



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TRATAMIENTO DE AGUA Y JALES EN UN COMPLEJO MINERO  
DE COBRE MEDIANTE PROCESOS FISICOQUÍMICOS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**P R E S E N T A**

**JOEL JIMÉNEZ HERNÁNDEZ**



México, D. F.

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: RODOLFO TORRES BARRERA

VOCAL: VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO

SECRETARIO: ROSA MARÍA RAMÍREZ ZAMORA

1<sup>er</sup> SUPLENTE: HUMBERTO RANGEL DÀVALOS

2<sup>do</sup> SUPLENTE: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

Lugar donde se realizó la tesis:

Coordinación de Ingeniería Ambiental

Instituto de Ingeniería, UNAM

Circuito Escolar S/N, Ciudad Universitaria

Coyoacán, Distrito Federal, 04510

Tel. 56233600

ASESOR:

Dra. Rosa María Ramírez Zamora \_\_\_\_\_

SUSTENTANTE:

Joel Jiménez Hernández \_\_\_\_\_

## DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a toda mi familia, principalmente a mis padres y hermanos.

A mi papá, por enseñarme tanto, por tu apoyo, por tu amor, por tu tenacidad y determinación para lograr lo que te propones, porque ser tu hijo y decirte “Papá” es un orgullo; solo quiero decirte “Gracias por todo”.

Mamá, por impulsarme a lograr todas mis metas, por tu amor, confianza y apoyo incondicional, por enseñarme a ayudar y a valorar cada día.

Rocío y Enrique, por ser mis amigos antes que nada, por apoyarme en todo momento, por los momentos que hemos pasado juntos, porque los admiro demasiado y porque formar una familia con ustedes es muy especial.

A mis abuelos por darme los padres que tengo y por los lazos y la unión familiar formada.

*Esto es por y gracias a ustedes*

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos mis primos y tíos por compartir momentos muy especiales en mi vida y el saber que cuento con su apoyo y cariño.

A la UNAM, por brindarme la oportunidad de mejorar nuestra sociedad mediante una carrera profesional, y por todo lo que aprendí dentro y fuera de sus aulas.

A la Facultad de Química de la UNAM por ser un centro de enseñanza de excelencia.

A mis profesores de licenciatura que me apoyaron en mi formación Profesional.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por el apoyo económico, y por facilitar sus instalaciones para la realización de este trabajo.

A mi directora de tesis, la Dra. Rosa María Ramírez Zamora por su apoyo, confianza, paciencia, tiempo y asesoría en el desarrollo de este trabajo, el cual representa un punto muy importante en mi vida académica, ya que es un trabajo que me forma de manera profesional como personal.

A Fabricio Espejel Ayala por la asesoría que me brindaste muchas veces y por el apoyo en el desarrollo experimental y escrito.

A mis grandes amigos Alejandro, Virginia, Raquel, Sergio y mis amigos (as) de muchos años, por ser siempre incondicionales y poder recurrir a ustedes cuando los necesito.

A mis amigos (as) de carrera por su apoyo y amistad, además de alegrar cada clase, fiesta, viaje y evento que compartimos durante estos años, ojalá sean muchos más.

A mis compañeros del Instituto Thalía, Oswaldo, Miriam, Ariadna, Alejandro, Kitzia, Víctor por su apoyo, consejos y amistad.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
I.    INTRODUCCIÓN.....	14
II.   OBJETIVO GENERAL.....	16
III.  OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
IV.  HIPÓTESIS.....	16
<b>CAPÍTULO 2. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO .....</b>	<b>17</b>
2.1 GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN .....	17
2.1.1 Principios de la coagulación – floculación.....	17
2.1.2 Coagulación .....	18
2.1.3 Floculación .....	18
2.1.4 Tipos de mecanismos .....	19
2.1.5 Mecanismos de la coagulación .....	21
2.1.5.1 Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la solución.....	22
2.1.5.1.1 Hidrólisis de las sales de aluminio.....	23
2.1.5.2 Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan.....	25
2.1.5.3 Adsorción de la cadena polimérica en la superficie de los coloides.....	26
2.1.5.4 Adsorción mutua entre cadenas poliméricas.....	26
2.1.6 Mecanismos de formación de flóculos.....	27
2.1.7 Equipos utilizados para el proceso de coagulación-floculación .....	30
2.1.8 Factores de influencia .....	33
2.2 PROPIEDADES DE LOS COAGULANTES Y FLOCULANTES .....	34
2.2.1 Coagulantes .....	34
2.2.2 Floculantes .....	37
2.3 JALES MINEROS Y DAM (DRENAJE ÁCIDO DE MINAS).....	41
2.3.1 Definición de jales.....	41
2.3.2 Generación de jales.....	42
2.3.3 Características fisicoquímicas de jales.....	47
2.3.4 Cifras de producción y acumulación de jales.....	51
2.4 EL AGUA Y LA MINERÍA .....	54
2.5 MARCO NORMATIVO .....	59
2.5.1 Protección al medio ambiente .....	59
2.4.1 Normatividad aplicable a Jales Mineros .....	62
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>67</b>
3.1 MATERIALES Y REACTIVOS .....	67
3.1.1 Polvos finos de caliza .....	67
3.1.2 Agua residual tipo industrial y agua ácida de la presa de jales .....	67
3.1.3 Jal minero.....	68
3.1.4 Reactivos para el ajuste del pH.....	68
3.1.5 Reactivos para el proceso de coagulación – floculación .....	69
3.2 SISTEMAS Y TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	70
3.2.1 Pruebas de coagulación – floculación de agua residual industrial .....	70
3.2.1.1 Acondicionamiento del agua residual de un complejo minero de cobre para la prueba de jarras.....	70
3.2.1.2 Pruebas de Coagulación – Floculación .....	71
3.2.2 Pruebas de neutralización de agua ácida .....	74
3.2.3 Pruebas de neutralización de jales mineros de cobre .....	75
3.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS .....	77

3.3.1 Determinación del contenido de óxidos - Fluorescencia de Rayos X.....	77
3.3.2 Determinación de generación de drenaje ácido con los jales .....	78
3.3.2.1 Determinación del potencial de neutralización (PN).....	79
3.3.2.2 Determinación del potencial de Acidez (PA) .....	80
3.4 TAMAÑO DE PARTÍCULA DE LOS POLVOS FINOS DE CALIZA COMO AYUDANTE DE LA FLOCULACIÓN Y AGENTE NEUTRALIZANTE .....	81
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>84</b>
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LOS POLVOS FINOS DE CALIZA .....	85
4.1.1 Tamaño de partícula de los polvos de caliza-análisis granulométrico.....	85
4.1.2 Determinación del contenido de óxidos – Fluorescencia de Rayos X .....	87
4.2 PRUEBAS DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON POLVOS FINOS DE CALIZA Y AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DE COBRE .....	90
4.2.1 Determinación de la dosis óptima de Sulfato de aluminio.....	90
4.2.1.1 Determinación dosis óptima de polvos de caliza y sulfato de aluminio .....	93
4.2.2 Determinación dosis óptima polímero aniónico .....	94
4.2.2.1 Determinación de la dosis óptima de polvos de caliza y polímero aniónico .....	96
4.2.3 Selección de coagulantes a aplicar al proceso de recuperación con polvos de caliza de agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre.....	98
4.2.3.1 Comparación de la calidad de los efluentes obtenidos a condiciones óptimas .....	98
4.2.3.2 Comparación de costos de reactivos.....	99
4.2.4 Balance de materia para la dosificación de polvos de caliza en el sistema de recuperación de agua (espesadores de lodos o jales) residual provenientes del proceso de flotación cobre de un complejo minero.....	100
4.3 NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA .....	102
4.4 PRUEBAS DE NEUTRALIZACIÓN DE JALES CON POLVOS DE CALIZA .....	107
4.4.1 Generación de Drenaje Ácido de los jales mineros utilizados en este estudio .....	107
4.4.2 Determinación del Potencial de Neutralización (PN) .....	107
4.4.3 Determinación del Potencial de Acidez (PA) .....	108
4.4.4 Neutralización de tres tipos de jales mineros de cobre.....	109
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>121</b>
A1. HIDRÓLISIS DEL LAS SALES DE HIERRO .....	121
<b>ANEXO B .....</b>	<b>123</b>
B.1 DETERMINACIÓN DE PH .....	123
B.2 COLOR.....	123
B.3 TURBIEDAD.....	124
B.4 CONDUCTIVIDAD .....	124
B.5 SÓLIDOS.....	125
B.6 PRUEBA DE POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN .....	127
<b>ANEXO C .....</b>	<b>128</b>
C.1 DETERMINACIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA .....	128
C.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE EQUIVALENTES DE NaOH (0.1M) PARA NEUTRALIZAR AGUA ÁCIDA DE LA PRESA DE JALES .....	129

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 SEGUIMIENTO DE LOS PROCESOS DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN .....	19
FIGURA 2. 2 MODELO QUE CONTIENE DOS IONES DE ALUMINIO .....	24
FIGURA 2. 3 ESTABILIDAD DE LOS COLOIDES.....	25
FIGURA 2. 4 ADSORCIÓN DE LOS COLOIDES A LAS CADENAS POLIMÉRICAS .....	26
FIGURA 2. 5 CADENAS POLIMÉRICAS .....	27
FIGURA 2. 6 DESESTABILIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS COLOIDALES POR MEDIO DE UN FLOCULANTE POLI ELECTROLÍTICO .....	29
FIGURA 2. 7 DIAGRAMA DE FLUJO DE FLOCULADOR Y SEDIMENTADOR.....	32
FIGURA 2.8 DIAGRAMA DE AGUA PARA PROCESO EN UN COMPLEJO MINERO DE COBRE. ....	57
FIGURA 3.1 EQUIPO PHIPPS & BIRD, PARA PRUEBA DE JARRAS .....	71
FIGURA 3.2 CONO DE SEDIMENTACIÓN (IMHOFF).....	72
FIGURA 4.1 CURVA GRANULOMÉTRICA O DISTRIBUCIÓN DEL DIÁMETRO DE PARTÍCULA DE LOS POLVOS DE CALIZA DE ALMACENAMIENTO CORTO. ....	85
FIGURA 4.2 CURVA GRANULOMÉTRICA O DISTRIBUCIÓN DEL DIÁMETRO DE PARTÍCULA DE LOS POLVOS DE CALIZA DE ALMACENAMIENTO LARGO. ....	86
FIGURA 4.3 NEUTRALIZACIÓN DEL JAL II A PARTIR DE DIFERENTES DIÁMETROS DE PARTÍCULA DE LOS POLVOS DE CALIZA.....	89
FIGURA 4.4 AGUA RESIDUAL TIPO INDUSTRIAL DE UN COMPLEJO MINERO DE COBRE. ....	91
FIGURA 4.5 TURBIEDAD DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON DIFERENTES DOSIS DE $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$ . ....	92
FIGURA 4.6 TURBIEDAD DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$ Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM).....	94
FIGURA 4.7 COLOR APARENTE Y TURBIEDAD DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON DIFERENTES DOSIFICACIONES DE POLÍMERO ANIÓNICO. ....	96
FIGURA 4.8 TURBIEDAD DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON POLÍMERO ANIÓNICO Y DIFERENTES DOSIFICACIONES DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	98
FIGURA 4.9 BALANCE GENERAL DE DE MATERIA PARA LA RECUPERACIÓN CON POLÍMERO ANIÓNICO (POLIACRILAMIDA, FLOPAN AN910) Y POLVOS DE CALIZA DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DE COBRE.....	101
FIGURA 4.10 NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA DE UNA PRESA DE JALES POR MEDIO DE NaOH (0.1M) .....	102
FIGURA 4.11 NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA DE UNA PRESA DE JALES CON UNA DOSIFICACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM).....	105
FIGURA 4.12 DOSIS (1.589G) x2 DE PIEDRA CALIZA COMO EXCESO NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA DE UNA PRESA DE JALES CON DOS DOSIFICACIONES ESTEQUIOMÉTRICAS DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	105
FIGURA 4.13 NEUTRALIZACIÓN DE AGUA ÁCIDA DE UNA PRESA DE JALES CON TRES DOSIFICACIONES ESTEQUIOMÉTRICAS DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	106
FIGURA 4.14 DIAGRAMA DE ADICIÓN DE POLVOS DE CALIZA PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE JALES .....	111
FIGURA A.1 POLÍMERO HIDROXO – METÁLICOS DE HIERRO. ....	121

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 TIEMPO DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS DE DIFERENTE DIÁMETRO. ....	21
TABLA 2.2 COAGULANTES MÁS COMUNES.....	35
TABLA 2.3 CARACTERÍSTICAS DE COAGULANTES.....	37
TABLA 2.4 MINERALES EN QUE SE ENCUENTRA PRESENTE EL COBRE.....	43
TABLA 2.5 CARACTERÍSTICAS DEL LIXIVIADO QUE HACEN PELIGROSO A UN RESIDUO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE. ....	49
TABLA 2.6 PRINCIPALES SUSTANCIAS AMORTIGUADORAS DE PH EN DEPÓSITO DE JALES.....	51
TABLA 2.7 PRODUCCIÓN DE COBRE FINO EN LA MINA “EL TENIENTE”, CHILE.....	52
TABLA 2.8 PRODUCCIÓN DE COBRE EN EL MUNDO AÑO 2007 Y PRODUCCIÓN DE JALES CALCULADA CON LA RELACIÓN.....	53
TABLA 2.9 PRODUCCIÓN DE JALES EN TONELADAS POR DÍA EN VARIAS MINERAS DE MÉXICO.....	53
TABLA 2.10 DEPÓSITOS DE JALES MINEROS EN TONELADAS ACUMULADAS EN VARIAS MINAS EN MÉXICO.....	54
TABLA 2.11 BALANCE DE AGUA DEL SISTEMA DE FLOTACIÓN DE UN COMPLEJO DE COBRE.....	56
TABLA 2.12 CARACTERÍSTICAS QUE HACEN A UN RESIDUO PELIGROSO.....	63
TABLA 2.13 CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS POR EL GIRO NO.9: MINERÍA. ....	65
TABLA 3.1 DOSIS DE LOS COAGULANTES DE $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ Y POLÍMERO ANIÓNICO APLICADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DOSIS ÓPTIMA. ....	73
TABLA 3.2 TÉCNICAS EXPERIMENTALES EN LA GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO. ....	79
TABLA 4.1 DIÁMETRO DE PARTÍCULA ESTIMADO POR INTERPOLACIÓN DE LA CURVA DE GRANULOMETRÍA DE LAS MUESTRAS DE ALMACENAMIENTO CORTO Y LARGO DE POLVOS DE CALIZA. ....	86
TABLA 4.2 COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD DE LOS POLVOS DE CALIZA DE ALMACENAMIENTO CORTO Y LARGO.....	87
TABLA 4.3 CONTENIDO DE ÓXIDOS DE LOS POLVOS DE CALIZA: ALMACENAMIENTO CORTO Y LARGO.....	88
TABLA 4.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA RESIDUAL TIPO INDUSTRIAL. ....	91
TABLA 4.5 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON DIFERENTES DOSIS DE $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$ . ....	92
TABLA 4.6 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	93
TABLA 4.7 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON UN POLÍMERO ANIÓNICO.....	95
TABLA 4.8 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON POLÍMERO ANIÓNICO Y DIFERENTES DOSIS DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	97
TABLA 4.9 CARACTERÍSTICAS FISCOQUÍMICAS DE AGUA RESIDUAL PROVENIENTE DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DESPUÉS DE UN TRATAMIENTO DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN CON LAS DOSIS ÓPTIMAS DE POLÍMERO ANIÓNICO Y $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ , Y DOSIS DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM).....	99
TABLA 4.10 PRECIOS DE LOS COAGULANTES DE POLÍMERO ANIÓNICO Y $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ .....	100
TABLA 4.11 DIFERENTES DOSIFICACIONES DE POLVOS DE CALIZA (0.075MM) PARA NEUTRALIZAR AGUA ÁCIDA DE UNA PRESA DE JALES.....	104
TABLA 4.12 RESULTADOS DEL POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN DE TRES JALES EVALUADOS. ....	107
TABLA 4.13 PORCIENTO DE SULFATOS Y AZUFRE TOTAL EN LAS TRES MUESTRAS DE JALES.....	108
TABLA 4.14 CANTIDAD DE CARBONATO DE CALCIO PARA NEUTRALIZAR TRES TIPOS DE JALES.....	109
TABLA 4.15 CANTIDAD DE POLVOS DE CALIZA ADICIONADOS PARA NEUTRALIZAR TRES TIPOS DE JALES. ....	109
TABLA 4.16 POTENCIAL DE NEUTRALIZACIÓN DE TRES TIPOS DE JALES NEUTRALIZADOS CON POLVOS DE CALIZA (0.075MM).....	110
TABLA 4.17 POTENCIAL DE ACIDEZ DE LOS TRES JALES NEUTRALIZADOS CON POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	110
TABLA 4.18 POTENCIALES DE NEUTRALIZACIÓN Y ACIDEZ DE LOS TRES JALES NEUTRALIZADOS CON POLVOS DE CALIZA (0.075MM). ....	110
TABLA 4.19 CANTIDAD DE POLVOS DE CALIZA PARA NEUTRALIZAR 1532.95 TONELADAS DE CADA TIPO DE JAL POR HORA, DE ACUERDO CON EL BALANCE DE MATERIA. ....	112
TABLA B.1. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE HCL PARA DETERMINAR EL PN (EFERVESCENCIA).....	127
TABLA C.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS POLVOS DE CALIZA DE ALMACENAMIENTO CORTO (AC). ....	128
TABLA C.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS POLVOS DE CALIZA DE ALMACENAMIENTO LARGO (AL).....	129
TABLA C.3 DOSIFICACIÓN DE NaOH 0.1M EN EL AGUA ÁCIDA.....	130

## **SIMBOLOGÍA**

AL	Almacenamiento largo
Al	Aluminio
$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	Sulfato de Aluminio
AC	Almacenamiento corto
$Al_2O_3$	Oxido de aluminio
Ca	Calcio
CaO	Oxido de calcio
$CaCO_3$	Carbonato de calcio (Calcita)
cm	Centímetro
$cm^2$	Centímetros cuadrados
$CO_2$	Dióxido de Carbono
CODELCO	Corporación Nacional del Cobre, Chile
Cu	Cobre
DAM	Drenajes Ácidos de Mina
Fe	Hierro
FRX	Fluorescencia de rayos X
g	Gramos
h	Horas
HCl	Acido clorhídrico
HPLC	Cromatografía de Líquidos de Alta Eficiencia
Kg	Kilogramos
Km	Kilómetros
L	Litros
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
M	Concentración Molar
m	Metros
mg	Miligramos
MIA	Manifestación de Impacto Ambiental
min.	Minutos
mm	Milímetro
$m^3$	Metros cúbicos
mS	Mili Siemens
N	Concentración Normal
NaOH	Hidróxido de Sodio
nm	Nanómetros
NOM	Norma Oficial Mexicana
NTU	Unidad Nefelométrica de Turbidez
$P_{10}$	Tamaño efectivo
PA	Potencial de Acidez
pH	Potencial de Hidrógeno
PM – ABA	Prueba Modificada de Balance Acido – Base
PN	Potencial de Neutralización
ppm	Partes por millón
rpm	Revoluciones Por Minuto
S	Azufre

s	Segundos
SiO <sub>2</sub>	Oxido de silicio
SS	Sólidos suspendidos
SST	Sólidos suspendidos totales
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
T	Temperatura
Ton	Tonelada
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
Unid.	Unidades
USAI	Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación
Vol.	Volumen

°C	Grados Centígrados
µm	Micrómetros
µL	Microlitros

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad técnica de aplicar polvos finos de caliza para el tratamiento de aguas residuales (provenientes del proceso de flotación de cobre), de jales y de agua ácida de una presa de jales, mediante procesos fisicoquímicos. La tesis contiene 5 capítulos, referencias y anexos: los cuales se enlistan a continuación: Capítulo 1 Introducción; Capítulo 2 Estudio Bibliográfico; Capítulo 3 Metodología Experimental; Capítulo 4 Resultados y Discusión; y Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones.

En la Introducción se presenta la información necesaria para determinar la problemática asociada a los residuos mineros de cobre, específicamente al agua residual, los jales y al agua ácida o drenaje ácido minero (DAM). También se plantea una opción de tratamiento con polvos finos de caliza, debido a que por sus características fisicoquímicas, pueden ayudar al mejoramiento del tratamiento de aguas residuales al ser utilizado como coadyuvante de floculación en el proceso de coagulación – floculación, como agente neutralizante de agua ácida de la presa de jales y de los jales mineros de cobre. En este capítulo también se plantea la hipótesis, el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo realizado.

En el Estudio bibliográfico, se expone un análisis de la información relacionada con: generalidades de los procesos de coagulación – floculación, definición de coagulación y floculación, fases de la coagulación, tipos de coagulantes y floculantes. Además se presenta información relacionada con el proceso de generación de jales, la definición de jal de cobre, cifras de producción de jales mineros, características fisicoquímicas de los jales, formación de agua ácida en la presa de jales, normatividad aplicable a jales mineros y la neutralización de jales mineros.

La metodología experimental aplicada en este trabajo contiene los siguientes incisos: material y reactivos utilizados, sistemas, procesos fisicoquímicos y técnicas experimentales empleadas para el tratamiento por procesos

## RESUMEN

fisicoquímicos con polvos finos de caliza del agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre, del agua ácida y de jales de una presa de jales de cobre. Las principales etapas del estudio experimental de este trabajo son cuatro: I. Determinación de las características fisicoquímicas de los polvos finos de piedra caliza a evaluar en este estudio, II. Realización de pruebas de coagulación-floculación con polvos finos de caliza y agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre; los parámetros medidos fueron pH, sólidos suspendidos totales (SST), color aparente, color real, turbiedad, volumen de lodos y conductividad, III. Realización de pruebas de neutralización del agua ácida de una presa de jales, utilizando los polvos finos de piedra caliza y, IV. Elaboración de pruebas de neutralización de jales de cobre de una presa, aplicando los polvos finos de caliza.

El capítulo 4 presenta la discusión de los resultados obtenidos en las cuatro etapas experimentales de este estudio. Dentro de los principales resultados obtenidos se tienen los siguientes: el tamaño efectivo ( $P_{10}$ ) para dos diferentes muestras de polvos finos de caliza (almacenamiento corto (AC) y almacenamiento largo (AL)) y su coeficiente de uniformidad fueron respectivamente de 0.086mm y 5.372 para los polvos finos de caliza (AC), y 0.078mm y 5.122 para los polvos finos de caliza (AL); los óxidos más abundantes para los dos tipos de polvos finos de piedra caliza fueron: CaO (54.85%), SiO<sub>2</sub> (4.502%) y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.823%). De acuerdo con el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX). Los polvos finos de caliza contienen alrededor del 93% de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) para almacenamiento corto y 99% CaCO<sub>3</sub> para almacenamiento largo. En las pruebas de tratamiento del agua residual de un complejo minero de cobre por medio del proceso de coagulación - floculación se determinó que la dosis óptima de los coagulantes de sulfato de aluminio es 15mg/0.5L de agua residual tipo industrial, y del polímero aniónico es 0.075mg/0.5L de agua residual tipo industrial, de los polvos finos de caliza como coadyuvante de floculación, fue 0.025g de polvos finos de caliza por cada 0.5L de agua residual tipo industrial para ambos coagulantes.

## RESUMEN

Los valores determinados, con base en la Norma Oficial Mexicana NOM – 141 – SEMARNAT – 2003, de los potenciales de neutralización ( $PN = 1.99 \text{ Kg}_{\text{CaCO}_3}/\text{Ton}_{\text{jales}}$ ) y de acidez ( $PA = 48.5553 \text{ Kg}_{\text{CaCO}_3}/\text{Ton}_{\text{jales}}$ ) para los jales permitieron calcular una relación  $PN/PA \leq 1.2$ . Con base en este valor estos jales pueden generar drenaje ácido y deben ser neutralizados, por ejemplo, con los polvos finos de caliza, ya que estos materiales presentaron un alto contenido de  $\text{CaCO}_3$ .

Por último se presentan los resultados de las pruebas de neutralización del agua acida de la presa de jales con polvos finos de caliza como agente neutralizante, donde se determinó que para la neutralización de agua ácida de presa de jales, el mejor tamaño (0.075mm) de partícula y de dosis de polvos de caliza (12.712g/L) permitieron alcanzar un pH dentro de un tiempo razonable (360 minutos), para ser aplicado en el complejo minero.

Finalmente, en el capítulo 5 con base en estos resultados, se concluyó que los polvos finos de caliza, presentaron una alta factibilidad técnica para ser utilizados como coadyuvantes de floculación y como agentes básicos para neutralizar aguas ácidas y jales de una presa de jales de cobre.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## I. Introducción

La actividad minera ha sido un factor muy importante para el desarrollo económico de México y de muchos países en el mundo; sin embargo, el desarrollo de la minería requiere grandes cantidades de agua tratada y potable debido a la extracción continua de metales que conlleva a la generación de diferentes tipos de residuos que en su mayoría son depositados en presas, sin considerar sus posibles afectaciones ambientales.

Por ejemplo para producir 80 000 toneladas de mineral por día, se requieren alrededor de 2.6 m<sup>3</sup> de agua por tonelada de mineral, generando así 8,730.6 m<sup>3</sup>/h de aguas residuales tipo industrial (Camimex, 2007). Del total de mineral extraído en una mina metálica, sólo el 2% corresponde al metal deseado, el resto es descartado como desechos: 50% estéril, 44% jales y 4% escorias (López *et al.*, 2003). Debido a la gran escasez de agua, es importante tratar y recircular el agua recuperada en los procesos de flotación de metales, para paliar esta problemática.

Además de esa problemática, en la extracción de metales se generan jales, que contienen arcillas con residuos de los metales extraídos, los cuales se encuentran en forma de sulfuros; los jales generalmente se encuentran expuestos al aire libre ya que son depositados en presas de jales, por lo que están en continuo proceso de oxidación liberando especies iónicas y al contacto con el agua generan soluciones conocidas como drenajes ácidos de mina (DAM) que son contaminantes de mantos freáticos y suelos. En los jales también existe la presencia de elementos tóxicos como el arsénico, plomo, cadmio, mercurio y cobre que si se presentan en altas concentraciones representarán un riesgo potencial de contaminación (Gaitán, 2008).

Al ser los jales un subproducto de la actividad minera y ser clasificados como residuos peligrosos, por las normas mexicanas NOM-052-SEMARNAT-1993 y

## INTRODUCCIÓN

NOM-141-SEMARNAT-1993, la búsqueda del tratamiento y estabilización de estos residuos es de vital importancia, para evitar la contaminación del medio ambiente, mantos freáticos y suelos.

Por otra parte, algunos de los subproductos que se producen durante la explotación de las minas son los polvos finos de piedra caliza, y aunque el uso de la piedra caliza es muy extenso, los polvos finos resultados en la etapa de molienda por su tamaño tan pequeño de partícula (0.15-0.045mm), no pueden ser reciclados o aprovechados en otras aplicaciones. Dentro de las aplicaciones más importantes de la piedra caliza se tiene su empleo en la construcción, si se calcina puede producir cal viva, se utiliza en la fabricación del cemento, como grava y arena (fragmentada) en la elaboración del concreto. Materia prima para la industria del cemento Portland, cal hidratada, calcita, construcción, mármol, agricultura, agregados pétreos, etc. (Quiminet, 2005). Además de que es utilizada como reactivo en el proceso de separación del cobre en las celdas de flotación para el control del pH en la industria minera de cobre (Proyecto Preliminares para las Plantas Industriales, 2008).

