de los coloides.

2.3.1. Coagulación

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las cargas de un coloide, producida por la eliminación de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, con la formación de núcleos microscópicos. Con lo que se logra:

- Neutralizar la carga de los coloides generalmente electronegativos, presentes en el agua.
- Formar un precipitado.

2.3.2. Estabilidad y desestabilización de los coloides

Los coloides son normalmente estables en solución; en general priman los factores estabilizantes sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se encuentran todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables.

Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan, entre ellas, están: la gravedad, el movimiento browniano y las fuerzas de Van der Waals.

Para que un coloide se coagule, es necesario que las partículas se aproximen a una distancia menor que la existente entre el centro del coloide y la cresta de la resultante o barrera de energía (la cual varía con el pH).

Los coloides se aproximan a una distancia menor que la de la barrera de energía cuando el potencial Z baja hasta un punto llamado "punto isoeléctrico" ($z = 0$); lo que sucede si se neutraliza la carga "q" o se acumula incrementado el número de iones en la solución.

Cuando se añade al agua una cantidad de sal de hierro (III) o aluminio (III) en exceso del límite solubilidad del hidróxido metálico, ocurre una serie de reacciones hidrolíticas, desde simple hidroxocomplejos, formación de polímeros coloidales hidroxometálicos, hasta la formación de un precipitado de hidróxido metálico.

Las dosificaciones prácticas en sales de aluminio (III) y hierro (III) que se requieren para la desestabilización de coloides siempre exceden de la solubilidad del hidróxido metálico, así es posible considerar que la desestabilización en estos sistemas se lleva a cabo por los polímeros de aluminio (III) y hierro (III), los cuales son compuestos cinéticos intermedios en la precipitación eventual de un precipitado de hidróxido metálico.

Estos polímeros son complejos hidroxometálicos que se adsorben sobre las partículas coloidales. La cantidad de polímero adsorbido y la consiguiente dosificación del coagulante de hierro (III) o aluminio (III) necesario para llevar a cabo la desestabilización de un coloide, pueden depender de la cantidad de coloide que está presente.

En el intervalo de pH por debajo del punto isoeléctrico del hidróxido metálico, prevalecerán los polímeros cargados positivamente. La absorción de estos polímeros positivos puede desestabilizar a los coloides cargados negativamente por neutralización de carga. Por encima del punto isoeléctrico, predominarán los polímeros aniónicos.

La adsorción de estos materiales no puede desestabilizar a los coloides negativos por neutralización de carga. En los casos en que los polímeros inorgánicos aniónicos son coagulante efectivos, estos pueden actuar por adsorción o formación de enlaces de puente.

Si la adsorción es importante, se debe esperar que la coagulación con polímeros de hierro (III) o aluminio (III) exhiban reestabilización (sobredosificación) y estequiometría.

La dosificación química requerida depende de cómo se alcance la desestabilización. Elevadas dosificaciones de coagulante se requieren para producir un precipitado voluminoso de hidróxido; la dosificación requerida tiende a disminuir a medida que la concentración coloidal aumenta. La desestabilización por absorción generalmente requiere una dosificación menor de coagulante; la dosificación requerida aumenta al aumentar la concentración coloidal.

La desestabilización por adsorción puede requerir tiempos de reacción más largos (tiempos de permanencia) para producir la agregación cuando la concentración coloidal es baja; esto puede contrarrestar la ventaja de una dosificación menor. Para estas y otras situaciones en que están presentes pequeñas concentraciones de materiales coloidales no deseados, pueden resultar eficaces las dosificaciones elevadas de coagulante que produce un precipitado gelatinoso de hidróxido metálico.

La desestabilización producida por los polímeros obtenidos a partir de las sales de hierro (III) o aluminio (III) está influenciada por tres factores: dosificación del coagulante, pH y concentración coloidal. Se ha visto que la dosificación del coagulante preciso para desestabilización, es una función de la concentración del coloide que debe agregarse.

Las características de los polímeros que se forman en un sistema como tal están afectadas por el grado de sobresaturación (dosificación del coagulante y pH) en el sistema. Por ejemplo se ha observado que los polímeros inorgánicos cargados positivamente se formarán para valores de pH inferiores al punto isoeléctrico del hidróxido metálico (Al(OH)_3 o Fe(OH)_3).

Cuando el pH disminuye por debajo del punto isoeléctrico, la carga positiva promedio de las especies metálicas tiende a aumentar, creciendo, por tanto, la desestabilización por neutralización de carga y la posibilidad de reestabilización por sobredosificación.

Las sales de hierro (III) o aluminio (III) son ácidas. La adición de estos compuestos químicos al agua es similar a una titulación ácida del agua.

Como resultado, el pH del sistema después de la adición de estos coagulantes, dependerá de la dosificación de coagulante y la alcalinidad (capacidad tampón) del agua o agua residual.

En general el agua contiene tres tipos de sólidos: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.1 mm) no sedimentan fácilmente, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables.

Los sólidos coloidales consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, etc., que no sedimentan o lo hacen después de periodos prolongados y su efecto global se traduce en el color y la turbiedad de las aguas sedimentadas si coagulación.

Los sólidos disueltos, materia orgánica e inorgánica, son invisibles separadamente, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos.

La coagulación química puede definirse como un proceso unitario usado para causar la agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales de las aguas superficiales; es un proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar agregados de mejor sedimentabilidad.

El proceso consiste en la adición de sustancias químicas al agua, su distribución uniforme y la formación de un flóculo fácilmente sedimentable.

La coagulación prepara el agua para la sedimentación, incrementa considerablemente la eficiencia de los sedimentadores y tiene como función principal desestabilizar, agregar y unir las sustancias coloidales presentes en el agua.

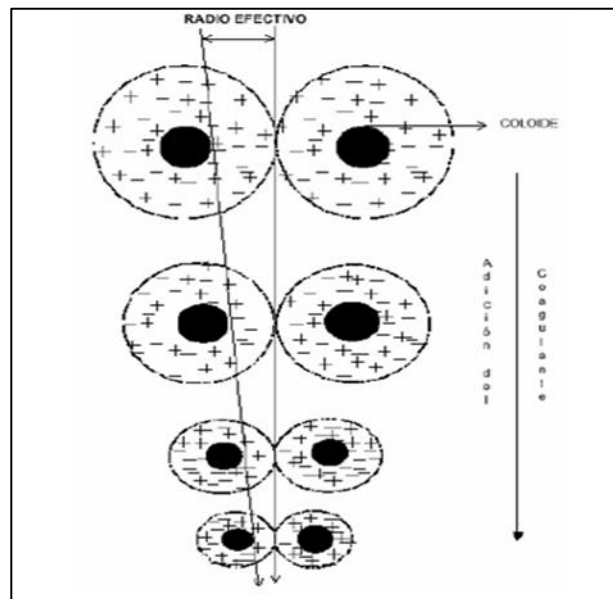
La coagulación es el proceso más ampliamente utilizado para remover sustancias que producen turbiedad en las aguas superficiales. Las sustancias que producen turbiedad son a menudo inorgánicas, mientras que las que causan olor, sabor y color, son generalmente orgánicas.

En resumen, se llama coagulación – floculación, al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, llamadas flóculo. Dicho proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero o aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.

- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor, en algunos casos de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos, entre otros.

Figura 1. **Esquema del fenómeno de la coagulación**



Fuente: MARTÍNEZ, Miguel, et al. Recuperación de sulfato de aluminio de lodos provenientes de un tratamiento primario avanzado. p.18.

La coagulación con sales metálicas (de aluminio o de hierro), produce también la remoción de DQO. Los principales mecanismos que contribuyen a la remoción de materia orgánica pueden resumirse en:

- Co-precipitación por adsorción sobre el hidróxido metálico
- Precipitación de complejos insolubles
- Neutralización de cargas de la materia orgánica coloidal

Por medio de la coprecipitación, la materia orgánica soluble es adsorbida sobre los cristales en crecimiento de hidróxido metálico, incorporándose así al flóculo para ser removida, junto con este. La precipitación de complejos insolubles consiste en la reacción de la materia orgánica disuelta con las sales metálicas, que forma complejos de baja solubilidad que pueden ser removidos por sedimentación.

El proceso de neutralización de cargas de la materia orgánica coloidal es similar al que se desarrolla con la turbiedad coloidal y que da origen y crecimiento al flóculo. El grado de remoción de materia orgánica depende del tipo y dosis del coagulante utilizado y del pH al cual se desarrolla el proceso.

Con valores bajos de pH se favorece la remoción de materia orgánica con menores dosis de coagulante, debido a que mejora la eficiencia de los mecanismos de adsorción y de neutralización de cargas.

2.4. Coagulantes utilizados

Los coagulantes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos del agua, especialmente con la alcalinidad del agua, para formar un precipitado voluminoso muy adsorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando. Estos pueden ser:

- Basados en aluminio
 - Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 - nH_2O$
 - Polihidroxiclорuro de aluminio $Al_n(OH_n)_mCl_{3n-m}$
 - Aluminio sódico $NaAlO_2$

- Basados en hierro
 - Sulfato férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$
 - Cloruro férrico FeCl_3
 - Sulfato ferroso FeSO_4

- Basados en calcio
 - Cloruro cálcico CaCl_2
 - Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$

- Basados en magnesio
 - Cloruro de magnesio MgCl_2

También se usan reactivos químicos constituidos por polímeros; dependiendo del monómero de partida y de su carga pueden ser:

- No iónicos
 - Policrilamidas
 - Polímeros del óxido de etileno

- Aniónicos
 - Copolimero de acrilamida-acrilato
 - Policrilamida parcialmente hidrolizada
 - Polisulfónicos

- Catiónicos
 - Polietilenamina
 - Polimetacrilato

Estos polímeros suelen emplearse conjuntamente con los coagulantes, a excepción de casos tales como el espesamiento de fangos orgánicos en los que se usan polielectrolitos catiónicos, sin otra combinación.

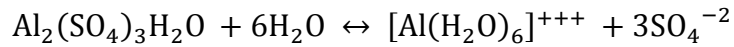
Los más utilizados son las sales de aluminio y hierro; cuando se adicionan estas sales al agua, se produce una serie de reacciones donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro, que son insolubles y forman los precipitados.

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante determina si la coagulación es completa: turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante ha sido bien hecha y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

2.4.1. Química de la coagulación con aluminio (III)

El sulfato de aluminio es el coagulante más utilizado en tratamiento de aguas. El producto comercial tiene usualmente la fórmula $Al_2(SO_4)_3 \cdot 14H_2O$, el material es empacado en diversas presentaciones: en polvo, molido, en terrones, en granos y en forma líquida.

El $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ es un polvo de color marfil, hidratado, que cuando está en solución se hidroliza:



Reacciona con las bases que encuentra en el agua así:

- Con la alcalinidad: grupos OH^- , CO_3^{-2} (carbonatos), HCO_3^- (bicarbonatos):
 - $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++} + \text{OH}^- \leftrightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}^-)]^{++} + \text{H}_2\text{O}$
 - $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++} + \text{CO}_3^{-} \leftrightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}^-)]^{++} + [\text{HCO}_3^-]$
 - $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+++} + \text{HCO}_3^{-} \leftrightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}^-)]^{++} + \text{H}_2\text{CO}_3$
 - El $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}^-)]^{++}$ es un compuesto inestable y transitorio que se hidroliza rápidamente:

$$[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}^-)]^{++} \rightarrow [\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH}^-)_2]^+ \rightarrow \text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH}^-)_3$$
 - El $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH}^-)]^{++}$ se polimeriza reaccionando entre sí. Estas reacciones de polimerización continúan con el tiempo, formando compuestos tales como $\text{Al}_6(\text{H}_2\text{O})_{15}^{-3}$, $\text{Al}_8(\text{H}_2\text{O})_{20}^{+4}$ y finalmente : $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$ o $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, según el pH.
- Con el agua: si se consume toda la alcalinidad, reacciona de la siguiente manera:



Los compuestos hidratados y los polimerizados pueden ser adsorbidos por las partículas coloidales del agua, produciendo su desestabilización.

La dispersión de los coagulantes se realiza en tres fases completamente diferentes:

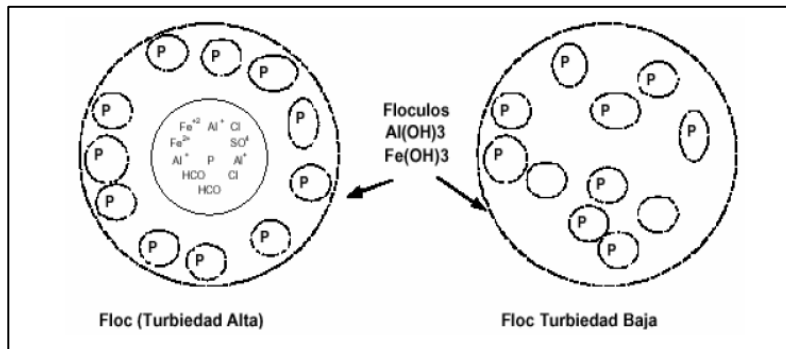
- Hidrólisis de los iones de hierro (III) o aluminio (III), esta fase se realiza en un tiempo muy corto (10^{-10} y 10^{-3} segundos).
- Difusión de los compuestos formados y adsorción de ellos en las partículas coloidales; el tiempo puede variar entre $8.5E-5$ y $2.4E-4$ segundos.
- Polimerización o reacción de los iones hidratados para formar especies diméricas o poliméricas, con un tiempo menor de 5 segundos.

2.4.2. Captura en un precipitado de hidróxido metálico

Se produce cuando se agrega una concentración de coagulante tan alta que excede el producto de solubilidad de hidróxidos metálicos como el $Al(OH)_3$ y $Fe(OH)_3$; en las soluciones de las sales metálicas como el $Al_2(SO_4)_3$ Y $FeCl_3$, se produce una precipitación rápida de estos hidróxidos.

Estos hidróxidos, a medida que se precipitan pueden atrapar las partículas coloidales, explicándose así la remoción de la turbiedad.

Figura 2. **Aglomeración de las partículas en un flóculo**



Fuente: MARTÍNEZ, Miguel, et al. Recuperación de sulfato de aluminio de lodos provenientes de un tratamiento primario avanzado. p.36.

Esto no es una verdadera coagulación, pero es la que más frecuentemente se produce debido a que en la práctica, las dosis que se usan están por encima del límite de solubilidad de los hidróxidos de aluminio y de hierro en el agua, a pH y temperatura de trabajo normal.

2.4.3. Factores que influyen en el proceso de coagulación

Una coagulación inadecuada no puede ser corregida en una etapa posterior del tratamiento. El proceso depende principalmente de los siguientes factores que están relacionados entre sí.

2.4.3.1. Características físicas y químicas del agua

Las características del agua que tienen mayor correlación en el proceso son: la concentración y naturaleza de los coloides, el pH y la alcalinidad, en especial cuando los coagulantes son sales de hierro o de aluminio, la temperatura y el contenido de carbono orgánico total (COT).

Tabla I. **Relación entre características del agua y la coagulación**

Tipo de agua	Coagulación producida por:	Requerimiento
Baja concentración de coloides, baja alcalinidad	Formación de precipitado Flóculo de barrido	Alta dosis de coagulante Adición de alcalinidad o partículas, o ambas
Baja concentración de coloides, alta alcalinidad	Formación de precipitado Flóculo de barrido	Alta dosis de coagulante Adición de particular
Alta concentración de coloides, baja alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos en la superficie de los coloides (pH 4 a 7)	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas. Adición de alcalinidad
Alta concentración de coloides, alta alcalinidad	Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitaciones de hidróxidos (pH >7)	Dosis de coagulantes incrementa con concentración de partículas

Fuente: SANDOVAL, Luciano, et al. Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización de agua. Instituto Mexicano de Tecnología del agua. p.7.

Además, el pH del agua es un factor importante en la desestabilización de las partículas.

- Concentración coloidal baja, alcalinidad baja: es la más difícil. La coagulación será ineficaz si solamente se utilizan sales de hierro (III) o aluminio (III), ya que el pH será rebajado demasiado, con el fin de permitir la formación de flóculo de barrido y la velocidad de contactos entre partículas será posiblemente demasiado lenta para llevar a cabo una desestabilización por neutralización de carga. Para una coagulación eficaz, se debe añadir alcalinidad, partículas coloidales o ambos a la vez.

- Concentración coloidal alta, alcalinidad baja: este es el sistema más fácil de tratar, ya que solo se debe determinar un parámetro químico (la dosificación óptima de coagulante). La desestabilización se lleva a cabo por absorción de los polímeros hidroxometálicos positivamente cargados; estos se producen en niveles ácidos de pH (pH 4 a 6, según el coagulante).
- Concentración coloidal alta, alcalinidad alta: la desestabilización se alcanza por adsorción y neutralización de carga para niveles de pH neutros y ácidos. Se puede elegir el uso de una dosificación alta de coagulante (debido a la elevada alcalinidad, el pH permanecerá generalmente en la región neutra, en donde los polímeros hidroxometálicos no están altamente cargados, con lo cual la neutralización de carga es más difícil).
- Concentración coloidal baja, alcalinidad alta: la coagulación se lleva a cabo por inmersión de las partículas coloidales en el flóculo de barrido, con dosificaciones relativamente altas de coagulante. Se puede añadir una ayuda de coagulante para aumentar la concentración coloidal y la velocidad de contacto de partícula.

2.4.3.2. Influencia del pH

Uno de los procesos químicos más comúnmente utilizados en los sistemas de tratamiento de las aguas residuales es el ajuste del pH. El pH afecta la solubilidad de los precipitados formados por el hierro y el aluminio, así como el tiempo requerido de formación de flóculo y la carga sobre las partículas coloidales.

El pH óptimo para la remoción de coloides negativos varía según la naturaleza del agua, pero usualmente caen entre 5,0 y 6,5. El rango de pH del coagulante utilizado en general es: sulfato de aluminio, pH = 4 – 7

La adición de coagulante trae consigo la disminución de pH debido al consumo de alcalinidad del agua y al mismo tiempo de los demás compuestos.

Al adicionar coagulantes inorgánicos al agua, ocurren reacciones químicas relacionadas principalmente con intercambio de protones. Los iones metálicos reaccionan con el agua formando iones acuosos complejos con carga positiva; estos iones son ácidos.

Dichos iones reaccionan rápidamente con el agua para formar diferentes compuestos. La interacción de estos iones metálicos hidratados es una reacción que se denomina hidrólisis o protólisis, aunque se trata realmente de reacciones ácido-base. Al liberarse protones se disminuye la carga neta del ion hidratado. Por tanto, el pH de la solución influenciará la distribución de las diferentes especies formadas.

2.4.3.3. Influencia de la temperatura

La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad de diferentes grados que afectan la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un flóculo.

2.4.3.4. Tipo de coagulante

Cada coagulante, dependiendo de la calidad y características del agua, actúa de modo diferente. Por tanto, la selección del tipo de coagulante deberá hacerse mediante trabajo a nivel de laboratorio.

Las sales de hierro pueden tener ventaja sobre las sales de aluminio en algunos casos, porque forman flóculos pesados y porque su margen de acción con relación al pH es más amplio. Sin embargo, su manejo a nivel de planta es más complejo que el de sales de aluminio.

2.4.3.5. Dosis de coagulante

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- Poca cantidad del coagulante no neutraliza totalmente la carga de la partícula; la formación de los microflóculos es muy escasa, por lo tanto la turbiedad residual es elevada.
- Alta cantidad de coagulante puede producir la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microflóculos, con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto la turbiedad residual es igualmente elevada.
- La selección del coagulante y la cantidad optima de aplicación.

2.4.3.6. Concentración de coagulante

Si existe buena turbulencia, se conseguirá una dispersión más efectiva cuanto más diluida sea la solución. Sin embargo, soluciones muy diluidas pueden hidrolizarse antes de su aplicación, formando productos que son efectivos para la coagulación.

2.4.3.7. Intensidad y tiempo de mezcla

Se requiere una mezcla adecuada para que el coagulante sea distribuido uniformemente a través del agua. Por tanto se debe realizar la mezcla lo más rápidamente que sea posible, ya que las reacciones se completan en tiempo menor que un segundo cuando la coagulación se realiza por adsorción, y en menos de 8 segundos cuando se efectúa por precipitación de hidróxidos.

La intensidad de agitación o de mezcla se relaciona con el gradiente de velocidad, el cual se deriva de la cantidad media de trabajo aplicado por unidad de tiempo, a un volumen unitario bajo una determinada viscosidad

2.5. Floculación

Es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean aglomerados mayores, que son capaces de sedimentar.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto.

Esto implica la formación de puentes químicos entre las partículas, de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un flóculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

Mientras la coagulación se debe principalmente a una acción química, la floculación se origina y se realiza como consecuencia del transporte de partículas desestabilizadas dentro del agua. La floculación tiene dos objetivos:

- Reunir los coloides desestabilizados para formar agrupaciones de partículas o flóculo con peso específico superior al del agua.
- Compactar los flóculos para disminuir su grado de hidratación y conseguir características adecuadas tales como mayor peso y buena consistencia para su fácil remoción.

La floculación puede ser producida por:

- El movimiento browniano de las partículas del agua: la floculación producida por este movimiento se denomina pericinética. Es demasiado lenta y por tanto no tiene tanto interés práctico en el tratamiento de aguas, aunque puede ser importante para explicar la denominada autofloculación.
- El movimiento inducido del agua mediante suministro externo de energía: esta floculación se denomina ortocinética y se debe a gradientes de velocidad originados por disipación de energía mecánica o hidráulica. En esta forma se consigue que las partículas se muevan con diferentes velocidades, lo cual aumenta su probabilidad de contacto.

2.5.1. Consideraciones generales

- En todos los modelos propuestos para la floculación, la tasa de aglomeración es dependiente del tiempo. Mediante ensayos de laboratorio pueden determinarse el tiempo óptimo de floculación.
- Al aumentar el gradiente de velocidad los flóculos aumentan de tamaño y simultáneamente aumentan las fuerzas de cizallamiento.
- La tasa de agrupación y por tanto de floculación depende también de la concentración y el tamaño inicial de los coloides.

2.5.2. Naturaleza de la turbiedad

La turbiedad es el efecto óptico causado por la dispersión o interferencia de los rayos luminosos que pasan a través del agua que contiene pequeñas partículas en suspensión, causadas por el lodo extraído del suelo, por escurrimientos superficiales que contienen materia suspendida, orgánica y mineral por el carbonato de calcio precipitado en las aguas duras, el hidróxido de hierro precipitado de sus corrosivas y por organismos microscópicos.

En términos sencillos, la turbiedad es la expresión empleada para describir partículas insolubles de arcilla, limo, material mineral, basura orgánica, plancton y otros microorganismos que impiden el paso de la luz. La turbiedad es de importante consideración en las aguas de abastecimiento, por tres razones:

- Estética: ya que la apariencia física es muy importante para productos de consumo humano.

- Filtrabilidad: se tiene que la filtración del agua se vuelve más difícil y por consiguiente aumenta su costo al aumentar la turbiedad.
- Desinfección: en aguas turbias, los organismos perjudiciales son expuestos a la acción del desinfectante, y en los casos en que la turbiedad es causada por desechos sólidos, algunos de los organismos patógenos pueden estar contenidos en las partículas, estando protegidos al desinfectarse.