En una mina de cal normalmente se producen 360 toneladas métricas por día, con un porcentaje de cal disponible de 89%, debido a sus características básicas por el alto contenido de carbonato de calcio y a sus características físicas y químicas, la piedra caliza puede ser utilizada como agente neutralizador, en la generación de drenaje ácido, agua ácida de presas de jales y como coadyuvante en la formación de flóculos en los procesos de tratamiento de aguas residuales (Quiminet, 2005).

Con base en lo expuesto en esta introducción, los objetivos e hipótesis que se plantearon para este estudio se presentan a continuación.

# INTRODUCCIÓN

## II. Objetivo General

Determinar con base en pruebas de laboratorio la factibilidad técnica de aplicar polvos de piedra caliza para: a) el tratamiento de agua residual de un complejo minero de cobre mediante el proceso de coagulación-floculación de agua residual, 2) para la neutralización de jales mineros y 3) para la neutralización del agua ácida de una presa de jales.

## III. Objetivos Específicos

1. Determinar el tamaño de partícula y el contenido de  $\text{CaCO}_3$  contenido en los polvos de caliza.
2. Determinar la dosis óptima de reactivos de coagulación (sulfato de aluminio y de polímero aniónico) y floculación (povos de caliza) para el proceso de coagulación – floculación de un agua residual proveniente del proceso de flotación de un complejo minero de cobre.
3. Determinar el mejor coagulante, entre sulfato de aluminio y de polímero aniónico, combinado con polvos de caliza para el proceso de coagulación – floculación de un agua residual proveniente del proceso de flotación de un complejo minero de cobre.
4. Determinar la mejor dosis y tamaño de partícula de polvos piedra caliza para la neutralización de jales y agua ácida de la presa de jales de cobre.

## IV. Hipótesis

Debido al contenido de  $\text{CaCO}_3$  de los polvos finos de piedra caliza, ésta presenta un alto potencial para ser utilizada como coadyuvante en la formación de flóculos durante el proceso fisicoquímico de coagulación – floculación, en el tratamiento de aguas residuales y como agente de neutralización de jales y de agua ácida de la presa de jales.

## **CAPÍTULO 2. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

### **2.1 Generalidades de los procesos de coagulación-floculación**

#### **2.1.1 Principios de la coagulación – floculación**

La coagulación y la floculación pueden verse como un proceso secuencial, ambos procesos ocurren simultáneamente o con algún sobreposición. Ellos se distinguen por su mecanismo de desestabilización, los tipos de reactivos químicos usados para su iniciación y los tamaños relativos en las partículas aglomeradas. Históricamente, la floculación a sido considerada como la aglomeración de partículas suspendidas promovidas primeramente por agitaciones físicas, colisiones partícula-partícula, y la adherencia mutua (Saloma, 2001). La coagulación puede ser interpretada como la conversión de partículas coloidales y dispersas a pequeños flóculos visibles por la adición de un electrolito simple. Este proceso afecta a partículas de tamaño coloidal presentes en el agua en suspensión estable, dicha estabilidad se debe a que estas partículas tienen cargas eléctricas del mismo signo, que por repulsión impiden la formación de agregados que puedan precipitar. La desestabilización se logra al contra restar la carga neta negativa de los coloides con los productos de hidrólisis (cargados positivamente) del coagulante, llevando a cabo la precipitación de los compuestos insolubles.

Este tratamiento se llama coagulación-floculación, las sustancias químicas usadas son coagulantes y los precipitados gelatinosos formados son llamados flóculos y los precipitados que se obtienen forman lodos (Paul y Marcel, 1995).

Cuando el potencial zeta es reducido a cero por la acción de un coagulante se le denomina punto isoeléctrico e indica que el promedio de las cargas de la partícula es cero o tiende a cero, pero no debe olvidarse que cierta proporción tiene carga positiva o negativa. En la medida en que se acerque a cero el valor del potencial zeta se observará una mayor remoción de coloides (Hernández, 1990; Cohen, 1971).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 2.1.2 Coagulación

La coagulación consiste en la neutralización de las cargas superficiales mediante la adición de electrolitos. La precipitación de un colide se provoca mediante la adición de un electrolito de carga opuesta a la de las partículas coloidales, y además el efecto aumenta marcadamente con el número de cargas que lleva el electrolito (Belloc, 2007); el mezclado rápido es una parte importante de la coagulación, el propósito del mezclado rápido es la dispersión de los químicos uniformemente en toda la fase líquida y durante el proceso de tratamiento del agua. El eficiente mezclado es de especial importancia cuando se usan sales de metales de transición. Entre los más usados son sales de aluminio (Al) y de hierro (Fe) por su bajo costo y que este tipo de sales trabajan en amplios de pH (Paul y Marcel, 1995).

### 2.1.3 Floculación

La “*Floculación*” es la formación de partículas sedimentables, a partir de partículas desestabilizadas de tamaño coloidal. Este término también se deriva del latín, en este caso del verbo *floculare*, que quiere decir formar un flóculo que se asemeja a una pelusa de lana o a una estructura porosa muy fibrosa. Al contrario, respecto a la coagulación, donde la fuerza primaria es de tipo electrostático, la floculación se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos. Desde el punto de vista operativo, la floculación se consigue recurriendo a una mezcla moderada y prolongada, que transforma las partículas coaguladas de tamaño submicroscópico en otras suspendidas, discretas y visibles. En esta fase, las partículas tienen un tamaño suficiente para ser removidas por medio de la sedimentación y/o filtración.

La coagulación y la floculación, son seguidas generalmente por la sedimentación o la filtración y es el proceso que más se emplea en la remoción de material suspendido que provoca turbiedad en el agua, como lo muestra la Figura 2.1.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Estas sustancias que provocan turbiedad están constituidas en su mayor parte por minerales calizos y organismos microscópicos, constituidas por una fase continua y una dispersa y son llamados coloides, se presentan en tamaños muy variables, que oscilan entre 0.00001 - 10 mm. Los elementos más gruesos, tales como la arena y el limo, pueden removerse del agua recurriendo a la sedimentación.

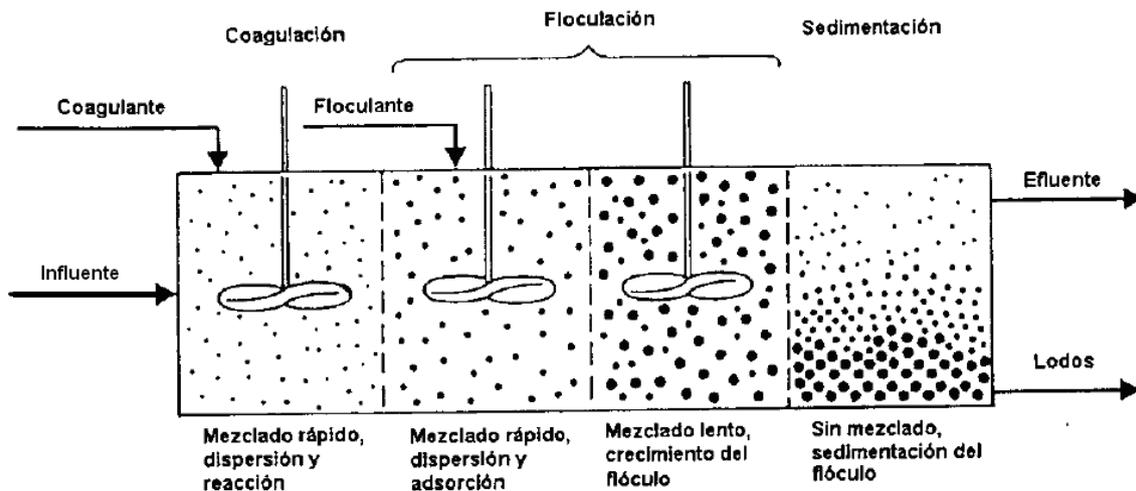


Figura 2. 1 Seguimiento de los procesos de Coagulación y Floculación (Saloma, 2001)

La floculación será tanto mejor cuanto más eficaz sea la coagulación previa. El coagulador, en el que tiene lugar la agitación rápida, va seguido de un floculador, en el que se mantiene una agitación lenta durante 25 min. (agua residual muy cargada), o durante un tiempo mucho mayor en tratamiento de agua potable.

### 2.1.4 Tipos de mecanismos

#### Asentamiento

El término asentamiento se refiere al asentamiento del agua coagulada. Tanto el equipo de coagulación como el de asentamiento, deben estar diseñados de tal manera, que efectúen una buena coagulación con el mínimo de reactivos y que se logre eliminar por asentamiento casi la totalidad de la materia floculada.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### Sedimentación

El término “sedimentación” se refiere a la remoción (sin ayuda de coagulantes) de materia suspendida, reduciendo la velocidad del agua hasta que sea prácticamente nula. Usualmente, la eliminación que se logra es sólo parcial, dependiendo de la materia que se trate, temperatura del agua y la amplitud de los tiempos de retención. Como las partículas pueden variar en un amplio margen desde material relativamente grueso hasta la materia coloidal, es evidente entonces que no hay una línea de demarcación perfecta entre los términos de sedimento y turbidez.

La sedimentación puede llevarse a efecto en lagos, estanques, depósitos o tanques, cuyos tamaños y periodos de retención puedan variar ampliamente. La Tabla 2.1 pone en manifiesto la importancia del tamaño de partículas, ya que se indican los tiempos de sedimentación relativos a las esferas de distintos tamaños (Guibai y Gregory, 2001); se observa que las velocidades de sedimentación de la materia coloidal en suspensión finamente dividida (aproximadamente de 0.001 a 1 $\mu$ m) son tan lentas, que es prácticamente imposible separarla del agua por sedimentación en los depósitos de dimensiones de corrientes.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.1 Tiempo de sedimentación de partículas de diferente diámetro.

Diámetro de las partículas.	Orden de tamaño	Área superficie total*	Tiempo necesario para la sedimentación**
10 mm	Grava	3.142 cm <sup>2</sup>	0.3s
1 mm	Arena gruesa	31.42 cm <sup>2</sup>	3s
0.1 mm	Arena fina	314.2 cm <sup>2</sup>	38s
0.01 mm	Limo	0.31 cm <sup>2</sup>	33 min
0.001 mm	Bacterias	3.14 cm <sup>2</sup>	55 h
0.0001 mm	Partículas coloidales	3.17 cm <sup>2</sup>	230 días
0.00001 mm	Partículas coloidales	2.833 cm <sup>2</sup>	6.3 años
0.000001 mm	Partículas coloidales	28.328 cm <sup>2</sup>	Mínimo de 63 años

\*Superficie para partículas del tamaño indicado producidas a partir de una partícula de 10mm de diámetro y una densidad de 2.65.

\*\*Estos cálculos se basan en una esfera de una densidad de 2.65 para sedimentar a 0.30m (Powell, 1954).

### 2.1.5 Mecanismos de la coagulación

La coagulación se presenta en cuatro mecanismos (Marín, 1989):

- a) Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la solución.
- b) Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan.
- c) Adsorción de la cadena polimérica en la superficie de los coloides.
- d) Adsorción mutua entre cadenas poliméricas.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 2.1.5.1 Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la solución

Todos los tipos de aguas, como la destilada, la desionizada, el agua residual (cruda), la potable, la superficial, la de proceso o la residual, son una mezcla de sustancias disueltas y partículas suspendidas. La mayor diferencia entre esas aguas es la concentración relativa de sus impurezas respectivas. Un lodo concentrado puede contener 100.00 mg/L (10%) o más de sólidos suspendidos; una agua residual sin tratar contiene 100 – 1000 mg/L (0.01 – 0.1 %); una agua residual tratada contiene 3 – 30 mg/L (0.0003 – 0.003 %); una agua potable contiene menos de 0.1 mg/L (0.00001%), (Saloma, 2001). Esas partículas coloidales suspendidas son normalmente polidispersas (intervalo de diferentes tamaños), pueden ser no esféricas (fibras, granos irregulares, formas amorfas) y, tienen densidades variables (mayores o menores de la del agua).

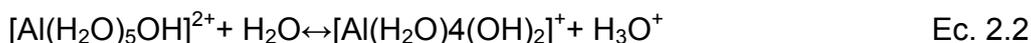
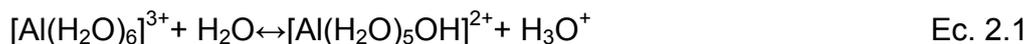
La desestabilización de las partículas coloidales se inicia por cualquiera de los siguientes cuatro mecanismos: (1) compresión de la doble capa eléctrica, (2) neutralización de la carga, (3) unión o (4) entrapamiento (O'Melia, 1972).

Los tamaños, formas y concentraciones de las partículas suspendidas afectan la floculación y la sedimentación. Las partículas más grandes sedimentan más rápido que las partículas pequeñas de igual densidad. Las partículas rugosas y de formas irregulares sedimentan más lento que las partículas lisas y esféricas de igual densidad. La floculación es menos efectiva si la concentración de sólidos es baja (<50 mg/L) por que se reduce la probabilidad de colisión y la adhesión subsecuente entre las partículas. La sedimentación puede ser obstaculizada, a concentraciones grandes de sólidos suspendidos (>2000 mg/L), por el contacto y fricción excesivos entre las partículas, lo que provoca una reducción en la velocidad de sedimentación de las partículas (Guibai y Gregory, 2001).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 2.1.5.1.1 Hidrólisis de las sales de aluminio

Cuando una sal de aluminio se añade al agua se desencadena una serie de reacciones con dicha agua (o con otros iones presentes en las aguas naturales), de acuerdo con un proceso que, en términos generales, se conoce por hidrólisis. En la actualidad, la opinión más generalizada que se apoya en la evidencia teórica experimental, es que los iones de aluminio que se añaden al agua intervienen casi instantáneamente en una serie de reacciones hidrolíticas con ésta para formar una serie de sustancias de tipo hidróxido de cargas multivalentes. En función del pH, estos compuestos pueden ser positivos, los valores del pH son bajos, y negativos, cuando dichos valores son marcadamente básicos. Estas reacciones pueden representarse como se indica en las Ecuaciones 2.1 y 2.2:



Esta reacción prosigue hasta que se forma la sustancia neutra  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3]$  u otra de carga negativa  $[\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_2(\text{OH})_4]^-$ .

Sin embargo la evidencia más reciente parece indicar que las sustancias monómeras, por ejemplo compuestos que tan solo contienen un ion aluminio, son, en el mejor de los casos, transitorias, y que un segundo tipo de reacción, llamada "olación", es la más importante en el proceso de coagulación. En el proceso de olación se registra una serie de reacciones de polimerización que dan lugar a la formación de complejos que contiene varios iones de aluminio unidos por dos grupos de iones hidroxilo como lo muestra la Figura 2.2. A continuación se presenta el modelo de un complejo sencillo que contiene dos iones de aluminio:

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

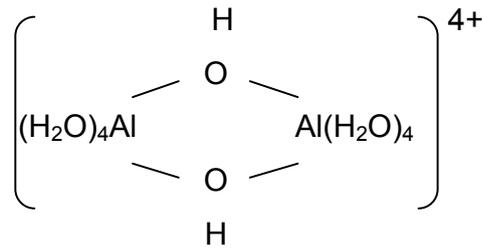
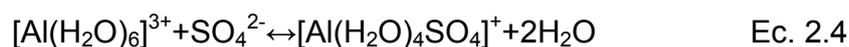


Figura 2. 2 Modelo que contiene dos iones de aluminio  
(Cohen y Hannah, 1971)

Se ha sugerido que el complejo más importante que se obtiene en coagulación con aluminio en concentraciones bajas es uno de tipo polinuclear que contiene ocho iones de aluminio que llevan una carga tetrapositiva, y que se muestra en la Ecuación 2.3:



El pH desempeña un papel importante en la coagulación, ya que el pH del agua es de vital importancia para establecer la carga media de los productos de la hidrólisis y, por consiguiente, es significativo en la determinación de la velocidad de la coagulación. Además del pH, la composición química del agua también influye sobre la especie del complejo que se obtiene, ya que cabe la posibilidad de que otros iones negativos distintos al hidróxido, especialmente los iones di- y trivalentes, entren a formar parte del complejo y modifiquen sus propiedades de modo significativo. Por lo tanto, en presencia de sulfato, cabe la posibilidad de que uno o más iones sulfato sustituyan a los iones de hidróxido del modo que se indica en la Ecuación 2.4:



En este caso el ión sulfato divalente ha desplazado a dos iones hidróxido para formar un complejo mono positivo de aluminio. En el anexo A.1 se muestra de igual forma la hidrólisis de las sales de hierro.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 2.1.5.2 Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan

El agua turbia además de sólidos disueltos y sedimentables, contiene coloides eléctricamente cargados. Estas cargas inducen la formación de capas eléctricas dobles y a la estabilidad del sistema coloidal, la cual se establece por las fuerzas de repulsión resultantes de la interacción entre las capas eléctricas como se muestra en la Figura 2.3.

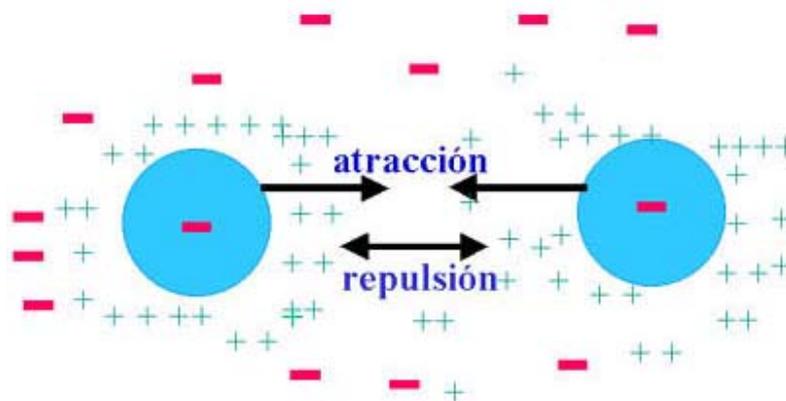


Figura 2. 3 Estabilidad de los coloides (Litoral de Chile, 2007)

Inmediatamente después de añadir las sales de aluminio o hierro al agua se desencadenan reacciones con los iones de ésta y otros, desestabilizando las partículas. Las especies coagulantes se adsorben rápidamente en la superficie de las partículas causantes de la turbiedad. La atracción electrostática de las partículas cargadas negativamente y los productos de la hidrólisis de carga positiva acentúan este proceso de deposición, formando partículas floculadas. Según el pH y las dosis de coagulantes administradas, la carga de la partícula, medida en función del potencial zeta, puede oscilar entre una de carácter ligeramente negativo a otra de carácter neutro. En este momento se considera que la suspensión está desestabilizada y, en consecuencia, el proceso de floculación, en el cual las partículas pueden aglomerarse hasta producir agrupaciones de tamaño sedimentable (Cohen y Hannah, 1971).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 2.1.5.3 Adsorción de la cadena polimérica en la superficie de los coloides

Una vez desestabilizadas las partículas coloidales, las fuerzas electrostáticas provocan la aglomeración, por medio de las colisiones entre estas partículas, formando flóculos, cuando el flóculo ya ha alcanzado un tamaño suficiente, sedimenta.

La mezcla o la turbulencia favorecen las colisiones y, como las partículas ya se han desestabilizado, cada una de estas colisiones produce una unión, generando cadenas poliméricas debido a la adsorción en la superficie de las partículas coloidales, como se muestra en la Figura 2.4.

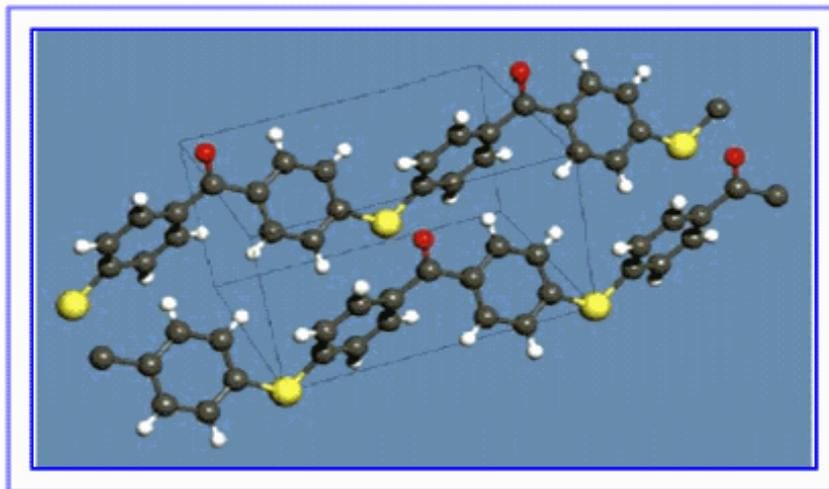


Figura 2. 4 Adsorción de los coloides a las cadenas poliméricas (Neofronteras, 2009)

### 2.1.5.4 Adsorción mutua entre cadenas poliméricas

En el proceso de tratamiento del agua residual y con objeto de conseguir una óptima y mejor formación de cadenas poliméricas o flóculos que, a su vez lleve a un mayor rendimiento en las etapas de sedimentación y filtración, se utilizan frecuentemente ayudantes de floculación, productos conocidos comúnmente como

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

“Poliectrolitos” o “Polímeros”. Estos polímeros, de alto peso molecular, pueden presentar propiedades aniónicas, catiónicas o no iónicas.

Los ayudantes de floculación producen la unión de los flóculos, para formar cadenas poliméricas como lo muestra la figura 2.5, estas cadenas sedimentan más rápido que los flóculos, y generan la acción de barrido, que es el resultante del arrastre de las partículas a medida que sedimentan (Cohen y Hannah, 1971).

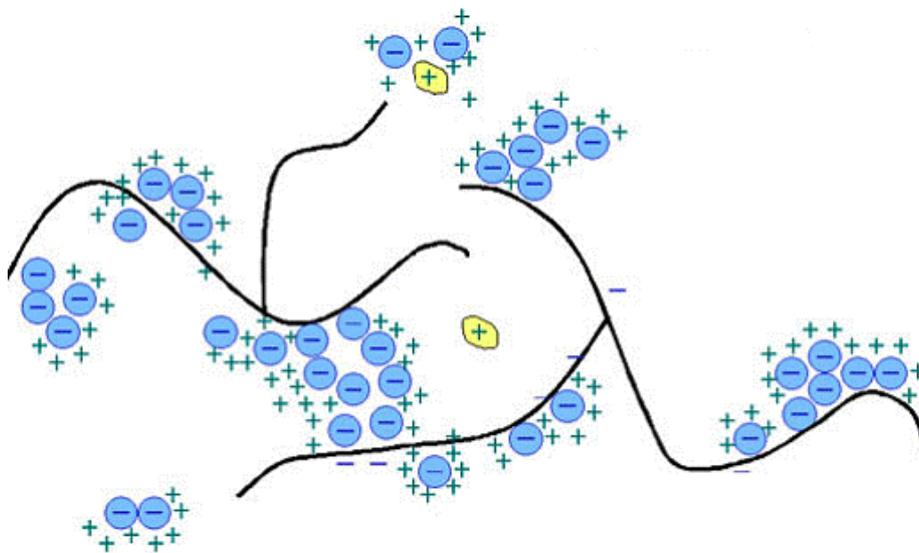


Figura 2. 5 Cadenas poliméricas (Fibra, 2007)

### 2.1.6 Mecanismos de formación de flóculos

El agua turbia contiene coloides eléctricamente cargados, sólidos disueltos y sedimentables; estas cargas inducen la formación de capas eléctricas dobles, y la estabilidad del sistema coloidal se establece por las fuerzas de repulsión resultantes de la interacción entre las capas dobles.

Como se mostró en el comportamiento de la hidrólisis del aluminio; que inmediatamente después de añadir las sales de aluminio al agua se desencadenan reacciones con los iones de ésta y otros, para producir compuestos de las especies polinucleares e hidroxio-multipositivos. Las especies coagulantes

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

se adsorben rápidamente en la superficie de las partículas causantes de la turbiedad, que acaban completamente revestidas de coagulante. La tracción electrostática de las partículas cargadas negativamente y los productos de la hidrólisis de carga positiva acentúan este proceso de deposición. El resultado neto es que las cargas eléctricas de las partículas se reducen (Cohen y Hannah, 1971).

Durante el proceso de formación descrito, así como durante la sedimentación, cuando el flóculo ya ha alcanzado un tamaño suficiente, aquel también puede aprisionar físicamente a las partículas de turbiedad y comportarse sencillamente como una “escoba” a medida que se sedimenta.

En contraste con los mecanismos que se acaban de describir, en la coagulación de partículas hidrófobas<sup>1</sup> (por regla general se trata de una turbiedad arcillosa) hay que considerar un mecanismo modificado para desestabilizar a los coloides hidrófilos<sup>2</sup>, en los que el color natural del agua es un ejemplo importante. Una característica de los coloides hidrófilos es que contienen grupos polares de los tipos hidroxílico, carboxílico o fosfático, cargados negativamente. Por consiguiente, estos coloides pueden combinarse químicamente, más bien electrostáticamente, con los coagulantes de carga positiva producidos en la hidrólisis, para formar otro insoluble que es eléctricamente neutro o desestabilizado.

El mecanismo de la remoción del color puede considerarse más como un proceso de precipitación química que como una coagulación. Esta diferencia significativa se debe por completo a las diferencias inherentes entre las partículas que provocan la turbiedad y las que son responsables del color. Existen muchos motivos para creer que entre el coagulante de hierro y aluminio parcialmente hidrolizado y algún grupo ácido de la molécula de color debe haber una interacción química, cuyo resultado es la formación de una sal básica insoluble. La

---

<sup>1</sup> Hidrófobas (aversión al agua)

<sup>2</sup> Hidrófilos (afinidad al agua)

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

insolubilidad de esta sal básica provoca la precipitación y remueve de la solución tanto a los compuestos cromáticos como a los coagulantes. La ligera solubilidad de ciertas sales de los compuestos cromáticos y coagulantes se debe frecuentemente a que algo de color permanece aún después de alcanzarse las condiciones óptimas para su remoción total. La desestabilización de las partículas coloidales por un floculante poli-electrolítico puede ser ilustrada por una serie de cinco reacciones que se muestran en la Figura 2.6.