2.5.3. Naturaleza de color

Generalmente cuando se habla de calidad del agua, suelen asociársele propiedades inherentes a ella: color, sabor y olor. Al considerar la primera de ellas, se observa que en el agua potable, tiene aceptación la transparencia y la carencia de color. El origen de la presencia de color podría deberse a materia suspendida denominada color aparente, el cual una vez removido, da lugar al color verdadero, siendo este último el de interés.

El color natural del agua puede asociarse también al contacto con desechos orgánicos como hojas, madera en diferentes estados de descomposición, taninos, ácido húmico, etc. También se puede derivar de hidróxidos metálicos, como el de hierro, además de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales. Hay que tener en cuenta ciertas consideraciones respecto del color:

- Estético: porque la mayoría de la gente prefiere un agua incolora.
- Industriales: porque interfiere con ciertos procesos y obstaculiza el funcionamiento de resinas aniónicas de intercambio iónico.

- Químico sanitario: porque interfiere con el proceso de cloración, al formar cloro-halo-metanos que se sospecha son cancerígenos y dificulta los análisis colorimétricos.

2.6. Lodo

A continuación se describe la producción, características fisicoquímicas, la humedad del lodo y la filtración de lodos por medios mecánicos.

2.6.1. Producción de lodos

El lodo obtenido en las plantas de tratamiento es una mezcla básica de los sólidos presentes en el agua a tratar y el coagulante utilizado para tal fin. Estos residuos generados se caracterizan por tener gran porcentaje de humedad; los lodos varían de una planta a otra al igual que sus propiedades físicas y químicas, varían dependiendo del agua cruda que se haya tratado y la dosis de productos químicos utilizados.

Cuando se logra el equilibrio, el hidróxido de aluminio será el producto predominante. Sin embargo, el equilibrio no se logra normalmente y se forma un compuesto complejo polimerizado, que contiene en promedio 3 o 4 moléculas de agua unidas al hidróxido de aluminio, el cual precipita.

El agua unida al complejo incrementa la cantidad de lodo, aumenta el volumen de lodo y lo hace más difícil de desaguar, ya que las moléculas de agua unidas químicamente, no se pueden remover mediante los métodos mecánicos normales.

La especie resultante de hidróxido de aluminio tiene un peso molecular de 132 g/mol, 1 mg/l de sulfato de aluminio agregado al agua producirá aproximadamente 0,44 mg/l de sólidos inorgánicos de aluminio.

Los sólidos suspendidos presentes en el agua cruda producen un peso equivalente de sólidos en el lodo, ya que al reaccionar son estos los que precipitan en forma de flóculos, producto de la reacción con el coagulante.

2.6.2. Características fisicoquímicas de los lodos

Los lodos procedentes de las estaciones de tratamiento de aguas están compuestos fundamentalmente por las materias presentes en el agua bruta y que por oxidación, coagulación y precipitación han sido retenidos en los decantadores y filtros, así como por sustancias (óxidos e hidróxidos) procedentes del coagulante y otros reactivos como cal, permanganato y carbón, que se han empleado en el tratamiento.

Las sustancias contenidas en el agua cruda son generalmente inertes (arcillas, arenas, etc.) y otras tanto en suspensión como disueltas (inorgánica y orgánica) como el plancton y otros microorganismos; de aquí que las características del lodo varían en función de la calidad del agua cruda y del tratamiento de potabilización al que es sometida.

El análisis de la materia de estos lodos, generalmente llamados lodos aluminosos, pone de manifiesto la presencia de muchos de los compuestos que recubren la corteza terrestre, variando las proporciones según la naturaleza del terreno atravesado por el agua cruda e incluso tomando en cuenta que en su transcurso pudo haber recibido aportes contaminantes importantes.

Se considera que la mayor parte de las sustancias disueltas en el agua cruda no quedarán retenidas en el proceso de tratamiento, a excepción de aquellas (por ejemplo los compuestos de magnesio (II) y hierro (II)) que al oxidarse pasan a ser insolubles, o aquellas que pueden llegar a precipitar, y que en el agua tratada no hay materia en suspensión alguna, los lodos procedentes del tratamiento del agua están formados, fundamentalmente, por la materia en suspensión del agua cruda, los hidróxidos de aluminio generados al incorporar el coagulante, por alguna otra sustancia insoluble empleada en el tratamiento.

2.6.3. Humedad del lodo

El mayor constituyente del lodo es el agua, siendo esto así, esta agua influye en gran medida en la energía necesaria para el secado o deshidratación del lodo y es por esto importante conocer las diversas formas en las que se encuentra esta agua.

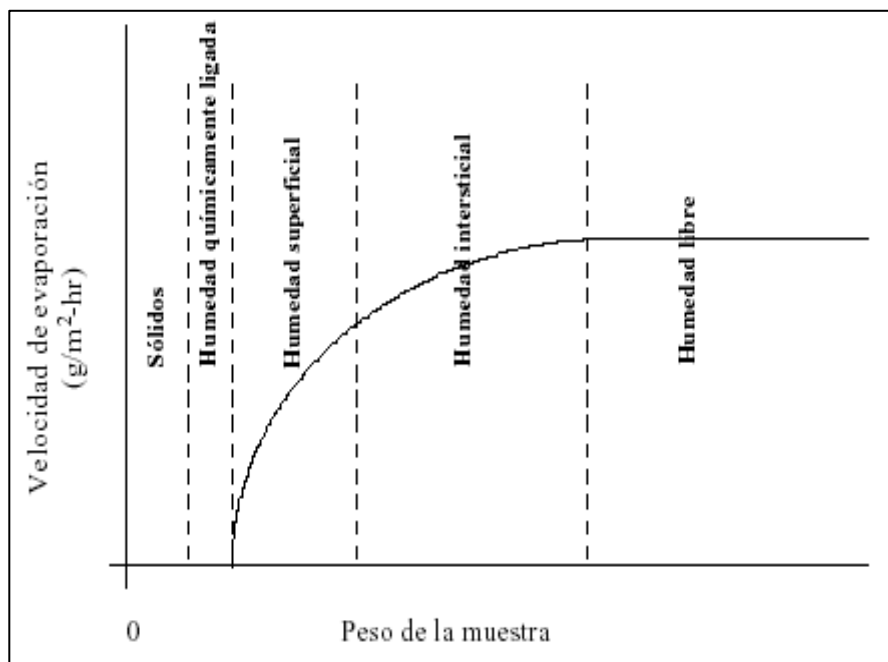
Este elevado grado de humedad de un lodo se divide en dos clases o categorías: humedad libre y humedad ligada. La humedad libre no está asociada con los sólidos que forman los lodos y se elimina fácilmente.

La humedad ligada es clasificada en tres tipos: intersticial, superficial y químicamente ligada. La proporción entre la humedad libre y humedad ligada es de suma importancia en la deshidratación de un lodo.

Se ha estudiado que mediante curvas termogravimétricas las características de secado de algunos lodos, (en estas curvas se representa la pérdida de peso de agua a temperatura constante).

Las curvas muestran que la pérdida de agua durante el secado térmico sigue tres etapas: una primera etapa en la que la velocidad de secado o pérdida de agua es constante y dos etapas siguientes en las que las velocidades de secado o evaporación disminuyen de forma diferente.

Figura 3. **Curva de secado del lodo**



Fuente: SANDOVAL, Luciano, et al. Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización de agua. p.8.

2.6.3.1. **Humedad libre**

Constituye la mayor parte del lodo y puede considerarse que termodinámicamente se comporta como agua pura (en la curva anterior sería la eliminada en el periodo de velocidad constante). Esta agua se puede eliminar por espesamiento o acondicionamiento.

2.6.3.2. Humedad ligada

Representa una pequeña proporción del agua total del lodo, no obstante su masa es mayor que la parte sólida del lodo; no se comporta como agua pura.

De sus variantes puede señalarse que: la humedad intersticial es la que se elimina en el primer periodo de disminución de velocidad de secado y el agua está ligada a la estructura del flóculo por tensión superficial, pasando a humedad libre si el flóculo se destruye; esta humedad se elimina por presión.

La humedad superficial es la eliminada en el segundo periodo de disminución de velocidad; el agua está ligada a la superficie de las partículas por adsorción y puede ser eliminada por deshidratación mecánica.

A diferencia de la humedad intersticial, en la cual el agua se puede mover y eliminar al desaparecer el confinamiento físico que la atrapa; en el caso de la humedad superficial, el agua no puede moverse tan fácilmente ya que está adherida a la superficie de la partícula sólida.

La humedad químicamente ligada está fijada a los sólidos por uniones químicas, siendo necesaria una fuente de energía para su separación, generalmente térmica o mediante procesos de acondicionamiento.

Los lodos que se producen en una planta convencional de lodos tras la etapa final de centrifugación o filtración, contiene del orden de un 15 % a 25 % de materia seca (si se emplean filtros prensa en la deshidratación, pueden conseguirse mayores sequedades).

2.6.4. Filtración de lodos por medios mecánicos

Los filtros a presión tienen un funcionamiento discontinuo y la alimentación es introducida en el sistema a altas presiones; el más característico es el filtro prensa de placas y marcos.

Un filtro se compone de una serie de chapas verticales, yuxtapuestas y acopladas. Estas chapas prensadas entre ellas cuentan con un sistema hidráulico-neumático que puede ser automático, semiautomático.

La presión aplicada a las zonas unidad de cada filtro debe de soportar la presión interna de la cámara que se forma debido a la inyección mediante bomba del lodo al sistema.

Esta disposición de placas verticales forman cámaras de filtración, estanca a la inmersión que permiten la fácil mecanización de la descarga de las pastas.

Membranas filtrantes finamente y fijamente malladas, se aplican en las dos grandes superficies crecientes en estas placas. A través de orificios se alimenta el sistema de lodo para ser prensado en la cámara de filtración.

Están generalmente colocados en el centro de estas placas, permitiendo una distribución adecuada del flujo, presión adecuada y mejor drenaje del lodo dentro de la cámara.

Lodos sólidos se acumulan gradualmente en la cámara de filtración hasta que se genera una pasta compacta final.

2.7. Impacto ambiental causado por el lodo generado en plantas de potabilización

Debido a la abundancia natural del aluminio y a su creciente utilización en la industria y en la vida moderna, es prácticamente improbable no encontrar trazas de aluminio en alguna célula de un ser vivo. Hasta ahora, no se ha demostrado un rol fisiológico para el metal, por lo que su presencia en el organismo constituye un riesgo de toxicidad.

La biodisponibilidad del metal y en consecuencia, su toxicidad, se ven influenciadas por la identidad química de la especie reactiva (dependiente del pH del medio) y por la capacidad de otros ligandos para interferir en la esfera de hidratación del ion metálico.

El pH fisiológico del entorno celular de los mamíferos oscila levemente alrededor de 7,4. Por lo tanto, los conceptos de biodisponibilidad y toxicidad potencial del aluminio, solo tienen sentido a la luz del conocimiento del comportamiento químico del metal en soluciones acuosas neutras.

En el medio extracelular, el aluminio forma complejos con especies de bajo peso molecular que poseen átomos de oxígeno donantes de electrones, entre ellas, citrato, hidróxido, fosfato, ADP y ATP. Estos ligandos mantienen en estado soluble al catión en suficiente cantidad y por el tiempo necesario para producir una respuesta tóxica, a nivel celular primero y en todo el organismo luego.

Si bien la toxicidad del aluminio ha sido bien documentada, los mecanismos por los cuales actúa todavía no han sido totalmente esclarecidos.

Se han demostrado acciones perjudiciales del catión en sistemas celulares y sobre distintos órganos tales como cerebro, hígado, hueso, músculo esquelético, corazón y médula ósea.

Actualmente, se considera que el cerebro constituye un sitio importante de acumulación de aluminio, independientemente de la vía por la cual el mismo ingresa al organismo. Diversas manifestaciones neurológicas en el ser humano han sido atribuidas a la intoxicación por aluminio: pérdida de la memoria, temblores, depresión de la movilidad motora, pérdida de la curiosidad, ataxia y convulsiones generalizadas con estado epiléptico. Por esta razón, el aluminio es considerado un elemento neurotóxico. En niños pequeños, la neurotoxicidad se manifiesta por regresión de las aptitudes verbales y motoras.

Numerosos estudios epidemiológicos y experimentales han sugerido una posible conexión entre la neurotoxicidad producida por aluminio y la patogénesis de la enfermedad de Alzheimer. Aunque esta relación todavía es motivo de controversia, no se puede ignorar la participación de la intoxicación con el aluminio en el desarrollo de severas manifestaciones neurológicas.

En el caso particular de los seres humanos, dado el extraordinario incremento del uso del aluminio, es de esperar que la exposición al metal aumente a medida que se eleva el promedio de vida de la población. Debido a la creciente biodisponibilidad del metal y a sus efectos sobre los seres vivos, surge la necesidad de investigar los mecanismos por los cuales el aluminio es incorporado a diferentes células, modificando su metabolismo y morfología, así como también determinar cuáles son las especies del catión involucradas en tales acciones.

Los estudios podrían revelar, en los próximos años, importantes interacciones de este elemento no esencial para el organismo con mecanismos de organización y funcionamiento celular, permitiendo así conformar un panorama más completo de la actividad del Al en los seres vivos. Mientras tanto, conviene evitar o disminuir al mínimo la exposición al metal.

La toxicidad del aluminio ha sido poco estudiada en medios científicos, a pesar de que existen datos preocupantes sobre este elemento:

- Estudios hechos sobre peces llegaron a observaciones como: síntoma de inhabilidad para mantener el equilibrio, coloración oscura, tornándolos propensos a adquirir enfermedades e infecciones, pudiéndolos llevar hasta la muerte. Se pretendió explicar el hecho con el cambio de pH. Otros estudios hechos al respecto concluyeron que formas inorgánicas de aluminio parecen ser las especies de mayor significado en toxicidad.
- Se adicionó aluminio en pequeños ríos y se hizo un monitoreo biológico, se observó que las comunidades macrobentónicas sufren variaciones en su estructura, distribución, abundancia y diversidad; además, hubo reducción de la tensión superficial, provocando alteraciones de la vida acuática. Pensando de esta forma, el aluminio puede influir de manera negativa en el medio ambiente.
- En lo relacionado al ser humano, los estudios mostraron que la concentración de aluminio es crítica a nivel de células renales, cuando no se permite una rápida eliminación de este elemento a través de las excreciones. Se encuentran además trabajos que han revelado que trazas de este material están íntimamente relacionados con estudios clínicos de encefalopatías crónica y deficiencia renal.

- Se demostró que las concentraciones de aluminio en aguas de abastecimiento pueden aumentar con la utilización de sulfato de aluminio como coagulante.
- Además de la salud, se puede afectar un proceso con concentraciones elevadas de aluminio, reduciendo la efectividad de desinfección del agua, aumentando la turbidez de agua tratada y provocando depósitos de aluminio en las paredes de los tubos.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

En esta investigación, las variables corresponden a una relación causal multivariada, donde las variables independientes serán: la concentración de ácido y el tiempo de agitación. Y la variable dependiente: el porcentaje de aluminio recuperado.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Esta investigación, se realizó a nivel laboratorio, utilizando un ácido inorgánico como coadyuvante (ácido sulfúrico), la operación unitaria utilizada para realizar la extracción fue la lixiviación; se realizaron corridas con tres distintos tiempos (15, 30 y 45 minutos) y tres distintas concentraciones de ácido sulfúrico (10, 20 y 30 % v/v).

La materia prima (lodo) fue obtenida de una planta de producción de agua potable; las muestras fueron tomadas directamente de los sedimentadores.

3.3. Recursos

A continuación se describe el recurso humano y la infraestructura, los cuales fueron fundamentales para llevar a cabo esta investigación.

3.3.1. Recurso humano

Para el desarrollo de la investigación, se contó con recurso humano capacitado para el tratamiento de aguas y el aprovechamiento de residuos.

- Investigador: Br. Oscar Alejandro Morales Peña
- Asesor: Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
- Técnicos: personal del laboratorio unificado de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”
- Técnicos: personal de planta de tratamiento de agua “Lo de Coy”

3.3.2. Infraestructura

La parte experimental de la investigación se realizó en:

- Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dr. Alba Tabarini Molina”.

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos materiales disponibles para el desarrollo de la investigación son: la materia prima, equipos, cristalería y reactivos descritos a continuación:

- Materia prima: el lodo se obtuvo de la planta de tratamiento de agua para consumo humano “Lo de Coy”, ubicada en Km. 17.5 carretera Interamericana, Mixco, departamento de Guatemala. Se recolectaron 5 cubetas de lodo, directamente del sedimentador.
- Equipo para la filtración del lodo: filtro prensa.

- Equipo y cristalería para lixiviación en laboratorio
 - Equipo de prueba de jarras
 - Balanza analítica
 - Cronómetro
 - Equipo para filtración al vacío
 - Potenciómetro
 - Picnómetro
 - Vaso de precipitados

- Equipo y cristalería para la determinación de la eficiencia del coagulante recuperado
 - Equipo de prueba de jarras
 - Colorímetro
 - Cronómetro
 - Potenciómetro
 - Vaso de precipitados
 - Turbidímetro
 - Flotadores

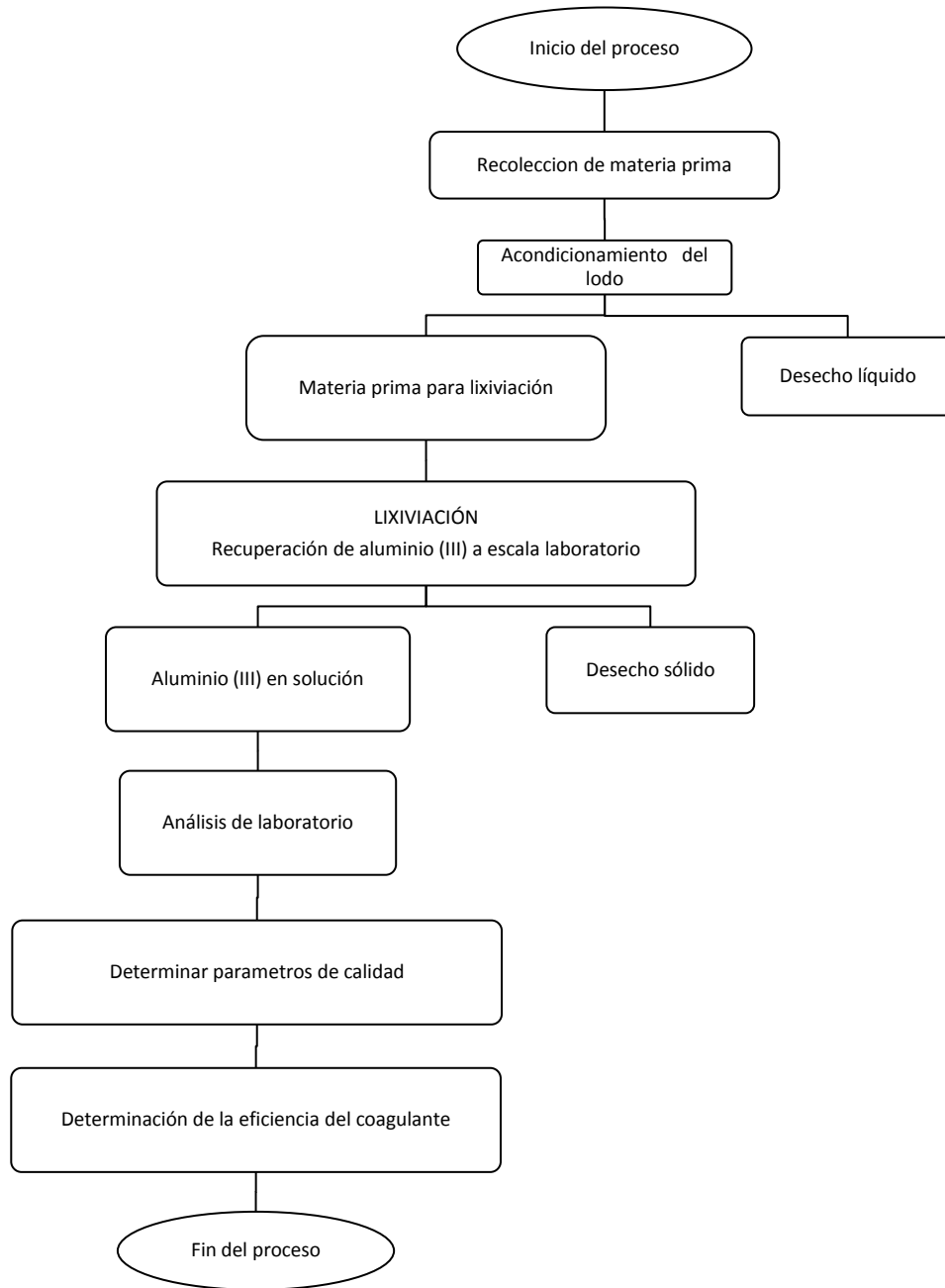
- Reactivos
 - Ácido sulfúrico
 - Agua desmineralizada
 - Ácido clorhídrico
 - Ácido nítrico
 - Reactivos necesarios para los análisis volumétricos, especificados en Norma NMX-AA-122-SCFI-2006

3.5. Condiciones de operación

Las condiciones bajo las cuales se realizó la investigación son las siguientes:

- Tamaño de lote: 300 gramos
- Velocidad de agitación: 100 revoluciones por minuto (rpm)
- Tiempo de contacto: 15, 30 y 45 minutos
- Concentración H_2SO_4 : 10, 20 y 30 % volumen/volumen
- Relación g lodo/ml H_2SO_4 : 1 g lodo/3 ml H_2SO_4

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso de recuperación de aluminio (III)



Fuente: elaboración propia.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Los datos se presentan agrupados en tablas, para una mejor comprensión de los diferentes análisis realizados.

3.6.1. Datos originales

Durante la elaboración experimental y caracterización del lodo, se obtuvieron los datos que se presentan a continuación.