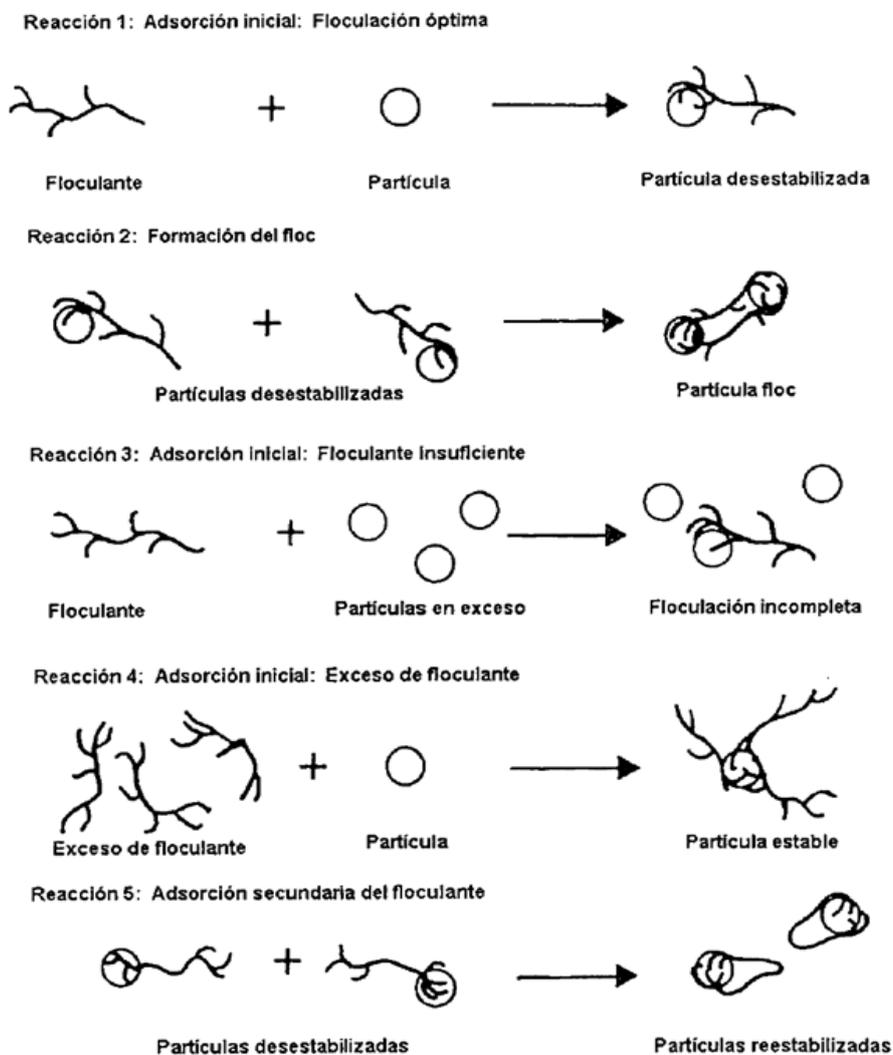


Figura 2. 6 Desestabilización de las partículas coloidales por medio de un floculante poli electrolítico (Kawamura, 1991).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

La adsorción inicial (Reacción 1) de un nivel óptimo del floculante desestabiliza una sola partícula. A esto le sigue, una formación de un flóculo visible (Reacción 2) entre varias partículas. La floculación es incompleta a un nivel insuficiente de floculante (Reacción 3). Muchas partículas individuales permanecen dispersas. Se agrega un incremento para que la concentración del floculante se incremente a un nivel óptimo. Un exceso en el nivel de floculante (Reacción 4) reduce la agregación y la suspensión se vuelve a dispersar en pequeños grupos y partículas individuales. La adsorción secundaria del floculante (Reacción 5) puede también conducir a la re-estabilización (Saloma, 2001).

### 2.1.7 Equipos utilizados para el proceso de coagulación-floculación

Es completamente fundamental lograr una rápida incorporación y mezcla de los reactivos con el agua, esto se puede lograr por medios mecánicos, con agitadores o utilizando canales con mamparas. El equipo de coagulación y sedimentación puede ser del tipo moderno de lecho suspendido o del tipo convencional (ASCE y AWWA, 1998).

***Equipo de lecho suspendido***, este equipo se ha utilizado tanto en coagulación como en operaciones de ablandamiento por el proceso de cal sodada en frío. En este equipo se pueden efectuar simultáneamente la clarificación y ablandamiento del agua.

La principal diferencia entre este equipo y el de diseño convencional, es que en el primer equipo todo el flujo de agua se filtra a través de un lecho de lodos que se encuentra suspendido generalmente, en la parte inferior del equipo. Este contacto del agua con el flóculo previamente formado, permite una completa utilización de la capacidad de adsorción de los flóculos; por tanto, se logra una reducción significativa del consumo de reactivos, se requieren menores tiempos de retención, y así, las plantas de tratamiento de agua son más compactas. Estas instalaciones dan efluentes de una alta calidad.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

El efluente de este tipo de equipo es relativamente claro, aunque no completamente. De aquí que si se requiere un alto grado de claridad, el efluente se filtra antes de enviarse al servicio. Muchas aguas industriales de enfriamiento y de proceso no requieren agua clara, por lo que la filtración se omite.

Por otra parte, si el agua se someterá a otro tratamiento tal como ablandamiento por intercambio catiónico, deionización, etc., debe filtrarse antes de introducirse a este equipo (Susumu, 2000).

***Floculadores y tanques de sedimentación.*** El equipo típico de floculación, coagulación y asentamiento, consiste de un mezclador rápido, una o más cámaras de floculación, uno o más tanques de asentamiento. El objeto del mezclador rápido, es mezclar el coagulante y otros agentes químicos rápidamente con el agua cruda, mediante un mecanismo de movimiento rápido. La reacción de los agentes químicos es muy veloz, lo que explica porque entre más rápido se mezclen las sustancias químicas con el agua, más eficiente es el uso del coagulante. Cuando se forman, los precipitados gelatinosos se presentan en forma de partículas mucho muy pequeñas, distribuidas uniformemente en el agua. Para la formación de partículas grandes, fácilmente sedimentables, se necesita que las pequeñas se aglomeren, la agitación violenta evita la formación de los flóculos grandes y pesados.

Para formar partículas grandes fácilmente sedimentables, se usa un movimiento lento y una trayectoria circular. Es importante que una vez que estas partículas de flóculos grandes se han formado, no se sujeten a flujos turbulentos que tienden a romperlos y dispersarlos. Es por esto que los conductos que comunican a los floculadores y los tanques de sedimentación, deben tener suficiente área transversal para evitar turbulencia (ASCE y AWWA, 1998). El tanque de sedimentación mostrado en la Figura 2.7 es de un solo paso.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

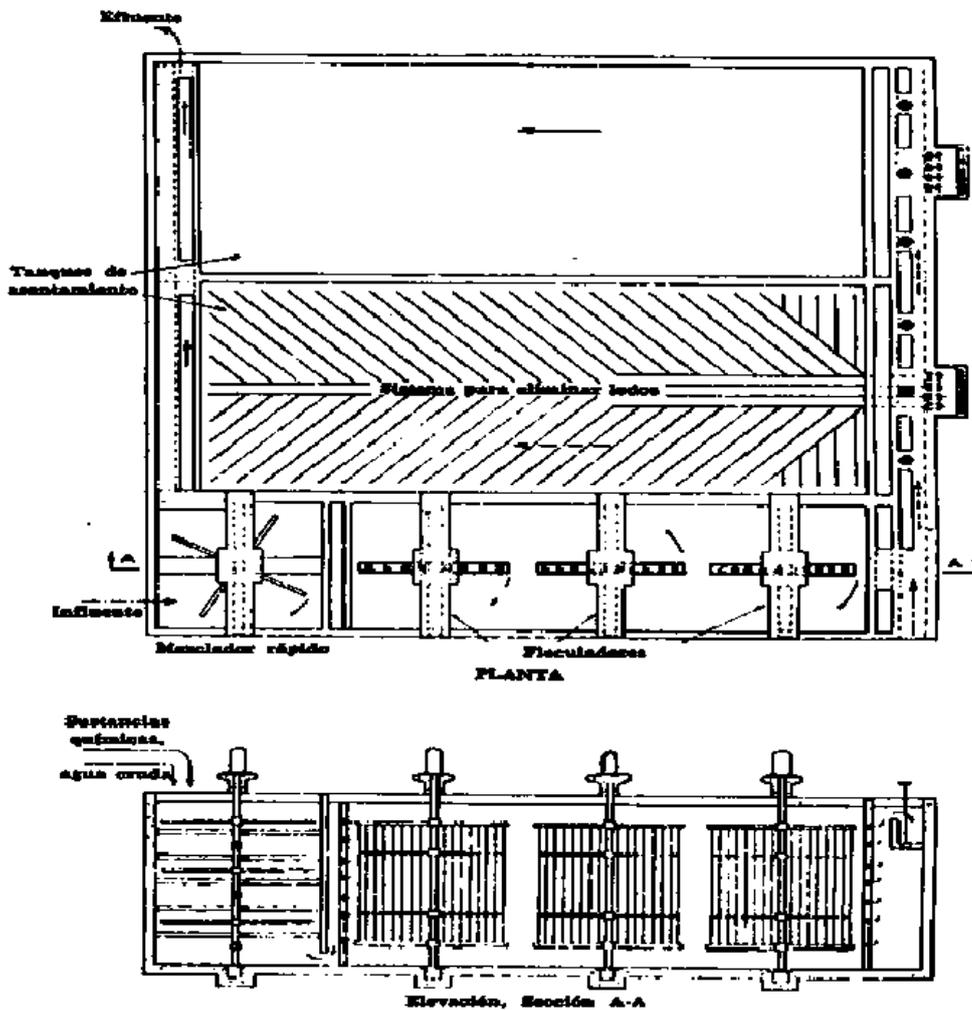


Figura 2. 7 Diagrama de flujo de floculador y sedimentador.  
(Nordell, 1975).

Si el flujo de agua es demasiado grande y se requiere un tanque de un área transversal considerable, es mejor dividirlo longitudinalmente en secciones cuyas áreas tengan un tamaño conveniente. De una manera general, los periodos de retención empleados son de 10 - 30 segundos en el mezclador rápido, de 10 a 30 minutos en el floculador y 1½ a 2 horas en el tanque de sedimentación. Los flocos asentados en estos últimos tanques, se remueven continuamente o intermitentemente en los tanques mostrados en la Figura 2.7 se usa un sistema de baldosas para remover los sedimentados. Estas baldosas se instalan en el fondo

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

de los dos tanques y se conectan válvulas de cierre rápido que se operan a intervalos periódicos para descargar los lodos al drenaje. En otros diseños se emplean rastras que remueven los lodos continuamente.

### 2.1.8 Factores de influencia

El tratamiento óptimo por coagulación de un agua cruda tiene por objeto lograr un equilibrio muy complejo en el que están implicadas muchas variables. Para un agua dada, existirá un óptimo interrelacionado de condiciones, tales como las características del agua, tipo de coagulante, dosis de coagulante, tiempo de mezclado para el proceso de floculación, temperatura del agua, efectos de mezclado y tamaño de partícula. A continuación se discuten los parámetros más importantes de cada grupo de factores anteriores que influyen sobre la eficiencia del proceso de coagulación.

**Características del agua:** dentro de los factores de este grupo, principalmente el pH del medio influye, ya que cada coagulante tiene un intervalo óptimo de acción y se debe trabajar en él, de lo contrario se tiene un desperdicio de producto químico y una disminución del rendimiento del tratamiento. La amplitud de la escala del pH está determinada por el tipo de coagulante empleado. Otro factor de influencia es la presencia de *sales*, ya que ciertos iones pueden alterar el valor óptimo del pH, la dosis óptima de coagulante y el contenido residual de coagulante en el efluente. Algunos de estos aspectos pueden explicarse en base a que ciertos iones inorgánicos pueden ser sustituidos por iones hidroxilos produciéndose un compuesto de diferente solubilidad.

**Tipo de coagulante:** dado que las características del agua a tratar cambian de un caso a otro, no existe un coagulante universal.

**Dosis de coagulante:** dicha dosis se determina mediante ensayos (prueba de jarras), es función de las características del agua.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

**Tiempo de mezclado para el proceso de floculación:** es el periodo transcurrido entre la adición del coagulante y el final de la agitación, los valores normales se encuentran en el intervalo de 10 y 30 minutos.

**Temperatura del agua:** cuanto menor sea la temperatura la viscosidad aumenta, en consecuencia la velocidad de sedimentación del flóculo disminuye, incrementando la dosis de coagulante necesario y requiere mayor tiempo para formar flóculos.

**Efectos de mezclado:** una mezcla rápida es esencial para dispersar uniformemente el coagulante y fomentar las colisiones de las partículas coagulantes con las que producen la turbiedad, la velocidad adecuada está entre 80 a 120 rpm durante 30 – 60 segundos. La agitación lenta debe promover el movimiento de los flóculos sin romperlos, de 20 a 30 rpm durante 10 a 30 minutos con una sedimentación de 30 minutos.

**Tamaño de partícula:** la dosis que produce remoción óptima de turbidez, se incrementa directamente con el área superficial del sistema, pero es inversamente proporcional al tamaño de partículas suspendidas (Bratby, 1981); una distribución amplia de tamaños de partículas aumenta la probabilidad de colisión entre las partículas.

### 2.2 Propiedades de los coagulantes y floculantes

#### 2.2.1 Coagulantes

Un coagulante es una sustancia química (generalmente iones de valencia superior a uno) que desestabiliza la carga de los coloides en una solución, haciéndolos fácilmente sedimentables. La actividad coagulante crece con la valencia del ión, un ión trivalente es de 600 a 1,000 veces más efectivo que uno monovalente; se distinguen dos grupos, los de aluminio y los de hierro. La mayoría de las partículas coloidales que forman el color y la turbiedad, tienen cargas eléctricas negativas,

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

mientras que los hidróxidos mencionados tienen carga positiva. De aquí que en la coagulación se encuentren involucrados fenómenos mecánicos y eléctricos. Las dosis de coagulante y el pH óptimo varían para cada agua en particular (Univirtual, 2005), en la Tabla 2.2 se muestran los coagulantes más comunes.

Tabla 2.2 Coagulantes más comunes (Univirtual, 2005).

Reactivo	Fórmula	Presentación
Sulfato de Aluminio	$Al_2(SO_4)_3$	Sólida o Líquida
Sulfato de Aluminio + cal	$Al_2(SO_4)_3 + Ca(OH)_2$	Líquida
Sulfato de Aluminio + sosa cáustica	$Al_2(SO_4)_3 + NaOH$	Sólida o Líquida
Aluminato sódico	$AlO_2Na$	Sólida o Líquida
Cloruro férrico	$FeCl_3$	Sólida o Líquida
Cloruro férrico + cal	$FeCl_3 + Ca(OH)_2$	Líquida
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	Sólida
Sulfato ferroso	$FeSO_4$	Sólida
Sulfato ferroso + cloro	$FeSO_4 + Cl_2$	Sólida y gaseosa
Sulfato ferroso + cal	$FeSO_4 + Ca(OH)_2$	Líquida
Ozono	$O_3$	Gaseosa

Dentro de los primeros tipos de coagulantes se encuentra el sulfato de aluminio, ya sea líquido o sólido, elimina color turbidez y mediante englobamiento en los flóculos formados, bacterias, virus y en general microorganismos. Las dosis empleadas varían de 15 a 200g/m<sup>3</sup>, es un reactivo corrosivo y ácido, conviene evitar derrames y el contacto con la piel. Los policloruros poseen un fuerte poder de coagulación y floculación, su rango de pH es muy amplio, desde 5 a 10. Son indicados para aplicarse en aguas de baja conductividad y turbiedad, han de

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

usarse preferentemente sin diluir, dosis máxima de  $100\text{g}/\text{m}^3$  como producto al 100%, no necesitan coadyuvante.

Los policlorosulfatos poseen elevada velocidad de decantación y el intervalo de pH de trabajo es amplio 6 – 9, por lo que no necesitan coadyuvante (Ramírez y Durán, 2000).

Las sales de hierro más empleadas son: el cloruro de hierro, que puede ser hierro trivalente o divalente (es mejor el trivalente, debido a su baja solubilidad). El intervalo de pH es de 4 – 6, se encuentra como cristales hidratados cafés o amarillos, cristales anhidros verde oscuro o en solución al 35 – 45%. El sulfato férrico líquido amarillo que se encuentra en forma anhidra o en forma hidratada, rango de pH de 3.5 a 6 y dosis de 5 a  $160\text{g}/\text{m}^3$  de reactivo comercial. El sulfato ferroso sólido verdoso que es la fuente más barata de hierro, se usa hidratado, sin embargo es necesario aplicar alcalinidad adicional para obtener un producto de solubilidad más conveniente (Marín, 1989).

Ayudan a la floculación de distintas maneras, ya sea modificando el pH del agua (hidróxido de sodio), transformando los coloides hidrofílicos en hidrofóbicos (ej. cloro), neutralizando cargas eléctricas de los coloides (ej. sulfato de magnesio) o sirviendo de material de soporte y medio adsorbente (arcillas, sílice activada).

Los polielectrolitos no iónicos como poliacrilamidas cuyo peso molecular está entre 1 y 30 millones, los aniónicos, que son una coexistencia de grupos que permiten la adsorción provocando la extensión del polímero y los catiónicos, en los cuales la carga eléctrica neta es positiva (Hernández, 1990).

En la Tabla 2.3 se resumen las características que presentan diversos productos químicos que se emplean como coagulantes para el tratamiento de aguas residuales.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.3 Características de coagulantes (Hernández, 1990).

Producto químico	pH		Dosis (g/L)	Recomendaciones
	Intervalo	Óptimo		
Cloruro férrico	5 – 11	5.5	0.06	- oxidar SH <sub>2</sub> a pH alto.
Sulfato ferroso	8.5 – 11	9	0.06 – 0.13	
Sulfato férrico	5 – 11	8 – 8.5	0.06	- evitar sobre-dosificación
Sulfato de alúmina	5.5 – 8	6 – 8.5	0.13 – 0.16	- normalmente se usa cal.
Cloruro de aluminio	5.32		0.13	

### 2.2.2 Floculantes

Cuando los coagulantes por si solos no reducen el potencial zeta lo suficiente como para lograr una remoción satisfactoria de coloides, se utilizan los llamados coadyuvantes, es decir, ayudantes de floculación, son en general macromoléculas de cadena larga, favoreciendo la formación de flóculos más grandes y pesados ayudan a eliminar color, sólidos suspendidos y materia orgánica. La ventaja radica en que cuando las partículas no pueden aproximarse por las fuerzas de repulsión, la gran longitud de la cadena poliméricas permite unir coloides entre sí mediante puentes, en condiciones en las cuales no hubiera habido normalmente coagulación. Esta reacción es rápida el 85% del polímero se adsorbe en aproximadamente 10 segundos. La cantidad de polímero utilizado es de 0.1 a 1 mg/L lo cual compensa su precio alto.

Los floculantes, llamados también ayudantes de coagulación, ayudantes de floculación incluso ayudantes de filtración, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo (flóculo más pesado, más voluminoso y más coherente).

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico) (Ramírez y Durán, 2000).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Los materiales de uso más generalizado pueden clasificarse *grosso modo* en:

1. Oxidantes
2. Agentes absorbentes o Arcillas
3. Sílice activada
4. Poli-electrolitos

### **Oxidantes**

Las dificultades que puedan surgir en la clarificación o eliminación del color como consecuencia de la presencia de compuestos orgánicos disueltos pueden eliminarse o atenuarse recurriendo al empleo de oxidantes.

El oxidante de empleo más corriente es el cloro, cuando se añade en cantidades suficientes para obtener un punto de ruptura de la doble capa, ya que ésta evita las uniones de las partículas para así formar flóculos. De acuerdo con este procedimiento se añade la cantidad de cloro suficiente para satisfacer la demanda del mismo, en cuyo momento el material orgánico que interfiere se oxida para dar compuestos inocuos. Otros oxidantes menos empleados son el ozono y el permanganato potásico. Claro está que todos estos productos químicos deben añadirse antes del proceso de coagulación, pues su función es precisamente contribuir al desarrollo de éste (Cohen y Hannah, 1971).

### **Agentes adsorbentes-ponderantes o arcillas**

Algunas arcillas son muy empleadas como ayuda de la coagulación en la eliminación de color de aguas altamente coloridas. Posiblemente esta práctica tiene su origen en la observación de que las aguas superficiales de bajo contenido mineral, son más fácilmente coagulables cuando tienen turbiedad, las arcillas son efectivas en la eliminación de color y turbidez.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

El efecto de estas arcillas se describe comúnmente como acción de peso, esto es, con aguas altas en color pero con muy baja turbidez, el flóculo formado por coagulación consta principalmente de materia orgánica, siendo por esto demasiado liviano por lo que se asienta rápidamente; la adición de arcilla aumenta el peso del flóculo, es decir, le da “peso” y se asienta rápidamente. Además de este factor, existe otro, que es la capacidad de absorción de la arcilla. De cualquier forma, se ha encontrado que la arcilla promueve la formación de flóculos que se asientan fácilmente, cuando se usan junto coagulantes de aluminio o hierro. Estas arcillas amplían el intervalo del pH en el que a coagulación puede efectuarse.

Además de la arcilla, se han empleado otros agentes, tales como sílice pulverizada, piedra caliza (que además aporta alcalinidad) y carbón activado (que posee la ventaja adicional de su elevada capacidad de adsorción).

### **Sílice activada**

La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza juntamente con el sulfato de aluminio, el término *sílice activada* significa una suspensión de partículas coloidales cargadas negativamente. Esta suspensión se obtiene por reacción de una solución diluida de silicato de sodio (0.5 a 5% en peso de  $\text{SiO}_2$ ) con un agente activante, normalmente un ácido (Bratby, 1981).

La sílice activada es una ayuda de coagulación muy efectiva para la eliminación de turbidez, color, materia orgánica u otras suspensiones. Usualmente se usa junto con los coagulantes, en el proceso de cal en frío puede usarse como coagulante. La sílice activada no existe como tal, por lo que tiene que ser preparada en el sitio de uso por la acción de ciertos materiales ácidos sobre el silicato de sodio. En algunos procesos, la sílice activada se prepara por lotes, y en otros se prepara y alimenta continuamente mediante dosificadores. En cualquier

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

método que se siga deben observarse cuidadosamente las indicaciones de los fabricantes para obtener los resultados esperados. La dosis de sílice activada se puede determinar fácilmente en el laboratorio. En general, cuando se emplea junto con un coagulante común, la dosis varía de 1 a 5 ppm.

La sílice coloidal se obtiene a partir del silicato sódico, que, aunque de por sí no es coadyuvante de la floculación, se convierte en él cuando la parte de la alcalinidad se neutraliza con el ácido, en cuyo momento se dice que se ha activado.

La sílice activada se emplea con coagulantes de aluminio y la dosis, expresada en mg/L de  $\text{SiO}_2$ , se suele determinar a veces en función del coagulante. Parece ser que no existe ningún motivo para emplear una relación fija de sílice activada a sulfato de aluminio para cualquier pH establecido. En la práctica actual se suele emplear de un 7 a un 11 por ciento de la dosis de sulfato de aluminio. El empleo de un exceso de sílice puede ser perjudicial para el proceso de floculación.

### **Poli-electrolitos**

Este término adjudicado a ciertos complejos orgánicos de origen natural o sintético, que se emplean como ayuda de la coagulación, ya sea en unión de los coagulantes usuales. Además, estos materiales se pueden clasificar como catiónicos, aniónicos o no iónicos. Hay algunos que han sido certificados por el Comité de Ayuda de Coagulantes en el Tratamiento del Agua (EE. UU.), como no tóxicos y pueden emplearse en la coagulación de agua para usos municipales. Estas sustancias cuando no son certificadas no deberán, por ningún motivo, usarse en aguas para que puedan posteriormente ser empleadas para beber, sino solamente en aguas de desecho o industriales (Ronald, 1997).

El mejoramiento de la formación del flóculo, sedimentación y clarificación que se pueden efectuar con el uso de estos poli-electrolitos, es a menudo sorprendente.

## **ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

La dosificación y el poli-electrolito adecuado deben determinarse por pruebas en el laboratorio.

### **2.3 Jales mineros y DAM (Drenaje ácido de minas)**

La industria minera es la principal proveedora de metales. México es productor de oro, plata, plomo, cobre, zinc, fierro, manganeso, arsénico, bismuto, cadmio, molibdeno, antimonio, estaño, tungsteno, aluminio, celestita, fluorita, grafito, diatomita, barita, yeso, azufre, mármol. Para su obtención es necesario extraer una gran cantidad de minerales del subsuelo que son procesados por flotación para recuperar los elementos metálicos con valor económico. Lo anterior genera una gran cantidad de residuos llamados jales que están formados por el mineral que no tiene valor y, al que en el medio minero, se le llama ganga.

#### **2.3.1 Definición de jales**

Durante la exploración y extracción de los metales, se producen jales que constituyen el principal residuo producido por la actividad minera. Estos residuos mineros que son generados durante los procesos de separación, concentración y recuperación de minerales. Se forman al mezclar las partículas de roca con agua y pequeñas cantidades de reactivos químicos que facilitan la liberación de los metales por flotación (Norma Oficial Mexicana 141, 2003).

El origen de los jales se da con la reducción del mineral hasta tamaños de partícula generalmente en el intervalo de milímetros. Los jales pueden estudiarse como un suelo, ya que se constituye en gran parte por arenas finas. Los desechos son de tres fases (granos sólidos, líquidos y gases en los poros) (Santos, 2006).

### 2.3.2 Generación de jales

Los jales mineros son un residuo de la extracción de metales de la industria minera, en la naturaleza el cobre se encuentra como un mineral compuesto, es decir que el metal está mezclado con otros elementos tales como el azufre y oxígeno, teniendo sulfuros y óxidos de cobre. Por lo que las rocas de mineral tienen que ser procesadas en un proceso denominado “concentración de minerales” cuyo objetivo es separar selectivamente los minerales de interés económico, produciendo un concentrado de mineral y generando residuos conocidos como jales (Pacheco, 2006).

La producción del cobre se inicia con una *exploración*, trabajo realizado por geólogos, que consiste en buscar yacimientos que puedan ser explotables. El trabajo de exploración se realiza en tres etapas: exploración básica, exploración intermedia y exploración avanzada (CODELCO, 2007).

*Exploración básica:* su objetivo es definir un área de interés donde se podría encontrar un yacimiento, utilizando como herramienta mapas geológicos, elementos de geofísica para determinar áreas extensas, así como imágenes de satélite.

*Exploración intermedia:* una vez establecida el área de interés, se realizan los trabajos geoquímicos con mayor detalle, analizando muestras de la superficie. Se determina si el área determinada contiene al mineral que se desea explotar. En el caso de una mina de cobre, nuestro metal de interés se encuentra en muchos minerales, algunos están referidos en la Tabla 2.4.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.4 Minerales en que se encuentra presente el cobre (Santos, 2006).

Mineral	Composición	% de cobre
Bornita	$S_4Cu_5Fe$	63
Brocantita	$SO_4Cu_3Cu(OH)_2$	62
Calcocita	$SCu_2$	80
Calcopirita	$S_2CuFe$	34
Covelina	$SCu$	66
Cuprita	$Cu_2O$	89
Enargita	$S_3Cu_2S_5As_2$	48
Malaquita	$CO_3CuCu(OH)_2$	57
Azurita	$2CO_3CuCu(OH)_2$	55
Crisocola	$SiO_3Cu_2H_2O$	36

Como se observa en la tabla anterior, el cobre se puede encontrar en altos porcentajes en varias fases mineralógicas como en la cuprita y en la calcocita, cuando el yacimiento presenta altos contenidos de estos minerales se puede continuar con una exploración avanzada.

*Exploración Avanzada:* consiste en determinar con exactitud la forma y extensión del yacimiento, así como la calidad del mineral que se puede explotar.

Una vez realizada la exploración se realiza la extracción, que consiste en la siguiente secuencia de actividades: perforación, tronadura, carguío y transporte. La perforación se realiza con equipos eléctricos de perforación rotatoria (taladros), obteniendo, como resultado, orificios de cierto diámetro en el material que se quiere extraer, en dichos orificios se introducen explosivos, los cuales se hacen explotar para fragmentar el material, a este proceso se le conoce como tronadura. Ya que se tienen la roca mineralizada fragmentada (en tamaño menor a un metro de diámetro), se realiza el carguío del material. Con la ayuda de palas mecánicas se pone el material en un transporte especial, el cual llevará las rocas a otra etapa del proceso.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Las rocas que provienen de la extracción tienen una granulometría variable, con diámetros de 1mm hasta de un 1m. Por lo que las rocas pasan por un proceso llamado triturado cuyo objetivo es reducir todas las rocas fragmentadas en un tamaño uniforme máximo de 1.30 cm. Después del triturado continúa la molienda que consiste en reducir el tamaño de las partículas del mineral hasta un máximo de 0.18 mm. Este tamaño de partícula permite liberar fácilmente, en su mayoría, los minerales del cobre en forma de partículas individuales.

El material procesado se pone en contacto con agua para formar una pulpa, liberando todo el material económico presente en la ganga (ganga: minerales que no presentan interés económico en el momento de la explotación, por lo regular son materias no metálicas asociadas a un yacimiento). Los principales minerales que trae una ganga son óxidos, carbonatos, sulfatos y silicatos (Santos, 2006).

Al finalizar la extracción de los minerales se lleva a cabo la concentración de minerales que es el proceso donde se separa uno o varios de los minerales de interés económico y es en esta parte del proceso es donde se generan los jales. La industria minera de cobre ha desarrollado varios procesos de concentración para la separación del metal de interés. Los métodos de concentración en los que se producen los jales de cobre se separan en químicos y fisicoquímicos.

Los métodos químicos utilizan compuestos para disolver los minerales de interés y recuperarlos en forma iónica dentro de una solución llamada lixiviado, este método se conoce como lixiviación. Mientras que los métodos fisicoquímicos utilizan reactivos que modifican las características superficiales de las partículas del mineral para lograr la separación de los materiales de interés siendo un proceso que involucra tres fases, este método es conocido con el nombre de flotación y es el más utilizado en la recuperación de los minerales de cobre.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### Método de Lixiviación

La lixiviación es el ataque químico a una materia prima para disolver algún metal valioso utilizando reacciones del tipo ácidas o básicas, oxidantes o reductoras, complejantes o combinaciones de ellas (Ballester *et al.*, 2000). En este método de extracción de metales se utilizan productos químicos para disolver los minerales presentes. Dentro de los disolventes que se emplean se encuentran soluciones ácidas, soluciones alcalinas y algunas sales. El disolvente más empleado es el ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Se agregan otros reactivos que sin ser el disolvente principal activan las reacciones de disolución, por ejemplo el sulfato ferroso actúa como un agente que despolariza la electrólisis del cobre y el sulfato férrico ayuda a disolver algunos sulfuros de cobre. Por el uso de químicos tanto el método de lixiviación como el método de flotación generan lodos conocidos como jales mineros y son considerados desecho, estos jales son depositados en presas y requieren ser tratados para evitar la formación de drenaje ácido de mina (DAM).

### Método de Flotación

La flotación es el proceso de separación en el que las especies minerales son suspendidas en una solución acuosa, con aire y con reactivos químicos que producen reacciones fisicoquímicas en el mineral.

Este proceso lo forman tres fases:

- Fase sólida, es representada por los minerales a separar.
- Fase líquida, es representada por el medio acuoso donde se lleva a cabo la separación.
- Fase gaseosa, es representada por el aire inyectado en el medio acuoso para formar burbujas donde se adhieren las partículas del mineral que se quiere separar.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

El proceso de flotación depende de fenómenos complejos que ocurren en la superficie de las partículas de mineral y en las burbujas de aire formadas en el agua, para que de esta forma el mineral de interés pueda separarse de los minerales de ganga.

La capacidad para formar una unión estable entre la partícula mineral y la burbuja no se da de manera natural por lo que es necesario cambiar las propiedades superficiales de hidrofílicas a hidrofóbicas, mediante la aplicación de reactivos químicos que se concentran en la interfase mineral / agua, denominados: colectores.

Algunos colectores son los siguientes:

- Ácidos orgánicos: ácido oleico y oleato de sodio, Alquil sulfato de sodio y Alquil fosfato de sodio
- Tio compuestos: mercaptanos, xantatos, ditiocarbonatos, ditiofosfatos.
- Derivados de Amoniac: Aminas, sales de amonio, sales de piridina, etanol-aminas.
- Aceites: keroseno, petróleo

Algunas de las variables de mayor importancia en el proceso de flotación (Pacheco, 2006) son:

Granulometría: debido a que la flotación requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado para su concentración y exista mayor contacto entre los reactivos y el mineral.

Tipo de reactivos: la eficiencia del proceso dependerá de la selección de la mejor fórmula de reactivos, con colectores, espumantes y modificadores.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Dosis de reactivo: la cantidad de reactivo requerida en el proceso dependerá de las pruebas metalúrgicas preliminares, así como del balance económico desprendido de la evaluación de los consumos.

Densidad de pulpa: existe un porcentaje de sólidos óptimo para el proceso que tienen influencia en el tiempo de residencia del mineral.

Aireación: este factor permite aumentar o retardar la flotación en beneficio de la recuperación.

Regulación del pH: este proceso es sensible al pH. Cada fórmula de reactivos tiene un pH óptimo ambiente en el cual se obtendrá el mejor resultado operacional.

Tiempo de residencia: dependerá de la cinética de flotación de los minerales en la adición de reactivos.

Calidad del agua: en las plantas normalmente se utiliza agua de recirculación que contiene cantidades residuales de reactivos y sólidos en suspensión que afectan el proceso de extracción del metal deseado.

El desarrollo de una mina consta de cuatro diferentes etapas que son: exploración, preparación y desarrollo, explotación y abandono.

### **2.3.3 Características fisicoquímicas de jales**

Los jales pueden representar un riesgo para el medio ambiente si se conjugan con una serie de factores que ocasionen su dispersión y la liberación de los elementos potencialmente tóxicos contenidos en ellos.

Los jales mineros de cobre son un residuo de la extracción de metales de la industria minera, el cobre se encuentra en la naturaleza como un mineral

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

compuesto, es decir que el metal está mezclado con otros elementos tales como el azufre y oxígeno, teniendo sulfuros y óxidos de cobre, por lo que son considerados residuos peligrosos de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana 141. Por lo que las rocas de mineral tienen que ser procesadas en un proceso denominado “concentración de minerales” cuyo objetivo es separar selectivamente los minerales de interés económico, produciendo un concentrado de mineral y generando residuos conocidos como jales (Pacheco, 2006).

Por definición las propiedades físicas son todas aquellas que pueden ser observadas sin que exista cambio alguno en cuanto a su apariencia, las más importantes desde el punto de vista ambiental son: composición mineralógica, tamaño de partícula (granulometría), densidad, porosidad y permeabilidad. También puede presentar cierta importancia en determinados casos, otros parámetros como: el volumen, la consistencia, el color y la temperatura.

La mayoría de los jales se encuentran en forma de lodos y el principal problema que éstos presentan es la subsecuente oxidación por su alto contenido de sulfuro ferroso  $\text{FeS}_2$ , comúnmente conocido como pirita. La oxidación natural de los sulfuros se da por la presencia de oxígeno, agua y bacterias capaces de oxidar el hierro y al sulfuro convirtiéndolos en sulfato férrico y ácido sulfúrico que provocan la liberación de cationes metálicos y metales pesados generando disoluciones conocidas como drenajes ácidos de mina (DAM). La liberación de ácidos y metales tóxicos como el arsénico, plomo, cromo, mercurio, plata, níquel, selenio, representan un riesgo potencial de contaminación en los cuerpos de agua cercanos ya que pueden lixiviarse, en la Tabla 2.5 extraída de la NOM-052-SEMARAT-1993 se presentan las concentraciones máximas permitidas por un lixiviado (Pérez, 2005).

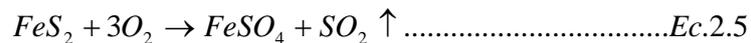
## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.5 Características del lixiviado que hacen peligroso a un residuo por su toxicidad al ambiente. (NOM-052-SEMARNAT-1993).

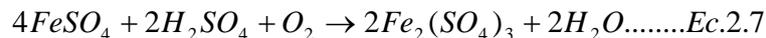
NO.	Constituyentes inorgánicos	Concentración máxima permitida (mg/L)
C.1.01	Arsénico	5.0
C.1.02	Bario	100.00
C.1.03	Cadmio	1.0
C.1.04	Cromo Hexavalente	5.0
C.1.05	Níquel	5.0
C.1.06	Mercurio	0.2
C.1.07	Plata	5.0
C.1.08	Plomo	5.0
C.1.09	Selenio	1.0

La oxidación de los sulfuros se presenta en tres etapas (Juárez, 2007):

*Primera etapa:* La oxidación de la pirita, el sulfuro más común, se realiza en presencia de aire o agua.



*Segunda etapa:* Es la oxidación del Fe (II). El sulfato ferroso, en presencia de ácido sulfúrico y oxígeno, se puede oxidar y producir sulfato férrico (soluble en agua). Cuando el pH se reduce en el microambiente en torno de los minerales sulfurados, la población de la bacteria *Acidibacillus ferrooxidans* comienza a crecer.

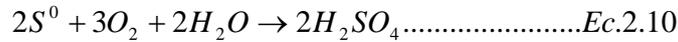


*Tercera etapa:* es la precipitación del hierro. El ión férrico se combina con el radical hidroxilo, produciendo hidróxido férrico que es insoluble en ácido y precipita:



## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

El sulfato férrico también puede reaccionar con la pirita y producir más ácido:

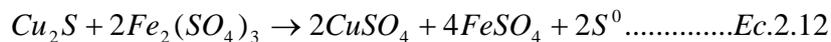


El ión férrico es un oxidante fuerte capaz de disolver una amplia variedad de minerales sulfurados.

*Calcopirita*



*Calcocita*



Dentro de las principales características de los jales sulfurados se puede mencionar que:

- Tienen altos contenidos de sulfatos.
- Su tamaño de partícula puede ser menor a 0.1 mm.
- El proceso de oxidación generalmente comienza después de que su deposición termina.
- Presentan un pH ácido (Valor entre 2-3).
- La filtración de oxígeno es lenta y uniforme.
- Son tóxicos por sus altas concentraciones de metales y la generación de DAM.

Los jales mineros contienen minerales primarios: minerales sulfurosos capaces de generar DAM (pirita, galena, esfalerita, pirrotita), y minerales capaces de neutralizar la posible acidez generada (calcita y arcillas) (Romero *et al.*, 2006).

La Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003 indica el procedimiento para realizar pruebas que permiten estimar la capacidad de generar ácido de los jales, ya que no todos los compuestos que contienen azufre pueden formar ácido sulfúrico: mientras que la prueba modificada solamente toma en cuenta los sulfuros que son los que pueden oxidarse y generar drenaje ácido.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

La norma indica los siguientes valores:

- Cuando el  $PN/PA \leq 1.2$ ; los jales son potenciales generadores de Drenaje Ácido.
- Cuando el  $PN/PA > 1.2$ ; los jales no son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

PN = Potencial de Neutralización

PA= Potencial de Acidez

Para controlar la oxidación de los jales mineros se llevan a cabo procesos de neutralización, que son reacciones amortiguadoras basadas en carbonatos, hidróxidos y aluminosilicatos que amortiguan el pH de los iones  $H^+$  liberados por la oxidación de sulfuros (Gaitán, 2008). La Tabla 2.6 muestra las sustancias amortiguadoras comúnmente usadas en dichos procesos de neutralización. Las reacciones de neutralización incrementan el pH lo que genera la precipitación de hidróxidos e hidroxisulfatos metálicos (Pérez Martínez, 2005).

Tabla 2.6 Principales sustancias amortiguadoras de pH en depósito de jales (Pérez Martínez, 2005).

Mineral	Fórmula
Carbonatos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcita</li> <li>• Dolomita</li> <li>• Siderita</li> </ul>	CaCO <sub>3</sub> CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> FeCO <sub>3</sub>
Hidróxidos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gibbsita</li> <li>• Ferrihidrita</li> <li>• Goethita</li> <li>• k-Jarosita</li> </ul>	Al(OH) <sub>3</sub> Fe(OH) <sub>3</sub> FeOOH KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
Aluminosilicatos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clorita</li> <li>• Muscovita</li> <li>• K-feldespatos</li> <li>• Plagioclasas</li> </ul>	(Mg, Al, Fe) <sub>6</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub> K Al <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub> (K,Na)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> -CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>

### 2.3.4 Cifras de producción y acumulación de jales

Durante la extracción del mineral en una mina metálica, sólo el 2% corresponde al metal deseado y el resto es descartado como diferentes desechos: 50% estéril, 44% jales y 4% escorias (López *et al.*, 2003).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

El principal productor de cobre en el mundo es Chile, donde el 40 % de los residuos corresponde a la industria minera (Navia *et al.*, 2008). Por cada tonelada de mena se producen 10 kilogramos de cobre fino y 990 kilogramos de desechos. La cantidad unitaria de desechos que deben extraerse para conseguir una cantidad unitaria de metal depende del tipo de mina, dicha variación oscila entre 1 a 40 ton (López *et al.*, 2003).

La mina subterránea de cobre más grande del mundo es “El Teniente” ubicada en Chile, se compone de casi 2.400 km de galerías subterráneas de este mineral. En el año 2006 la mina producía 418, 332 toneladas de cobre. En la Tabla 2.7 se puede observar la producción de cobre fino en la mina el Teniente desde el año de 1965 (Minas de Chile, CODELCO, 2007).

Tabla 2.7 Producción de Cobre fino en la mina “El Teniente”, Chile (COLDELCO, Minera “El Teniente”, Chile, 2007).

Producción			
Año	Cobre fino	Año	Cobre fino
1965	90,000 ton	1995	322,800 ton
1985	319,100 ton	2000	355,700 ton
1990	300,500 ton	2005	437,400 ton

De acuerdo con la relación de que por cada tonelada se producen 990 Kg de desechos y 10 Kg de Cobre fino (siendo el 44% jales), en el año 2005 en la mina “El Teniente” se produjeron 1, 732,104 toneladas de jales.

Con las cifras de producción mundial de cobre en el año 2007 y la relación de que por cada tonelada de mena, sólo 10 kilogramos son cobre fino y los 990 kilogramos restantes son desechos y el 44% de los desechos son jales se puede construir la Tabla 2.8 (López *et al.*, 2003).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.8 Producción de cobre en el mundo año 2007 y producción de jales calculada con la relación reportada por López et al., (2003).

Ranking mundial	País	Producción de Cobre en 2007 (ton/ año)	Producción de Jales de cobre en 2007 (ton/ año)
1	Chile	5,700,000	22,572,000
2	Perú	1,200,000	4,752,000
3	Estados Unidos	1,190,000	4,712,400
4	China	889,000	3,520,440
5	Australia	858,800	3,400,848
-	México	635,000	2,514,600

La generación de jales de cobre es una problemática a nivel mundial, las cantidades que se generan son sorprendentes, superan los 40 millones de toneladas al año entre los principales países productores de este metal. El principal país productor es Chile, con más de un tercio del total.

En México existen una gran cantidad de regiones mineras productoras. Las cifras de producción y acumulación de estos residuos son impresionantes, la Tabla 2.9 muestra la producción de jales por día en varias mineras de México.

Tabla 2.9 Producción de jales en toneladas por día en varias mineras de México (Gaitán, 2008).

Sitio	Ton / día	Referencia
En el año de 1995 se reporta que en México existen aproximadamente 500 mineras.	Entre 300,000 y 500,000	INE <a href="http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/36/cap3.html">http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/36/cap3.html</a>
Producción de jales mineros de cobre en la empresa Minera México de Cananea, SA de CV.	75,000	Revista: <i>Construcción y Tecnología</i> del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (Marzo 1999) <a href="http://www.imcyc.com/revista/1999/marzo/jales.html">http://www.imcyc.com/revista/1999/marzo/jales.html</a>
En el Distrito Minero de Guanajuato México, las mineras La Asunción y Las Torres producen jales mineros de cuarzo	2,000	Mendoza-Amézquita <i>et. al.</i> , (2006)

De acuerdo con la información de la tabla anterior se puede calcular que en nuestro país se generan más de 182 millones de toneladas de jales al año. La

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.10 muestra la cantidad de toneladas acumuladas a lo largo de los años de producción de varias mineras mexicanas.

Tabla 2.10 Depósitos de jales mineros en toneladas acumuladas en varias minas en México (Gaitán, 2008).

Características	Toneladas acumuladas	Referencia
Existen depósitos en Taxco que contienen grandes cantidades de jales de plata.	$5.5 \times 10^6$	Armienta <i>et al.</i> , 2006
Acumulación de jales mineros de cobre en la empresa Minera México de Cananea, SA de CV. Empresa fundada en 1986.	$1.5 \times 10^6$	Revista: Construcción y Tecnología del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (Marzo 1999)
En el Distrito de Guanajuato existen 31 depósitos de jales de cianuración y flotación.	$4.03 \times 10^7$	Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach, (2006)

Los jales son depositados en las presas ocupando espacios muy amplios, una vez depositados se deberá supervisar que no generen drenaje ácido y almacenar durante años. Por lo que la utilización o aprovechamiento de estos residuos puede ser una solución factible para mitigar esa problemática.

### 2.4 El agua y la minería

Comparándose con la mayoría de las actividades industriales y agrícolas, la explotación minera no es una gran consumidora de agua (Juárez, 2007). Para satisfacer las demandas de agua, la actividad minera acude generalmente al agua superficial (lagunas y ríos) y al agua subterránea como fuente de abastecimiento.

El principal consumo de agua dentro de la minería se ubica en los procesos de flotación, la lixiviación en pilas requiere menor cantidad de agua para ser factible. Una industria minera de cobre genera alrededor de  $8730.64 \text{ m}^3/\text{h}$  de aguas residuales de tipo industrial para producir 80000 toneladas de mineral por día. El consumo de agua es de  $2.6 \text{ m}^3$  por tonelada de mineral, recuperando alrededor del

## **ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

60 – 65% de agua para reutilización por medio del proceso fisicoquímico coagulación – floculación, adicionando como coagulante un polímero aniónico (Camimex, 2007).

En la figura 2.8 se muestra la distribución del agua, en un complejo minero de cobre, así como los sistemas generales de molienda, flotación primaria, remolienda, columnas de flotación, espesadores, el agua recuperada y la producción de jales. La tabla 2.11 muestra las entradas de agua para proceso, las salidas de agua residual tipo industrial con su composición de sólidos suspendidos totales (SST).

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.11 Balance de agua del sistema de flotación de un complejo de cobre (Camimex, 2007).

		Entrada agua para proceso	Salida agua recuperada (60 - 65)%	Salida agua con 54% SST	Total de agua que entra para proceso	Total de salida de agua con un 65% de recuperación
Tubería	No. Corrientes	Ton/h	Ton/h	Ton/h	Ton/h	Ton/h
1	2	3759.56	-	-	7519.12	-
2	6	150.21	-	-	901.26	-
3	1	266.76	-	-	266.76	-
4	1	43.5	-	-	43.5	-
5	1	-	(5238.38 – 5674.916)	-	-	5674.916
6	1	-	-	(2947.72- 3055.724)	-	3055.724
Balance de agua					8730.64	8730.64

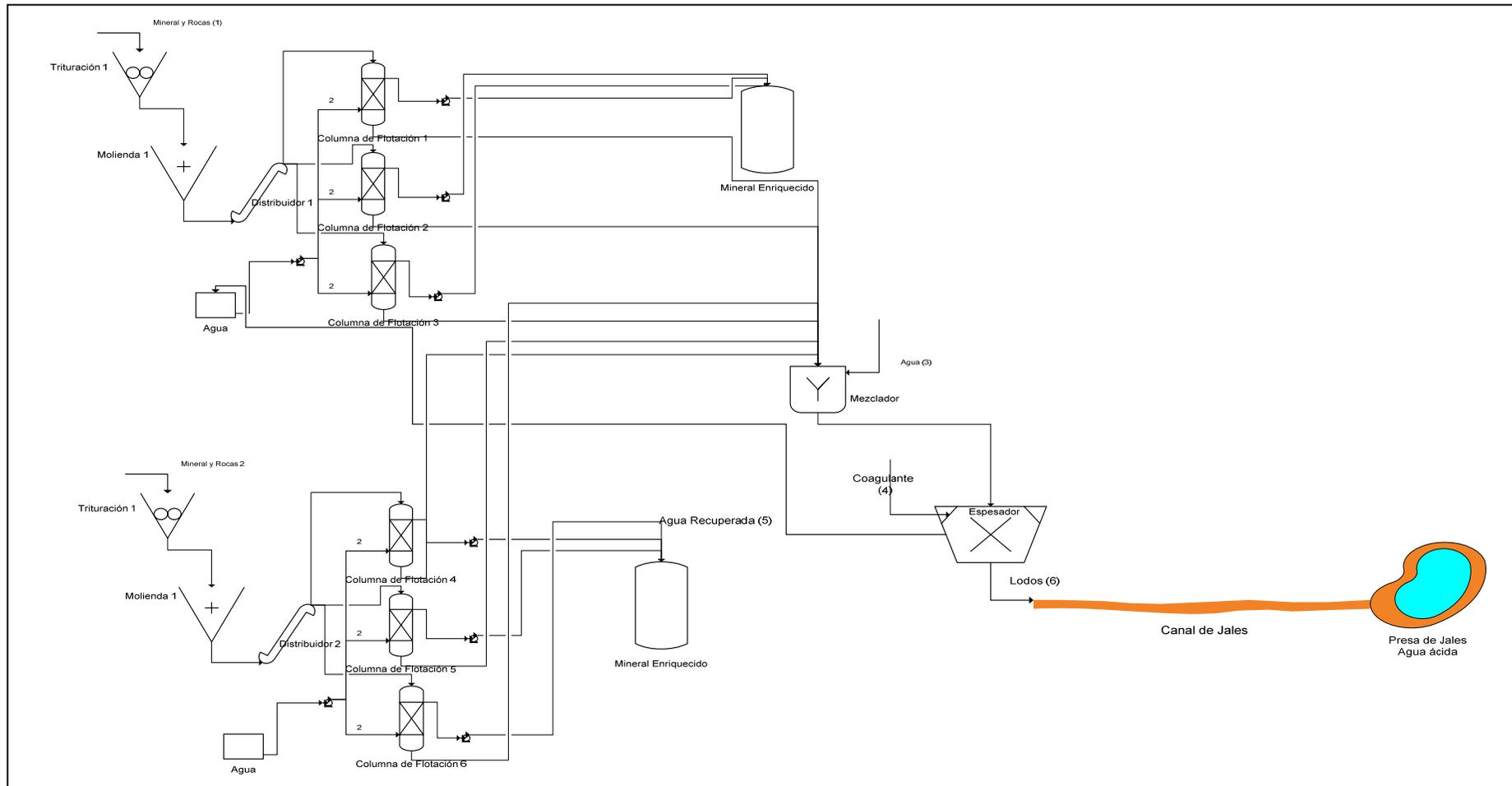


Figura 2.8 Diagrama de agua para proceso en un complejo minero de cobre.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

La población residente en los campamentos ocupa el segundo lugar en demandas, por que debido a la escasez o mala calidad del agua superficial, se emplean aguas subterráneas de manantial. Para el minado, el uso del agua del subsuelo es menos importante, generalmente se prefiere extracción de minerales por medio de la barrenación y los martillos neumáticos dentro de las minas subterráneas (Juárez, 2007).

Muchas veces lo difícil de la explotación minera no es abastecer, sino liberarse de grandes cantidades de agua no deseables. Este es el problema del drenaje de las minas, el de captar, transportar y eliminar al medio ambiente flujos de agua de manera que no ocasionen daños (Sánchez, 1995).

Los impactos en los acuíferos locales, por acción directa de la minería son muy notorios. Por acción del bombeo y desagüe de minas, se producen variaciones de los niveles en mantos freáticos, cambios localizados en el caudal de los manantiales y en la dirección del flujo; mientras que por acción de la lixiviación de sulfuros se producen alteraciones en la calidad del agua (aguas ácidas). El descenso de los niveles freáticos puede causar la disminución de la extensión de ciénagas, la disminución de los caudales de manantiales, el descenso del caudal base de algunos ríos y de la consecuente disponibilidad del agua para riego. La infiltración de aguas superficiales procedentes de pilas de lixiviación y desechos humanos, pueden causar serios daños en la calidad del agua subterránea regional.

Las aguas residuales de drenaje de las minas y las aguas percoladas por las acumulaciones de colas son ácidas, por causa de la oxidación del sulfuro ( $S^{2-}$ ) en sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) soluble, que ocurre cuando los jales que contienen sulfuros metálicos son expuestos al aire y agua. Esto ocurre continuamente en las presas de jales mineros, ya que los jales se encuentran en contacto con el aire y el agua, por lo que generan agua ácida. El producto de la oxidación de los sulfuros

## **ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

metálicos es ácido sulfúrico, que si no es neutralizado por minerales con características básicas, produce drenaje ácido que contiene disueltos metales y metaloides potencialmente tóxicos (Ramírez, 2008). Estas fuentes generan la contaminación de los ríos principalmente durante la época húmeda (Peñaloza, 2001).

### **2.5 Marco normativo**

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) entró en vigor en el año de 1988 y en ella se establece una serie de lineamientos encaminados a la protección ambiental y a la conservación de los recursos naturales en el país. Respecto a las actividades de explotación y aprovechamiento de los recursos minerales, la ley hace el señalamiento de la alteración que puede ocasionar esta actividad en el equilibrio ecológico.

A partir de los lineamientos de la LGEEPA, se han establecido diversos criterios para la protección del ambiente en la realización de las actividades que involucran la minería. Estos criterios están señalados en los reglamentos en materia de impacto ambiental, en el de residuos peligrosos y en las normas oficiales mexicanas.

#### **2.5.1 Protección al medio ambiente**

En México fue aprobada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 para la adecuada disposición de jales, en septiembre de 2004.

Tomando en consideración que la prevención y el control de los desequilibrios ecológicos y el deterioro del ambiente, son indispensables para preservar los recursos naturales de la nación y asegurar el bienestar de la población, se establece en el reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en materia de impacto ambiental lo siguiente:

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

El artículo 5 hace una referencia detallada de las actividades que requieren autorización en materia de impacto ambiental.

El inciso L) de este artículo se refiere a la “exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la federación” y consta de tres fracciones que son las siguientes:

- I. Obras para la explotación de minerales y sustancias reservadas a la federación, así como su infraestructura de apoyo;
- II. Obras de exploración, excluyendo las de prospección gravimétrica, geológica superficial, geoeléctrica, magneto-telúrica, de susceptibilidad magnética y densidad, así como las obras de barrenación, de zanjeo y exposición de rocas, siempre que se realicen en zona agrícolas, ganaderas o eriales y en zona con climas secos o templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinares, ubicadas fuera de las áreas naturales protegidas, y
- III. Beneficio de minerales y disposición final de sus residuos en presas de jales, excluyendo las plantas de beneficio que no utilicen sustancias consideradas como peligrosas y el relleno hidráulico de obras mineras subterráneas.

De esta última fracción queda clara la importancia que tiene la disposición de jales, al ser necesaria la autorización por parte de las autoridades correspondientes, previa presentación de una Manifestación de Impacto Ambiental (MIA).

Este reglamento establece los lineamientos que deben seguirse en materia de generación, manejo, almacenamiento, disposición y reutilización de residuos, de acuerdo con lo estipulado en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Protección al Ambiente. Entre las definiciones que este reglamento considera y que son de interés para el caso de los jales están los siguientes:

**Almacenamiento:** Acción de retener temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección, o se dispone de ellos.

**Confinamiento controlado:** Obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos, que garantice su aislamiento definitivo.

**Confinamiento en formaciones geológicas estables:** Obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos en estructuras naturales impermeables, que garanticen su aislamiento definitivo.

**Jales:** Residuos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales.

**Presa de jales:** Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de jales.

De lo anterior se puede entender que inicialmente, cuando fue promulgada la LGEEPA y el reglamento en materia de residuos peligrosos, el almacenamiento de los jales deberán almacenarse conforme a lo que dispongan las normas técnicas ecológicas correspondientes, establecidos en la norma NOM-141-SEMARNAT-2003 para la adecuada disposición de jales.

En el artículo 36 del reglamento se establece que “Las presas de jales podrán ubicarse en el lugar en que se originen o generen dichos residuos, excepto arriba de poblaciones o de cuerpos receptores ubicados a una distancia menor de 25 kilómetros que pudieran resultar afectados”.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

### 2.4.1 Normatividad aplicable a Jales Mineros

La norma oficial mexicana, establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente (NOM – 052 – SEMARNAT – 1993).