Tabla II. **Análisis fisicoquímico al lodo crudo**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
ph		6,28	6,44
Temperatura	°C	24,00	21,80
Sólidos totales	mg/L	37 272,00	37 622,00
Humedad	%	92,30	91,60
Aluminio	g/kg	15 000,00	13 400,00
Sulfatos	g/kg	2,76	4,92
DBO ₅	mg/L	54,00	38,00
DQO	mg/L	1 324,00	1 756,00
Color		Gris - marrón	Gris – marrón

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla III. **Análisis fisicoquímico lixiviado**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
pH		6,89	6,93
Temperatura	°C	22,40	24,60
Sólidos totales	mg/L	1 447,00	1 978,00
Sulfatos	mg/L	4,34	5,36
Aluminio	mg/L	0,82	0,67
DBO ₅	mg/L	13,00	19,00
DQO	mg/L	987,00	852,00

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla IV. **Análisis fisicoquímico al lodo filtrado**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
pH		6,35	6,79
Temperatura	°C	21,60	22,30
Sólidos totales	mg/L	255 024,00	276 987,00
Humedad	%	25,50	26,50
Aluminio	g/kg	184 687,11	180 345,68
Color		Café - gris	Café - gris

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla V. **Cuantificación de metales pesados en lodo filtrado**

Metal	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
Arsénico	mg/kg	21,45	20,28
Cadmio	mg/kg	2,15	2,49
Cromo	mg/kg	52,92	55,75
Cobre	mg/kg	26,45	25,47
Plomo	mg/kg	11,23	11,08
Mercurio	mg/kg	N.D.	N.D.
Hierro	mg/kg	16 137,26	16 813,12

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Recuperación de aluminio (III), utilizando solución de ácido sulfúrico al 10 % v/v**

	Tiempo (min)	RPM	Densidad (g/ml)	pH	%Al extraído
Experimento C ₁₁	15	100	1,07	1,89	0,29
	30	100	1,10	1,92	0,63
	45	100	1,12	2,01	1,08
Experimento C ₁₂	15	100	1,07	1,78	0,29
	30	100	1,10	1,88	0,63
	45	100	1,12	2,05	1,03

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla VII. **Recuperación de aluminio (III), utilizando solución de ácido sulfúrico al 20 % v/v**

	Tiempo (min)	RPM	Densidad (g/ml)	pH	% Al _{extraído}
Experimento C ₂₁	15	100	1,15	1,62	0,67
	30	100	1,17	1,65	1,19
	45	100	1,18	1,85	1,81
Experimento C ₂₂	15	100	1,15	1,54	0,67
	30	100	1,18	1,77	1,25
	45	100	1,19	1,94	1,82

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla VIII. **Recuperación de aluminio (III), utilizando solución de ácido sulfúrico al 30 % v/v**

	Tiempo (min)	RPM	Densidad (g/ml)	pH	% Al(III) _{extraído}
Experimento C ₃₁	15	100	1,25	1,16	1,07
	30	100	1,25	1,31	1,95
	45	100	1,26	1,43	2,52
Experimento C ₃₂	15	100	1,25	1,24	1,07
	30	100	1,26	1,23	1,99
	45	100	1,26	1,51	2,57

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla IX. **Recuperación de sulfato de aluminio, solución de ácido sulfúrico al 30 % V/V**

	Tiempo (horas)	RPM	Densidad (g/ml)	pH	% Al(III) _{extraído}
Experimento C _{E1}	1	100	1,26	1,43	2,52
	2	100	1,28	1,44	2,68
	3	100	1,29	1,45	2,87
	4	100	1,30	1,46	3,13
	5	100	1,32	1,48	3,48
	6	100	1,32	1,48	3,58
	7	100	1,32	1,48	3,56
	8	100	1,32	1,48	3,40
Experimento C _{E2}	1	100	1,27	1,48	2,51
	2	100	1,27	1,45	2,64
	3	100	1,30	1,46	2,90
	4	100	1,31	1,47	3,16
	5	100	1,33	1,48	3,52
	6	100	1,34	1,48	3,63
	7	100	1,34	1,48	3,62
	8	100	1,34	1,48	3,63

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla X. **Análisis fisicoquímico al lodo lixiviado**

Parámetro	Unidad	
pH		2,60
Conductividad eléctrica	mS/cm	445,00
Fosforo	%	0,02
Potasio	%	0,09
Calcio	%	0,56
Magnesio	%	0,08
Cobre	ppm	5,00
Zinc	ppm	5,00
Manganeso	ppm	20,00
Sodio	ppm	1 250,00
Carbono orgánico	%	2,34
Nitrógeno total	%	0,32
Relación C:N		7,3:1

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Cuantificación de metales pesados en lodo lixiviado**

Metal	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
Arsénico	mg/kg	9,35	10,78
Cadmio	mg/kg	1,54	1,36
Cromo	mg/kg	22,82	22,51
Cobre	mg/kg	5,96	4,47
Plomo	mg/kg	4,85	4,06
Mercurio	mg/kg	N.D	N.D
Aluminio	mg/kg	88 295,43	88 075,20
Hierro	mg/kg	5 759,82	5 740,19

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Parámetros especificados en NMX-AA-122-SCFI-2006**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
Densidad	g/ml	1,26	1,26
Color	Visual	Ámbar	Ámbar
Aluminio	%	2,52	2,57
Alúmina	%	4,66	4,77
Alúmina libre	%	0,67	0,57
Acidez libre	%	2,10	2,40
Hierro	%	1,34	1,56

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XIII. **Cuantificación de metales pesados en solución de aluminio recuperado**

Metal	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
Arsénico	mg/kg	7,12	7,93
Cadmio	mg/kg	0,98	1,03
Cromo	mg/kg	23,53	23,76
Cobre	mg/kg	27,56	27,67
Plomo	mg/kg	5,31	5,24
Mercurio	mg/kg	N.D.	N.D.
Aluminio	mg/kg	96 345,02	96 075,56
Hierro	mg/kg	11 765,81	11 873,73

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. Prueba de jarras (sulfato de aluminio 1 %)

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UTP)	pH
0	0,00	0,00	462,00	45,00	7,73
1	1,00	1,00	283,52	40,00	7,59
2	2,00	2,00	255,76	39,00	7,40
3	3,00	3,00	218,43	37,00	7,30
4	4,00	4,00	193,78	34,00	6,83
5	5,00	5,00	176,55	32,00	6,69
6	6,00	6,00	159,92	29,00	6,53
7	7,00	7,00	145,73	25,00	6,40
8	8,00	8,00	115,28	21,00	6,33
9	9,00	9,00	96,37	17,00	6,25
10	10,00	10,00	71,54	13,00	6,17
11	11,00	11,00	36,34	8,00	6,10
12	12,00	12,00	23,12	6,00	5,99
13	13,00	13,00	16,45	5,00	5,93
14	14,00	14,00	5,89	3,00	5,88
15	15,00	15,00	5,25	2,00	5,82
16	16,00	16,00	5,34	2,00	5,78
17	17,00	17,00	5,33	2,00	5,70

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XV. **Prueba de jarras (aluminio (III) recuperado 1 %)**

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UTP)	pH
0	0,00	0,00	462,00	45,00	7,73
1	1,00	1,00	435,30	39,00	7,66
2	2,00	2,00	405,91	37,00	7,51
3	3,00	3,00	376,02	35,00	7,40
4	4,00	4,00	337,58	31,00	7,42
5	5,00	5,00	319,57	29,00	7,39
6	6,00	6,00	307,74	24,00	7,37
7	7,00	7,00	277,29	22,00	7,30
8	8,00	8,00	254,70	22,00	7,25
9	9,00	9,00	237,61	20,00	7,18
10	10,00	10,00	225,18	18,00	7,10
11	11,00	11,00	199,35	17,00	7,01
12	12,00	12,00	201,71	16,00	6,93
13	13,00	13,00	204,90	14,00	6,86
14	14,00	14,00	202,22	14,00	6,76
15	15,00	15,00	199,08	14,00	6,70

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XVI. **Prueba de jarras (aluminio (III) recuperado 2 %)**

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UTP)	pH
0	0,00	0,00	462,00	45,00	7,73
1	1,00	1,00	299,75	38,00	7,56
2	2,00	2,00	286,58	33,00	7,32
3	3,00	3,00	273,18	28,00	7,12
4	4,00	4,00	257,75	25,00	7,08
5	5,00	5,00	250,03	22,00	6,86
6	6,00	6,00	245,88	20,00	6,74
7	7,00	7,00	225,50	19,00	6,81
8	8,00	8,00	201,76	17,00	6,65
9	9,00	9,00	177,78	14,00	6,47
10	10,00	10,00	147,47	13,00	6,31
11	11,00	11,00	119,61	10,00	6,17
12	12,00	12,00	92,17	8,00	6,01
13	13,00	13,00	64,77	8,00	5,84
14	14,00	14,00	40,01	6,00	5,65
15	15,00	15,00	22,04	5,00	5,50
16	16,00	16,00	6,47	4,00	5,37
17	17,00	17,00	6,79	4,00	5,24
18	18,00	18,00	6,65	4,00	5,15

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XVII. **Prueba de jarras (aluminio (III) recuperado 3 %)**

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UTP)	pH
0	0,00	0,00	462,00	45,00	7,73
1	1,00	1,00	265,93	35,00	7,51
2	2,00	2,00	204,48	31,00	7,22
3	3,00	3,00	135,14	26,00	7,00
4	4,00	4,00	116,93	22,00	6,83
5	5,00	5,00	70,59	17,00	6,65
6	6,00	6,00	36,50	12,00	6,50
7	7,00	7,00	14,88	10,00	6,30
8	8,00	8,00	3,65	9,00	6,05
9	9,00	9,00	2,49	5,00	5,87
10	1,00	10,00	3,33	4,00	5,64
11	1,00	11,00	3,05	4,00	5,42

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla XVIII. **Caracterización del agua para prueba de jarras**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2
pH		7,69	7,77
Turbiedad	NTU	456,00	468,00
Color	UTP	43,00	47,00

Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Los datos calculados, se organizan en tablas para su comprensión y análisis.

3.7.1. Datos calculados

Son todos los datos obtenidos a partir de los resultados calculados, en base a la muestra de cálculo.

Tabla XIX. **Análisis fisicoquímico al lodo crudo**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
pH		6,28	6,44	6,36
Temperatura	°C	24,00	21,80	22,90
Sólidos totales	mg/L	37 272,00	37 622,00	37 447,00
Humedad	%	92,30	91,60	91,95
Aluminio	g/kg	15 000,00	13 400,00	14 200,00
Sulfatos	g/kg	2,76	4,92	3,84
DBO ₅	mg/L	54,00	38,00	46,00
DQO	mg/L	1 324,00	1 756,00	1 540,00
Color	visual	Gris - marrón	Gris – marrón	Gris - marrón

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla II.

Tabla XX. **Análisis fisicoquímico al lixiviado**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
pH		6,89	6,93	6,91
Temperatura	°C	22,40	24,6	23,5
Sólidos totales	mg/L	1 447,00	1 978,00	1 712,00
Sulfatos	mg/L	4,34	5,36	4,85
Aluminio	mg/L	0,82	0,67	0,75
DBO ₅	mg/L	13,00	19,00	16,00
DQO	mg/L	987,00	852,00	919,50

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla III.

Tabla XXI. **Análisis fisicoquímico al lodo filtrado**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
pH		6,35	6,79	6,57
Temperatura	°C	21,60	22,30	21,90
Sólidos totales	mg/L	255 024,00	276 987,00	266 005,50
Humedad	%	25,50	26,50	26,00
Aluminio	g/kg	185 000,00	179 000,00	182 000,00
Color	Visual	Café - gris	Café - gris	Café-gris

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla IV.

Tabla XXII. **Cuantificación de metales pesados al lodo filtrado**

Metal	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
Arsénico	mg/kg	21,45	20,28	20,86
Cadmio	mg/kg	2,15	2,49	2,32
Cromo	mg/kg	52,92	55,75	55,83
Cobre	mg/kg	26,45	25,47	25,96
Plomo	mg/kg	11,23	11,08	11,15
Mercurio	mg/kg	N.D.	N.D.	N.D.
Hierro	mg/kg	16 137,26	16 813,12	16 975,19

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla V.

Tabla XXIII. **Porcentaje en peso de aluminio (III) (g Al(III)/g solución), variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (min)	Porcentaje en peso de recuperación de aluminio (III) (g Al(III)/g solución)		
		C₁₁	C₁₂	\bar{X}
10	15	0,29	0,29	0,29
	30	0,63	0,63	0,63
	45	1,08	1,03	1,06
20	15	0,67	0,67	0,67
	30	1,19	1,25	1,22
	45	1,82	1,81	1,82
30	15	1,07	1,07	1,07
	30	1,95	1,99	1,97
	45	2,52	2,57	2,54

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas VI, VII y VIII.

Tabla XXIV. **Densidad y pH, variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (min)	Densidad (g/mL)			pH		
		C ₁₁	C ₁₂	\bar{X}	C ₁₁	C ₁₂	\bar{X}
10	15	1,07	1,07	1,07	1,89	1,78	1,84
	30	1,15	1,15	1,15	1,62	1,54	1,58
	45	1,25	1,25	1,25	1,24	1,16	1,20
20	15	1,10	1,11	1,11	1,92	1,88	1,90
	30	1,17	1,18	1,17	1,65	1,77	1,71
	45	1,25	1,26	1,26	1,31	1,23	1,27
30	15	1,12	1,12	1,12	2,01	2,05	2,03
	30	1,18	1,19	1,19	1,85	1,94	1,90
	45	1,26	1,26	1,26	1,43	1,51	1,47

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas VI, VII y VIII.

Tabla XXV. **Porcentaje en peso de alúmina (g Al₂O₃/g solución), variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (min)	Porcentaje en peso de recuperación de Alúmina (g Al ₂ O ₃ /g solución)		
		C ₁₁	C ₁₂	\bar{X}
10	15	0,53	0,53	0,53
	30	1,17	1,17	1,17
	45	2,01	1,90	1,96
20	15	1,25	1,24	1,24
	30	2,21	2,31	2,26
	45	3,37	3,36	3,36
30	15	1,98	1,99	1,98
	30	3,62	3,68	3,65
	45	4,66	4,77	4,71

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas VI, VII y VIII.

Tabla XXVI. **Aluminio (III) lixiviado (g/lote), variando la concentración de ácido sulfúrico, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico(% V/V)	Tiempo de agitación (min)	Aluminio (III) lixiviado (g/lote)	Porcentaje de extracción (%)
10	15	3,08	5,08
	30	6,97	11,49
	45	1,81	19,47
20	15	7,69	12,68
	30	14,34	23,63
	45	21,57	35,55
30	15	11,81	19,47
	30	13,39	22,07
	45	32,07	52,87

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas VI, VII y VIII.

Tabla XXVII. **Eficiencia de lixiviación, expresado como mg Al(III)/mL de ácido sulfúrico, en función del tiempo de agitación y la concentración de ácido sulfúrico**

Concentración de ácido (% v/v)	Tiempo de agitación (min)	Aluminio (III) recuperado (mg)	Relación mg Al(III)/ mL ácido sulfúrico
10	15	3 960,00	39,60
	30	6 951,79	69,52
	45	11 720,01	117,20
20	15	7 550,00	37,75
	30	13 459,43	67,30
	45	21 565,72	107,83
30	15	13 391,57	44,64
	30	24 780,54	82,60
	45	32 074,62	106,92

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas VI, VII y VIII.

Tabla XXVIII. **Porcentaje en peso de aluminio (III) (g Al(III)/g solución), utilizando ácido sulfúrico al 30 % y variando el tiempo de agitación, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (min)	Porcentaje en peso de recuperación de aluminio (III) (g Al(III)/g solución)		
		C ₁₁	C ₁₂	\bar{X}
30	1	2,52	2,51	2,52
	2	2,68	2,64	2,66
	3	2,87	2,91	2,89
	4	3,13	3,16	3,15
	5	3,48	3,52	3,50
	6	3,59	3,63	3,61
	7	3,56	3,62	3,59
	8	3,40	3,63	3,52

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla IX.

Tabla XXIX. **Densidad y pH de soluciones de aluminio (III),
utilizando ácido sulfúrico al 30 % y variando el tiempo de
agitación, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (horas)	Densidad (g/mL)			pH		
		C ₁₁	C ₁₂	\bar{X}	C ₁₁	C ₁₂	\bar{X}
30	1	1,27	1,27	1,27	1,43	1,48	1,46
	2	1,28	1,28	1,28	1,44	1,45	1,44
	3	1,29	1,30	1,29	1,45	1,46	1,46
	4	1,30	1,31	1,31	1,46	1,47	1,47
	5	1,32	1,40	1,33	1,48	1,48	1,48
	6	1,32	1,40	1,33	1,48	1,48	1,48
	7	1,32	1,40	1,33	1,48	1,48	1,48
	8	1,32	1,40	1,33	1,48	1,48	1,48

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla IX

Tabla XXX. **Aluminio (III) lixiviado (g/lote) y porcentaje de extracción de aluminio (III), utilizando ácido sulfúrico al 30 % y variando el tiempo de agitación, a 100 RPM**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (horas)	Aluminio (III) lixiviado (g/lote)	Porcentaje de extracción (%)
30	1	31,94	53,18
	2	34,00	56,24
	3	37,36	61,02
	4	41,13	66,50
	5	46,64	74,04
	6	48,02	76,32
	7	47,74	75,92
	8	46,79	74,38

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla IX.

Tabla XXXI. **Cuantificación de metales pesados en lodo lixiviado**

Metal	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
Arsénico	mg/kg	9,35	10,78	10,06
Cadmio	mg/kg	1,54	1,36	1,45
Cromo	mg/kg	22,82	22,51	45,33
Cobre	mg/kg	5,96	4,47	5,21
Plomo	mg/kg	4,85	4,06	4,45
Mercurio	mg/kg	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	mg/kg	88 295,43	88 075,20	88 185,31
Hierro	mg/kg	5 759,82	5 740,19	5 750,00

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XI.

Tabla XXXII. **Parámetros especificados en NMX-AA-122-SCFI-2006**

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio	Especificación	Porcentaje de error (%)
Densidad	g/ml	1,26	1,26	1,26	1,29	2,32
Color	visual	Ámbar	Ámbar	Ámbar	Ámbar	-----
Aluminio	%	2,52	2,57	2,54	3,10 _{Mínimo}	18,06
Alúmina	%	4,66	4,77	4,71	5,90 _{Mínimo}	20,16
Alúmina libre	%	0,07	0,07	0,62	0,50 _{Máximo}	28,00
Acidez libre	%	2,10	2,40	2,25	1,50 _{Máximo}	50,00
Hierro	%	0,29	0,33	0,3121	1,00 _{Máximo}	68,79

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XII.

Tabla XXXIII. Cuantificación de metales pesados en solución de aluminio (III) recuperado

Metal	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
Arsénico	mg/kg	7,12	7,93	7,53
Cadmio	mg/kg	0,98	1,03	1,00
Cromo	mg/kg	23,53	23,76	23,65
Cobre	mg/kg	27,56	27,67	27,62
Plomo	mg/kg	5,31	5,24	5,28
Mercurio	mg/kg	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	mg/kg	96 345,02	96 075,56	96 210,29
Hierro	mg/kg	11 765,81	11 873,73	11 819,77

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XIII.

Tabla XXXIV. Color y turbiedad de agua cruda

Parámetro	Unidad	Corrida 1	Corrida 2	Promedio
pH		7,69	7,77	7,73
Turbiedad	NTU	456,00	468,00	462,00
Color	UTP	43,00	47,00	45,00

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XVIII.

Tabla XXXV. Prueba de jarras (sulfato de aluminio 1 %)

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	Color (UTP)	Turbiedad (NTU)	pH	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)
0	0,00	0,00	41,00	462,00	7,73	0,00	0,00
1	1,00	1,00	40,00	283,52	7,59	38,63	11,11
2	2,00	2,00	39,00	255,76	7,40	44,64	13,33
3	3,00	3,00	37,00	218,43	7,30	52,72	17,78
4	4,00	4,00	34,00	193,78	6,83	58,06	24,44
5	5,00	5,00	32,00	176,55	6,69	61,79	28,89
6	6,00	6,00	29,00	159,92	6,53	65,39	35,56
7	7,00	7,00	25,00	145,73	6,40	68,46	44,44
8	8,00	8,00	21,00	115,28	6,33	75,05	53,33
9	9,00	9,00	17,00	96,37	6,25	79,14	62,22
10	10,00	10,00	13,00	71,54	6,17	84,52	71,11
11	11,00	11,00	8,00	36,34	6,10	92,13	82,22
12	12,00	12,00	6,00	23,12	5,99	95,00	86,67
13	13,00	13,00	5,00	16,45	5,93	96,44	88,89
14	14,00	14,00	3,00	5,89	5,88	98,73	93,33
15	15,00	15,00	2,00	5,25	5,82	98,86	95,56
16	16,00	16,00	2,00	5,34	5,78	98,84	95,56
17	17,00	17,00	2,00	5,33	5,70	98,85	95,56

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XIV.

Tabla XXXVI. Prueba de jarras (aluminio recuperado 1 %)

Jarra	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ cm ₃ en 1L	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UTP)	pH	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)
0	0,00	0,00	462,00	45,00	7,73	0,00	0,00
1	1,00	1,00	435,30	39,00	7,66	5,78	13,33
2	2,00	2,00	405,91	37,00	7,51	12,14	17,78
3	3,00	3,00	376,02	35,00	7,40	18,61	22,22
4	4,00	4,00	337,58	31,00	7,42	26,93	31,11
5	5,00	5,00	319,57	29,00	7,39	30,83	35,56
6	6,00	6,00	307,74	24,00	7,37	33,39	46,67
7	7,00	7,00	277,29	22,00	7,30	39,98	51,11
8	8,00	8,00	254,70	22,00	7,25	44,87	51,11
9	9,00	9,00	237,61	20,00	7,18	48,57	55,56
10	10,00	10,00	225,18	18,00	7,10	51,26	60,00
11	11,00	11,00	199,35	17,00	7,01	56,85	62,22
12	12,00	12,00	201,71	16,00	6,93	56,34	64,44
13	13,00	13,00	204,90	14,00	6,86	55,65	68,89
14	14,00	14,00	202,22	14,00	6,76	56,23	68,89
15	15,00	15,00	199,08	14,00	6,70	56,91	68,89

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XV.

Tabla XXXVII. Prueba de jarras (aluminio recuperado 2 %)

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	Turbiedad (NTU)	Color (UTP)	pH	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)
0	0,00	0,00	462,00	45,00	7,73	0,00	0,00
1	1,00	1,00	299,75	38,00	7,56	35,12	15,56
2	2,00	2,00	286,58	33,00	7,32	37,97	26,67
3	3,00	3,00	273,18	28,00	7,12	40,87	37,78
4	4,00	4,00	257,75	25,00	7,08	44,21	44,44
5	5,00	5,00	250,03	22,00	6,86	45,88	51,11
6	6,00	6,00	245,88	20,00	6,74	46,78	55,56
7	7,00	7,00	225,50	19,00	6,81	51,19	57,78
8	8,00	8,00	201,76	17,00	6,65	56,33	62,22
9	9,00	9,00	177,78	14,00	6,47	61,52	68,89
10	10,00	10,00	147,47	13,00	6,31	68,08	71,11
11	11,00	11,00	119,61	10,00	6,17	74,11	77,78
12	12,00	12,00	92,17	8,00	6,01	80,05	82,22
13	13,00	13,00	64,77	8,00	5,84	85,98	82,22
14	14,00	14,00	40,01	6,00	5,65	91,34	86,67
15	15,00	15,00	22,04	5,00	5,50	95,23	88,89
16	16,00	16,00	6,47	4,00	5,37	98,60	91,11
17	17,00	17,00	6,79	4,00	5,24	98,53	91,11
18	18,00	18,00	6,65	4,00	5,15	98,56	91,11

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XVI.