Esta norma fue desarrollada a partir de las disposiciones de la LGEEPA y sustituyó a la norma técnica ecológica expedida anteriormente para residuos peligrosos. Esta norma establece que los residuos en cualquier estado físico son peligrosos por presentar alguna de las siguientes características: a) corrosivo, b) reactivo, c) explosivo, d) tóxico, e) inflamable o f) biológico infeccioso. Para determinar estas características se realiza una prueba de extracción del residuo, con el procedimiento que se indica en la NOM – 053 – SEMARNAT – 1993. En la tabla 2.12 se especifican las condiciones para que un residuo cumpla con alguna de las características CRETIB.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

Tabla 2.12 Características que hacen a un residuo peligroso (NOM – 052 – SEMARNAT – 1993).

CARACTERISTICAS	DEFINICION
Corrosividad	Un residuo se considera peligroso por su corrosividad cuando en estado líquido o en solución acuosa presenta un pH sobre la escala menor o igual a 2.0, o menor o igual a 12.5. En estado líquido o en solución acuosa y a una temperatura de 55° C es capaz de corroer el acero al carbón (SAE 1020), a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año.
Reactividad	Un residuo se considera peligroso por su reactividad cuando bajo condiciones normales (25° C y 1 atmosfera) se combina o polimeriza violentamente sin detonación. En condiciones normales (25° C y 1 atmosfera) cuando se pone en contacto con agua en relación (residuo – agua) de 5:1, 5:3, 5:5 reacciona violentamente formando gases, vapores o humos. Bajo condiciones normales cuando se ponen en contacto con soluciones de pH: ácido (HCl 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N) es relación (residuo – solución) de 5:1, 5:3, 5:5 reaccionan violentamente formando gases, vapores o humos. Posee en su constitución cianuros o sulfuros que cuando se exponen a condiciones de pH entre 2.0 y 12.5 pueden generar gases, vapores o humos tóxicos en cantidades mayores a 250mg de HCN/Kg de residuo o 500mg de H <sub>2</sub> S/Kg de residuo. Es capaz de producir radicales libres.
Explosividad	Un residuo se considera peligroso por su explosividad cuando tiene una constante de explosividad igual o mayor a la del di-nitrobenceno. Es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva de 25° C y a 1.03Kg/cm <sup>2</sup> de presión.
Toxicidad al ambiente	Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al ambiente cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM – 053 – ECOL – 1993, el lixiviado de la muestra representativa que contenga cualquiera de los constituyentes listados en las tablas 5, 6 y 7 (anexo 5) en concentraciones mayores a los límites señalados en dichas tablas.
Inflamabilidad	Un residuo se considera peligroso por su inflamabilidad cuando en solución acuosa contiene más de 24% de alcohol en volumen. Es líquido y tiene un punto de inflamación inferior a 60° C. No es líquido pero es capaz de provocar fuego por fricción, adsorción de humedad o cambios químicos espontáneos (a 25° C y a 1.03Kg/cm <sup>2</sup> ). Se trata de gases comprimidos inflamables o agentes oxidantes que estimulan la combustión.
Biológico infecciosas	Un residuo con características biológico infecciosas se considera peligroso cuando el residuo contiene bacterias, virus u otros microorganismos con capacidad de infección. Cuando contiene toxinas producidas por microorganismos que causen efectos nocivos a seres vivos.

La Norma Oficial Mexicana NOM – 141 – SEMARNAT – 2003, establece los requisitos para caracterizar los jales y criterios para la caracterización y

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.

El objetivo de esta norma “establece las especificaciones para la caracterización del jal y la caracterización del sitio, así como los criterios para la mitigación de los impactos ambientales por la remoción de la vegetación para el cambio de uso de suelo. Asimismo señala especificaciones y criterios ambientales para las etapas de preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y post-operación de presas de jales, y para el monitoreo”.

De acuerdo a esta norma, consta de dos procedimientos para determinar la peligrosidad de los residuos mineros:

- ✓ El primero determina la extracción del constituyente tóxico y determina la peligrosidad en función de la movilidad de los constituyentes tóxicos con agua, conforme a la “Prueba para realizar la extracción de metales y metaloides en jales, con agua en equilibrio con CO<sub>2</sub>”.
- ✓ El segundo consiste en evaluar la peligrosidad en función del potencial de generación de drenaje ácido de acuerdo con la “Prueba de Balance Acido – Base para jales que contiene sulfuros de metales”

Para el desarrollo de esta tesis sólo se considero el segundo procedimiento, esta prueba tiene el propósito de caracterizar la peligrosidad de los jales por su reactividad. Consiste en definir el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquéllos potencialmente consumidores, para determinar la capacidad neutralizante neta de los constituyentes del jal, bajo la base de la “Prueba de Balance Ácido – Base para jales que contienen sulfuros de metales”.

De acuerdo a las regulaciones nacionales, la peligrosidad de los jales está en función de:

- a) Su capacidad de generación de acidez
- b) Su contenido de constituyentes tóxicos fácilmente solubles o disponibles.

## ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO

La NOM-052-SEMARNAT-2005 establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Un residuo se considera peligroso por su toxicidad al medio ambiente cuando se somete a la prueba de extracción para toxicidad conforme a la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, y el lixiviado de la muestra representativo contiene concentraciones mayores a los límites señalados en la Tabla 2.5.

Esta norma clasifica los residuos peligrosos por su giro industrial y su proceso. Los residuos mineros señalando a los jales como los principales actores, se encuentran en el Giro No. 9 “Minería”. En la Tabla 2.13 se presenta la clasificación de los residuos peligrosos por el Giro de Minería.

Tabla 2.13 Clasificación de los residuos peligrosos por el Giro No.9: Minería.  
(NOM-052-SEMARNAT-1993).

No. de giro	Giro industrial y proceso	Clave CRETIB	Residuo Peligroso	No.
9.1	Extracción de antimonio	(T)	Jales y colas provenientes de las concentración del mineral.	RP9.1/01
9.2	Extracción de óxidos de cobre	(T)	Residuos provenientes de la concentración del mineral a través de lixiviación por cementación de fierro seguido por precipitación del hierro.	RP9.2/01
		(T)	Residuos provenientes de la concentración del mineral por el proceso de lixiviación por vertido seguido por precipitación del hierro.	RP9.2/02
		(T)	Residuos provenientes del proceso de lixiviación <i>in situ</i> seguida por precipitación del hierro.	RP9.2/03
9.3	Extracción de Pirita de cobre	(T)	Jales de la concentración del mineral por las técnicas de flotación y lixiviado en tina.	RP9.3/01
		(T)	Residuos provenientes de la concentración del mineral mezclados con óxidos de cobre usando la técnica de precipitación del hierro.	RP9.3/02
9.4	Extracción del Plomo Zinc	(T)	Jales provenientes de la concentración de los sólidos por flotación.	RP9.4/01

En la tabla anterior se muestra que los residuos generados en la industria de la minería presentan un peligro de toxicidad sin importar su proceso de extracción.

## **ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO**

Siendo los procesos de extracción de óxidos de cobre y extracción de pirita de cobre, los que contienen mayor información de generación de residuos peligrosos (Gaitán, 2008).

## **CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El objetivo principal de este trabajo es evaluar la factibilidad técnica de aplicar polvos finos de caliza para el tratamiento de aguas residuales (provenientes del proceso de flotación de cobre), de jales y de agua ácida de una presa de jales, mediante procesos fisicoquímicos.

El estudio experimental se dividió en cuatro partes principales: I. Determinación de las características fisicoquímicas de los polvos finos de caliza a evaluar en este estudio, II. Realización de pruebas de coagulación-floculación con polvos finos de caliza y agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre; los parámetros medidos fueron pH, sólidos suspendidos (SS), color aparente, color real, turbiedad, volumen de lodos y conductividad, III. Realización de pruebas de neutralización del agua ácida de una presa de jales, utilizando los polvos finos de caliza y, IV. Elaboración de pruebas de neutralización de jales de cobre de una presa, aplicando los polvos finos de caliza. A continuación se describen los principales materiales, reactivos, sistemas y técnicas experimentales y analíticas.

### **3.1 Materiales y Reactivos**

#### **3.1.1 Polvos finos de caliza**

Se colectaron dos tipos de muestra de piedra caliza: con diferente tiempo de almacenaje, una muestra con un tiempo de corto de almacenaje de 1 a 6 meses y otra con un tiempo de largo de almacenaje de 6 meses a 10 años, de una planta de cal localizada en un estado del norte de México, se almacenaron en bolsas de plástico.

#### **3.1.2 Agua residual tipo industrial y agua ácida de la presa de jales**

Las muestras de agua residual tipo industrial (cruda) fueron colectadas de un complejo minero localizado en un estado del norte de México, el muestreo se

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

realizo antes de la entrada del sistema de espesamiento de colas o jales y después del sistema de flotación, se tomaron 60 litros de muestra. Las muestras de agua ácida fueron colectadas de la presa de jales mineros de cobre localizada en un estado del norte de México

El agua residual tipo industrial y el agua ácida se almacenaron en bidones de plástico con capacidad 20L en el interior del cuarto frío a una temperatura aproximada de 5 °C para evitar la descomposición gradual del agua.

### 3.1.3 Jal minero

Se colectaron tres muestras de jal: los jales presentaban diferente grado de formación de drenaje ácido de mina; el primero con un valor de pH = 10.39 básico (Jal I colectado a la salida del espesador), otro que presentaba pH = 4.45 ácido (Jal II colectado en la presa de jales en la parte donde iniciaron las descargas de este residuos) y otra que también presentaba formación de drenaje ácido pH = 7.5 neutro (Jal III a la mitad de la presa de jales) de un complejo minero localizado en un estado al norte de México.

### 3.1.4 Reactivos para el ajuste del pH

Para realizar las pruebas de coagulación – floculación, fue necesario el ajuste de pH. Se utilizaron los siguientes reactivos: hidróxido de sodio (NaOH), en estado sólido marca J.T.Baker con una pureza de 98.2%, una solución de NaOH marca J.T.Baker con una pureza de 98.2%, a una concentración de 0.1M y una solución 1N de ácido clorhídrico grado analítico marca J. T. Baker con una pureza del 36.5-38 % para disminuir el pH de la mezcla o para aumentar el pH de la mezcla.

Como coagulantes se emplearon sulfato de aluminio ( $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ ) marca J.T.Baker con una pureza de 99.9% y un polímero aniónico. En el tratamiento del agua industrial residual, se empleó el proceso de coagulación – floculación. De acuerdo a lo reportado en la tabla 2.3 (Hernández, 1990) el ajuste del pH para

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

sulfato de aluminio se llevó al inicio de las pruebas de coagulación – floculación en valores entre 6 a 8 ya que son los valores de pH óptimos donde trabaja mejor el sulfato de aluminio (Hernández, 1990). Para las pruebas con el polímero aniónico no se realizó ajuste de pH.

### 3.1.5 Reactivos para el proceso de coagulación – floculación

En un estudio previo realizado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ramírez Zamora, 1999) se logró determinar que uno de los mejores coagulantes, el sulfato de aluminio, para el tratamiento de aguas residuales y potables, debido a su alta eficiencia y bajo costo.

Se preparó una solución madre de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) con una concentración de 6.1750 g/L ya que contiene 1g Al/L, con esta solución se realizó un barrido a diferentes dosis de 5, 10, 15, 20, 25 y 30mL por cada 0.5L de agua residual tipo industrial, para determinar la dosis óptima de coagulante, en el proceso de coagulación – floculación.

De igual forma se preparó una solución madre de polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910 de SNF Floerger) con una concentración de 1g/L utilizada en el complejo minero (Camimex, 2007), con esta solución se realizó un barrido a diferentes dosis de 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3 y 0.4mL por cada 0.5L de agua residual tipo industrial, para determinar la dosis óptima de polímero utilizado en el complejo minero de cobre como coagulante en el proceso de coagulación – floculación.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.2 Sistemas y técnicas experimentales

#### 3.2.1 Pruebas de coagulación – floculación de agua residual industrial

##### 3.2.1.1 Acondicionamiento del agua residual de un complejo minero de cobre para la prueba de jarras

Para la determinación de la dosis óptima tanto del polímero aniónico como del sulfato de aluminio, se realizaron diversas pruebas de jarras para conocer las dosis adecuadas del sulfato de aluminio y del polímero aniónico como coagulantes. Una vez determinadas las dosis óptimas de los coagulantes, se utilizaron los polvos de caliza como coadyuvante de floculación en el proceso de coagulación - floculación y se realizó un barrido a diferentes dosis (0.005, 0.015, 0.025, 0.035, 0.045 y 0.060g) de polvos de caliza (tamaño de partícula de 0.075mm) por cada 0.5L de agua residual tipo industrial de un complejo minero de cobre) para determinar la dosis óptima de piedra caliza.

Al utilizar sulfato de aluminio  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  como coagulante es necesario realizar el ajuste de pH a un valor entre 6 y 8, en el caso del polímero aniónico no es necesario ajustar el pH. Por lo tanto, para el ajuste de pH, se utilizó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración 0.1M para aumentar el pH y para disminuir el pH se utilizó una solución de ácido clorhídrico (HCl) a una concentración 0.1N, para la medición del pH se utilizó un potenciómetro marca Thermo Orion 3 – Star. El acondicionamiento de pH se realizó de la siguiente manera:

El agua residual tipo industrial debe retirarse del cuarto frío, para que alcance la temperatura ambiente antes de ajustar el pH entre 6 y 8. Una vez que se alcance la temperatura ambiente se agita el agua residual, para obtener una mezcla homogénea, se coloca un volumen de 8L en una cubeta de 20L aproximadamente y se coloca el electrodo del potenciómetro para verificar el valor actual de pH; en base al valor medido, se añade aproximadamente 0.25mL de ácido clorhídrico 1N por 1L para disminuir una unidad de pH, en caso de que el agua residual se

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

encuentre por arriba del intervalo óptimo de pH (6 – 8) del coagulante, se adiciona 0.5mL de una solución de NaOH 0.1M por 1L para aumentar una unidad de pH, para alcanzar un valor final de pH entre 6 – 8, en caso de que el agua se encuentre con un valor de pH por debajo del rango óptimo.

### 3.2.1.2 Pruebas de coagulación – floculación

Para conocer la dosis óptima de coagulante de sulfato de aluminio y del polímero aniónico, se llevaron a cabo varias pruebas de coagulación – floculación por medio de un equipo de jarras, para tratar el agua residual tipo industrial de un complejo minero de cobre, utilizando diferentes dosis de las concentraciones establecidas de los coagulantes.

Para las pruebas de jarras se utilizó el equipo Phipps & Bird modelo PB – 700 el cual consta de 6 paletas individuales como se muestra en la figura 3.1.

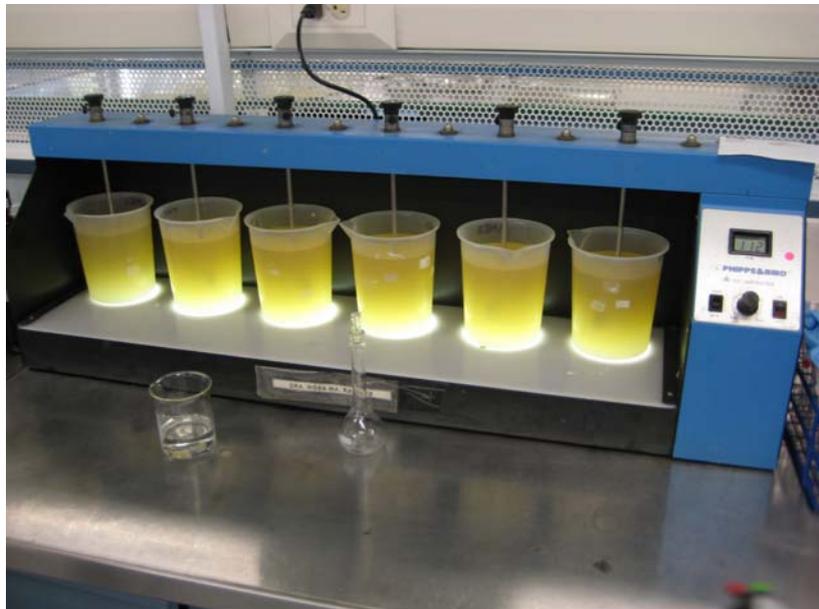


Figura 3.1 Equipo Phipps & Bird, para prueba de jarras.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para el caso del sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) en la determinación de la dosis óptima, se colocó 0.5L del agua residual tipo industrial en cada vaso, previamente ajustada al rango del pH 6 – 8, como se muestra en la figura 3.1.

De acuerdo con las etapas (mezclado rápido y mezclado lento) de coagulación – floculación, para la etapa de mezclado rápido se agitó a 120rpm durante 60 segundos y se adicionaron en cada vaso el coagulante, al finalizar los 60 segundos de la etapa de mezclado rápido, inicia la etapa de mezclado lento, se disminuyó la velocidad a 30rpm durante 30 minutos, donde ocurre la formación de los flóculos. Al término de este periodo, se detuvo la agitación y se trasvasó el agua a cada uno de los vasos evitando la ruptura de los flóculos formados a un cono de sedimentación (Imhoff) como se muestra en la figura 3.2 y se dejó que los flóculos se sedimentaran por 60 minutos adicionales, para la medición de volumen de lodos generados, tomando en cuenta que el agua recuperada se toma partir del borde de los lodos generados, dejando el 20%-30% del volumen de agua para no arrastrar lodo.



Figura 3.2 Cono de sedimentación (Imhoff)

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

De igual forma se realizó la determinación de la dosis óptima del polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) utilizado por el complejo minero de cobre como coagulante, en este caso no es necesario ajustar el pH del agua residual tipo industrial.

Esta operación se realizó con cada una de las diferentes dosis de coagulantes utilizados, sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) y polímero aniónico. La determinación de la dosis óptima se realizó de acuerdo a los resultados obtenidos en la medición de los parámetros, como lo son: el pH, color aparente, color real, sólidos suspendidos totales (SST), turbiedad, volumen de lodos y conductividad ver anexo B. Las dosis aplicadas se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Dosis de los coagulantes de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  y polímero aniónico aplicadas para la determinación de la dosis óptima.

mL de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (concentración de 6.1750 g/L)	5	10	15	20	25	30
mL de polímero aniónico (concentración de 1g/L)	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4

Para la clarificación de las aguas en el proceso de coagulación – floculación, es necesario evaluar el tiempo de sedimentación, para ello es necesario que la mayor parte o aproximadamente el 90% de los flóculos formados sedimente adecuadamente en el cono de sedimentación. La sedimentación evita además que durante la filtración, el filtro se sature rápidamente.

Durante el estudio en las pruebas de jarras se determinó un tiempo aproximado para la sedimentación total de los flóculos de entre 45 – 60 minutos, este tiempo se determinó de manera cualitativa cuando visualmente el 90% de los flóculos sedimentaron. Se debe tener cuidado de no perturbar el agua en los conos Imhoff para evitar que los flóculos sedimentados vuelvan a suspenderse en la solución.

Una vez finalizado el tiempo de sedimentación, el sobrenadante en los conos se separó 150mL del agua y se procedió a analizarlo para determinar los valores de los parámetros fisicoquímicos, tomando lectura del volumen de lodos generados,

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

turbiedad, conductividad, sólidos suspendidos, color real, color aparente y pH, de igual forma se miden los parámetros para el agua residual tipo industrial sin tratar (cruda), con base en las técnicas recomendadas por las normas mexicanas correspondientes y por el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA *et al.*, 1998). De acuerdo a los valores medidos de los parámetros, se determina la remoción comparando los valores medidos del agua tratada a partir del proceso de coagulación – floculación con el agua residual industrial sin tratar (cruda). A partir de la eficiencia de la remoción de estos parámetros fisicoquímicos, permitió seleccionar la dosis óptima del sulfato de aluminio y el polímero aniónico. Con base en los resultados obtenidos se seleccionó la dosis de coagulante en base al siguiente criterio: 1) dosis en la que se obtienen las mejores características fisicoquímicas del efluente, siendo los valores de turbiedad, color real, color aparente más bajos, para adicionar los polvos de caliza con la finalidad de generar flóculos mas grandes como coadyuvante de floculación, disminuir la dosis de coagulante y prevención de generación de drenaje ácido.

Aplicando la técnica descrita párrafos arriba, para una dosis óptima de coagulante, se adicionan dosis crecientes de polvos de caliza (0 a 60 mg/L) si se aplica el método clásico de prueba de jarras. Las dosis de polvos de caliza se adicionan iniciando el periodo de mezclado lento. Cuando inicia la formación de los flóculos y para combinarse con el coagulante (sulfato de aluminio y polímero aniónico). Al final del proceso de coagulación – floculación, se analiza el efluente (pH, color real, color aparente, turbiedad...) y de los lodos generados (volumen de lodos, tamaño de flóculo, velocidad de sedimentación).

### 3.2.2 Pruebas de neutralización de agua ácida

El agua ácida en la presa de jales es generada por la constante oxidación de los metales, que se encuentran en forma de sulfuros; los jales generalmente se encuentran expuestos al aire libre ya que son depositados en presas, por lo que

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

están en continuo proceso de oxidación liberando especies iónicas y al contacto con el agua y el aire (Sánchez, 1995).

Antes de realizar la neutralización de este tipo de aguas ácidas, se determinó su curva de neutralización. La técnica consistió en lo siguiente: se colocaron 250mL de agua ácida de la presa de jales en un matraz erlenmeyer de 1L. Posteriormente, se agregaron volúmenes crecientes de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.1M por medio de una bureta de 50mL y se midió el valor de pH en cada una de las dosificaciones, hasta obtener un pH básico. De acuerdo con los resultados obtenidos de la curva de neutralización del agua ácida, se determinó la cantidad de equivalentes de hidróxido de sodio requeridos para neutralizar (pH=7) 250mL de agua ácida. Con base en la cantidad de equivalentes de NaOH empleados y el contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) de los polvos de caliza, se determinó la dosis estequiométrica requerida de estos materiales para neutralizar la misma cantidad (250mL) de agua ácida de la presa de jales.

Para la prueba de neutralización de agua ácida con los polvos de caliza, después de determinar la dosis estequiométrica de polvos de caliza, se colocaron 250 mL de agua ácida en agitación constante a 180rpm y se midió el valor inicial de pH y de temperatura. A esta muestra se adicionó la dosis estequiométrica de polvos de caliza, midiendo el pH y la temperatura cada 5 minutos durante 30 minutos, después por lapsos de 1 a 2 horas, hasta que el pH se estabilizó. Se repitió la misma técnica para múltiplos de dosis estequiométricas de 2, 3 y 4.

### **3.2.3 Pruebas de neutralización de jales mineros de cobre**

La neutralización de los jales mineros fue llevada a cabo aplicando polvos de caliza, la cual fue previamente cribada de acuerdo al análisis granulométrico en donde se determinó el tamaño de partícula de piedra caliza que se agregó a los jales. De igual forma, se realizó un estudio de Fluorescencia por Rayos X, donde se determina la cantidad de óxidos de calcio que contienen los polvos de caliza. Donde de acuerdo con los resultados del análisis de contenido de óxidos por

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

fluorescencia de rayos X, se determinó la cantidad de carbonato de calcio que contienen los polvos finos de caliza.

Para neutralizar los jales mineros es necesario determinar si los jales son potencialmente generadores de drenaje ácido, de acuerdo a lo que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM- 141 – SEMARNAT – 2003), obteniendo los valores de las pruebas de PN y PA.

Se seleccionó un tamaño de 18mm de diámetro de partícula debido a que de acuerdo a los resultados obtenidos en un análisis granulométrico es uno de los más representativos. La técnica de neutralización de jales se describe a continuación:

Se colocan 10g de jal seco en un matraz erlenmeyer y se agregan 10mL de agua, siendo esta proporción másica como se generan los jales en el complejo minero de origen. Posteriormente, esta mezcla se agita para formar una suspensión homogénea, se mide el valor de pH y se registra. A continuación, se agrega una dosis estequiométrica de polvos de caliza, calculada de acuerdo con los resultados obtenidos de PA y del contenido de  $\text{CaCO}_3$  de los polvos de caliza (cuantificados indirectamente por la técnica analítica de Fluorescencia por Rayos X, que determinó la cantidad de óxidos de calcio contenidos en la piedra caliza).

La suspensión de jal-polvos de caliza se pone en agitación constante a 120rpm, se mide y registran el valor de pH por intervalos de 5 minutos durante los primeros 30 minutos y después por intervalos de 1 hora, hasta que el pH se haya estabilizado.

Una vez que se estabilizó el pH, se detuvo la agitación y la suspensión acuosa de jal neutralizado se dejó secar o evaporar el agua a temperatura ambiente. Finalmente, al jal neutralizado y seco se le determinó el potencial de neutralización y el potencial de acidez, para determinar si todavía puede generar drenaje ácido, de acuerdo a la NOM – 141 – SEMARNAT – 2003.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.3 Técnicas analíticas

#### 3.3.1 Determinación del contenido de óxidos - Fluorescencia de Rayos X

La determinación del contenido de óxidos se realizó para determinar si en la piedra caliza se encontraban presentes y en qué proporción principalmente componentes de óxidos de carbonato, para cuantificar la cantidad de carbonato de calcio y neutralizar los jales mineros de cobre generadores de drenaje ácido, tratar agua residual tipo industrial como coadyuvante de floculación en el proceso de coagulación – floculación y como agente neutralizante en el agua acida de la presa de jales.

El método de preparación de las muestras fue el de cribar la piedra caliza con una malla del número 200 con un diámetro de abertura de 0.075mm, colocando aproximadamente 10g de la piedra retenida en la malla de cada una de las muestras en tubos de ensayo con tapa de rosca. La determinación del % de óxidos en las muestras de tiempo corto y tiempo largo de almacenaje de la piedra caliza se realizó por la técnica de Fluorescencia de Rayos X. El análisis se llevó a cabo con un Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X SRS3000. El estudio se realizó en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI), Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

También se realizó un estudio granulométrico a los polvos finos de caliza, para determinar el tamaño efectivo de partícula y el coeficiente de uniformidad.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 3.3.2 Determinación de generación de drenaje ácido con los jales

La peligrosidad de los jales está determinada por sus características tóxicas, determinadas por su composición u oxidación y por su forma de manejo, la oxidación de los sulfuros, que ocurre cuando los jales que contienen sulfuros metálicos son expuestos al aire y al agua. El producto de la oxidación de los sulfuros metálicos es ácido sulfúrico, que si no es neutralizado por minerales con reacción básica, produce drenaje ácido de mina (DAM) que contiene disueltos metales y metaloides potencialmente tóxicos; la prueba que evalúa la peligrosidad de los jales por su capacidad de generar drenaje ácido, de acuerdo a los lineamientos de la Prueba Modificada de Balance Acido – Base (PM – ABA), la cual se seleccionó porque es relativamente simple y de fácil interpretación.

Por lo que se necesita la relación de dos valores: el Potencial de Neutralización (PN) y el Potencial de Acidez (PA), que permiten evaluar si los jales contienen o no suficientes carbonatos de calcio para neutralizar a los sulfuros que son los potenciales generadores de ácido.

La NOM – 141 – SEMARNAT – 2003 establece lo siguiente:

Cuando  $PN/PA \leq 1.2$ ; los jales son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

Cuando  $PN/PA > 1.2$ ; los jales no son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

Las características de las técnicas experimentales empleadas para la determinación de la generación de drenaje ácido con los jales mineros se muestran en la tabla 3.2.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Tabla 3.2 Técnicas experimentales en la generación de Drenaje Ácido.