Tabla XXXVIII. **Prueba de jarras (aluminio recuperado 3 %)**

Jarra	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ cm ³ en 1L	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ mg/L	Color (UTP)	Turbiedad (NTU)	pH	Remoción de turbiedad (%)	Remoción de color (%)
0	0,00	0,00	45,00	462,00	7,73	0,00	0,00
1	1,00	1,00	35,00	265,93	7,51	42,44	22,22
2	2,00	2,00	31,00	204,48	7,22	55,74	31,11
3	3,00	3,00	26,00	135,14	7,00	70,75	42,22
4	4,00	4,00	22,00	116,93	6,83	74,69	51,11
5	5,00	5,00	17,00	70,59	6,65	84,72	62,22
6	6,00	6,00	12,00	36,50	6,50	92,10	73,33
7	7,00	7,00	10,00	14,88	6,30	96,78	77,78
8	8,00	8,00	9,00	3,65	6,05	99,21	80,00
9	9,00	9,00	5,00	2,49	5,87	99,46	88,89
10	10,00	10,00	4,00	3,33	5,64	99,28	91,11
11	11,00	11,00	4,00	3,05	5,42	99,34	91,11

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XVII.

Tabla XXXIX. **Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo**

Concentración de ácido sulfúrico	Tiempo de reacción		
	T1	T2	T3
C1	0,29	0,67	1,07
	0,29	0,67	1,07
C2	0,63	1,19	1,95
	0,63	1,25	1,99
C3	1,08	1,82	2,52
	1,03	1,81	2,57

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XLVIII.

Tabla XL. **Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo**

Concentración de ácido sulfúrico	Tiempo de reacción			
	T1	T2	T3	Total
C1	0,2878	0,6308	1,0558	0,2878
C2	0,6708	1,2204	1,8167	0,6708
C3	1,0718	1,9703	2,5447	1,0718
Total	2,0303	3,8215	5,4172	2,0303

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XLIX.

Tabla XLI. **Análisis de varianza para el proceso de extracción de aluminio (III), utilizando tres concentraciones de ácido y tres tiempos de agitación**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F _{calculada}	F _{tabulada}
Concentración de ácido sulfúrico	0,6686	2,0000	0,3343	6,3292	4,2560
Tiempo de agitación	0,7053	2,0000	0,3527	109,9325	4,2560
Interrelación	41,2113	4,0000	10,3028	1 680,3926	3,6330
Error	0,0552	9,0000	0,0061		
Total	32,4101	17,0000			

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla L.

Tabla XLII. **Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Sulfato de aluminio 1 %	Aluminio (III) recuperado 2 %
38,6320	35,1200
44,6407	37,9700
52,7208	40,8700
58,0563	44,2100
61,7857	45,8800
65,3853	46,7800
68,4567	51,1900
75,0476	56,3300
79,1407	61,5200
84,5152	68,0800
92,1342	74,1100
94,9957	80,0500
96,4394	85,9800
98,7251	91,3400
98,8636	95,2300
98,8442	98,6000
98,8463	98,5300
	98,5600

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla LI.

Tabla XLIII. **Análisis de varianza, para los datos de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F_{calculada}	F_{tabulada}
Porcentaje de remoción de turbiedad	814,8626	1,0000	814,8626	1,6727	4,1393
Dentro de los grupos	16 076,1158	33,0000	487,1550		
Total	16 890,9784	34,0000			

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla LII.

Tabla XLIV. **Análisis de varianza, para los datos de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F_{calculada}	F_{tabulada}
Porcentaje de remoción de color	494,9790	1,0000	494,9790	0,5251	4,1393
Dentro de los grupos	31 104,5791	33,0000	942,5630		
Total	31 599,5581	34,0000			

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla LIII.

Tabla XLV. **Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Porcentaje de remoción de color			
Sulfato de aluminio 1 %	Aluminio (III) recuperado 2 %	Total	Media
2,4390	7,3171	9,7561	4,8780
4,8780	19,5122	24,3902	12,1951
9,7561	31,7073	41,4634	20,7317
17,0732	39,0244	56,0976	28,0488
21,9512	46,3415	68,2927	34,1463
29,2683	51,2195	80,4878	40,2439
39,0244	53,6585	92,6829	46,3415
48,7805	58,5366	107,3171	53,6585
58,5366	65,8537	124,3902	62,1951
68,2927	68,2927	136,5854	68,2927
80,4878	75,6098	156,0976	78,0488
85,3659	80,4878	165,8537	82,9268
87,8049	80,4878	168,2927	84,1463
92,6829	85,3659	178,0488	89,0244
95,1220	87,8049	182,9268	91,4634
95,1220	90,2439	185,3659	92,6829
95,1220	90,2439	185,3659	92,6829
	90,2439	90,2439	45,1220

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla LIV.

3.8. Análisis estadístico

Se empleará un diseño completamente aleatorio, involucrando combinaciones de tratamientos factoriales. Para establecer cuál de las tres concentraciones de solvente (ácido sulfúrico diluido) y tiempo de reacción, se determinó la cantidad de extracción de aluminio (III), analizando muestras en tres tiempos distintos. Se obtendrán réplicas de los experimentos de extracción de aluminio (III) en cada combinación de tratamientos, que dio un total de $9 * 2 = 18$ unidades experimentales.

Los factores experimentales y factores respuestas se detallan a continuación.

- Factores experimentales:
 - Concentración de ácido sulfúrico (10, 20 y 30 % v/v)
 - Tiempo de agitación (15, 30 y 45 minutos)

- Factores respuesta:
 - Porcentaje de extracción de aluminio (III)

Con estos registros se pretende obtener los siguientes datos:

- Porcentaje de eficiencia en la extracción de aluminio (III), empleando distintas concentraciones de solvente (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo de reacción.

- Análisis de variancia para dos factores (concentración de ácido sulfúrico y tiempo de reacción) en función del porcentaje de extracción de aluminio (III).

- Análisis de varianza de dos factores: este análisis de varianza se emplea en experimentos de dos factores utilizando observaciones repetidas en un diseño completamente aleatorio, considerando el caso de n réplicas de combinaciones de tratamiento determinada por “ a ” niveles del factor A y “ b ” niveles del factor B. Cada combinación define una celda en un arreglo de la siguiente forma.

Tabla XLVI. **Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores**

A	B				Total	Media
	1	2	.....	b		
1	y_{111}	y_{121}	.....	y_{1b_1}	$T_{1..}$	y_1
.	y_{112}	.....	y_{1b_1}			
.	.					
.	.				$T_{2..}$	y_2
.	y_{11n}	.....	y_{1b_1}			
.	y_{111}	.....	y_{2b_1}			
2	.				$T_{...}$	y_n
.	.					
.	.					
.	.					
a	y_{a1n}	.....	y_{abn}			
Total	T_1	T_2	.....	T_b	$T_{...}$	
Media	y_1	y_2	.....	y_b		$y_{...}$

Fuente: WALPOLE, Ronald. Probabilidad y estadística para ingenieros. p.531.

La finalidad de este estudio es comprobar cuál hipótesis es la que mejor se ajusta a la parte experimental del estudio, aceptando la hipótesis nula o las hipótesis alternativas.

Para este análisis se emplean las siguientes ecuaciones:

Tabla XLVII. **Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	f calculada
Concentración de ácido	$SSA = \frac{\sum_{i=1}^a T_i^2 \dots}{bn} - \frac{T^2}{abn}$	$a - 1$	$S_1^2 = \frac{SSA}{a - 1}$	$f_1 = \frac{S_1^2}{s^2}$
Tiempo de reacción	$SSB = \frac{\sum_{j=1}^b T_j^2 \dots}{an} - \frac{T^2}{abn}$	$b - 1$	$S_1^2 = \frac{SSB}{b - 1}$	$f_2 = \frac{S_2^2}{s^2}$
Interrelación	$SS(AB) = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij} \dots^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^a T_{i.} \dots^2}{bn} - \frac{\sum_{j=1}^b T_{.j} \dots^2}{an} + \frac{T^2 \dots}{abn}$	$(a - 1)(b - 1)$	$S_3^2 = \frac{SS(AB)}{(a - 1)(b - 1)}$	$f_1 = \frac{S_{31}^2}{s^2}$
Error	$SSE = SST - SSA - SSB - SS(AB)$	$ab(n - 1)$	$S^2 = \frac{SSE}{ab(n - 1)}$	
Total	$SST = \sum_{j=1}^b \sum_{i=1}^a T_{ij} \dots^2 = \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{T^2 \dots}{abn}$	$N - 1$		

Fuente: WALPOLE, Ronald. Probabilidad y estadística para ingenieros. p.534.

Empleando un análisis de varianza de dos factores (concentración de ácido y tiempo de reacción), con un nivel de significancia de 0.05 se busca probar las siguientes hipótesis:

H_a : Sí hay diferencias significativas en el porcentaje de extracción de aluminio (III), mediante la variación en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo de reacción.

H_a' : Sí existe diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbiedad y color, utilizando la solución de coagulante recuperado contra eficiencia de remoción de un coagulante comercial.

$$\mu_1 \neq \mu_2$$

H_o : No hay diferencias significativas en el porcentaje de extracción de aluminio (III), mediante la variación en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo de reacción.

H_o' : No existe diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbiedad y color, utilizando la solución de coagulante recuperado contra eficiencia de remoción de un coagulante comercial.

$$\mu_1 = \mu_2$$

Para identificar cuál de las tres concentraciones de solvente y tiempo de reacción es preferible, se determinó la cantidad de extracción de aluminio (III), analizando muestras en tres tiempos distintos. En el experimento se obtendrán réplicas de extracción de aluminio (III) en cada combinación de tratamientos.

Tabla XLVIII. **Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo**

Concentración de ácido sulfúrico	Tiempo de reacción		
	T1	T2	T3
C1	0,29	0,67	1,07
	0,29	0,67	1,07
C2	0,63	1,19	1,95
	0,63	1,25	1,99
C3	1,08	1,82	2,52
	1,03	1,81	2,57

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Extracción de aluminio (III) en porcentaje en peso, empleando tres concentración de ácido sulfúrico en función del tiempo**

Concentración de ácido sulfúrico	Tiempo de reacción			
	T1	T2	T3	Total
C1	0,2878	0,6308	1,0558	1,9744
C2	0,6708	1,2204	1,8167	3,7080
C3	1,0718	1,9703	2,5447	5,5868
Total	2,0303	3,8215	5,4172	11,2691

Fuente: elaboración propia.

Tabla L. **Análisis de varianza para el proceso de extracción de aluminio (III) recuperado, utilizando tres concentraciones de ácido y tres tiempos de agitación**

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_{calculada}	F_{tabulada}
Concentración de ácido sulfúrico	0,6686	2,0000	0,3343	6,3292	4,2560
Tiempo de agitación	0,7053	2,0000	0,3527	109,9325	4,2560
Interrelación	41,2113	4,0000	10,3028	1680,3926	3,6330
Error	0,0552	9,0000	0,0061		
Total	32,4101	17,0000			

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Análisis de varianza de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F_{calculada}	F_{tabulada}
Porcentaje de remoción de turbiedad	814,8626	1,0000	814,8626	1,6727	4,1393
Dentro de los grupos	16 076,1158	33,0000	487,1550		
Total	16 890,9784	34,0000			

Fuente: elaboración propia.

Tabla LII. **Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Sulfato de aluminio comercial 1 %	Aluminio (III) recuperado 2 %
38,6320	35,1200
44,6407	37,9700
52,7208	40,8700
58,0563	44,2100
61,7857	45,8800
65,3853	46,7800
68,4567	51,1900
75,0476	56,3300
79,1407	61,5200
84,5152	68,0800
92,1342	74,1100
94,9957	80,0500
96,4394	85,9800
98,7251	88,5034
98,8636	95,2300
98,8442	98,6000
98,8463	98,5300
	98,5600

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Porcentaje de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %**

Sulfato de aluminio comercial 1 %	Aluminio (III) recuperado 2 %
2,4390	7,3171
4,8780	19,5122
9,7561	31,7073
17,0732	39,0244
21,9512	46,3415
29,2683	51,2195
39,0244	53,6585
48,7805	58,5366
58,5366	65,8537
68,2927	68,2927
80,4878	75,6098
85,3659	80,4878
87,8049	80,4878
92,6829	85,3659
95,1220	87,8049
95,1220	90,2439
95,1220	90,2439
	90,2439

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIV. Análisis de varianza de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 % y una solución de aluminio (III) recuperado al 2 %

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F_{calculada}	F_{tabulada}
Porcentaje de remoción de color	494,9790	1,0000	494,9790	0,5251	4,1393
Dentro de los grupos	31 104,5791	33,0000	942,5630		
Total	31 599,5581	34,0000			

Fuente: elaboración propia.

Con base en los resultados del análisis estadístico, se concluye que:

- Respecto porcentaje de extracción de aluminio (III):
 - Sí existe diferencia en la extracción de aluminio (III), al emplear distintas concentraciones de ácido sulfúrico.
 - Sí existe diferencia en la extracción de aluminio (III), en función del tiempo de agitación.
 - Sí existe interacción entre la concentración de ácido sulfúrico y el tiempo de agitación.

Por lo tanto:

- H_a : Sí existe variación significativa en el porcentaje de extracción de aluminio (III), mediante la variación en la concentración de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo.

Respecto a la eficiencia en remoción de color y turbiedad:

- No existe diferencia en la remoción de turbiedad, al emplear sulfato de aluminio comercial al 1 % y la solución de aluminio (III) al 2 %.
- No existe diferencia en la remoción de color, al emplear sulfato de aluminio comercial al 1 % y la solución de aluminio (III) recuperada al 2 %.

Por lo tanto:

- H_a' : No existe diferencia significativa en la eficiencia de remoción de turbiedad y color, utilizando la solución de coagulante recuperado al 2 % contra la eficiencia de remoción de sulfato aluminio comercial al 1 %.

4. RESULTADOS

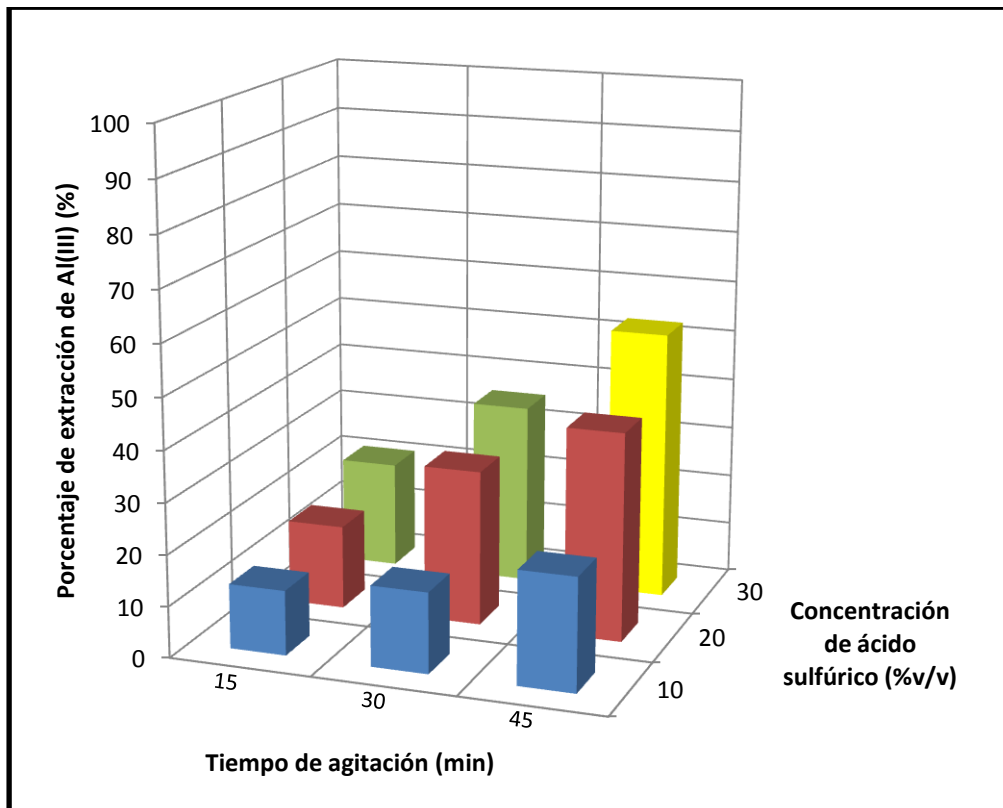
Se procede a analizar los datos anteriormente presentados, agrupándolos en tablas.

Tabla LV. **Porcentaje de recuperación de aluminio (III), gramos de aluminio (III) lixiviado y porcentaje en peso de recuperación de aluminio (III), en función del tiempo y la concentración de ácido sulfúrico**

Concentración de ácido sulfúrico (% V/V)	Tiempo de agitación (min)	Aluminio (III) lixiviado (g/lote)	Porcentaje de extracción (%)	Porcentaje en peso de recuperación (g Al(III)/g solución)
10	15,00	7,68	12,66	0,72
	30,00	9,55	15,74	0,83
	45,00	13,39	22,07	1,07
20	15,00	9,95	16,40	0,90
	30,00	18,46	30,43	1,57
	45,00	24,78	40,85	1,97
30	15,00	12,72	20,97	1,14
	30,00	21,57	35,55	1,82
	45,00	32,07	52,87	2,54

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXII, XXV y XXVI.

Figura 5. **Porcentaje de extracción de aluminio (III), para tres concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de agitación**



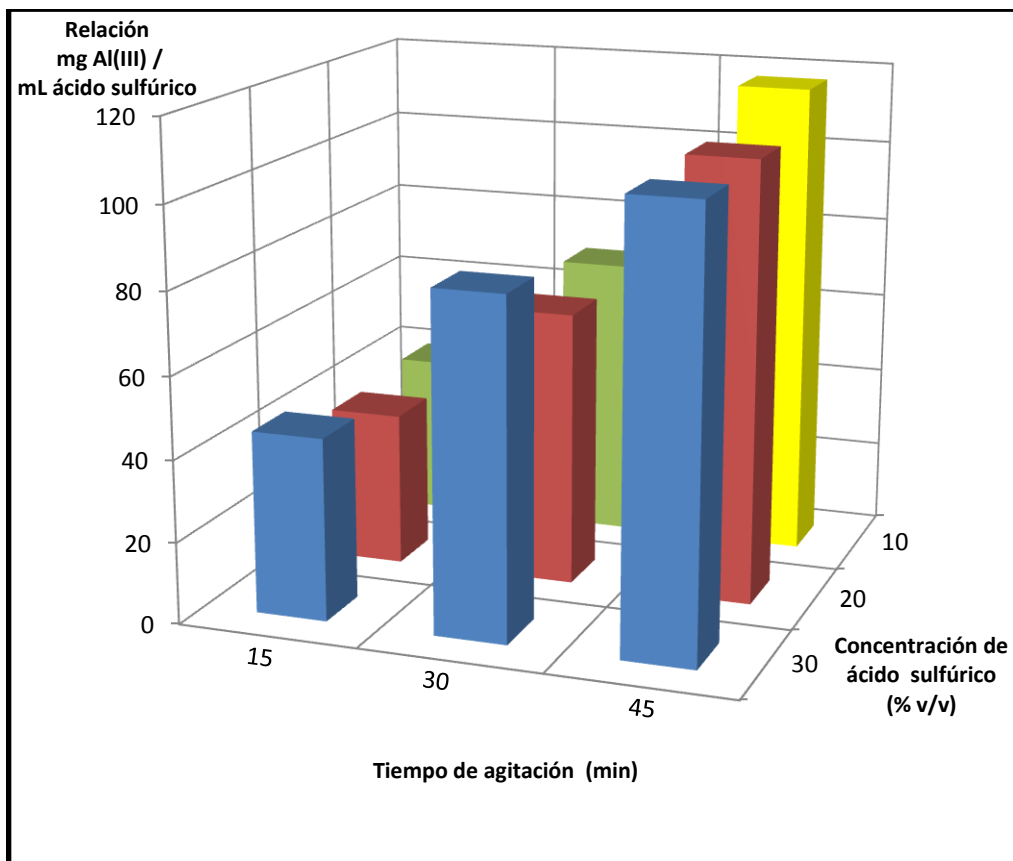
Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXVI.

Tabla LVI. **Eficiencia de lixiviación, expresado como mg Al(III)/ml ácido sulfúrico, en función del tiempo de agitación y la concentración de ácido sulfúrico**

Concentración de ácido (% v/v)	Tiempo de agitación (min)	Aluminio (III) recuperado (mg)	Relación mg Al(III)/ml ácido sulfúrico
10	15,00	3 960,00	39,60
	30,00	6 951,79	69,52
	45,00	11 720,01	117,20
20	15,00	7 550,00	37,75
	30,00	13 459,43	67,30
	45,00	21 565,72	107,83
30	15,00	13 391,57	44,64
	30,00	24 780,54	82,60
	45,00	32 074,62	106,92

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXVII.

Figura 6. **Eficiencia de lixiviación, expresado como mg Al(III)/ml ácido sulfúrico, para tres concentraciones de ácido en función del tiempo de agitación**



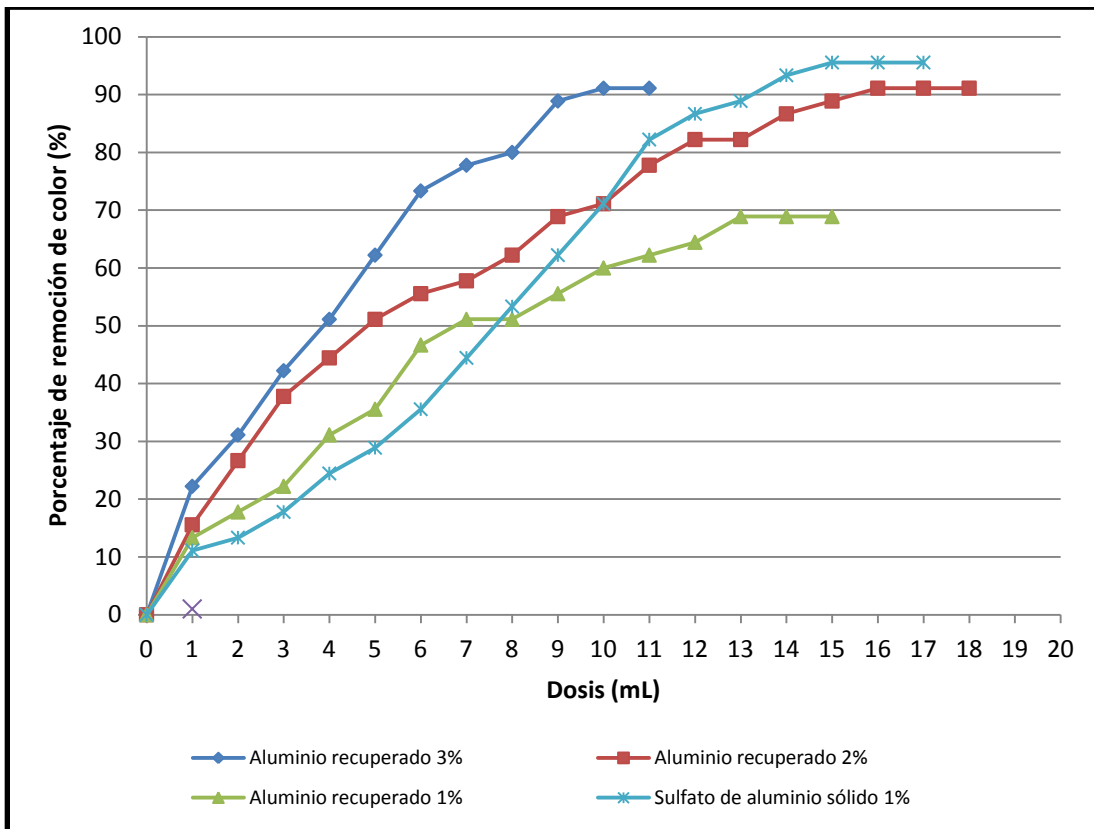
Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXVII.