Técnica	Método	Equipo
Determinación del Potencial de Neutralización (PN)	Anexo normativo 5 de la Norma Oficial Mexicana (NOM- 141 – SEMARNAT – 2003). Ver Anexo B.1	Laboratorio
Determinación del Potencial de Acidez (PA)	Anexo normativo 5 de la Norma Oficial Mexicana (NOM- 141 – SEMARNAT – 2003)	<p><math>\% S_{total}</math> → Análisis elemental en el laboratorio de la USAI, Facultad de Química, UNAM, con equipo Fisons Instrument.</p> <p><math>\% S_{sulfatos}</math> → Cromatógrafo de Líquidos de Alta Eficiencia marca Agilent, modelo 1100.</p>

### 3.3.2.1 Determinación del potencial de neutralización (PN)

De acuerdo con el Anexo normativo 5 de la Norma Oficial Mexicana (NOM- 141 – SEMARNAT – 2003) se aplicó el método establecido por esta norma para la determinación del Potencial de Neutralización (PN). La técnica consiste en pesar 1 gramo de muestra sobre papel aluminio y se agregan unas gotas de HCl al 25 % clasificando el grado de efervescencia. Por otra parte en un matraz de 250 mL se pesan 2g de Jal y se agregan 90 mL de agua destilada, al tiempo cero se agrega un volumen de HCl 1N de acuerdo al grado de efervescencia el vol. añadido ( $V_a$ ) se registra. La mezcla se agita por dos horas a temperatura ambiente y se vuelve agregar la cantidad indicada en la tabla de efervescencia de HCl 1N ( $V_b$ ).

La mezcla se vuelve a poner en agitación por 22h y al término se mide el pH, si es mayor a 2.5 se añade HCl 1N indicado en la tabla de efervescencia para disminuirlo a un valor de 2-2.5, el volumen añadido ( $V_c$ ) se registra.

Se calculan los mL gastados de HCl 1N:  $V_f = V_a + V_b + V_c$ . Al matraz se adiciona agua destilada hasta un volumen de 125mL y se titula con NaOH 0.1N hasta un pH final de 8.3, se registra el volumen de NaOH utilizado. Ver Anexo B.6

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El potencial de neutralización (PN) expresado como  $\text{Kg}_{\text{CaCO}_3}/\text{ton}$  de jales, se calcula con:  $PN = \frac{(V_f \text{ en mL de HCl}) - (0.1 * \text{Vol. en mL de NaOH})}{\text{Peso de la muestra en g.}} * 50$

Donde:

$V_f$  : son los mL gastados de HCl

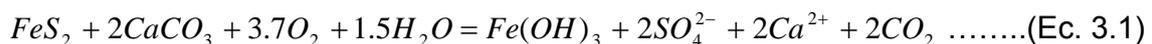
$\text{Vol. en mL de NaOH}$  : son los mL gastados en la titulación para alcanzar un pH de 8.3

### 3.3.2.2 Determinación del potencial de Acidez (PA)

El potencial de acidez determina el balance entre los minerales que son potenciales productores de acidez (sulfuros) y aquellos que son potenciales consumidores de acidez (principalmente carbonatos de calcio).

De acuerdo con el Anexo normativo 5 de la Norma Oficial Mexicana (NOM– 141 – SEMARNAT – 2003) se aplicó el método establecido por esta norma para la determinación del Potencial de Acidez (PA).

Se calculó el Potencial de Acidez como la diferencia entre el azufre total ( $S_{\text{Total}}$ ) y el azufre como sulfatos ( $S_{\text{SO}_4^{2-}}$ ) y se multiplica por 31.25; valor que se obtiene de la siguiente reacción de neutralización de los sulfuros.



De acuerdo a la estequiometría de la reacción, 1 ton de jales que contienen 10 kg de S (1%) requiere 31.25 kg de  $\text{CaCO}_3$  para no producir acidez.

Por lo anterior, el Potencial de Acidez (PA) expresado como kg requeridos de  $\text{CaCO}_3/\text{ton}$  de jales, se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$PA = \% S^{2-} \times 31.25$$
$$\% S^{2-} = (\% S_{\text{total}} - \% S_{\text{sulfatos}}) \dots\dots(\text{Ec. 3.2})$$

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El  $\%S_{total}$  se determinó con un estudio de análisis elemental. Mientras que la técnica empleada para la cuantificación del  $\%S_{sulfatos}$  fue poner en contacto 2 g de jal en 50 mL de agua destilada, permitiendo que los sulfatos se disuelvan, las disoluciones son tratadas por la técnica de cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC).

El equipo empleado es un cromatógrafo de Líquidos de Alta Eficiencia marca Agilent, modelo 1100. El método de detección consiste en espectroscopia ultravioleta – visible, empleando como detector un arreglo de diodos.

Las condiciones de operación del equipo son las siguientes:

Fase móvil: Biftalato de Potasio 0.02 M, pH= 5

Flujo de fase móvil: 1 mL/min

Temperatura=: 30 °C.

Volumen de muestra inyectado: 40  $\mu$ L.

Columna empleada: núcleo-Si II Anión.

Longitud de onda para la cuantificación: 302 nm.

### **3.4 Tamaño de partícula de los polvos finos de caliza como ayudante de la floculación y agente neutralizante**

En la prueba de granulometría para determinar el tamaño de partícula de los polvos de piedra caliza se emplearon tamices de diferentes tamaños (mallas 14, 18, 25, 30, 50, 80, 100, 140, 200, 325).

Las muestras estaban contenidas en bolsas de plástico de aproximadamente de 1L, al destapar las muestras de piedra caliza se observó que la mayoría estaba compuesta de terrones de unos 3cm de diámetro aproximadamente y de arenilla. La muestra se encontraba a temperatura ambiente (23° C aproximadamente). Se procedió a tomar muestras clasificadas por tiempo de almacenamiento corto (AC) y largo (AL). Posteriormente, se aplicó el método de cuarteo de acuerdo a lo que

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

establece la Norma Mexicana (NMX – AA – 015 – 1985) como a continuación se presenta: el contenido de las bolsas de tiempo corto se vació en la mesa de laboratorio cubierta por una bolsa de plástico, se formó un montículo y se mezcló hasta observarlo homogéneo, en cuanto a distribución de los diferentes tamaños.

Se dividió en cuatro partes ayudados de una espátula y se tomó una muestra de 75g de cada uno de los cuadrantes, colocándola en un vaso de plástico de 1L de cada uno de los cuatro extremos hasta obtener un peso de muestra de 300g. Esta muestra se pesó en una balanza granataria para proceder a vaciar el contenido del vaso en el juego de tamices acomodados de la siguiente forma: tamiz 14, 18, 25, 30, 50, 80, 100, 140, 200, 325 y charola.

Una vez colocada toda la masa de la piedra caliza en los tamices se colocó la tapa y se procedió a agitarlos mecánicamente con un Rotap, para hacer que los diferentes tamaños se distribuyeran hacia los tamices de abajo. Los movimientos fueron circulares alternando con movimientos verticales y movimientos horizontales. Esto se realizó por alrededor de 10 minutos.

Una vez agitado los tamices durante los 10 minutos, se procedió a pesar el contenido de los polvos finos de caliza retenido en cada uno de los tamices.

Se realizó una gráfica de diámetro de partícula contra el porcentaje que pasa para determinar la distribución de partícula, el porcentaje de finos y de gruesos. Se calculó el diámetro efectivo de partícula y el coeficiente de uniformidad teniendo en cuenta lo siguiente:

Hay dos factores fundamentales que se usan para definir la granulometría:

### 1.- Tamaño efectivo

El tamaño efectivo ( $P_{10}$ ), es expresado al tamaño del grano en milímetros, que pasa por las mallas de una serie granulométrica y se refiere al tamaño de granos correspondiente al porcentaje de 10% de su peso.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 2.- Coeficiente de uniformidad

Coeficiente de uniformidad es el término empleado para definir la razón entre el tamaño del grano expresado en milímetro tal que la dimensión de los granos de piedra caliza correspondiente al 60 % en peso sea superior a ese tamaño ( $P_{60}$ ) y el tamaño efectivo.

$$\text{Coeficiente de uniformidad} = \frac{P_{60}}{P_{10}} \dots\dots(\text{Ec. 3.3})$$

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el presente capítulo se presentan todos los resultados experimentales obtenidos, así como el análisis de los mismos. En primer lugar se presentan los resultados obtenidos en las cuatro principales etapas experimentales de este trabajo: I. Determinación de las características fisicoquímicas de los polvos finos de caliza evaluados en este estudio, II. Realización de pruebas de coagulación-floculación con polvos finos de caliza y agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre; III. Realización de pruebas de neutralización del agua ácida de una presa de jales, utilizando los polvos finos de caliza y, IV. Elaboración de pruebas de neutralización de jales de cobre de una presa, aplicando los polvos finos de caliza.

En la primera etapa se analizan los resultados de la determinación del tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad de los polvos de caliza, así como de la determinación del contenido de óxidos en estos residuos. En la segunda etapa se realizó una caracterización fisicoquímica del agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre y, posteriormente, se llevó a cabo su tratamiento por el proceso de coagulación – floculación (prueba de jarras). En las pruebas de tratamiento de esta agua residual se determinó la dosis óptima de sulfato de aluminio, del polímero aniónico (ambos coagulantes) y de los polvos de caliza (como floculante). En la tercera etapa o pruebas de neutralización de agua ácida de la presa de jales con caliza se presentan y analizan los resultados obtenidos de la curva de neutralización del agua ácida con NaOH y de polvos de caliza, para este último agente de neutralización se presentan los resultados en función del tiempo y de la dosis aplicada. Finalmente, en la cuarta etapa se presentan los resultados de las pruebas de neutralización de jales: determinación de los potenciales neutralización (PN) y de acidificación (PA) de los jales de cobre antes y después del proceso de neutralización con polvos de caliza; así como los valores

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

de pH registrados, en función del tiempo, para la dosis estequiométrica calculada a agregar de polvos de caliza para neutralizar estos residuos.

### 4.1 Caracterización fisicoquímica de los polvos finos de caliza

#### 4.1.1 Tamaño de partícula de los polvos de caliza-análisis granulométrico

En este estudio se realizaron pruebas granulométricas para determinar el tamaño efectivo ( $P_{10}$ ) y el coeficiente de uniformidad de los polvos de caliza. La realización de este estudio nos permitió determinar si el tamaño efectivo de partícula es adecuada para ser utilizada como floculante (coadyuvante de floculación) y agente neutralizante de los jales mineros de cobre y del agua ácida de la presa de jales.

Los resultados de la prueba granulométrica de las muestras de polvos de caliza clasificadas con los nombres: almacenamiento corto y almacenamiento largo se muestran en las figuras 4.1 y 4.2. Las cifras específicas de los análisis granulométricos realizados en presentan en el Anexo C.

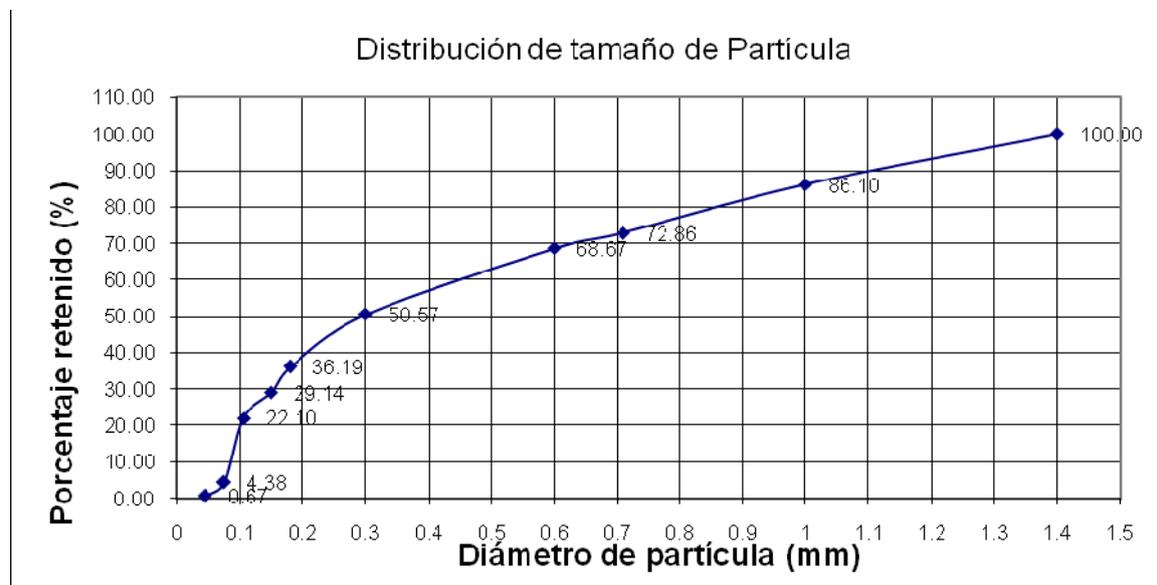


Figura 4.1 Curva granulométrica o distribución del diámetro de partícula de los polvos de caliza de almacenamiento corto.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

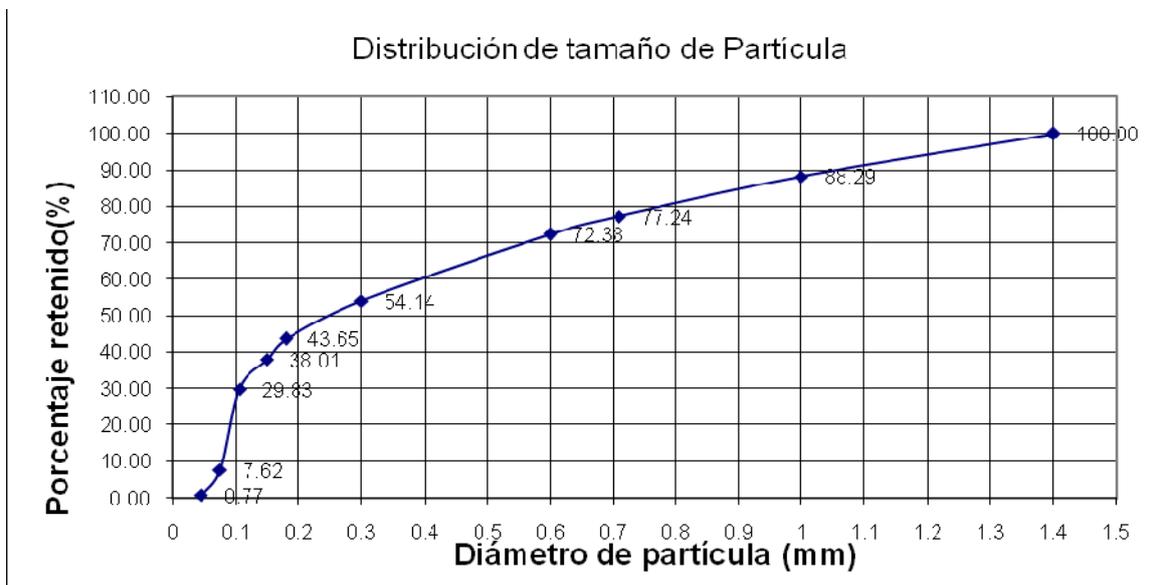


Figura 4.2 Curva granulométrica o distribución del diámetro de partícula de los polvos de caliza de almacenamiento largo.

Interpolando en las figuras 4.1 y 4.2, se obtuvo el valor correspondiente al tamaño de diámetro de partícula en mm, para el cual corresponde el 10% y el 60% del porcentaje retenido tanto de la piedra de almacenamiento corto y largo, para el cálculo del coeficiente de uniformidad. Estos valores se muestran en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Diámetro de partícula estimado por interpolación de la curva de granulometría de las muestras de almacenamiento corto y largo de polvos de caliza.

Muestra almacenamiento	Diámetro que corresponde al 10% de porcentaje retenido, $P_{10}$ (mm)	Diámetro que corresponde al 60% de porcentaje retenido, $P_{60}$ , (mm)
Corto	0.0860	0.4620
Largo	0.0780	0.3995

Por medio de los valores obtenidos del diámetro que correspondiente al 10% y 60% que es retenido, se calcula el coeficiente de uniformidad para ambos almacenamientos, mostrados en la tabla 4.2:

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.2 Coeficientes de uniformidad de los polvos de caliza de almacenamiento corto y largo (Análisis Granulométrico, 2008).

MUESTRA	PORCENTAJE DE GRUESOS	PORCENTAJE DE FINOS	TAMAÑO EFECTIVO DE PARTÍCULA (mm)	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
Corto	64.68	35.32	0.0860	5.372
Largo	70.53	29.47	0.0780	5.122

En ambas pruebas granulométricas se observa que los polvos de caliza de almacenamiento corto y almacenamiento largo presentan valores muy similares en los coeficientes de uniformidad y los tamaños efectivos de partícula. También se observó que el mayor porcentaje de masa retenida en cada uno de los tamices se encuentra en los tamices 14 y 200, por lo que en las pruebas siguientes, los polvos de caliza se utilizaron con un diámetro de partícula de 0.075mm (malla 200) ya que tiene mayor área de contacto.

### 4.1.2 Determinación del contenido de óxidos – Fluorescencia de Rayos X

Este estudio se realizó para determinar el % de óxidos y, con ese dato poder calcular el contenido de calcio (Ca) en los polvos de caliza; ya que el calcio por sus características básicas puede ser utilizado como agente neutralizante. La tabla 4.3 que a continuación se presenta contiene los resultados de la determinación del contenido de óxidos de los polvos de caliza de almacenamientos corto y largo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.3 Contenido de óxidos de los polvos de caliza: Almacenamiento corto y largo.

Almacenamiento corto		Almacenamiento largo	
Compuesto	%	Compuesto	%
SiO <sub>2</sub>	4.502	SiO <sub>2</sub>	4.522
TiO <sub>2</sub>	0.046	TiO <sub>2</sub>	0.045
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.364	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.510
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.126	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.823
MnO	-	MnO	0.078
MgO	0.472	MgO	0.606
CaO	54.845	CaO	51.960
K <sub>2</sub> O	0.106	K <sub>2</sub> O	0.091
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.042	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.032
Suma	61.503	Suma	59.667

Ambas muestras (de almacenamiento corto y largo) presentaron una composición muy similar; los contenidos promedio de óxidos de mayor abundancia fueron los siguientes: SiO<sub>2</sub> (4.5%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.47 %) y CaO (53.4%). Las sumas no dieron 100%, ya que existen pérdidas de CO<sub>2</sub> por calcinación los carbonatos del material.

Si consideramos que todo el calcio contenido en los polvos de caliza se encuentra en forma de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), entonces podemos determinar la cantidad de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) contenido en las muestras de caliza, por medio de los siguientes cálculos estequiométricos. Se tomó una muestra de 100g de polvos de piedra caliza con 53.4% de CaO en promedio y se calculó la cantidad de calcio contenido en 100g de piedra caliza, por medio de la relación estequiométrica 1molCa/1molCaCO<sub>3</sub>. Se determinó el porcentaje promedio contenido de CaCO<sub>3</sub> en la caliza, como se muestra a continuación:

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

$$(53.4\text{gCaO})\left(\frac{1\text{molCaO}}{56.079\text{gCaO}}\right)\left(\frac{1\text{molCa}}{1\text{molCaO}}\right)\left(\frac{40.08\text{gCa}}{1\text{molCa}}\right) = 38.165\text{gCa}$$

$$38.165\text{gCa}\left(\frac{1\text{molCa}}{40.08\text{gCa}}\right)\left(\frac{1\text{molCaCO}_3}{1\text{molCa}}\right)\left(\frac{100.088\text{gCaCO}_3}{1\text{molCaCO}_3}\right)\left(\frac{100\%}{100\text{gr}}\right) = 95.31\% \text{CaCO}_3$$

De acuerdo a estos cálculos se obtuvo que las muestras de caliza contienen un 95.31% promedio de  $\text{CaCO}_3$  y que tienen una composición muy similar entre ellas con respecto al contenido de óxidos, así como en la distribución de partícula, por lo que para las pruebas siguientes se tomó como un solo tipo de polvos de caliza.

Se determino el tamaño de los polvos de caliza para las siguientes pruebas a partir de la neutralización del jal II utilizando diferentes tamaños de polvos como se muestra en la figura 4.3, donde se observa que entre mayor sea el tamaño de partícula se requiere mayor tiempo para alcanzar un pH neutro.

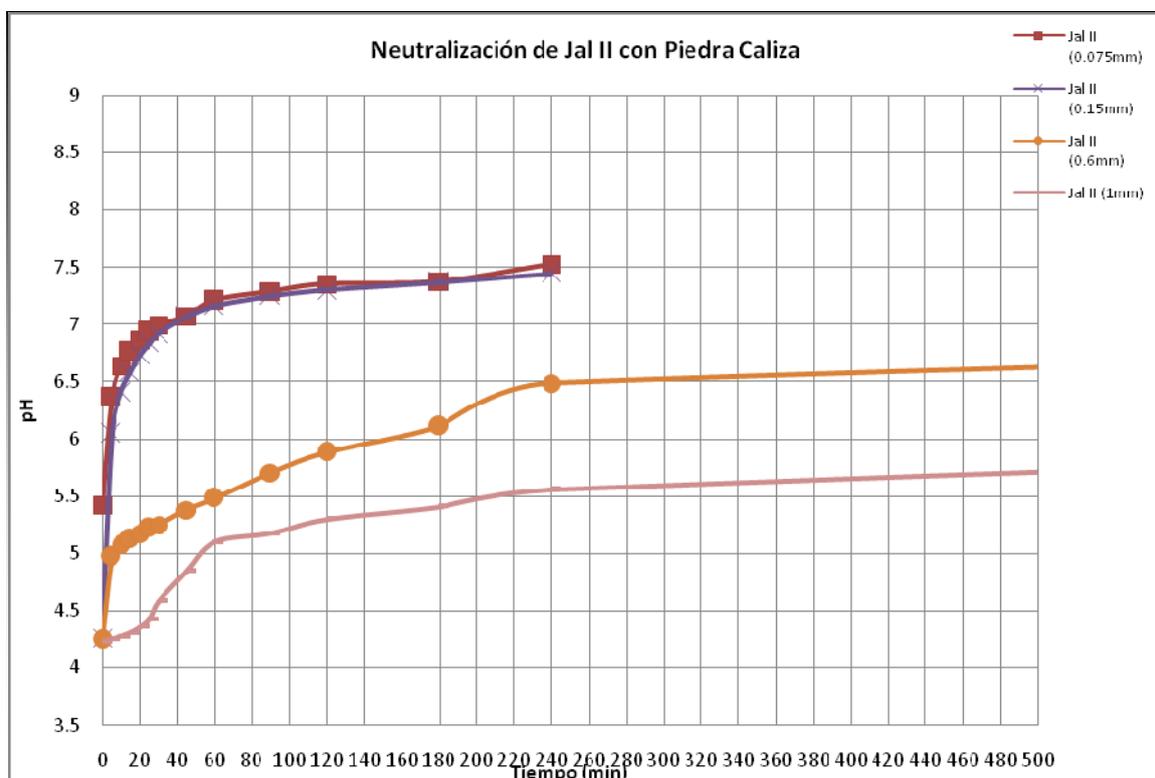


Figura 4.3 Neutralización del jal II a partir de diferentes diámetros de partícula de los polvos de caliza.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que para alcanzar un pH neutro en un menor tiempo se requiere un tamaño de partícula de 0.075mm, esto se debe a que hay una mayor área de contacto entre los polvos de caliza y el jal II, respecto a los otros dos tamaños evaluados, por lo que para las siguientes pruebas se utilizó un tamaño de partícula de 0.075mm.

### **4.2 Pruebas de coagulación-floculación con polvos finos de caliza y agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de jarras (coagulación-floculación) del tratamiento del agua residual tipo industrial de un complejo minero de cobre por medio del proceso fisicoquímico coagulación – floculación; en el inciso 4.2.1 se muestran los datos de la determinación de la dosis óptima del coagulante de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), 4.2.1.1 la determinación de la dosis óptima de polvos de caliza como coadyuvante de floculación, utilizando como coagulante la dosis óptima del ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), 4.2.2 la determinación de la dosis óptima del polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910), y por ultimo en el inciso 4.2.2.1 la determinación de la dosis óptima de la piedra caliza como coadyuvante de floculación, utilizando como coagulante la dosis óptima del polímero aniónico.

#### **4.2.1 Determinación de la dosis óptima de Sulfato de aluminio**

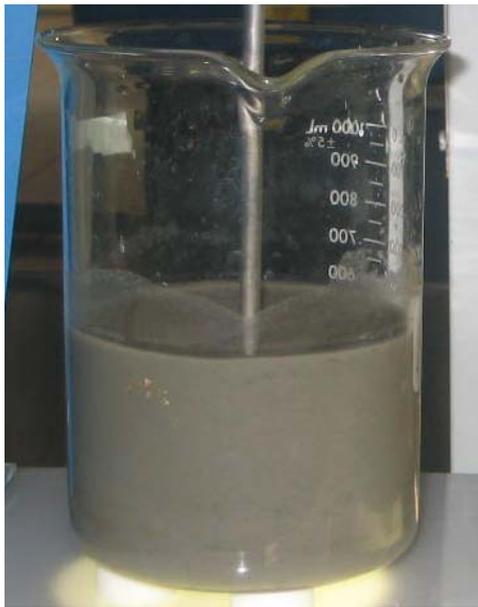
En esta prueba se utilizó en primera instancia como coagulante el sulfato de aluminio, para el tratamiento del agua residual tipo industrial. Este coagulante es uno de los más usados en el tratamiento de agua potable y residual, (Ramírez Zamora, 1999). En segunda instancia se utilizó un polímero orgánico.

La tabla 4.4 y la figura 4.4 que a continuación se presentan, muestran las características físicas del agua residual tipo industrial (cruda), así como los valores promedio de los parámetros medidos.

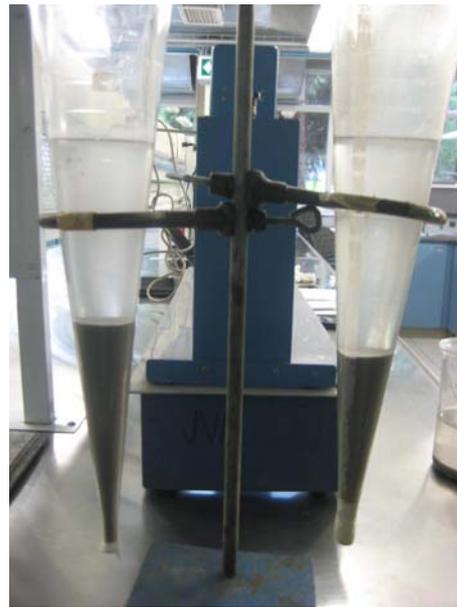
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.4 Características físicas del agua residual tipo industrial.

Muestra	Temperatura (°C)	pH	Color Aparente (Unid. Platino-Cobalto)	Color Real (Unid. Platino-Cobalto)	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Conductividad (mS/cm)
Cruda	23.2	10.01	4842	49	6,670.74	434.6	3.11



Antes del tratamiento



Después del tratamiento

Figura 4.4 Agua residual tipo industrial de un complejo minero de cobre.

Se observó que el agua presentaba un pH básico y un contenido muy alto de sólidos suspendidos totales (SST), comparado al valor reportado (350 mg/L) para un agua residual doméstica de concentración fuerte (Metcalf y Eddy, 1996).

La tabla que a continuación se presenta muestra los resultados de la prueba de jarras, para el tratamiento del agua residual por medio del proceso de coagulación – floculación, utilizando diferentes dosis de  $(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O})$  previamente ajustada a pH = 7.8.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.5 Características fisicoquímicas de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con diferentes dosis de  $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$ .

Muestra	Dosis de $(Al_2(SO_4)_3)$ (mg/L)	pH	Color Aparente (Unid. Platino-Cobalto)	Color Real (Unid. Platino-Cobalto)	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Vol. Lodos generados (mL)	Conductividad (mS/cm)
Cruda	-	7.8	4842	49	6670.74	434.6	-	3.11
1	61.75	6.96	208	56	8	17.33	50	3.25
2	123.5	6.63	169	68	5.5	12.55	50	3.26
3	185.25	6.32	135	55	5.5	10.83	50	3.27
4	247	5.99	161	61	11	14.08	50	3.26
5	308.75	5.67	164	48	5.5	15.61	50	3.27
6	370.5	5.56	159	44	7.5	19.29	50	3.26

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que en la dosificación de 185.25mg  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O/L$  se encuentran en los valores más bajos de los parámetros de turbiedad, color aparente y sólidos suspendidos (SS). La figura 4.5 ilustra los resultados de turbiedad, donde se observa que la turbiedad más baja se encuentra en la dosificación de 15mL de sulfato de aluminio.

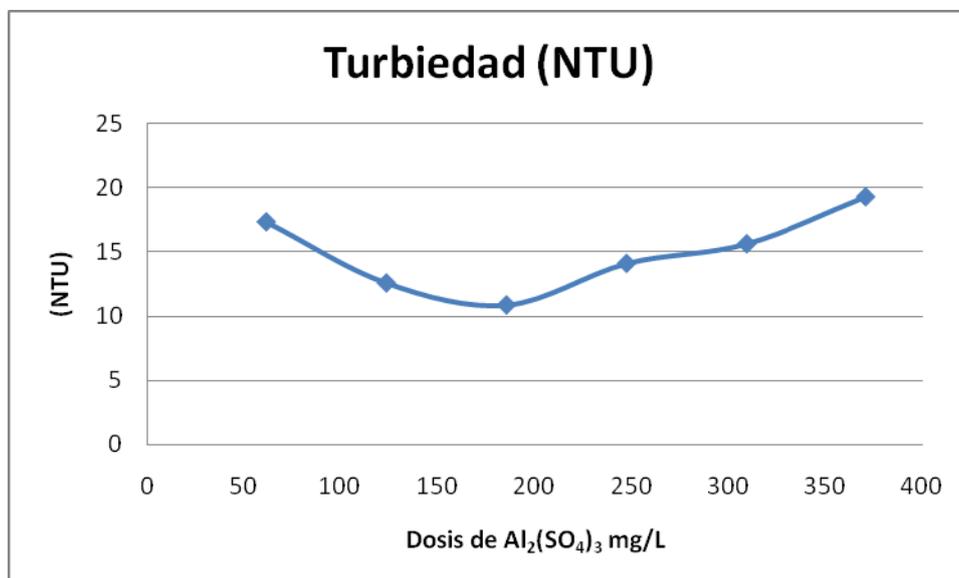


Figura 4.5 Turbiedad de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con diferentes dosis de  $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Determinando así la dosificación de 185.25mg  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  /L de una solución madre de sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) con una concentración inicial de 6.1750 g/L como dosis óptima de coagulante. Esta dosificación se utilizó en las siguientes pruebas de la determinación de la dosis óptima de polvos de caliza como coadyuvante de floculación.

### 4.2.1.1 Determinación dosis óptima de polvos de caliza y sulfato de aluminio

Para esta prueba se utilizó la dosis óptima de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  donde se adicionaron diferentes cantidades de polvos de caliza con un tamaño de 0.075mm, como coadyuvante de floculación, los resultados se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Características fisicoquímicas de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  y diferentes dosis de polvos de caliza (0.075mm).

Muestra	Dosis de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (mg/L)	Dosis de Polvos de Caliza (mg/L)	pH	Color Aparente (Unid. Platino-Cobalto)	Color Real (Unid. Platino-Cobalto)	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Vol. Lodos generados (mL/L)	Conductividad (mS/cm)
Cruda	-	-	7.8	4842	49	6670.74	434.6	-	3.11
1	185.25	0	6.17	427	42	7	29.79	80	3.45
2	185.25	10	6.47	139	41	8.5	19.85	125	3.43
3	185.25	30	6.58	141	49	7	18.76	125	3.41
4	185.25	50	6.58	132	36	6	15.66	125	3.41
5	185.25	70	6.63	178	34	8	27.27	125	3.42
6	185.25	90	6.78	180	36	8	26.43	125	3.38
7	185.25	120	6.83	189	36	7	29.32	125	3.42

Se observa que la adición de los polvos de caliza permitió obtener mejores valores de algunos parámetros como lo son: el pH, el color aparente, el color real y sólidos suspendidos; sin embargo, aumentó el tamaño de los flóculos por lo que el volumen de lodos generados fue mucho mayor, comparado con el volumen generado sólo con el coagulante de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ . En la figura 4.6 se muestra que la dosificación de 0.05g/L de polvos de caliza tiene el menor valor de turbiedad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

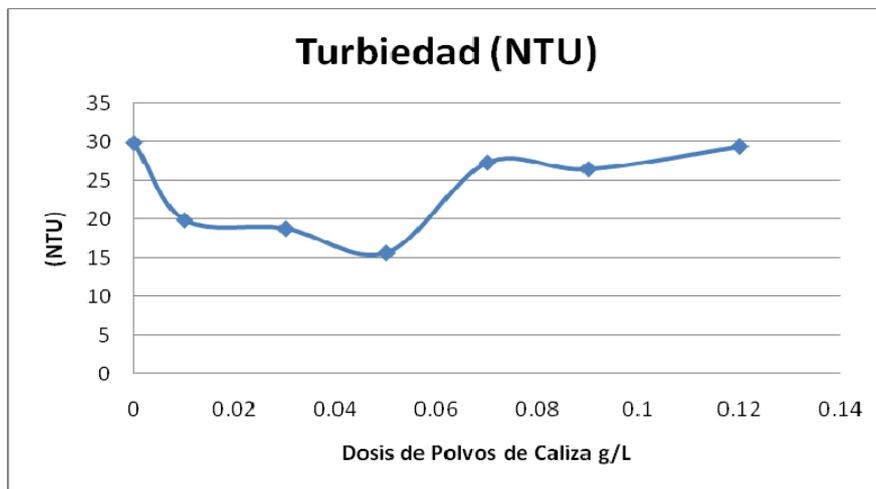


Figura 4.6 Turbiedad de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con  $(Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O)$  y diferentes dosis de polvos de caliza (0.075mm).

Se determinó que la mejor dosificación de polvos de caliza fue 0.05g/L como coadyuvante, de acuerdo a los resultados obtenidos y que se muestran en la tabla 4.6. Además de que los valores de color aparente, color real, SS y turbiedad fueron menores en comparación con las otras dosificaciones.

### 4.2.2 Determinación dosis óptima polímero aniónico

De igual forma que en la determinación de la dosis óptima del  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ , se realizaron las pruebas para determinar la dosis óptima de polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910), pero en este caso no se ajustó el pH.

La tabla que a continuación se presenta muestra los resultados de la prueba de jarras, para el tratamiento del agua residual tipo industrial por medio del proceso fisicoquímico coagulación – floculación, utilizando diferentes dosis de polímero aniónico establecidos en el capítulo anterior:

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.7 Características fisicoquímicas de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con un polímero aniónico.

Muestra	Con. dosis de Polímero (mg/L)	pH	Color Aparente (Unid. Platino-Cobalto)	Color Real (Unid. Platino-Cobalto)	SS (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Vol. Lodos generados (mL/L)	Conductividad (mS/cm)
Cruda	-	10.01	4842	49	6670.74	434.6	-	3.11
1	0.05	8.92	258	48	12	32.64	80	3.18
2	0.075	9.93	186	38	13.5	34.93	90	3.16
3	0.1	9.13	311	65	7	37.65	90	3.18
4	0.15	9.08	344	53	10	40.74	90	3.18
5	0.2	9.08	380	49	7.5	50.52	90	3.19
6	0.3	9.06	410	60	10.5	54.39	90	3.18
7	0.4	9.1	417	50	14	56.41	85	3.19

Se observa en la tabla 4.7 que en la dosificación de 0.075mg/L se obtienen los valores más bajos en los parámetros de color aparente, color real y la turbiedad. Los resultados de color aparente se ilustran en la figura 4.6.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

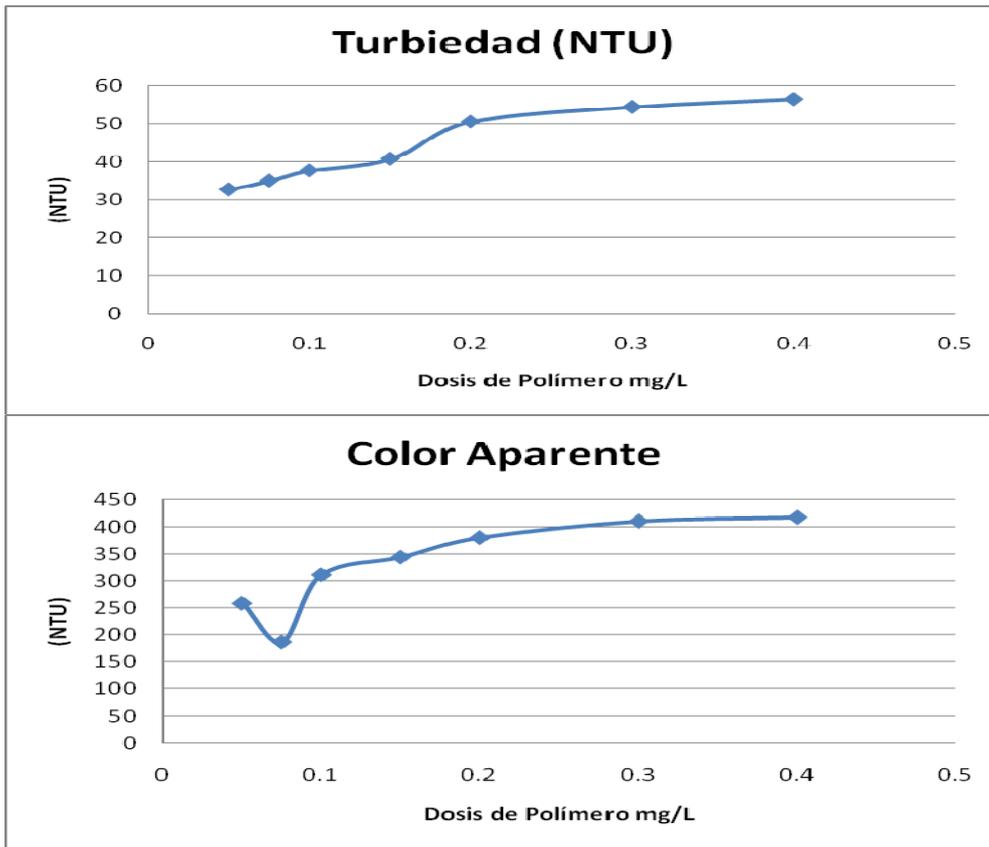


Figura 4.7 Color aparente y turbiedad de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con diferentes dosificaciones de polímero aniónico.

En la figura 4.7 se observa que el valor del color aparente en la dosificación de 0.075mg de polímero/L fue el menor. Determinando así la dosificación de 0.075mg/L de una solución madre de polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) con una concentración inicial de 1g/L como dosis óptima de coagulante, por lo que se utilizará esta dosificación en la determinación de la dosis óptima de polvos de caliza como coadyuvante de floculación.

### 4.2.2.1 Determinación de la dosis óptima de polvos de caliza y polímero aniónico

De igual forma, para esta prueba se utilizó la dosis óptima de polímero aniónico donde se adicionaron diferentes cantidades de polvos de caliza, como

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

coadyuvante de floculación, los resultados obtenidos de las pruebas se muestran en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Características fisicoquímicas de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con polímero aniónico y diferentes dosis de polvos de caliza (0.075mm).

Muestra	Con. dosis de Polímero (mg/L)	Dosis de Piedra Caliza (mg/L)	pH	Color Aparente (Unid. Platino-Cobalto)	Color Real (Unid. Platino-Cobalto)	SS (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Vol. Lodos generados (mL/L)	Conductividad (mS/cm)
Cruda	-	-	10.01	4842	49	6670.74	434.6	-	3.11
1	0.075	0	6.17	427	42	7	29.79	80	3.45
2	0.075	10	9.92	126	32	8.5	13.02	90	3.14
3	0.075	30	9.97	127	39	7.5	12.69	100	3.13
4	0.075	50	9.93	115	39	5.5	12.26	100	3.13
5	0.075	70	9.94	173	36	8.5	23.86	100	3.13
6	0.075	90	9.96	132	38	7.5	13.42	100	3.14
7	0.075	120	9.94	198	37	7	26.2	100	3.13

De igual manera que con el sulfato de aluminio, se observa que los polvos de caliza mejoraron la remoción de algunos parámetros como son: el color aparente, el color real y los sólidos suspendidos, los polvos de caliza incrementaron el volumen de los floculos, comparado con el generado sólo con el coagulante de polímero aniónico. En la figura 4.8 se muestra que la dosificación de 0.05g/L de piedra caliza tiene el menor valor de turbiedad.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

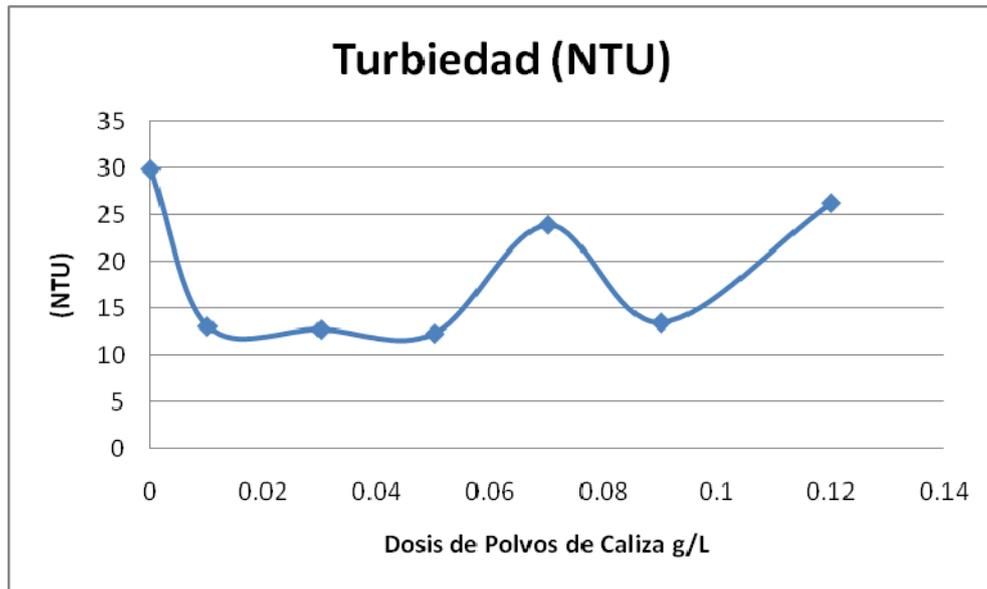


Figura 4.8 Turbiedad de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con polímero aniónico y diferentes dosificaciones de polvos de caliza (0.075mm).

Se determinó que la mejor dosificación de polvos de caliza es 0.05g/L como coadyuvante, de acuerdo con los resultados obtenidos y que se muestran en la tabla 4.8, los valores de color aparente, SST y turbiedad fueron los más bajos, en comparación con las otras dosificaciones.

### 4.2.3 Selección de coagulantes a aplicar al proceso de recuperación con polvos de caliza de agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre

#### 4.2.3.1 Comparación de la calidad de los efluentes obtenidos a condiciones óptimas

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas, se tienen las dosificaciones óptimas para los siguientes tratamientos: para el tratamiento del agua residual tipo industrial utilizando sulfato de aluminio como coagulante (185.25mg/L de una solución madre de sulfato de aluminio  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$  con una concentración de 6.1750 g/L para 1L con 50 mg/L de polvos de caliza como coadyuvante de floculación), para el tratamiento del agua residual tipo industrial utilizando polímero aniónico como coagulante (75mg/L de una solución madre de

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) con una concentración de 1g/L para 1L con 0.05g/L de piedra caliza como coadyuvante de floculación).

Para estas condiciones óptimas de tratamiento, tabla 4.9 presenta de manera comparativa la calidad del efluente obtenido en cada caso.

Tabla 4.9 Características fisicoquímicas de agua residual proveniente del proceso de flotación después de un tratamiento de coagulación-floculación con las dosis óptimas de polímero aniónico y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , y dosis de polvos de caliza (0.075mm).

Muestra	Con. dosis (mg/L)	Dosis de Polvos de Caliza (mg/L)	pH	Color Aparente (Unid. Platino-Cobalto)	Color Real (Unid. Platino-Cobalto)	SST (mg/L)	Turbiedad (NTU)	Vol. Lodos generados (mL/L)	Conductividad (mS/cm)
Cruda	-	-	7.8	4842	49	6670.74	434.6	-	3.11
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	185.25	50	6.58	132	36	6	15.66	125	3.41
Polímero	0.075	50	9.93	115	39	5.5	12.26	100	3.13

De acuerdo con los resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual proveniente del proceso de flotación, con el sulfato de aluminio y el polímero aniónico, los resultados de los parámetros medidos (Color real, SST) en cuanto a la calidad del agua tratada fueron muy similares, pero se observa que con el polímero aniónico hubo una mayor cantidad de agua recuperada (alrededor del 67.5% del agua) ya que genera una menor cantidad de lodos y la calidad del agua es mejor en cuanto al color aparente, volumen de lodos generados y turbiedad, comparada con los resultados del tratamiento con sulfato de aluminio. En el siguiente inciso se realizó una comparación de costos de reactivos, para determinar que reactivo es el más conveniente de acuerdo al costo.

### 4.2.3.2 Comparación de costos de reactivos

Como se puede observar en el inciso anterior los coagulantes utilizados para el tratamiento del agua residual son muy eficaces, y se obtuvieron valores de la remoción de materia muy similares, por lo que es necesario hacer una

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

comparativa de costos de reactivos, en la tabla 4.10 se muestran los costos de cada uno de los reactivos.

Tabla 4.10 Precios de los coagulantes de polímero aniónico y  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  (SNF Floerger, 2009).

Coagulante	Polímero Aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) (Kg)	Sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) (Kg)
Precio con IVA (Pesos)	\$ 15.95	\$ 1.41

De acuerdo con estos precios el costo por tratar  $1\text{m}^3$  de agua residual proveniente del proceso de flotación utilizando como coagulante el polímero aniónico es de \$0.0012 pesos por cada  $\text{m}^3$ , y utilizando sulfato de aluminio es de \$ 0.262 pesos por cada  $\text{m}^3$ . De acuerdo con los resultados obtenidos en el tratamiento del agua residual y del costo de tratamiento el polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) es el mejor reactivo para tratar este tipo de agua residual, ya que por la cantidad de polímero que se utiliza para tratar 1L de agua residual fue muy pequeña comparada con el sulfato de aluminio el costo se reduce considerablemente haciéndolo más rentable, además de que se obtiene una mejor calidad de agua.

#### 4.2.4 Balance de materia para la dosificación de polvos de caliza en el sistema de recuperación de agua (espesadores de lodos o jales) residual provenientes del proceso de flotación cobre de un complejo minero

Con estos resultados se determinó la cantidad necesaria para tratar el agua del balance de agua en el capítulo 2 de la tabla 2.11 utilizando el polímero aniónico como coagulante y polvos de caliza como coadyuvante como se muestra en la figura 4.9.

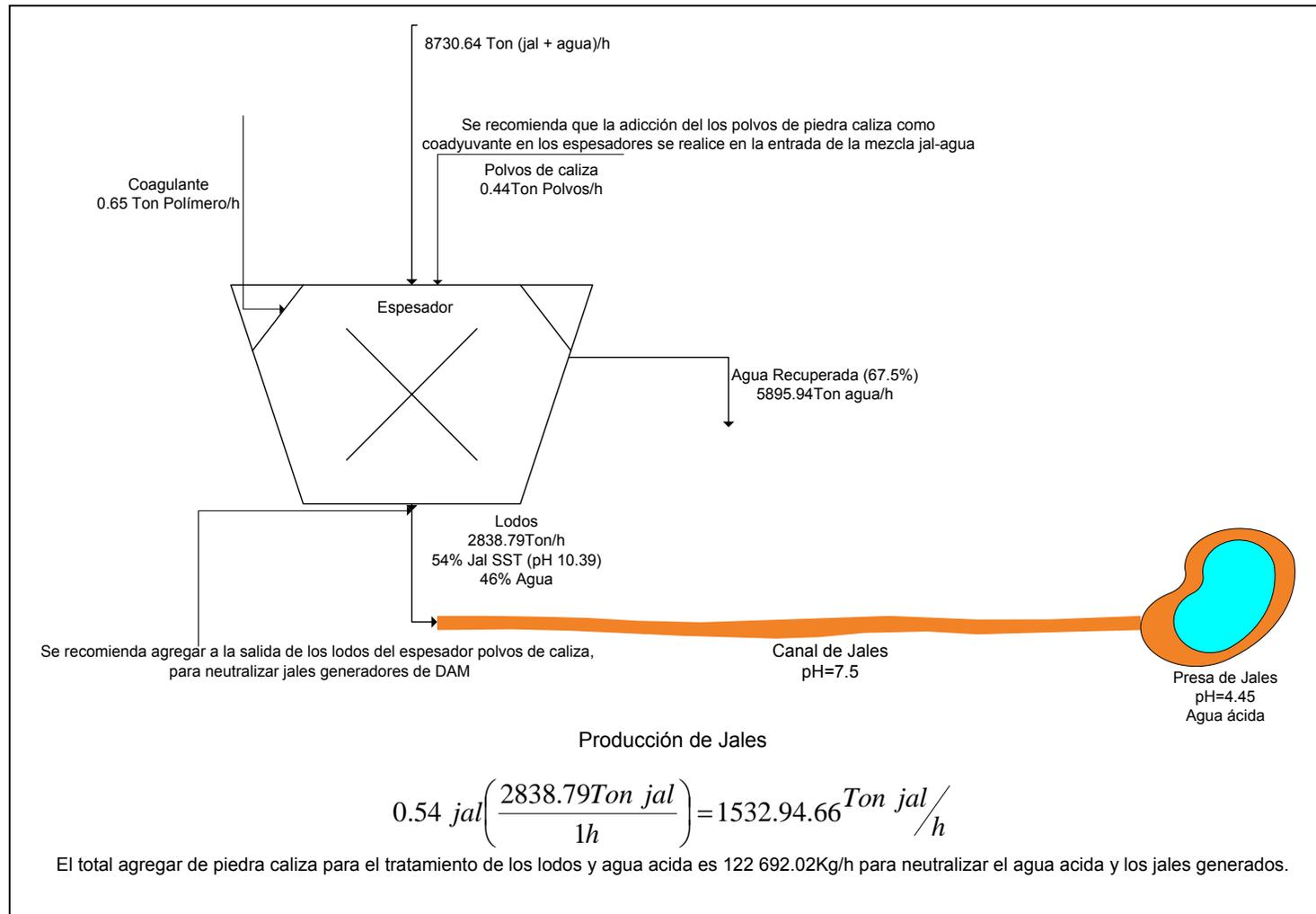


Figura 4.9 Balance general de de materia para la recuperación con polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) y polvos de caliza de agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.3 Neutralización de agua ácida

Para la neutralización del agua ácida de la presa de jales, se realizaron pruebas para obtener la curva de neutralización de esta agua, adicionando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración 0.1M, para determinar la cantidad de equivalentes de NaOH que se requieren para neutralizar 250mL de agua ácida y obtener un pH neutro. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 4.10. Las cifras específicas de la neutralización del agua ácida realizados en presentan en el Anexo C. Se determinó que se requieren 0.054 moles de una solución de NaOH 0.1M, para neutralizar 250mL de agua acida y obtener un pH neutro (pH = 7).

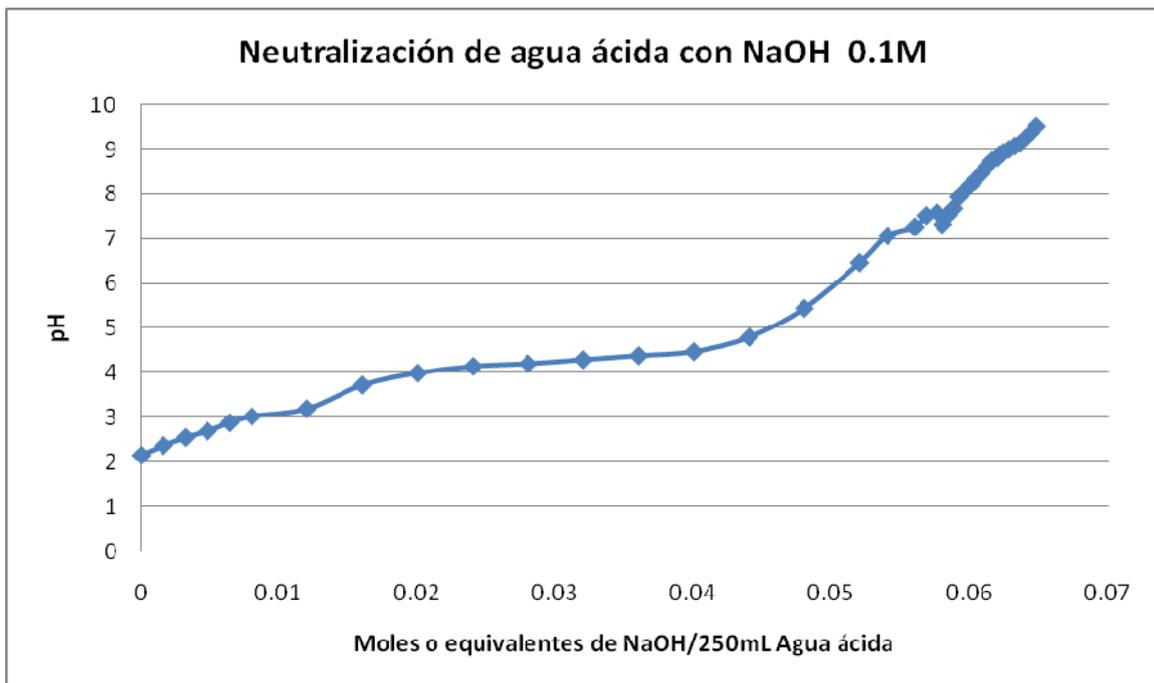


Figura 4.10 Neutralización de agua ácida de una presa de jales por medio de NaOH (0.1M)

Los moles o equivalentes adicionados de una solución de NaOH 0.1M para neutralizar 250 mL de agua ácida, fueron 0.054 moles NaOH. Si tomamos en cuenta que se tiene 1 equivalente por cada mol de NaOH, en tanto que para 1mol de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se tienen 2 equivalentes, podemos calcular la

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

cantidad de carbonato de calcio que se requiere para neutralizar 250mL de agua ácida de la presa de jales.

Sabemos que 56.079g de  $\text{CaCO}_3$  es 1mol de  $\text{CaCO}_3$ , de acuerdo a los cálculos obtenemos que para neutralizar 250mL de agua ácida de la presa de jales de cobre se requieren 1.589g de polvos de caliza con un contenido de 95.31% de  $\text{CaCO}_3$ .

$$0.054 \text{ mol NaOH} \left( \frac{1 \text{ Equivalente}}{1 \text{ mol NaOH}} \right) \left( \frac{1 \text{ mol CaCO}_3}{2 \text{ Equivalentes}} \right) = 0.027 \text{ mol CaCO}_3$$
$$0.027 \text{ mol CaCO}_3 \left( \frac{56.079 \text{ g CaCO}_3}{1 \text{ mol CaCO}_3} \right) \left( \frac{1 \text{ g Polvos caliza}}{0.9531 \text{ g CaCO}_3} \right) = 1.589 \text{ g Polvos caliza}$$

Se realizaron pruebas con dosificaciones del doble y cuádruple de la dosis estequiométrica de los polvos de caliza debido a que, por una parte, el carbonato de calcio es una base débil por lo que la reacción puede ser lenta, y por otra parte, a que no toda la base se encuentra disponible porque también contiene óxidos de aluminio que tienen propiedades ácidas y que se neutralizarían completamente con los óxidos de potasio y magnesio.