Tabla LVII. **Porcentaje de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres diferentes concentraciones de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada**

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	porcentaje de remoción de color			
			Aluminio comercial 1 %	Aluminio recuperado 1 %	Aluminio recuperado 2 %	Aluminio recuperado 3 %
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,00	1,00	11,11	13,33	15,56	22,22
2	2,00	2,00	13,33	17,78	26,67	31,11
3	3,00	3,00	17,78	22,22	37,78	42,22
4	4,00	4,00	24,44	31,11	44,44	51,11
5	5,00	5,00	28,89	35,56	51,11	62,22
6	6,00	6,00	35,56	46,67	55,56	73,33
7	7,00	7,00	44,44	51,11	57,78	77,78
8	8,00	8,00	53,33	51,11	62,22	80,00
9	9,00	9,00	62,22	55,56	68,89	88,89
10	10,00	10,00	71,11	60,00	71,11	91,11
11	11,00	11,00	82,22	62,22	77,78	91,11
12	12,00	12,00	86,67	64,44	82,22	
13	13,00	13,00	88,89	68,89	82,22	
14	14,00	14,00	93,33	68,89	86,67	
15	15,00	15,00	95,56	68,89	88,89	
16	16,00	16,00	95,56		91,11	
17	17,00	17,00	95,56		91,11	
18	18,00	18,00			91,11	

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII Y XXXVIII.

Figura 7. **Porcentaje de remoción de color, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres concentraciones de solución de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis de aplicada**



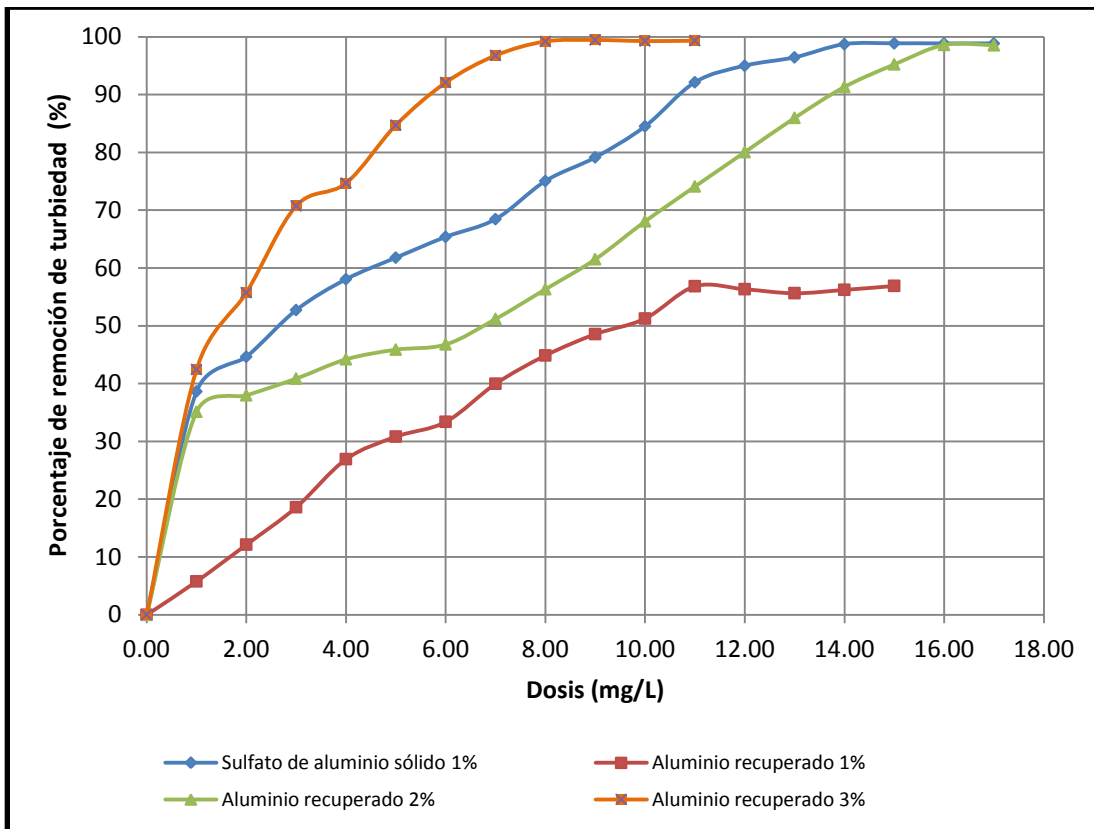
Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII Y XXXVIII.

Tabla LVIII. **Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres diferentes concentraciones de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada**

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	porcentaje de remoción de turbiedad			
			Aluminio comercial 1 %	Aluminio recuperado 1 %	Aluminio recuperado 2 %	Aluminio recuperado 3 %
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1,00	1,00	38,63	5,78	35,12	42,44
2	2,00	2,00	44,64	12,14	37,97	55,74
3	3,00	3,00	52,72	18,61	40,87	70,75
4	4,00	4,00	58,06	26,93	44,21	74,69
5	5,00	5,00	61,79	30,83	45,88	84,72
6	6,00	6,00	65,39	33,39	46,78	92,10
7	7,00	7,00	68,46	39,98	51,19	96,78
8	8,00	8,00	75,05	44,87	56,33	99,21
9	9,00	9,00	79,14	48,57	61,52	99,46
10	10,00	10,00	84,52	51,26	68,08	99,28
11	11,00	11,00	92,13	56,85	74,11	99,34
12	12,00	12,00	95,00	56,34	80,05	
13	13,00	13,00	96,44	55,65	85,98	
14	14,00	14,00	98,73	56,23	91,34	
15	15,00	15,00	98,86	56,91	95,23	
16	16,00	16,00	98,84		98,60	
17	17,00	17,00	98,85		98,53	
18	18,00	18,00			98,56	

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII Y XXXVIII.

Figura 8. **Porcentaje de remoción de turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres concentraciones de solución de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis de aplicada**



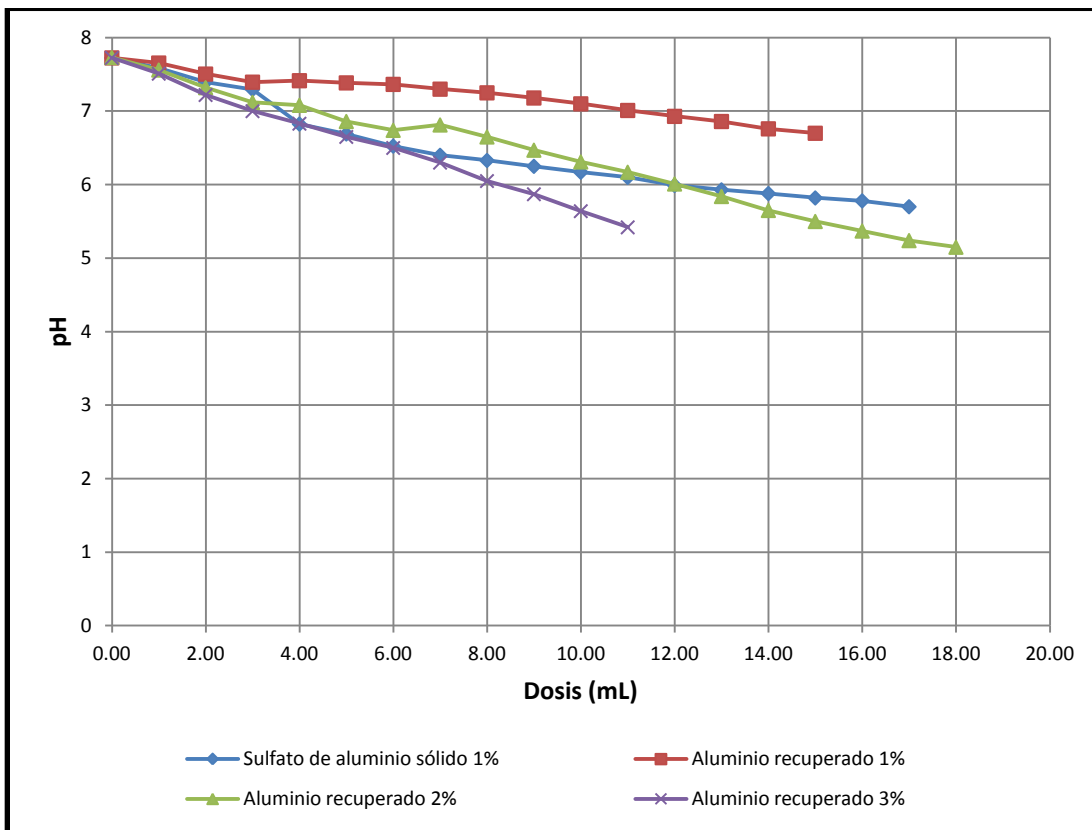
Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII Y XXXVIII.

Tabla LIX. **Variación de pH, utilizando sulfato de aluminio comercial y tres diferentes concentraciones de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada**

Jarra	Al ₂ (SO ₄) ₃ cm ₃ en 1L	Al ₂ (SO ₄) ₃ mg/L	pH final			
			Aluminio comercial 1 %	Aluminio recuperado 1 %	Aluminio recuperado 2 %	Aluminio recuperado 3 %
0	0,00	0,00	7,73	7,73	7,73	7,73
1	1,00	1,00	7,59	7,66	7,56	7,51
2	2,00	2,00	7,40	7,51	7,32	7,22
3	3,00	3,00	7,30	7,40	7,12	7,00
4	4,00	4,00	6,83	7,42	7,08	6,83
5	5,00	5,00	6,69	7,39	6,86	6,65
6	6,00	6,00	6,53	7,37	6,74	6,50
7	7,00	7,00	6,40	7,30	6,81	6,30
8	8,00	8,00	6,33	7,25	6,65	6,05
9	9,00	9,00	6,25	7,18	6,47	5,87
10	10,00	10,00	6,17	7,10	6,31	5,64
11	11,00	11,00	6,10	7,01	6,17	5,42
12	12,00	12,00	5,99	6,93	6,01	5,23
13	13,00	13,00	5,93	6,86	5,84	5,08
14	14,00	14,00	5,88	6,76	5,65	4,89
15	15,00	15,00	5,82	6,70	5,50	4,68
16	16,00	16,00	5,78	6,65	5,37	
17	17,00	17,00	5,70	6,59	5,24	
18	18,00	18,00		6,50	5,15	

Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII Y XXXVIII.

Figura 9. Variación de pH, en la remoción de color y turbiedad, utilizando sulfato de aluminio comercial al 1 %, y tres concentraciones de solución de aluminio (III) recuperado, en función de la dosis aplicada



Fuente: elaboración propia, con base en las tablas XXXV, XXXVI, XXXVII Y XXXVIII.

Tabla LX. **Comparación de la calidad del aluminio recuperado contra las especificaciones descritas en NMX-AA-122-SCFI-2006**

Parámetro	Unidad	Promedio	Especificación	Porcentaje de error (%)
Densidad	g/ml	1,26	1,29 ¹	2,32
Color	visual	Ámbar	Ámbar	-----
Aluminio	%	2,54	3,10 _{Mínimo}	18,06
Alúmina	%	4,71	5,90 _{Mínimo}	20,16
Alúmina libre	%	0,62	0,50 _{Máximo}	28,00
Acidez libre	%	2,25	1,50 _{Máximo}	50,00
Hierro	%	0,3121	1,00 _{Máximo}	68,79

Fuente: elaboración propia, con base en la tabla XXXII.

¹Se tomó la densidad = 1.29 g/ml, debido a que es la densidad mínima para una solución de sulfato de aluminio, con el contenido mínimo de aluminio.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El objetivo principal de esta investigación es evaluar un método experimental de lixiviación a nivel laboratorio, para la recuperación de aluminio (III), como alternativa para el aprovechamiento del lodo generado en las plantas potabilizadoras.

Como se puede observar en la tabla LV, sección de resultados, para realizar la extracción de aluminio (III), se variaron tres tiempos de agitación (15, 30 y 45 minutos), y tres concentraciones de ácido sulfúrico (10, 20 y 30 % v/v), según la figura 5, sección de resultados, el tiempo de agitación y la concentración de ácido afecta directamente el porcentaje de extracción; se puede observar que a mayor tiempo de agitación y mayor concentración de ácido, existe una mejor recuperación de aluminio, la cual corresponde a 2,54 % (g Al(III)/g solución), la misma se obtuvo utilizando una solución extractora de ácido sulfúrico al 30 % v/v, agitando durante 45 minutos.

La concentración de ácido utilizado en el proceso de extracción, provocó que la mayor cantidad de aluminio fuera disuelto en la solución ácida, aplicando un exceso de ácido, para que el aluminio actuara como el reactivo limitante en la reacción, previendo que el lodo contiene otros materiales que demanda ácido en la reacción; este hecho afecta el pH de la solución final, ya que el ácido que no reaccionó con ningún metal, quedó como ácido libre en la solución y provocó que las soluciones de aluminio tengan un pH ácido (pH = 1 – 2).

El tiempo de agitación o de contacto, influyó en la extracción de aluminio, debido que a mayor tiempo de contacto entre el lodo y la solución de ácido, existen mayores probabilidades que el ácido reaccione con los hidróxidos de aluminio contenidos en el lodo, y se disuelve la mayor cantidad de aluminio en la solución ácida.

La eficiencia de lixiviación se calculó por medio de la relación miligramos de aluminio extraídos contra mililitros de ácido sulfúrico utilizados; se realizó esta relación, para identificar con qué condiciones de operación se puede extraer la mayor cantidad de aluminio, utilizando la menor cantidad de ácido sulfúrico.

Según la tabla LVI y la figura 6, sección de resultados, la mayor eficiencia de lixiviación para las condiciones propuestas, se alcanzó utilizando una solución de ácido sulfúrico al 10 % v/v, agitando a 100 revoluciones por minuto (rpm), durante 45 minutos, se obtuvo la mayor cantidad de aluminio (III).

Estos datos indican que el tiempo de contacto no fue el suficiente, para que todo el ácido sulfúrico reaccionara en su totalidad con todo el aluminio disponible, provocando que quedara ácido sin reaccionar en la solución final.

Obviamente la solución al 30 % v/v extrajo más aluminio, pero el proceso no es eficiente, ya que se utiliza más ácido que utilizando una solución de ácido al 10 % v/v.

Después de haber recuperado aluminio (III) en solución, se procedió a efectuar una comparación, utilizando el porcentaje de remoción de color y turbiedad, como parámetros de comparación entre el sulfato de aluminio comercial y la solución de aluminio recuperado.

Para realizar la comparación, se formuló una solución de sulfato de aluminio sólido al 1 %, de igual manera una solución de aluminio (III) recuperado al 1 %, los resultados de la comparación se muestran en la tabla LVII, sección de resultados y muestran que hay una diferencia significativa en la remoción de color y turbiedad, siendo la solución de aluminio (III) recuperada la menos eficiente.

Por lo tanto se formuló una solución de aluminio (III) recuperada al 2 %, los resultados de la comparación se muestran en la tabla LVII, y muestran que la diferencia entre las dos soluciones de coagulante no es significativa; por último se formuló una solución de aluminio (III) al 3 %, y los resultados de la comparación mostraron que la solución de aluminio recuperado al 3 % es más eficiente que la solución de sulfato de aluminio comercial al 1 %.

El descenso del pH en el agua tratada se debe a las diferentes concentraciones de aluminio contenidas en la solución de aluminio (III) recuperada; como se puede observar en la figura 9, existe un descenso en el pH final del agua tratada conforme aumenta la dosis de aluminio en solución aplicada, siendo la solución de aluminio (III) recuperado al 3 %, la que provocó un pH final más ácido que utilizando concentraciones al 1 % y 2 %, respectivamente.

Cuando una sal de aluminio se agrega al agua, se desencadena una serie de reacciones, primero reacciona con la alcalinidad del agua, causando un consumo de la misma y un descenso en el pH; cuando la alcalinidad se consume, el ion hidratado de aluminio reacciona con el agua, que actúa como una base débil.

La hidrólisis del agua en presencia del aluminio, el equilibrio ácido-base para el aluminio es: $\text{Al}^{+3} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + [\text{H}]^+$, cuando ocurre la reacción de hidrólisis del agua, el ion OH^- , reacciona con el aluminio para formar hidróxido de aluminio y se libera un ion H^+ ; por lo tanto mientras más aluminio reaccione con el agua, habrá más iones H^+ libres, lo que provocará un descenso del pH al aumentar la dosis de aluminio en el agua. Este hecho es justificable, debido a que al evaluar las constantes de equilibrio, se puede encontrar que la constante hidrolítica para la hidrólisis del agua en presencia del aluminio es $\text{pK} = 1 \times 10^{-18}$, dicha constante causa un efecto hidrolítico fuerte.

El pH del agua es de vital importancia para establecer la carga media de los productos de las hidrólisis, y por consiguiente es significativo en la determinación de la velocidad de la coagulación

Los resultados de remoción de color y turbiedad, están en función de la calidad de cada coagulante, ya que la solución de aluminio (III) recuperada para las condiciones de operación propuestas no cumplen con los parámetros establecidos para el sulfato de aluminio líquido comercial; este hecho justifica la razón por la cual la eficiencia de remoción de color y turbiedad, es mejor con la solución de sulfato de aluminio sólido comercial y similar, utilizando una solución de aluminio (III) recuperada al 2 %.

Respecto de la calidad de la solución de aluminio recuperada, se comparó con las especificaciones para sulfato de aluminio líquido para tratamiento de agua para consumo humano, los resultados mostrados en la tabla LX, sección de resultados, muestran que existe un porcentaje alto de diferencia, respecto de las características de la solución de aluminio recuperada contra las especificaciones

Se pueden mencionar los más importantes, como el porcentaje de aluminio en la solución muestra, un 18,06 % de diferencia contra el contenido mínimo de aluminio, siendo la solución de aluminio (III) recuperado, la que presenta un contenido de aluminio (III) menor respecto del dato tabulado, la acidez libre como ácido sulfúrico, muestra un 50 % de diferencia.

Las diferencias de los parámetros de calidad de la solución del coagulante recuperado, se deben al hecho que los parámetros de operación fueron propuestos, si se desea obtener una solución con características similares a las especificadas, se deben de afinar los parámetros de operación.

CONCLUSIONES

1. El porcentaje de extracción de aluminio (III), es directamente afectado por la concentración de ácido sulfúrico y por el tiempo de agitación, ya que a mayor concentración de ácido y mayor tiempo de agitación se obtiene el porcentaje más alto de extracción de aluminio (III); para las condiciones propuestas este fue de 52,87 %, equivalente a 32,07 g/lote (lote = 300 g), utilizando ácido sulfúrico al 30 % v/v y un tiempo de agitación de 45 minutos.
2. Las condiciones de operación más eficientes, según la relación mg Al(III)/ml H₂SO₄ que es igual a 117,20 mg Al(III)/ml H₂SO₄, se obtiene utilizando ácido sulfúrico al 10 % v/v, tiempo de contacto de 45 minutos y velocidad de agitación de 100 rpm.
3. Utilizando una solución al 2 % de aluminio (III) recuperado, los efectos en el porcentaje de remoción de color y turbiedad, según el análisis de varianza, no existen diferencias significativas utilizando una solución de sulfato de aluminio comercial al 1 %.
4. La calidad de la solución de aluminio (III) recuperada, no cumple con los parámetros especificados de acuerdo con la norma NMX-AA-122-SCFI-2006.

RECOMENDACIONES

1. Por su eficiencia en la recuperación de aluminio y por la calidad alcanzada al recuperarlo, debe realizarse un estudio en una planta piloto.
2. Realizar el estudio de recuperación teniendo en cuenta otras variables como velocidad de agitación (rpm), otros ácidos extractores (ácido clorhídrico, ácido nítrico, etc.) o porcentaje de humedad del lodo, analizando su incidencia en el porcentaje de aluminio recuperado.
3. Realizar la lixiviación del lodo variando el tiempo de contacto, para encontrar el punto de agotamiento del aluminio contenido en el lodo, utilizando las condiciones de operación más eficientes de lixiviación, obtenidas en la experimentación.
4. Realizar la recuperación de aluminio, en las dos épocas climáticas marcadas de Guatemala, en la temporada seca y la lluviosa, ya que este factor influye en la calidad de agua a tratar y por ende en la cantidad de coagulante a utilizar, factor que incide directamente en las propiedades y la acumulación de aluminio en los lodos.
5. Evaluar el efecto de realizar extracciones cíclicas del aluminio, su influencia en la calidad, la posible acumulación de metales traza y el porcentaje de recuperación en cada ciclo.
6. Elaborar una evaluación económica de la investigación, por medio de un análisis beneficio/costo.

7. Realizar un estudio para conocer si es viable fabricar *compost* a partir de lodo lixiviado, al cual se le extrajo la mayor cantidad de aluminio presente inicialmente en el mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. BARRIENTOS ROJAS, Carol Elizabeth. *Evaluación de dos métodos de recuperación y refinación de los metales preciosos a nivel laboratorio a partir de los desperdicios con alto contenido de oro*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2003. 98 p.
2. GALLO RAMIREZ, Julián. *Reutilización de lodos de plantas de potabilización en el tratamiento de aguas residuales*. [en línea]. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1215/1/julianalbertogalloramirez.juancarlosuribehurtado.2003.pdf>. [Consulta: 8 de marzo de 2012].
3. GEANKOPLIS, Christie J. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. 3a ed. México: CEGSA, 1998. 1007 p.
4. MARTÍNEZ, Miguel, et al. *Recuperación de sulfato de aluminio de lodos provenientes de un tratamiento primario avanzado*. Instituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México. [en línea]. <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/155.pdf>>. [Consulta: 2 de enero de 2012].
5. McCABE, Warren, et al. *Operaciones unitarias en Ingeniería Química*. 4a ed. México: McGraw Hill, 1991. 1112 p.

6. PIVARAL SOTO, Mónica Sarai. *Estudio técnico a nivel planta piloto para la extracción de hierro (III) -Fe₂(SO₄)₃- , por lixiviación con ácido sulfúrico a partir de hematita proveniente de la mina “Quebrada María”, Camotán, Chiquimula*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008.
7. SAMPIERI, Roberto. *Metodología de la investigación*. 4a ed. México: McGraw Hill, 1999. 752 p.
8. SANDOVAL, Luciano, et al. *Tratabilidad de los lodos producidos en la potabilización de agua*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [en línea]. <www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/mexapa045.pdf>. [Consulta: 23 de febrero 2012].
9. TREYBAL, Robert. *Operaciones de transferencia de masa*. 2a ed. México: McGraw Hill, 1980. 858 p.
10. VILLEGAS, Juan, et al. *Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. [en línea]. <www.redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/849/84911707039.pdf>. [Consulta: 23 de febrero 2012].
11. WALPOLE, Ronald. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6a ed. México: Prentice Hall, 1999. 752 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. **Procedimientos**

Apéndice 1a. Recolección de materia prima

Se recolectaron muestras de lodo de la siguiente manera:

- Se utilizaron recipientes plásticos nuevos (capacidad de 20 litros), para evitar cualquier tipo de contaminación.
- Se tomaron 5 muestras directamente del sedimentador.
- Se tomó la cantidad necesaria por día, para evitar la descomposición de la materia (ya que el lodo arrastra materia orgánica susceptible a la descomposición).

Apéndice 1b. Procedimiento para lixiviación en laboratorio

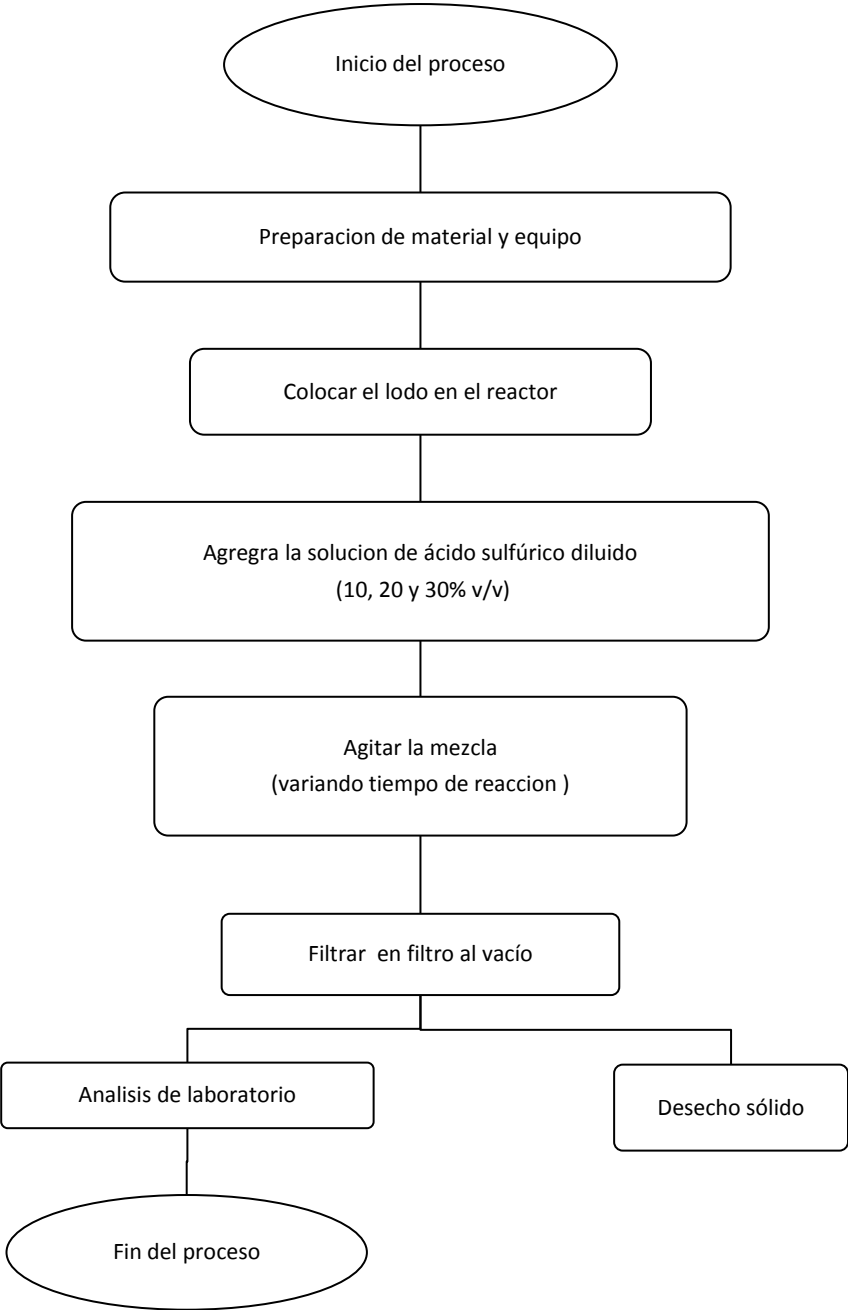
- Preparar las soluciones de ácido sulfúrico diluido (10, 20 y 30 % v/v). [Muestra de cálculo, ecuación 1].
- Mezclado: agregar el lodo al reactor, luego verter la solución de ácido sulfúrico diluido poco a poco, hasta cubrir totalmente el volumen de lodo.
- Agitación: agitar la mezcla, variando el tiempo de agitación (15, 30 y 45 minutos).
- Al terminar la agitación medir el pH.
- Filtración: separar por medio de filtración al vacío.
- Medir la densidad de la solución resultante.

Apéndice 1c. **Métodos y unidades de lixiviación a nivel laboratorio**

Parámetro	Técnica	Método ó instrumento de medición	Unidades de cuantificación
Concentración de solución de ácido sulfúrico	Cuantitativa	Ver apéndice 2 (muestra de cálculo, ecuación 1)	% v/v
pH	Cuantitativa	Potenciómetro	Unidades de pH
Tiempo	Cuantitativa	Cronómetro	Minutos

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1d. **Diagrama de flujo para la lixiviación de lodo en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 1e. Análisis de laboratorio

El objetivo de realizar los siguientes análisis es establecer la calidad de la solución de aluminio (III) recuperado, de acuerdo con los parámetros establecidos en la norma NMX-AA-122-SCFI-2006.

- Determinación del trióxido de aluminio libre y/o de la acidez como ácido sulfúrico, en el sulfato de aluminio.
- Determinación del hierro total.
- Determinación de alúmina como material activo en el sulfato de aluminio sólido y/o en disolución por el método del fluoruro de potasio.

Nota: ver anexo 1 NMX-AA-122-SCFI-2006, métodos de prueba.

Apéndice 4f. **Procedimiento para evaluar la eficiencia de remoción de turbiedad y color**

- Aplicación de prueba de jarras: la prueba de jarras es una guía que permite simular el proceso de coagulación – sedimentación de una planta de tratamiento, dicha prueba se lleva a cabo para determinar los químicos, dosis y condiciones para un mejor desempeño de esta operación.

Prueba de Jarras: esta prueba es útil en los siguientes casos.

- Comparar el trabajo de varias dosis de coagulantes
- Comparar el trabajo de distintos coagulantes

Con la prueba de jarras se puede determinar:

- Selección del tipo de coagulante
- Determinación de la dosis más eficiente de coagulante: por medio de la remoción de turbiedad y color
- Determinar la influencia del pH en la coagulación
- Determinar la eficiencia de los ayudantes de coagulación – floculación
- Determinar el orden más efectivo de adición de los diferentes productos químicos
- Evaluar el efecto del tiempo de reacción entre el fin de la coagulación y el inicio de la floculación
- Determinar porcentajes de remoción de cierto tipo de material bajo determinadas condiciones de operación

Descripción del equipo:

- Un motor de velocidad variable que permite el movimiento de seis paletas ubicadas sobre ejes verticales.
- Un tacómetro para indicar el número de revoluciones por minuto (RPM).

Seis vasos de precipitados (jarras), de 2 litros cada uno.

Apéndice 1g. **Equipo para prueba de jarras**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Procedimiento del ensayo:

- Determinar el color, turbiedad y pH del agua cruda.
- Añadir el coagulante al agua en dosis progresivas en cada vaso de precipitado de la siguiente manera: se coloca el agua de la muestra (previamente agitada) en las jarras, las cuales se introducen debajo de los agitadores y se pone a funcionar el equipo a 100 RPM por 1 minuto (mezcla lenta).
- Se procede a la mezcla rápida; la velocidad se cambia a 40 RPM durante 15.
- Se suspende la agitación, se procede a dejar sedimentar por 15 minutos.

- Se toman alícuotas con los flotadores, aproximadamente tomar 50 ml.
- Se procede a medir la turbiedad, color y pH.

Apéndice 4g. **Parámetros medibles en el ensayo de prueba de jarras**

Parámetro	Técnica	Instrumento de medición	Unidades de cuantificación
Dosis de coagulante	Cuantitativa	Volumétrico	ppm
Volumen de agua cruda	Cuantitativa	Volumétrico	mL
Tiempo	Cuantitativa	Cronómetro	Minutos
Ph	Cuantitativa	Potenciómetro	Unidades de pH
Turbidez	Cuantitativa	Espectrofotómetro	UNT
Color	Cuantitativa	Colorímetro	UC

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Muestra de cálculo

1. Soluciones de ácido sulfúrico diluido:

$$\% \frac{V}{V} = \frac{V_{as}}{V_{ad}} \times 100 \quad \text{[Ecuación 1]}$$

Dónde:

% v/v = Porcentaje volumen -volumen

V_{as} = Volumen de ácido sulfúrico (ml)

V_{ad} = Volumen de agua destilada (ml)

Nota: se realizó este procedimiento para calcular las concentraciones de las soluciones de ácido sulfúrico diluido (10, 20 y 30 % v/v).

2. Determinación de los valores promedio de los datos obtenidos para cada corrida:

$$X = \frac{\sum X_n}{n} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

Donde:

X_n = Dato

N = Número de datos

Nota: se realizó este procedimiento para calcular los valores medios para todos los valores que sean necesarios.

3. Determinación de la densidad de las soluciones:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{[Ecuación 3]}$$

Donde:

ρ = Densidad (g/mL)

m = Masa (g)

V = Volumen (mL)

Nota: Se realizó este procedimiento para determinar la densidad de todas las soluciones que se necesiten.

4. Determinación del aluminio (III) en gramos:

$$\text{Al (III)}_{\text{lixiviado}} \text{ (g)} = \frac{\% \text{ Al(III)}_{\text{lixiviado}}}{\rho \times \frac{1000\text{mL}}{1\text{L}} \times 1\text{L}_{\text{solucion}}} \quad \text{[Ecuación 4]}$$

Donde:

ρ = Densidad (g/mL)

Aluminio (III)_{lixiviado} = Aluminio extraído (g)

% Aluminio (III)_{lixiviado} = Porcentaje en peso de aluminio extraído (%)

Nota: se realizó el cálculo para 1L de solución de aluminio.

5. Determinación del porcentaje de extracción de aluminio (III):

$$\% EF_L = \frac{\text{Al (III)}_{\text{extraído (g)/lote}}}{\text{Al (III)}_{\text{total (g)/lote}}} \times 100 \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Donde:

$\% EF_L$ = Porcentaje de eficiencia de aluminio extraído

Aluminio (III) extraído (g)/lote = Gramos de aluminio extraído por lote

Aluminio (III) disponible (g)/lote = Gramos de aluminio total por lote

Nota: se realizó este procedimiento para determinar el porcentaje de extracción de aluminio (III), de cada solución obtenida por lixiviación.

6. Determinación del porcentaje de eficiencia de lixiviación:

$$\% EF_L = \frac{\text{Al (III)}_{\text{extraído (g)/lote}}}{\text{Al (III)}_{\text{disponible (g)/lote}}} \times 100 \quad [\text{Ecuación 6}]$$

Donde:

$\% EF_L$ = Porcentaje de eficiencia de aluminio extraído

Aluminio (III) extraído (g)/lote = Gramos de aluminio extraídos por lote

Aluminio (III) disponible (g)/lote = Gramos de aluminio disponibles por lote

Nota: se realizó este procedimiento para determinar el porcentaje (%) de eficiencia del proceso de lixiviación de todas las soluciones que se obtengan por lixiviación.

7. Determinación de la eficiencia del coagulante recuperado, mediante la remoción de turbiedad:

$$\% \text{ Eficiencia} = \left| \frac{\text{Turbiedad 1} - \text{Turbiedad 2}}{\text{Turbiedad 1}} \right| \times 100 \quad [\text{Ecuación 7}]$$

Donde:

% Eficiencia = Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad (%)

Turbiedad 1 = Turbiedad del agua cruda (NTU)

Turbiedad 2 = Turbiedad del agua tratada con el coagulante recuperado (NTU)

Nota: Se realizó este procedimiento para calcular la eficiencia de remoción de turbiedad con todas las soluciones de coagulante regenerado.

8. Determinación de la eficiencia del coagulante recuperado, mediante la remoción de color:

$$\% \text{ Eficiencia} = \left| \frac{\text{Color 1} - \text{Color 2}}{\text{Color 1}} \right| \times 100 \quad [\text{Ecuación 8}]$$

Donde:

% Eficiencia = Porcentaje de eficiencia en la remoción de turbiedad (%)

Color 1 = Color del agua cruda (NTU)

Color 2 = Color del agua tratada con el coagulante recuperado (NTU)

Nota: se realizó este procedimiento para calcular la eficiencia de remoción de color con todas las soluciones de coagulante regenerado.

9. Determinación del porcentaje de error:

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\text{Dato}_{\text{Teorico}} - \text{Dato}_{\text{Experimental}}}{\text{Dato}_{\text{Teorico}}} \right| \times 100 \quad [\text{Ecuación 9}]$$

Donde:

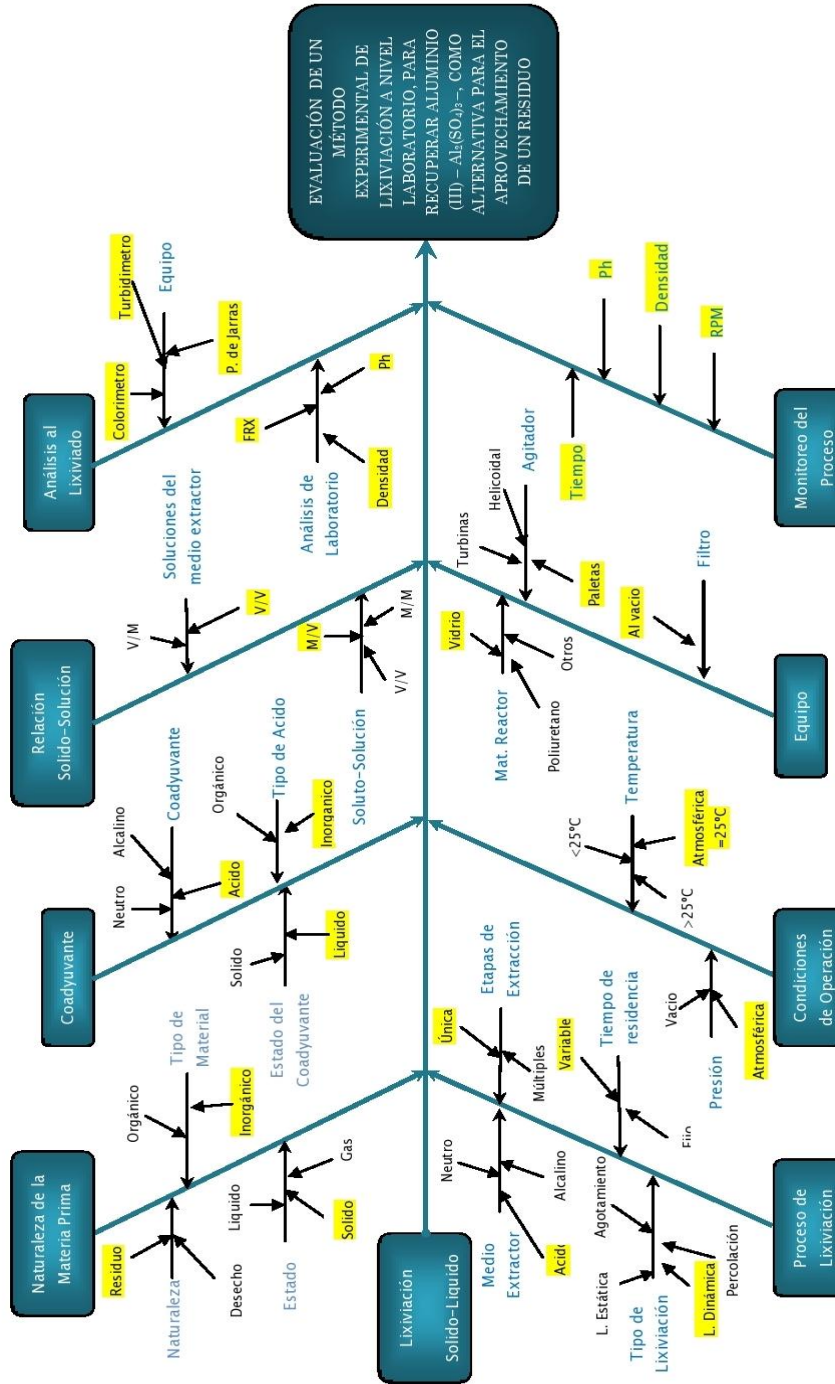
% Error = Porcentaje de error (%)

Dato_{teórico} = Dato tabulado en la fuente de referencia

Dato_{experimental} = Dato obtenido por medio de la experimentación

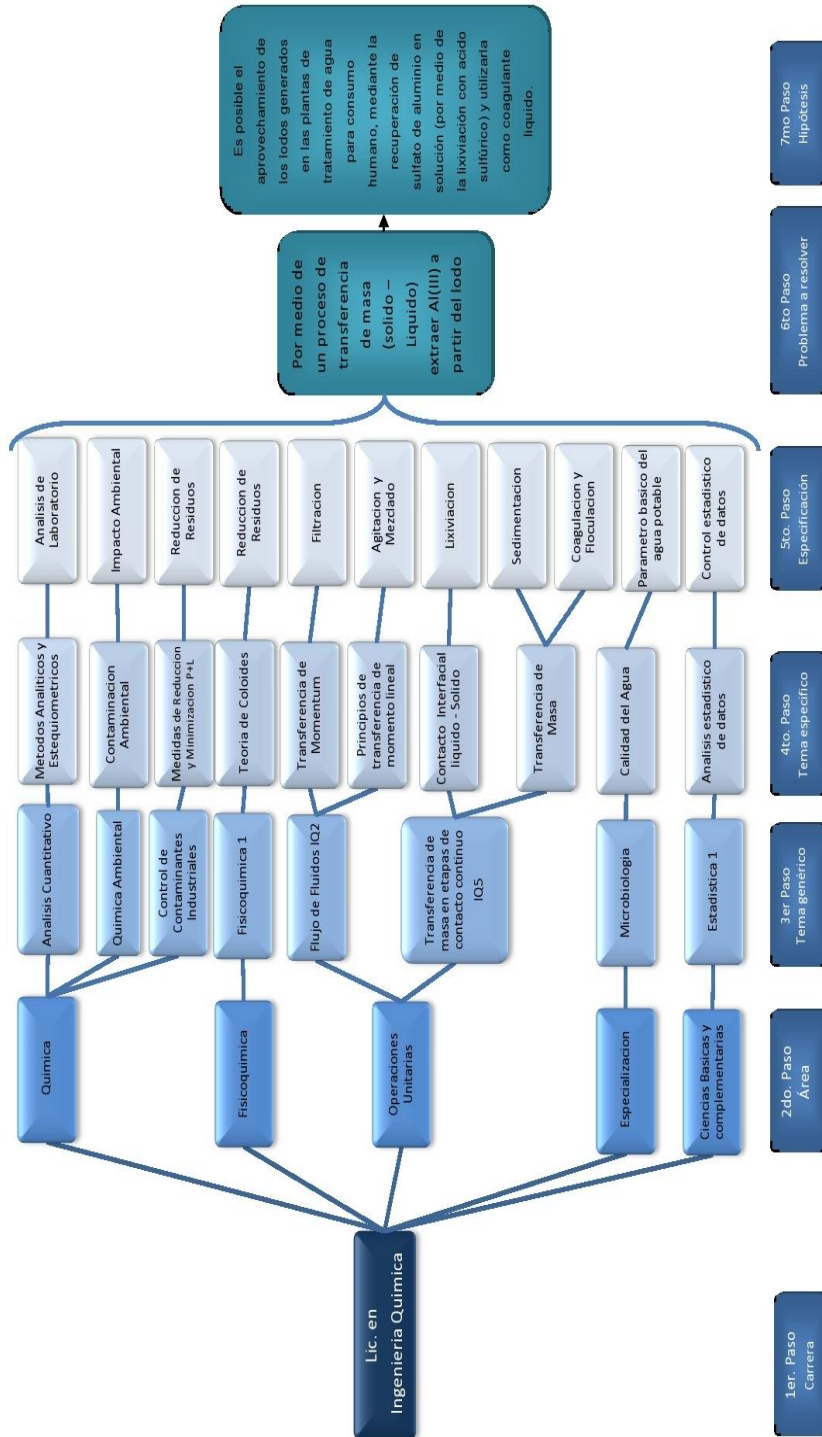
Nota: con esta ecuación se obtuvo el porcentaje de error que existe entre los parámetros para sulfato de aluminio tabulados y la solución de aluminio recuperado.

Apéndice 3. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Tabla de requisitos académicos



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Fotografías de la experimentación**

Apéndice 5a. **Residuo sólido de las plantas de potabilización (lodo)**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5b. **Lodo filtrado**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5c. **Medición de masa/lote de lodo para lixiviar**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5d. **Preparación de soluciones de ácido sulfúrico y
mezclado con lodo**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5e. **Equipo para agitación**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5f. **Proceso de agitación**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5g. **Agitación**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5h. **Sedimentación del lodo lixiviado**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5i. **Equipo de filtración al vacío**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5j. **Soluciones de aluminio (III) recuperado**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5k. **Lodo lixiviado**



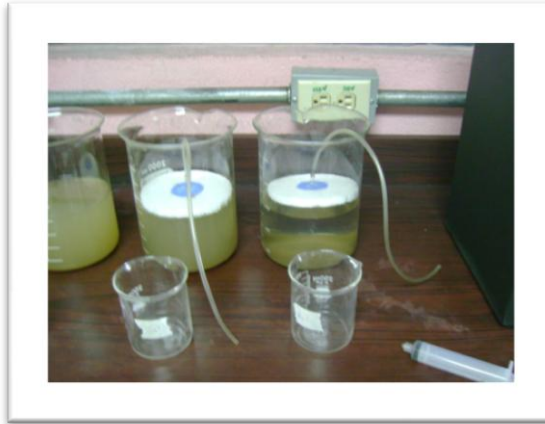
Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5l. **Prueba de jarras**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina”.
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5m. **Toma de muestras de agua para análisis de color y turbiedad**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5n. **Agua tratada, utilizando diferentes dosis de solución de aluminio (III)**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5ñ. **Turbidímetro**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5o. **Colorímetro**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5p. **Potenciómetro**



Fuente: Laboratorio de química y microbiología sanitaria "Dra. Alba Tabarini Molina".
Facultad de Ingeniería, USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Norma NMX-AA-122-SCFI-2006



Continuación de anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006

- SECRETARÍA DE SALUD
Dirección General de Salud Ambiental.
Laboratorio Nacional de Salud Pública.
- SILICATOS Y DERIVADOS, S.A. DE C.V.
- SISTEMA INTERMUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE
Y ALCANTARILLADO DE LA ZONA METROPOLITANA DE
GUADALAJARA
- UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Facultad de Química.

Continuación de anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006

PREFACIO

En la elaboración de la presente norma mexicana participaron las siguientes empresas e instituciones:

- ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA
- CERTIFICACIÓN MEXICANA, S.C
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
- COMITÉ TÉCNICO DE NORMALIZACIÓN NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
- CORPORACIÓN QUÍMICA OMEGA
- FERMI, S.A. DE C.V.
- GERENCIA REGIONAL DE AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA
- INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.
- KEMWATER DE MÉXICO, S.A DE C.V.
- MOLIENDAS TIZAYUCA, S.A. DE C.V.
- PROSI PVS CHEMICAL, S.A. DE C.V.
- QUÍMICA LUSSAK, S.A. DE C.V.

Continuación de anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006

ÍNDICE DEL CONTENIDO

Número del capítulo		Página
0	Introducción	1
1	Objetivo y campo de aplicación	1
2	Referencias	2
3	Definiciones	3
4	Clasificación y designación del producto	5
5	Especificaciones	7
6	Muestreo	10
7	Métodos de prueba	11
8	Medidas de seguridad	21
9	Evaluación de la conformidad	21
10	Marcado, etiquetado y envase	22
11	Bibliografía	23
12	Concordancia con normas internacionales	24

Continuación de anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006

CDU: 638.163



**POTABILIZACIÓN DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO
HUMANO – SULFATO DE ALUMINIO – ESPECIFICACIONES Y
MÉTODOS DE PRUEBA**

**POTABILIZATION OF WATER FOR USE AND HUMAN
CONSUMPTION – ALUMINUM SULFATE – SPECIFICATIONS
AND TEST METHODS**

0 INTRODUCCIÓN

La necesidad de abastecer agua para uso y consumo humano, que cumpla con las características organolépticas, microbiológicas y químicas establecidas por la normativa, ha obligado la implementación de mejoras en los tratamientos de potabilización. En este contexto se hace necesario que en dichos tratamientos sean utilizados productos químicos específicos, que no presenten efectos potenciales adversos a la salud.

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta norma mexicana establece las especificaciones que debe cumplir el sulfato de aluminio como coagulante utilizado para la potabilización del agua para uso y consumo humano, así como la metodología de muestreo y los métodos de prueba para determinarlas.

Continuación de anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
2/24

2 REFERENCIAS

Para la correcta interpretación de esta norma, se deben consultarse las siguientes normas oficiales mexicanas y normas mexicanas vigentes o las que las sustituyan:

NOM-003-SCT-2000	Características de las etiquetas de envases y embalajes destinadas al transporte de sustancias, materiales y residuos peligrosos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de septiembre de 2000.
NOM-004-STPS-1999	Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de mayo de 1999.
NOM-008-SCFI-2002	Sistema General de Unidades de Medida, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de noviembre de 2002.
NOM-010-STPS-1999	Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de marzo de 2000.
NOM-017-STPS-2001	Equipo de protección personal-Selección, uso y manejo en los centros de trabajo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de noviembre de 2001.
NOM-018-STPS-2000	Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de octubre de 2000.
NOM-030-SCFI-1993	Información comercial, declaración de cantidad en la etiqueta - Especificaciones, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de octubre de 1993.
NOM-050-SCFI-2004	Información comercial-Etiquetado general de productos, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1 de junio de 2004.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
3/24

NMX-AA-051-SCFI-2001 Análisis de agua - Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 13 de agosto de 2001.

NMX-AA-115-SCFI-2001 Análisis de agua - Criterios generales para el control de la calidad de resultados analíticos. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 17 de abril de 2001.

3 DEFINICIONES

Para los propósitos de esta norma se establecen las siguientes definiciones:

3.1 Alúmina

Mineral que contiene aluminio combinado como trióxido de aluminio (Al_2O_3).

3.2 Blanco analítico o de reactivos

Agua reactivo o matriz equivalente que no contiene, por adición deliberada, la presencia de ningún analito o sustancia por determinar, pero que contiene los mismos disolventes, reactivos y se somete al mismo procedimiento analítico que la muestra problema de acuerdo a NMX AA-115 SCFI-2001.

3.3 CAS

Siglas en inglés del Chemical Abstracts Service, Organismo que elabora bases de datos de compuestos químicos.

3.4 EINECS

Siglas en inglés del European Inventory of Existing Commercial Chemical Substances, Inventario europeo de sustancias químicas comerciales.

3.5 Hidrólisis

Ruptura o descomposición de los compuestos químicos por acción del agua.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
4/24

3.6 Llevar a peso constante

Proceso en el cual, a través del calentamiento, el material es secado para eliminar la humedad contenida en sus intersticios. Cuando el material ya no tiene más humedad que perder, su masa permanece constante.

3.7 Material activo del sulfato de aluminio (alúmina combinada)

Es el aluminio soluble en agua, que se encuentra combinado como sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$. El material activo también se denomina alúmina activada.

3.8 Punto de cristalización

Temperatura a la cual un sólido en disolución, adquiere los elementos característicos para formar una red cristalina.

3.9 Solubilidad en agua

La capacidad que tiene un compuesto o soluto de disolverse en el agua. Está dada por la relación entre la masa del soluto que es disuelta en un determinado volumen de agua, depende directamente de la temperatura e inversamente de la presión.

3.10 Sulfato de aluminio sólido

El producto de reacción entre el ácido sulfúrico y un mineral rico en aluminio. Se refiere al aluminio (III) soluble en agua que se encuentra combinado como sulfato de aluminio. su fórmula química es $Al_2(SO_4)_3$. En forma seca se presenta como terrones, polvo o granular.

3.11 Sulfato de aluminio líquido

Disolución con diferentes porcentajes en masa, de la forma sólida de sulfato de aluminio.

3.12 Trióxido de aluminio o alúmina

Es otra manera de reportar el material activo que contiene el sulfato de aluminio expresado como Al_2O_3 .

Trióxido de aluminio libre o alumbre alcalino:

Es el aluminio soluble en agua que no está combinado como sulfato de aluminio [$Al_2(SO_4)_3$], está combinado como trióxido de aluminio (Al_2O_3) y es expresado como "trióxido de aluminio libre" (Al_2O_3 libre).

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
5/24

4 CLASIFICACIÓN Y DESIGNACIÓN DEL PRODUCTO

4.1 Nombre químico

Sulfato de aluminio

4.2 Sinónimo

Alumbre

4.3 Fórmula empírica

$Al_2(SO_4)_3$

4.4 Fórmula química

$Al_2(SO_4)_3 \cdot n H_2O$

4.5 Masa molecular

342,14 g/mol $(Al_2(SO_4)_3)$.

4.6 Número de registro del CAS

$Al_2(SO_4)_3$ 10043-01-3

4.7 Número de registro del EINECS

$Al_2(SO_4)_3$ 233-135-0

4.8 Propiedades físicas

4.8.1 Densidad

Las densidades de las disoluciones de sulfato de aluminio libre de hierro están dadas en la tabla 1, y dependen de las concentraciones de material activo, expresados en gramos de sulfato de aluminio por mililitro de disolución (g/mL) y en Grados Baumé, son valores típicos o aproximados que varían con la acidez.

TABLA 1.- Densidades de las disoluciones del sulfato de aluminio libre de hierro

% de Al ₂ O ₃	% de Al	*Bé	Densidad g/mL a 15 °C
7,30	3,86	32,5	1,2889
7,40	3,92	33,0	1,2946
7,50	3,97	33,5	1,3004
7,70	4,07	34,0	1,3063
7,80	4,13	34,5	1,3098

4.8.2 Solubilidad en agua

Se recomienda no utilizar disoluciones con concentraciones mayores a 8% de Al₂O₃ (equivalente a 4,2 % de aluminio o 42,4 g de aluminio /kg de disolución) en masa a temperaturas cercanas a 0 °C, para evitar la sedimentación.

4.8.3 Punto de cristalización

Es de - 7°C para una disolución que contiene 8% de Al₂O₃ (equivalente a 4,2 % de aluminio o 42,4 g de aluminio /kg de disolución).

4.9 Propiedades químicas

El sulfato de aluminio presenta sales hidratadas y disoluciones ácidas. Cuando el sulfato de aluminio se encuentra muy diluido, se hidroliza y forma un precipitado de hidróxido de aluminio.

Los compuestos de aluminio son anfóteros, por lo que deben ser utilizados en un intervalo determinado de pH.

5 ESPECIFICACIONES

El sulfato de aluminio es comercializado con diferentes grados de calidad, conocidas como estándar y libre de hierro, sus principales diferencias son los contenidos de hierro, ácido sulfúrico y material activo (aluminio).

5.1 Apariencia

5.1.1 Sólido

El sulfato de aluminio en forma sólida, debe tener apariencia seca y limpia, puede presentarse como polvo o gránulos blancos para el libre de hierro y ámbar para el estándar y tener diferentes tamaños de partículas.

5.1.2 Líquido

El sulfato de aluminio debe ser un líquido translúcido.

5.2 Tamaño de partícula del sulfato de aluminio granular

El 100 % del producto debe pasar por malla de 4,75 mm y no menos del 90 % del producto debe pasar por malla de 1,70 mm.

El método de prueba para determinar el tamaño de partícula del producto está descrito en el punto 7.1 de esta norma.

5.3 Pureza del sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio es el resultado de diversos procesos de fabricación, su pureza puede variar, no debe ser, en ningún caso, una mezcla de productos comerciales y debe cumplir con el contenido de material activo especificado en la tabla 2, el método de prueba para determinarlo está indicado en la misma tabla.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
8/24

TABLA 2.- Contenido del aluminio y alúmina (%) como material activo

Clase de producto	Presentación	Contenido mínimo de aluminio %	Contenido mínimo de alúmina %	Método de prueba
Estándar	Líquido	3,1	5,9	7.5
Estándar	Sólido	8,9	16,9	7.5
Libre de hierro	Líquido	3,1	5,9	7.5
Libre de hierro	Sólido	8,9	16,9	7.5

5.4 Impurezas

5.4.1 Material insoluble en agua

a) Para el sólido

Máximo 0,5 % en masa.

b) Para el líquido

Máximo 0,2 %

El método de prueba para determinar material insoluble en agua está descrito en el punto 7.2 de esta norma

5.4.2 Contenido de trióxido de aluminio libre.

No debe ser mayor del 0,5 %.

5.4.3 Acidez libre como ácido sulfúrico

No debe ser mayor a 1,5 %

El método de prueba para determinar 5.4.2 y 5.4.3 está descrito en el punto 7.3 de esta norma.

5.4.4 Hierro total

El producto debe cumplir las especificaciones dadas en la tabla 3. El método de prueba está indicado en la misma tabla.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
9/24

TABLA 3.- Límites de hierro

Grado	Impureza	Límite máximo mg Fe ₂ O ₃ / kg de Al ₂ (SO ₄) ₃ sólido al 17% de alúmina,	Límite máximo g Fe / kg de Al	Método de prueba
Libre de hierro	Fe	100	0,8	7.4
Estándar	Fe	27 500	216	7.4

El usuario podrá solicitar menores niveles de concentración de hierro (como Fe₂O₃ o como Fe)

5.5 Sustancias tóxicas

El sulfato de aluminio no debe contener sustancias tóxicas que rebasen los límites dados en la tabla 4, para dosificaciones que no excedan 150 mg/L. Los métodos de prueba para determinar las sustancias tóxicas están señalados en la misma tabla.

TABLA 4.- Sustancias tóxicas

Parámetro	Límites máximos permisibles		Métodos de prueba
	mg/kg de Al ₂ (SO ₄) ₃ sólido al 17% de alúmina (base seca)	mg / kg de Al	
Arsénico	9	101	7.6
Bario	400	4490	7.6
Cadmio	3	34	7.6
Cobre	800	8990	7.6
Cromo Total	33	371	7.6
Mercurio	1	11	7.6
Plomo	7	79	7.6
Selenio	7	79	7.6

El usuario podrá solicitar menores niveles de concentración de sustancias tóxicas

5.6 Impurezas en general

El producto no debe contener sustancias que deterioren la salud de los consumidores del agua tratada apropiadamente con el sulfato de aluminio.

6 MUESTREO

El muestreo se efectuará en el producto terminado y envasado. El muestreo tendrá como fin verificar si las muestras cumplen con las especificaciones establecidas y, en su caso, para efecto de certificación.

6.1 Muestreo de líquidos a granel

Se deberán tomar cinco muestras de 100 mL aproximadamente, a diferentes alturas o sectores del recipiente de almacenamiento a granel. Las muestras individuales se deberán combinar y mezclar concienzudamente para formar una mezcla compuesta simple de 500 mL aproximadamente. La muestra se vaciará en tres recipientes herméticos, de 125 mL aproximadamente, de vidrio o de otro material adecuado, a prueba de humedad y sellados. Cada recipiente estará claramente etiquetado con el nombre del producto, tipo del contenedor muestreado, nombre del productor, datos del muestreo, lugar de producción y muestreo, número de lote y la firma del responsable del muestreo.

Una muestra será utilizada para análisis, las dos muestras restantes quedarán retenidas para efecto de reevaluación.

6.2 Muestreo de sólidos a granel

Se deberá obtener una mezcla compuesta mediante la selección de cinco muestras individuales de 100 g aproximadamente, las muestras serán tomadas ya sea a diferentes niveles o sectores del recipiente de almacenamiento a granel. Las muestras individuales deberán combinar y mezclar concienzudamente, para formar una mezcla compuesta, de aproximadamente 500 g. La muestra se vaciará en tres recipientes herméticos, de 160 g aproximadamente, de vidrio o de otro material adecuado, a prueba de humedad y sellados. Cada recipiente estará claramente etiquetado con el nombre del producto, tipo del contenedor muestreado, nombre del productor, datos del muestreo, lugar de producción y muestreo, número de lote y la firma del responsable del muestreo.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
11/24

6.3 Muestreo de empaques

Se deberá obtener una mezcla compuesta de los lotes de sulfato de aluminio empaçado, muestreando aproximadamente el 5 % de los contenedores del lote, con un mínimo de cinco y un máximo de 15 contenedores muestreados. Si el lote se forma de menos de cinco contenedores, el procedimiento será idéntico al muestreo a granel.

La muestra se vaciará en tres recipientes herméticos de vidrio o de otro material adecuado, de 160 g aproximadamente, a prueba de humedad y sellados. Cada recipiente estará claramente etiquetado con el nombre del producto, tipo del contenedor muestreado, nombre del productor, datos del muestreo, lugar de producción y muestreo, número de lote y la firma del responsable del muestreo.

Una muestra será utilizada para análisis, las dos muestras restantes quedarán retenidas para efecto de reevaluación.

7 MÉTODOS DE PRUEBA

El sistema de unidades utilizado en la presente norma debe cumplir con lo establecido en la norma oficial mexicana NOM-008-SCFI (ver 2 Referencias).

Todos los reactivos deben ser grado reactivo analítico. El agua reactivo debe presentar una conductancia menor o igual a 5,0 μS (μS^{-1} o μmho).

7.1 Determinación tamaño de partícula del sulfato de aluminio granular

Para determinar el tamaño de partícula tomar una muestra de 100 g, y hacerla pasar por malla de 4,75 mm y por malla de 1,70 mm.

7.2 Determinación del material insoluble en agua

7.2.1 Principio

El método se basa en la medición gravimétrica del material retenido en un filtro de una muestra de producto disuelta en agua a temperatura de ebullición.

7.2.2 Procedimiento

Pesar con exactitud de 0,000 1 g de 10 g a 40 g de muestra sólida y transferir a un vaso de precipitados, disolver con 100 mL aproximadamente de agua destilada. Someter a ebullición y mantener así hasta que todo el sulfato de aluminio se disuelva.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
12/24

Filtrar la disolución en un crisol Gooch con filtro de microfibras de vidrio con tamaño de poro nominal de 1,2 µm previamente llevado a peso constante. Lavar el residuo con agua tibia y secar el filtro en la estufa a 105°C - 110°C hasta peso constante. Enfriar a temperatura ambiente y pesar. El incremento en peso del crisol es la materia insoluble.

7.2.3 Cálculos y expresión de los resultados

Calcular la cantidad de materia insoluble con la siguiente fórmula y expresar el resultado en por ciento.

$$\% \text{ material insoluble} = \frac{\text{peso del residuo} \times 100}{\text{peso de la muestra}}$$

7.3 Determinación del trióxido de aluminio libre y/o acidez libre como ácido sulfúrico, en el sulfato de aluminio

7.3.1 Principio

Se lleva a cabo la descomposición de las sales de aluminio por un exceso de fluoruro de potasio neutro para formar dos compuestos estables neutros a la fenoltaleína, donde cualquier cantidad de ácido permanece sin alteración.

7.3.2 Reactivos

- a) Fenoltaleína al 0,1 % en alcohol.
- b) Disolución de fluoruro de potasio. Disolver 1000 g de fluoruro de potasio puro en 1200 mL de agua destilada caliente libre de dióxido de carbono, agregar 0,5 mL de fenoltaleína (inciso anterior) y neutralizar con hidróxido de potasio o ácido sulfúrico, hasta que 1 mL de la disolución en 10 mL de agua destilada (libre de dióxido de carbono) muestre un ligero color rosa. Filtrar cualquier material insoluble y no lavar, diluir a 2000 mL con agua libre de dióxido de carbono. Almacenar en botella de plástico.
- c) Ácido sulfúrico 0,5 N e hidróxido de sodio 0,5 N. Titular el álcali contra el ácido en aproximadamente 40 mL de agua destilada agregar 10,0 mL de disolución de fluoruro de potasio (inciso anterior) utilizar fenoltaleína (inciso a) como indicador.

7.3.3 Procedimiento

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
13/24

Pesar con exactitud de 0,000 1 g de 2 g a 4 g de la muestra sólida y su equivalente en muestra líquida, disolver en 100 mL de agua destilada y calentar a ebullición. Agregar en caliente, 10,0 mL de ácido sulfúrico aproximadamente 0,5 N. Enfríar a temperatura ambiente. Agregar de 18,0 mL a 20,0 mL de disolución de fluoruro de potasio y 0,5 mL de fenolftaleína. Titular con hidróxido de sodio aproximadamente 0,5 N, gota a gota, hasta que un ligero color rosa pálido persista durante un minuto. La titulación permite saber si la muestra es ácida o alcalina.

7.3.4 Cálculos y expresión de los resultados

Calcular el valor de los parámetros con la siguiente fórmula y expresar el resultado en por ciento.

$$\% \text{ de alúmina libre como } Al_2O_3 = \frac{[mL \text{ de } H_2SO_4 \times N/0,5 - mL \text{ de } NaOH \times N/0,5] \times 0,0085 \times 100}{\text{masa de la muestra}}$$

$$\% \text{ de ácido sulfúrico libre } (H_2SO_4) = \frac{[mL \text{ de } NaOH \times N/0,5 - mL \text{ de } H_2SO_4 \times N/0,5] \times 0,0245 \times 100}{\text{masa de la muestra}}$$

7.3.4.1 Interpretación de resultados

Existe alúmina alcalina si la retrotitulación con hidróxido de sodio es menor que la cantidad de ácido sulfúrico agregado (o sea, menor de 10,0 mL). Existe ácido libre si la retrotitulación con hidróxido de sodio es mayor que la cantidad de ácido sulfúrico agregado (o sea, mayor a 10,0 mL). La muestra es neutra si la retrotitulación con hidróxido de sodio es igual al volumen agregado de ácido sulfúrico.

7.4 Determinación de hierro total

7.4.1 Principio

El método consiste en la formación de un complejo colorido que se lee espectrofotométricamente a 475 nm y cuya intensidad de color es directamente proporcional a su concentración.

7.4.2 Reactivos

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
14/24

7.4.2.1 Disoluciones:

7.4.2.1.1 Disolución de tiocianato de potasio (KSCN), al 10 por ciento.

7.4.2.1.2 Ácido sulfúrico, 1:1 por volumen ó 18 N. Mezclar cuidadosamente en un vaso de precipitados de vidrio borosilicato, mientras agita, volúmenes iguales de ácido sulfúrico y agua. Enfriar a temperatura ambiente.

NOTA.- Siempre adicionar el ácido al agua.

7.4.2.1.3 Permanganato de potasio (KMnO₄), aproximadamente al 1,0 por ciento. Almacenar en frasco de vidrio ámbar. Se puede almacenar por aproximadamente 6 meses.

7.4.2.1.4 Disolución estándar de hierro, de 1,0 mg de Fe /mL.

7.4.2.1.5 Disolución estándar de hierro, de 0,10 mg /mL de Fe. Preparar por dilución del estándar de 1,0 mg / mL de Fe. Incluir 10,0 mL de H₂SO₄ 1:1 por litro de disolución estándar.

7.4.3 Aparatos

Espectrofotómetro

7.4.4 Procedimiento

7.4.4.1 Calibración

En un matraz volumétrico de 100 mL, usando una pipeta, adicionar 1,0 mL de disolución estándar de hierro de 0,10 mg de Fe /mL, 50,0 mL de agua, 10,0 mL de ácido sulfúrico 1:1 y permanganato de potasio al 1 por ciento, gota a gota, hasta obtener un color rosa persistente. Adicionar 10,0 mL de tiocianato de potasio al 10 por ciento y diluir con agua hasta la marca. Medir en un espectrofotómetro a 475 nm, dentro de los diez minutos siguientes, contra un blanco analítico.

Preparar la disolución blanco transfiriendo 10,0 mL de la disolución de tiocianato de potasio al 10 por ciento y 10,0 mL de ácido sulfúrico 1:1 en un matraz volumétrico de 100 mL. Diluir a la marca con agua y mezclar.

Repetir utilizando 2,0 mL, 3,0 mL, 4,0 mL, y 5,0 mL de disolución estándar de hierro de 0,10 mg de Fe /mL en sucesivos matraces. Medir cada uno dentro de los diez minutos después de su preparación.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
15/24

Si el espectrofotómetro no es de lectura directa, graficar absorbancia contra miligramos de hierro en papel milimétrico o graficar por ciento de transmitancia contra miligramos de hierro en papel semilogarítmico. Es preferible reducir a una ecuación la relación de absorbancia o transmitancia con miligramos.

7.4.4.2 Determinación

Medir exactamente lo más cercano a 10 g ($\pm 0,01$ g) del sulfato de aluminio líquido o 5 g ($\pm 0,01$ g) del sulfato de aluminio si es sólido y diluir a 1000 mL. En un matraz volumétrico de 100 mL agregar: 10,0 mL de la disolución de la muestra, 50,0 mL de agua, 10,0 mL de ácido sulfúrico 1:1 y gota a gota de permanganato de potasio al 1 % hasta obtener un color rosa persistente. Enfriar a temperatura ambiente. Agregar 10,0 mL de tiocianato de potasio al 10 % y aforar. Medir en un espectrofotómetro a 475 nm dentro de los 10 minutos siguientes contra un blanco analítico.

Este procedimiento es apropiado para cuantificar hierro en sulfato de aluminio líquido, en el intervalo de 0,1 a 0,7 % de Fe_2O_3 . Si el contenido de hierro sale del intervalo de la curva de calibración se debe ajustar al tamaño de la alícuota; tomar en cuenta esta nueva cantidad de la alícuota. Calcular el contenido del Fe_2O_3 en la muestra.

7.4.5. Cálculos y expresión de los resultados:

Calcular el valor de los parámetros con la siguiente fórmula y expresar el resultado en por ciento:

$$\% \text{ de hierro expresado como } \text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{M \times V \times C \times 100}{W \times D}$$

donde:

M son los miligramos de hierro en 10,0 mL de la disolución muestra;
V es el volumen total de la disolución de la muestra dividida por la alícuota utilizada;
100 = 1 000,0 mL / 10,0 mL;
C es el factor de conversión: Fe a Fe_2O_3 = 1,4297;
W es la masa de la muestra, en gramos, y
D es el factor de conversión de la masa de la muestra de gramos a miligramos = 1 000.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
16/24

7.5 Determinación de Alúmina como material activo en el sulfato de aluminio sólido y/o en disolución

El método descrito se emplea para determinar el contenido de alúmina y alúmina total soluble en muestras, en estado sólido y/o en disolución, de sulfato de aluminio, grados regular y libre de hierro. Esta aplicación está restringida a muestras en las cuales la relación de por ciento de ácido sulfúrico libre a por ciento de alúmina no exceda en un 0,85.

7.5.1 Principio

Este método se basa en la formación de complejos a alta temperatura, del aluminio presente en las muestras analizadas, por parte de la sal sódica del ácido etilendiamino tetracético (EDTA) agregada en exceso, en presencia de un amortiguador de acetato de amonio/ácido acético y una posterior medición de la sal sódica del EDTA sobrante con sulfato de zinc, usando en ambas reacciones anaranjado de xileno como indicador.

7.5.2 Reactivos

7.5.2.1 Reactivos

Todos los productos químicos usados en este método deben ser grado reactivo analítico, a menos que se indique otro grado.

- a) Agua
- b) Acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$)
- c) Ácido clorhídrico (HCl)
- d) Ácido etilendiamino tetracético, sal de sodio, dihidratada ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- e) Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
- f) Anaranjado de xileno ($\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{N}_2\text{Na}_4\text{O}_{10}\text{S}$)
- g) Azul de hidroxinaftal
- h) Carbonato de calcio (CaCO_3)
- j) Hidróxido de sodio (NaOH)
- k) Sulfato de zinc heptahidratado ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)
- l) Ácido acético glacial (CH_3COOH)

7.5.2.2 Disoluciones

7.5.2.2.1 Disolución amortiguadora de acetato de amonio/ácido acético

Disolver 500,0 g de acetato de amonio en 500 mL de agua haciendo uso de un vaso de precipitados de 1 500 mL, agregar 20,0 mL de ácido acético glacial y transferir a un frasco de polietileno.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
17/24

7.5.2.2.2 Disolución de sal disódica del ácido etilendiamino tetracético dihidratada 0,05 M.

Pesar 18,6 g de sal disódica del ácido etilendiamino tetracético dihidratada en un vaso de precipitados de 250 mL, disolver y vaciar con un embudo a un matraz aforado de 1 000 mL, lavar vaso y embudo con agua y verterla al matraz; completar hasta la marca de aforo.

7.5.2.2.3 Disolución de ácido sulfúrico 1:1

A 25,0 mL de agua agregar cuidadosamente, con agitación constante, 25,0 mL de ácido sulfúrico concentrado. Enfriar y colocar en un frasco con gotero de polietileno o vidrio.

7.5.2.2.4 Disolución de ácido clorhídrico (3 + 10; o 1 + 3.3)

A 20 mL de agua agregar con cuidado y agitación constante, 6,0 mL de ácido clorhídrico concentrado. Colocar en un frasco de polietileno o vidrio.

7.5.2.2.5 Disolución indicadora de anaranjado de xilenol al 0,1 % peso

Disolver 0,1 g de la sal tetrasódica de anaranjado de xilenol en 100 mL de agua. Colocarla en un frasco gotero. Esta Disolución tiene una caducidad aproximada de seis meses.

7.5.2.2.6 Disolución de sulfato de zinc 0,05 M

En un vaso de precipitados de 250 mL pesar 15,0 g de sulfato de zinc heptahidratado, agregar agua y disolver. Con la ayuda de un embudo vaciar el contenido del vaso a un matraz aforado de 1 000 mL, lavar vaso y embudo y verterlo al mismo; completar hasta la marca del aforo con agua. Guardar en un frasco de polietileno.

7.5.2.2.7 Disolución de hidróxido de sodio 40 g/L

En un vaso de precipitados de 250 mL pesar 40,0 g de hidróxido de sodio, agregar agua y disolver. Con la ayuda de un embudo vaciar el contenido del vaso a un matraz aforado de 1 000 mL, lavar vaso y embudo y verterlo al mismo; completar hasta la marca del aforo con agua. Guardar en un frasco de polietileno.

7.5.3 Materiales

Todo el material volumétrico utilizado en este procedimiento debe ser al menos clase A.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
18/24

- a) Buretas de 10 mL, 25 mL y 50 mL,
- b) Embudo de vidrio para filtración rápida,
- c) Dos frascos de polietileno de 1 000 mL,
- d) Frascos con gotero de polietileno o vidrio, de 60 mL y 125 mL,
- e) Jeringas desechables para cada muestra líquida por analizar, sin aguja, de al menos 1 mL,
- f) Matraces aforados de 500 mL y 1 000 mL,
- g) Matraces erlenmeyer de 250 mL y 500 mL,
- h) Pipeta aforada de 50 mL, calibrada para entregar
- i) Pipeta graduada de 5 y 10 mL
- j) Perlas de ebullición, varillas de vidrio y pinzas para vasos de precipitados,
- k) Probetas graduada de 25 mL, 50 mL, 100 mL y 500 mL, y
- l) Vasos de precipitados de 100 mL, 150 mL, 250 mL, 400 mL y 1 500 mL.
- m) Vidrio de reloj

7.5.4 Aparatos e instrumentos

- a) Balanza analítica con precisión de 0,1 mg.

7.5.5 Procedimiento

7.5.5.1 Valoración de la disolución de la sal disódica del EDTA

Pesar en balanza analítica y en un matraz erlenmeyer de 250 mL aproximadamente 200 mg de carbonato de calcio, agregar 10,0 mL de agua y agitar para formar una lechada; adicionar lentamente con una pipeta graduada, 2,0 mL de disolución de ácido clorhídrico (3 + 10), se recomienda utilizar un vidrio de reloj, para cubrir la punta de la pipeta y la boca del matraz erlenmeyer, al término lavar con una pizeta con agua la punta de la pipeta y el vidrio de reloj. A continuación adicionar agua hasta completar a 100 mL. Poner en una bureta de 50 mL la disolución de la sal disódica del EDTA, adicionar 30,0 mL de esta disolución al matraz erlenmeyer que contiene la disolución preparada anteriormente, con una pipeta graduada adicionar 15,0 mL de disolución de hidróxido de sodio 40 g/L, agitar. Adicionar 300 mg de hidroxinaftol, la disolución adquiere una coloración amarilla.

Con la bureta que contiene la disolución de la sal disódica del EDTA, con la que agregamos los 30,0 mL anteriormente indicados, continuar la adición hasta obtener un virre en la disolución al color azul, que indica la finalización de la titulación complejométrica. Determinar la molaridad de la siguiente manera:

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
19/24

$$M = \frac{W}{100,09 \times V}$$

donde:

W son los miligramos de CaCO_3 (carbonato de calcio), utilizados;
V son los mililitros de disolución de la sal disódica del EDTA, consumidos,
y
M es la molaridad determinada en la valoración de la disolución de la sal disódica del EDTA.

7.5.5.2 Valoración del sulfato de zinc 0,05 M

Con una pipeta aforada transferir 25 mL de la disolución de la sal disódica del EDTA a un matraz erlenmeyer de 250 mL, agregar 50 mL de agua, de 24 a 25 mL de disolución amortiguadora de acetato de amonio /ácido acético y de 3 a 4 gotas de la disolución indicadora de anaranjado de xilenol. Titular la disolución de EDTA con la disolución de sulfato de zinc colocada previamente en una bureta de 25 mL hasta un vire definido de color ocre a rojo violáceo. Calcular el factor F de la siguiente manera:

$$F = \frac{\text{mililitros de disolución de la sal disódica del EDTA utilizados}}{\text{mililitros de disolución de sulfato de zinc utilizados}}$$

7.5.5.3 Preparación de la muestra de sulfato de aluminio y determinación de Alúmina

En un matraz erlenmeyer de 500 mL o en un vaso de precipitados de 400 mL agregar 50 mL de agua.

Pesar con exactitud cerca de 0,7 g de sólido o tomar una jeringa desechable y llenar hasta la marca de un centímetro cúbico con la muestra por analizar. Limpiar la punta de la jeringa con un paño o papel suave y pesarla. Registrar el peso de la jeringa con muestra como P1.

Transferir con sumo cuidado el contenido de la jeringa al matraz o vaso de precipitados, según lo que se haya decidido usar, evitar en lo posible la pérdida de muestra. Volver a pesar la jeringa y registrar este segundo peso como P2. Obtener el peso de la muestra por diferencia de $P1 - P2$.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
20/24

Agregar dos gotas de disolución de ácido sulfúrico 1:1 y mezclar. Con pipeta aforada adicionar 50,0 mL de la disolución de sal disódica del EDTA 0,05 M, agregar 25,0 mL de la disolución amortiguadora de acetato de amonio/ácido acético, agitar suavemente para homogeneizar y agregar unas perlas de ebullición. Calentar el contenido del recipiente hasta ebullición en una placa de calentamiento y dejar de 2 min a 3 min con ebullición constante, cuidando que no exista pérdida de muestra por proyección de la misma.

Transcurrido el tiempo de ebullición retirar del calentamiento el recipiente y enfriar a temperatura ambiente, agregar de 3 a 4 gotas de la disolución indicadora de anaranjado de xlenol y titular el exceso de sal disódica del EDTA con la disolución de sulfato de zinc 0,05 M, previamente colocada en una bureta de 25 mL, hasta obtener un virre definido de color ocre a rojo violáceo, al término de la reacción complejométrica.

7.5.6 Cálculos

Calcular el valor de los parámetros con la siguiente fórmula y expresar el resultado en por ciento.

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ y Fe}_{\text{total}} \text{ expresado como Al}_2\text{O}_3 = \frac{[V_1 - V_2 \times F] M \times 5,098}{\text{pm}}$$

donde:

V_1 son los mililitros de disolución de la sal disódica del EDTA;
 V_2 son los mililitros de disolución de sulfato de zinc;
 M es la molaridad de la disolución de la sal disódica del EDTA;
 F es el factor F obtenido en 8.1.2, y
 pm es el peso de la muestra titulada en gramos.

y

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = (\% \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ y Fe}_{\text{total}} \text{ como Al}_2\text{O}_3) - (\% \text{Fe}_{\text{total}} \text{ como Fe}_2\text{O}_3 \times 0,6385)$$

donde:

$\% \text{Fe}_{\text{total}}$ es el valor obtenido mediante la metodología de hierro total soluble en la muestra problema.

El % de aluminio se determina mediante la relación de masas moleculares de la alúmina y el aluminio.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
21/24

7.5.7 Interferencias

El hierro presente en las muestras problema va a interferir ya que también se va a titular por lo que será necesario realizar la corrección pertinente.

7.6 Determinación de sustancias tóxicas

Se determinarán mediante los procedimientos establecidos en la norma mexicana NMX-AA-051-SCFI (ver 2 Referencias).

Para análisis de Hg y As se emplea el método de vapor frío y generador de hidruros respectivamente de acuerdo a lo establecido en la norma mexicana NMX-AA-051-SCFI (ver 2 Referencias).

El resto de los elementos se analizará por quelación y extracción con metil isobutil cetona (MBIK), como lo indica la norma anteriormente mencionada

8 MEDIDAS DE SEGURIDAD

Se deberá cumplir con los aspectos de:

- Hoja de datos de seguridad,
- Requerimientos para su distribución, almacenaje, manejo y utilización,
- Emergencias,
- Inclusión de datos toxicológicos;

Lo anterior, de acuerdo a lo dispuesto por las normas oficiales mexicanas NOM-004-STPS, NOM-010-STPS, NOM-017-STPS y NOM-018-STPS (ver 2 Referencias).

9 EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD

Para la evaluación de la conformidad del producto con la presente norma se deben incluir en el procedimiento correspondiente al menos los siguientes aspectos:

- * En el caso de ser efectuada la evaluación de la conformidad por un organismo de certificación, éste deberá estar debidamente acreditado en esta norma de producto.

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
22/24

- Evaluación del sistema de control de calidad, sistema de administración o gestión de la calidad en la fábrica, en donde elaboran el producto
- Ensayos de muestras puntuales obtenidas por el organismo de certificación acreditado de conformidad con lo dispuesto en esta norma, estos ensayos se efectuarán en un laboratorio acreditado en las normas de los métodos de prueba aplicables.
- El muestreo se efectuará de conformidad con lo dispuesto en el capítulo 6 de esta norma.
- Los ensayos se efectuarán con los métodos de prueba que se indican en el capítulo 7 de esta norma.

10 MARCADO, ETIQUETADO Y ENVASE

10.1 Producto envasado

Quando el sulfato de aluminio se entrega en sacos debe indicar en forma clara e indeleble los datos siguientes, además de dar cumpliendo con lo dispuesto en las normas oficiales mexicana NOM-030-SCFI y NOM-050-SCFI (ver 2 Referencias):

- Nombre o denominación genérica del producto;
- Denominación o razón social;
- Domicilio fiscal;
- Leyenda "HECHO EN MÉXICO" o el nombre del País de origen;
- Marca registrada;
- Indicación de cantidad en kilogramos o en toneladas;
- Nombre y/o ubicación de la planta productora, y
- Designación normalizada.

10.2 Producto a granel

Quando el sulfato de aluminio se entrega en un envase de cualquier naturaleza y cuyo contenido puede ser variable, se debe incorporar en la factura o remisión la siguiente información, cumpliendo con lo dispuesto en la norma NOM-030-SCFI (ver 2 Referencias).

Continuación del anexo 1.

NMX-AA-122-SCFI-2006
23/24

- Nombre o denominación genérica del producto
- Denominación o razón social
- Domicilio fiscal
- Leyenda "HECHO EN MÉXICO" o el nombre del País de origen.
- Marca registrada
- Indicación de cantidad en kilogramos o en toneladas.
- Nombre y/o ubicación de la planta productora
- Designación normalizada

Se debe cumplir con las características de las etiquetas que deben portar todos los envases y embalajes establecidos por la NOM-003-SCT.

11 BIBLIOGRAFÍA

NMX-Z-013/1-1977 Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Mexicanas. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de octubre de 1977.

ANSI/AWWA B403-98. AWWA Standard for Aluminum sulfate – liquid, ground, or lump. American National Standard, American Water Works Association, Denver Colorado, U.S.A.

Hazardous Chemicals Data Book. Editado por G. Weiss. Noyes Data Corporation. Park Ridge, New Jersey, U. S. A., 1980.

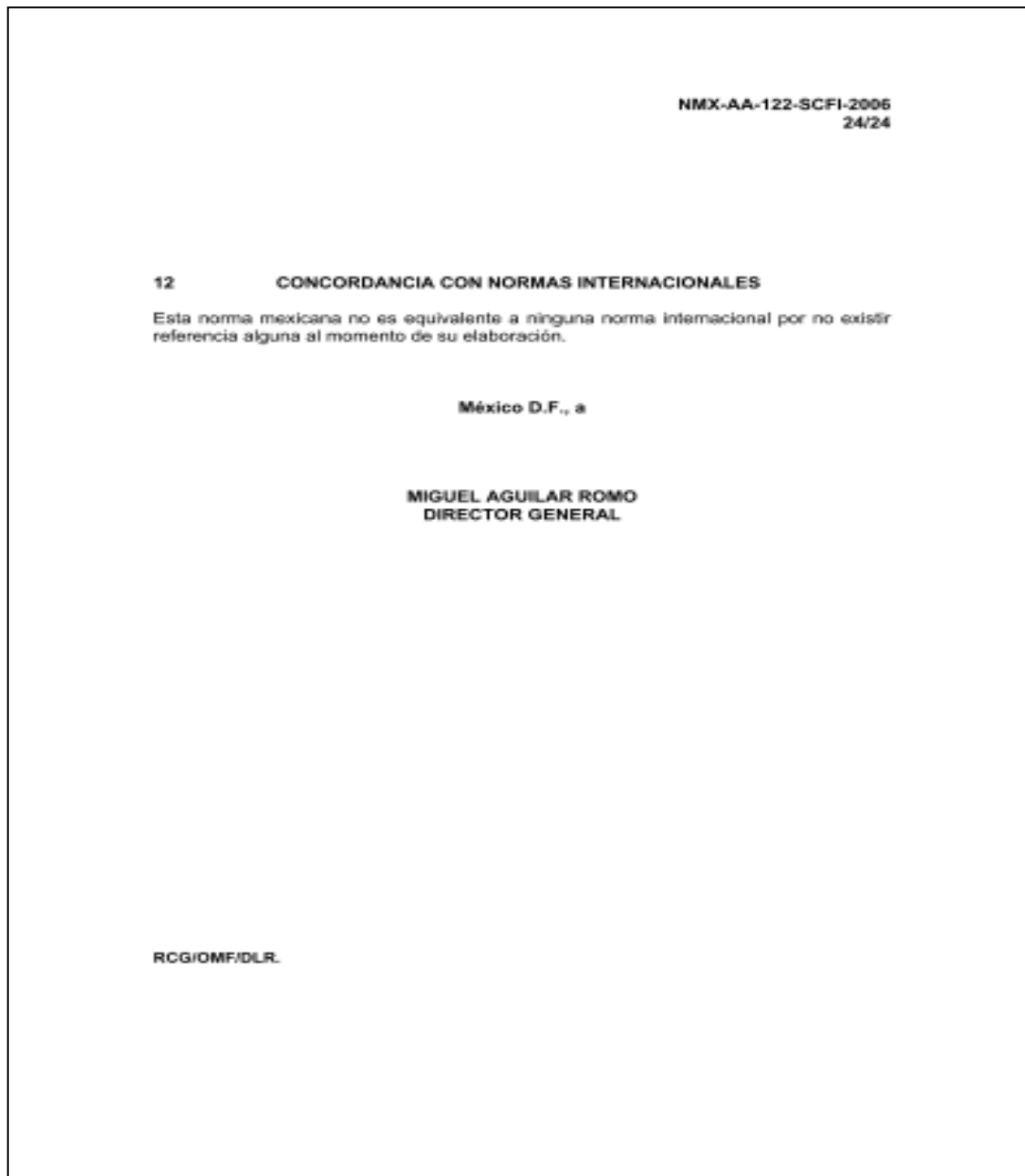
European Standard EN 878:1997. Chemicals used for treatment of water intended for human consumption - Aluminum sulfate.

Norma Española UNE-EN 878:1997. Productos químicos utilizados en el tratamiento del agua destinada al consumo humano- Sulfato de aluminio.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 20th edition, . Washington, DC, 1998.

The Merck Index, an encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals. 13th. edition. MERCK & Co., Inc. Rahway, N. J., U. S. A., 2001.

Continuación del anexo 1.



Fuente: www.imta.gob.mx/cotennser/images/docs/NOM/NMX-AA-122-SCFI-2006.pdf.

Consulta: 29 de marzo de 2012.

Anexo 2. Análisis de fluorescencia de rayos X

Anexo 2a. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de lodo crudo

Muestra 1		Muestra 2	
Reporte de concentraciones		Reporte de concentraciones	
Elemento		Elemento	
Concentración (mg/kg)		Concentración (mg/kg)	
Arsénico	21,45	Arsénico	20,28
Cromo	52,92	Cromo	55,75
Cadmio	2,15	Cadmio	2,49
Cobre	26,45	Cobre	25,47
Plomo	11,23	Plomo	11,08
Mercurio	No detectable	Mercurio	No detectable
Aluminio	180 345,68	Aluminio	184 687,11
Hierro	16 137,00	Hierro	16 813,00

Fuente: Laboratorio de fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Anexo 2b. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra lodo lixiviado**

Muestra 1		Muestra 2	
Reporte de concentraciones		Reporte de concentraciones	
Elemento		Elemento	
Concentración (mg/kg)		Concentración (mg/kg)	
Arsénico	9,35	Arsénico	10,78
Cromo	22,82	Cromo	20,51
Cadmio	1,54	Cadmio	1,36
Cobre	4,47	Cobre	5,96
Plomo	4,85	Plomo	4,06
Mercurio	No detectable	Mercurio	No detectable
Aluminio	88 295,43	Aluminio	88 075,20
Hierro	5 759,82	Hierro	5 740,19

Fuente: Laboratorio de fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Anexo 2c. **Análisis fluorescencia de rayos X, muestra de solución de aluminio (III)**

Muestra 1		Muestra 2	
Reporte de concentraciones		Reporte de concentraciones	
Elemento		Elemento	
Concentración (mg/kg)		Concentración (mg/kg)	
Arsénico	7,12	Arsénico	7,93
Cromo	23,53	Cromo	23,76
Cadmio	0,9847	Cadmio	1,03
Cobre	27,56	Cobre	27,67
Plomo	5,31	Plomo	5,24
Mercurio	No detectable	Mercurio	No detectable
Aluminio	96 345,02	Aluminio	96 075,56
Hierro	11 765,81	Hierro	11 873,73


Fuente: Laboratorio de fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, USAC.

Anexo 3. **Alternativas de uso para lodo lixiviado**


Después de realizar el proceso de lixiviación y extraer gran cantidad del aluminio contenido en el lodo, la torta sobrante puede ser reutilizada, ya que no se quiere trasladar el problema de contaminación; a continuación se describe brevemente dos alternativas para el aprovechamiento de dicho residuo:

- *Compost*: puede ser utilizado como material de relleno para realizar *compost*, con materiales orgánicos, sería una alternativa utilizando la biodegradación para modificar las características de dicho residuo y poder ser utilizado como acondicionador de suelos. La investigación se podría realizar con el objetivo de evaluar las características del *compost* producido a partir de residuos, utilizando el lodo como material de relleno y evaluar la aptitud como acondicionador de suelos. Se han realizado investigaciones, para utilizar el lodo para *compost*, pero cuando el lodo aún contiene altos porcentajes de aluminio no es factible utilizarlo para *compost*, ya que algunas plantas pueden absorber el aluminio y este queda retenido en los tejidos vegetales, lo cual representa un riesgo para la salud humana y animal.
- **Materiales de construcción**: otra alternativa, es utilizar la torta de lodo para elaborar materiales de construcción, mezclándolo con materiales cementales (cemento, cal y yeso), con la finalidad de producir ladrillos; se han realizado investigaciones utilizando esta alternativa y se ha concluido que sí puede ser utilizado para fabricar este tipo de productos.

Anexo 3a. **Análisis fisicoquímico al lodo lixiviado**

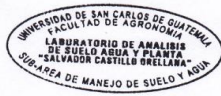


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



INTERESADO: OSCAR MORALES PEÑA
PROCEDENCIA: PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA
FECHA DE INGRESO: 22/11/2012
ANALISIS DE MATERIAL RESIDUAL

IDENT	pH	mS /cm C.E.	%				ppm				%		C : N
			P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn	Na	C.O	NT	
M-1	0.6	445	0.02	0.09	0.56	0.08	5	5	20	1250	2.34	0.32	7.3 : 1



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
 EDIFICIO T-8, SEGUNDO NIVEL, OFICINA B-9, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA.
 CÓDIGO POSTAL 01012. APARTADO POSTAL 1545. TEL.: (502) 2443 9500, EXTENSION: 1768. FAX: (502) 2476 9758.

Fuente: Laboratorio suelo-agua-planta "Salvador Castillo Orellana".
Facultad de Agronomía. USAC.