De acuerdo con las pruebas realizadas se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 4.11, donde se muestran las diferentes dosificaciones de polvos de caliza, la temperatura y el comportamiento del pH, las cuales se mantuvieron a agitación constante de 180rpm.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 4.11 Diferentes dosificaciones de polvos de caliza (0.075mm) para neutralizar agua ácida de una presa de jales

Dosis Estequiométrica	(1.589g/250mL)		(3.178g/250mL)		(6.356g/250mL)	
# Malla (mm)	0.075		0.075		0.075	
Tiempo (min)	pH	T (°C)	pH	T (°C)	pH	T (°C)
0	2.39	17.5	2.35	17.3	2.35	16.9
5	4.45	17.8	4.74	17.6	5.11	17.1
10	4.61	18.1	5.1	17.7	5.35	17.2
15	4.78	18.3	5.28	17.9	5.5	17.5
20	5	18.6	5.44	18	5.64	17.5
25	5.17	18.9	5.55	18.1	5.74	17.6
30	5.31	19.1	5.74	18.4	5.9	17.6
60	5.84	19.2	6.17	18.5	6.32	17.7
120	6.37	19.3	6.66	18.7	6.77	17.9
180	6.6	19.6	6.99	18.8	7.08	18.9
360	7.18	19.9	7.29	18.8	7.36	18.8
900	7.49	19.7	7.54	18.8	7.58	18.3
3 días	7.35	20.2	7.5	20.8	7.56	20.9

En las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se puede observar el comportamiento del pH con respecto al tiempo para cada una de las diferentes dosificaciones, cuando se adicionan los polvos de caliza para neutralizar el agua ácida.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

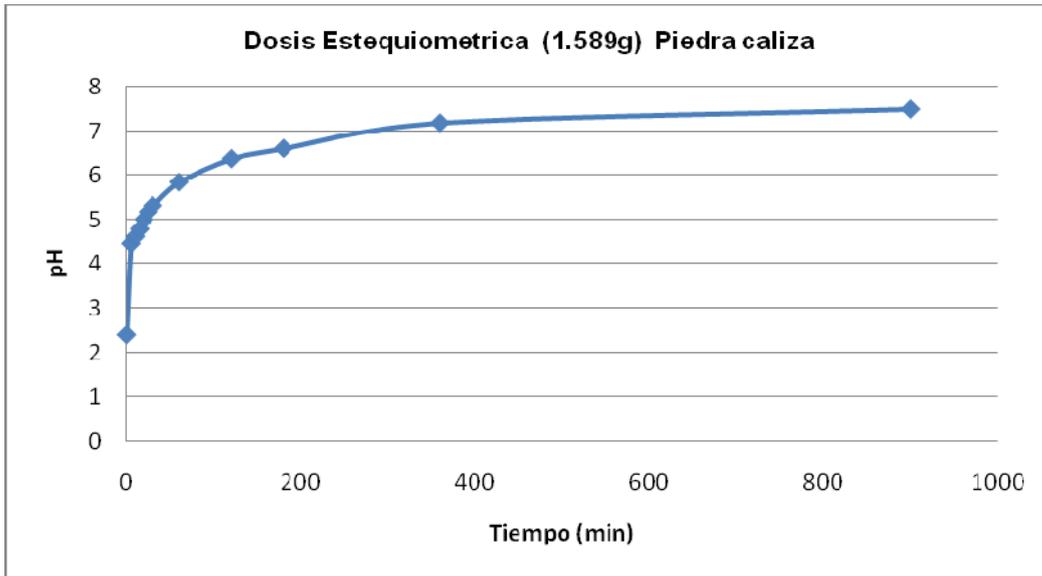


Figura 4.11 Neutralización de agua ácida de una presa de jales con una dosificación estequiométrica de polvos de caliza (0.075mm).

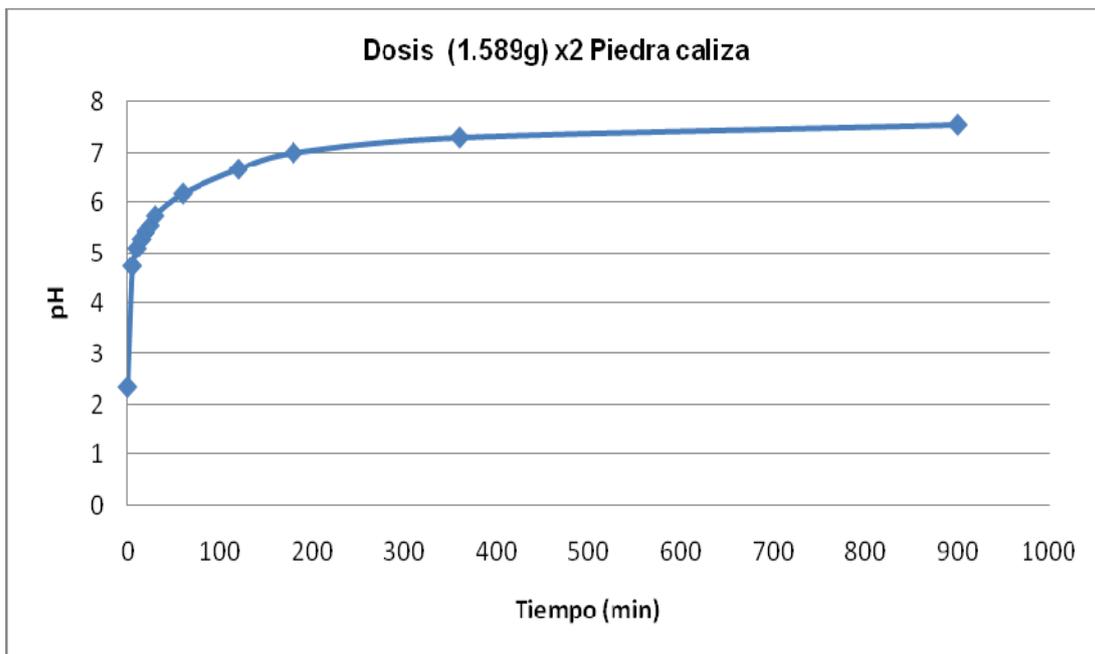


Figura 4.12 Dosis (1.589g) x2 de piedra caliza como exceso Neutralización de agua ácida de una presa de jales con dos dosificaciones estequiométricas de polvos de caliza (0.075mm).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

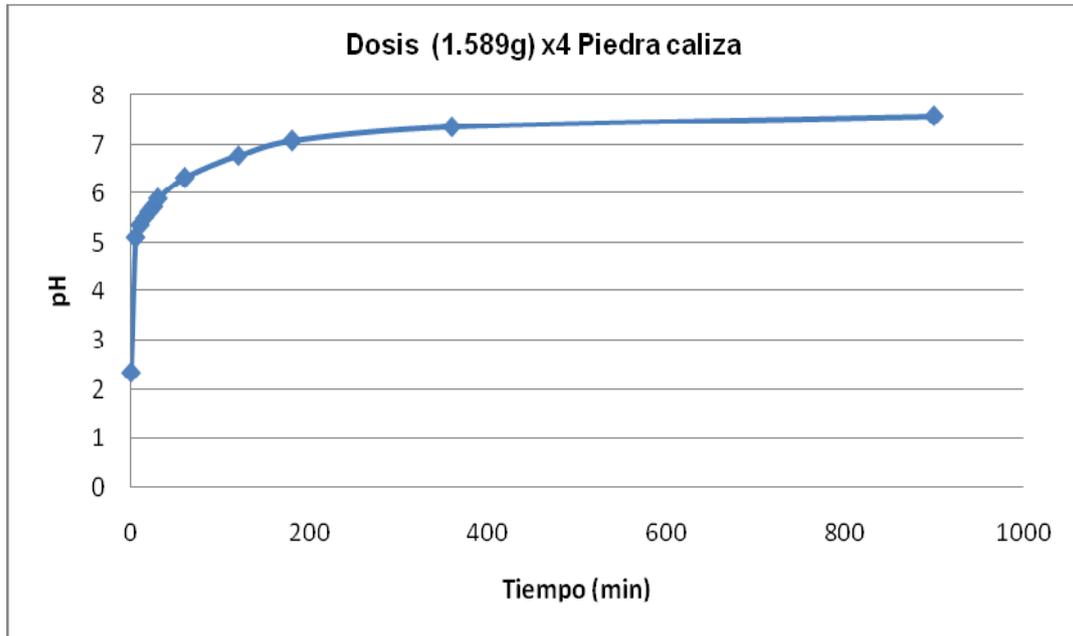


Figura 4.13 Neutralización de agua ácido de una presa de jales con tres dosificaciones estequiométricas de polvos de caliza (0.075mm).

Como podemos observar en la figura 4.11, donde se adiciona al agua ácido la dosis estequiométrica (1.589g de polvos de caliza/250mL agua ácido) el tiempo que se requiere para llegar a un pH neutro (pH=7) es mayor que cuando se adiciona el doble (figura 4.12) y cuádruple (figura 4.13) de la cantidad requerida para ser neutralizada.

Se recomienda agregar el doble o más de la dosis estequiométrica de polvos de caliza 12.712g/L, ya que en exceso ayudará a la neutralización de los jales que se encuentran en el fondo de la presa. De acuerdo con estos resultados se determinó la cantidad necesaria de polvos de caliza para neutralizar el agua residual del balance de agua en el capítulo 2 de la tabla 2.5.

La cantidad de lodos generados es de 2838.79Ton/h con un 54% SST (jal) y un 46% de agua, que expuestos al medio ambiente generan DAM.

$$0.46 \text{ agua} \left( \frac{1000L}{1\text{Ton agua}} \right) \left( \frac{2838.79\text{Ton agua}}{1h} \right) \left( \frac{12.712g \text{ caliza}}{L} \right) \left( \frac{1Kg}{1000g} \right) \left( \frac{1\text{Ton}}{1000Kg} \right) = \frac{16.60\text{Ton caliza}}{h}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El total agregar de polvos de caliza para neutralizar el agua contenida en los lodos es 16.60 Ton/h, la adición de los polvos de caliza debe ser a la salida de los lodos del espesador, aprovechando el rebombeo del agua hacia la presa de jales como un sistema de agitación y como medio de neutralización de jales mineros.

### 4.4 Pruebas de neutralización de jales con polvos de caliza

Se requiere calcular la relación de dos valores: el Potencial de Neutralización (PN) y el Potencial de Acidez (PA), estos valores permiten evaluar si los jales son potencialmente generadores del drenaje ácido.

#### 4.4.1 Generación de Drenaje Ácido de los jales mineros utilizados en este estudio

#### 4.4.2 Determinación del Potencial de Neutralización (PN)

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior, los valores calculados para determinar el potencial de neutralización de las tres muestras de jal se dan en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12 Resultados del Potencial de Neutralización de tres jales evaluados.

Muestra	Peso Muestra g	Mezcla 3 pH a las 24h	pH a las 2h más de agitación	Titulación con NaOH (0.1N) Vol gastado (mL)	pH después de la titulación	Vol. Gastado de HCl V <sub>f</sub> (mL)	PN (Kg <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> / ton de jal)	PN Promedio (Kg <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> / ton de jal)
Jal I	2.0011	2.22	-	9.3	8.32	1	1.75	1.5
Jal I	2.003	2.19	-	9.5	8.45	1	1.25	
Jal II	2.0025	2.30	-	10.5	8.38	1.5	11.25	11
Jal II	2.0020	2.34	-	10.7	8.42	1.5	10.71	
Jal III	2.0002	2.13	-	9.4	8.31	1	1.4998	2
Jal III	2.0005	2.12	-	9.0	8.33	1	2.4993	

El Jal II presentó un Potencial de Neutralización (PN) o cantidad requerida de Kg de CaCO<sub>3</sub> de los polvos de caliza mucho mayor respecto al valor determinado para el jal I y jal III. Esto se pudo haber debido a que los jales I y III presentaron al inicio

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

un pH básico y neutro (jal I pH=10.39, jal III pH=7.5) comparados al del Jal II (pH inicial de 4.45).

### 4.4.3 Determinación del Potencial de Acidez (PA)

Con la técnica de cromatografía de líquidos de alta eficiencia (HPLC), se determinó la cantidad de sulfatos en los tres jales y con el estudio de análisis elemental la determinación del azufre total. Los resultados se encuentran en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Porcentaje de Sulfatos y Azufre Total en las tres muestras de jales.

Muestra	% $S_{sulfatos}$	% $S_{total}$
Jal I	0.596	2.521
Jal II	1.542	2.024
Jal III	0.1019	1.6557

Calculando el valor del potencial de acidez (PA) con la siguiente ecuación 4.1:

$$PA = \% S^{2-} \times 31.25 \quad \dots\dots\dots Ec. 4.1$$
$$\% S^{2-} = (\% S_{total} - \% S_{sulfatos})$$

Tenemos que el PA del Jal I es de 60.16, el del Jal II es igual a 15.06 y el jal III es de 48.56 Kg de  $CaCO_3$  por tonelada de jal.

De acuerdo a la NOM – 141 – SEMARNAT – 2003 establece lo siguiente:

Cuando  $PN/PA \leq 1.2$ ; los jales son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

Cuando  $PN/PA > 1.2$ ; los jales no son potenciales generadores de Drenaje Ácido.

Aplicando los resultados obtenidos para el PN y el PA se calcularon los siguientes resultados: la relación  $PN/PA$  igual a 0.0249 para el Jal I, 0.730 para el Jal II y 0.04118 para el jal III. Los valores de los tres jales los hacen jales potencialmente generadores de drenaje ácido, por lo que sería necesario neutralizarlos o encontrar una opción de aprovechamiento de estos residuos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.4.4 Neutralización de tres tipos de jales mineros de cobre

Con los resultados de PN y PA de los tres jales se calculó la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  requerida para neutralizarlos. En la tabla 4.14 se muestran las cantidades de piedra caliza a agregar en 20g de jal para su neutralización.

Tabla 4.14 Cantidad de carbonato de calcio para neutralizar tres tipos de jales

Muestras	PN (Kg $\text{CaCO}_3/\text{Ton}_{\text{jai}}$ )	pH	PA (Kg $\text{CaCO}_3/\text{Ton}_{\text{jai}}$ )	Cantidad a agregar de $\text{CaCO}_3$ (PA – PN) (Kg $\text{CaCO}_3/\text{Ton}_{\text{jai}}$ )	g $\text{CaCO}_3/20\text{g}_{\text{jai}}$
Jal I	1.5	10.39	60.16	58.66	1.173
Jal II	11	4.45	15.06	4.06	0.081
Jal III	2	7.5	48.56	46.56	0.9312

Se recomienda agregar los polvos de caliza a la salida del espesador aprovechando el rebombeo del agua ácida hacia la presa de jales como un sistema de agitación y como medio de neutralización de jales mineros.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la determinación de óxidos, sabemos que los polvos de caliza contienen un 95.31% de  $\text{CaCO}_3$ . Por lo que se calculó la cantidad que se debe agregar a los jales para su neutralización, se añadió un exceso del 20% de piedra caliza como posible agente neutralizador de jales acumulados en la presa de jales, mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 4.15 Cantidad de polvos de caliza adicionados para neutralizar tres tipos de jales.

Muestras	Gramos de polvos de caliza/ 20g de jal	Exceso del 20% de los polvos de caliza (g/20g jal)
Jal I	1.228	1.474
Jal II	0.085	0.102
Jal III	0.975	1.17

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los jales se neutralizaron siguiendo la metodología del capítulo anterior, agregando las cantidades de piedra caliza mostradas en la tabla 4.14.

Una vez neutralizadas y secas las muestras de los jales se realizaron nuevamente las pruebas para determinar los valores de PN y PA, para cada uno de los jales neutralizados. En la tabla 4.16 se muestran los valores obtenidos del PN para los jales I, II y III.

Tabla 4.16 Potencial de neutralización de tres tipos de jales neutralizados con polvos de caliza (0.075mm).

Muestra	Peso Muestra g	Mezcla 3 pH a las 24h	pH a las 2h mas de agitación	Titulación con NaOH (0.1N) Vol gastado (mL)	pH después de la titulación	Vol. Gastado de HCl V <sub>f</sub> (mL)	PN (Kg <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> /ton de jal)
Jal I	2.0005	2.17	-	21.5	8.33	5	71.25
Jal II	2.0011	2.45	-	18.5	8.36	4	53.75
Jal III	2.0002	2.05	-	13.2	8.31	4	66.993

En la tabla 4.17 se encuentran los resultados de la cantidad de sulfatos, del azufre total y el PA de los jales.

Tabla 4.17 Potencial de acidez de los tres jales neutralizados con polvos de caliza (0.075mm).

Muestra	% S <sub>sulfatos</sub>	% S <sub>total</sub>	PA (Kg CaCO <sub>3</sub> /Ton <sub>jal</sub> )
Jal I	0.00107	1.5892	49.631
Jal II	0.00136	1.2914	40.324
Jal III	0.00098	1.3710	42.814

Aplicando los resultados obtenidos para el PN y el PA de los jales neutralizados, se calculó la relación PN/ PA establecida en la NOM– 141 – SEMARNAT – 2003, los resultados están en la tabla 4.18.

Tabla 4.18 Potenciales de neutralización y acidez de los tres jales neutralizados con polvos de caliza (0.075mm).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Muestras	pH	PN (Kg CaCO <sub>3</sub> /Ton <sub>jai</sub> )	PA (Kg CaCO <sub>3</sub> /Ton <sub>jai</sub> )	PN/PA
Jal I	10.4	71.25	49.63	1.43
Jal II	4.4	53.75	40.32	1.33
Jal III	7.5	67	42.81	1.56

Los valores de los tres jales fueron mayores a 1.2 y, de acuerdo a la NOM- 141 – SEMARNAT – 2003, ya no son generadores de drenaje ácido.

Debido a la complejidad del manejo del jal acidificado y del neutro, los cuales se encuentran depositados, se sugiere que los polvos de caliza se dosifiquen a la salida del espesador de la planta para aprovechar la alta turbulencia que se observa para el mezclado del jal y los polvos. De acuerdo con estos resultados se determinó la cantidad necesaria de polvos de caliza para neutralizar los jales de acuerdo con el balance de agua en el capítulo 2 de la tabla 2.11.

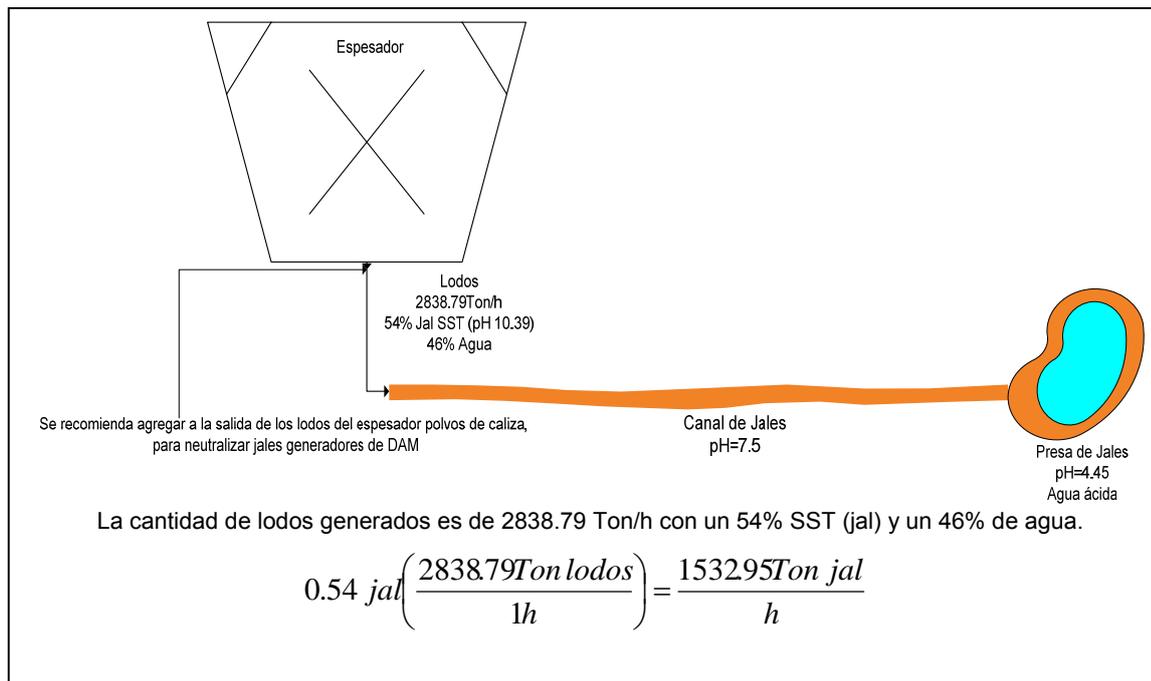


Figura 4.14 Diagrama de adición de polvos de caliza para la neutralización de jales

El balance de materia de cada tipo de jal para su neutralización con polvos de caliza se muestra en la tabla 4.19, la adición de los polvos de caliza debe ser a la

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

salida de los lodos del espesador con un tamaño de 0.075mm, aprovechando la agitación de los lodos y como medio de neutralización de los jales generadores de drenaje ácido de mina (DAM) que se encuentran estancados en la misma presa, como se muestra en la figura 4.14.

Tabla 4.19 Cantidad de polvos de caliza para neutralizar 1532.95 Toneladas de cada tipo de jal por hora, de acuerdo con el balance de materia.

Muestras	pH	g de polvos de caliza (0.075mm) / 20g de jal	Ton. de polvos de caliza / hora
Jal I	10.39	1.474	121.612
Jal II	4.45	0.102	8.415
Jal III	7.5	1.17	96.53

Se recomendaría hacer una estimación de costos para ver si conviene agregar los polvos de caliza o no, en lugar de un agente básico comercial.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo, se determinó que los polvos finos de caliza presentaron una alta factibilidad para ser utilizados como: 1) coadyuvantes de floculación en el proceso fisicoquímico coagulación – floculación de aguas residuales y 2) agente básico para la neutralización de jales mineros de cobre generadores de drenaje ácido, y de agua ácida de una presa de jales de cobre.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo se concluyó de manera específica lo siguiente:

1. El tamaño de partícula y el contenido de óxidos de los dos tipos de muestras de polvos de caliza colectados (de almacenamiento corto y largo) presentaron valores muy similares, por lo que se podrían utilizar ambos de manera indistinta en pruebas de coagulación-floculación y de neutralización. Los polvos de caliza presentaron un contenido promedio de 51.6% de CaO, es decir, 95.31% de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), considerando que todo el calcio se encuentran en forma de  $\text{CaCO}_3$ .
2. Bajo condiciones óptimas de dosificación, el polímero aniónico (poliacrilamida, Flopan AN910) (0.075mg/L), combinado con polvos de caliza (0.05g/L), resultó ser la mejor opción técnico-económica de reactivos de coagulación-floculación de agua residual proveniente del proceso de flotación de cobre.
3. Para la neutralización de agua ácida de presa de jales, el mejor tamaño (0.075mm) de partícula y de dosis de polvos de caliza (12.712g/L) permitieron alcanzar un pH dentro de un tiempo razonable (360 minutos), para ser aplicado en el complejo minero.
4. Para la neutralización de los tres tipos de jales evaluados, uno con alta formación de drenaje ácido (pH= 4.45), otro de mediana formación (pH= 7.5) y el último de baja formación (pH = 10.39), se determinó que los

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

polvos de caliza permitieron neutralizarlos eficientemente, por lo que después de la neutralización ya no fueron clasificados como formadores de drenaje ácido de minas. Sin embargo, por cuestiones prácticas y económicas se recomienda realizar la adición de los polvos de caliza a la salida de los espesadores.

Las recomendaciones que se sugieren para el presente estudio se describen a continuación:

- 1.- Realizar un muestreo más representativo (en número y puntos muestreados) de jales en el sitio de disposición, con base en los criterios recomendados por la NOM-141-SEMARNAT-2003, con el fin de determinar con mayor precisión la factibilidad de aplicar polvos de caliza como agente neutralizante.
- 2.- Realizar un estudio más completo de factibilidad y un análisis costo-beneficio para determinar si la aplicación de polvos de caliza, en comparación con productos básicos de tipo comercial, es aceptable.

## REFERENCIAS

1. ASCE y AWWA. (1998). **Water Treatment Plant Design**, 2nd. Ed., McGraw-Hill, Toronto.
2. Ballester, A., Luis Felipe V. y Sancho, J. (2000). **Metalurgia Extractiva, Volumen I Fundamentos**; Editorial Síntesis. Madrid, España, pp. 1-428.
3. Belloc, S. (2007). **Tratamiento de aguas residuales provenientes del lavado de suelo contaminado con hidrocarburos del petróleo**, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. México.
4. Bratby, J. R. (1981). **Optimizing coagulants and flocculants aids for settling**. JAWWA, American Public Health Association, junio.
5. Cohen, M. J. y Hannah, A. S. (1971). **Control de Calidad y Tratamiento del Agua. Manual de Abastecimientos Públicos del Agua**, Americ Water Works Association, 19 Ed. Mc Graw Hill.
6. Gaitán Lastras, A. (2008). **Remoción de Cobre y Amonio en agua mediante materiales de intercambio iónico preparados con un jal minero de Cobre**, Tesis de Licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. México.
7. González Sandoval, M. (2006). **Generación de lixiviados ácidos de jales ricos en pirita**. Tesis de maestría en Ingeniería química. Facultad de Química, UNAM. México.
8. Guibai, L. y Gregory, J. (2001). **Flocculation and Sedimentation of High – Turbidity Waster**, Water Research, Editorial Limusa. México.
9. Hartman, Howard L, Kutmansky, Jan M. (2002). **Introductory Mining Engineering**, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA.
10. Hernández Ávila, J., Salinas Rodríguez, E., Patiño Cardona, F., Rivera Landero, I., Yta, M., Pérez Labra, M. (2006). **Caracterización de los jales del distrito Pachuca–Real del Monte, Hidalgo, y su posible uso como material industrial**. Boletín de Mineralogía 17.
11. Hernández M. A. (1990). **Depuración de aguas residuales**, Colección Señor.

## REFERENCIAS

12. Hordell E. (1975). *Tratamiento de agua para la industria y otros usos*, Química 45, Ed. CECSA.
13. Arellano, Jorge. (1973). *Teoría, Diseño y Control de los Procesos de Clarificación del Agua*, Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente (CEPIS)
14. Juárez, B. y Rico R. (1985). *Mecánica de Suelos Tomo I Fundamentos de la Mecánica de Suelos*; 3ª Ed.; Editorial Limusa. México.
15. Juárez García, L. (2007). *Determinación del potencial de generación de ácido en muestras de jales*. Tesis de licenciatura en Ingeniería química metalúrgico. Facultad de Química, UNAM. México.
16. Kawamura, S. (1991). *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, Edictorial Limusa Wiley and Sons. USA.
17. Kelly, E. G. y Spotswood, D. J. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*, Editorial Limusa, Noriega Editores.
18. Lawrence R. W. y Wang Y. (1997). *Determination of Neutralization Potential in the Prediction of Acid Rock Drainage*, Fourth International Conference on Acid Rock Drainage. Vancouver, Canada.
19. López P., Ainzúa S., Zolezzi C. y Vasconi, P. (2003). *La Minería y su Pasivo Ambiental. Análisis de Políticas Públicas*, Serie APP, Número 24, Publicaciones Terra. México, pp. 1-16.
20. Marín G. (1989). *Coagulación – floculación de aguas: una visión de los coagulantes más utilizados*. Ingeniería Química, Enero.
21. Martínez S. C. A. (2006). *Determinación de la peligrosidad de jales mineros con base en la normatividad ambiental mexicana y su efecto potencial en el ambiente*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
22. Navia R. y Bezama A. (2008). *Hazardous waste management in Chilean main industry: An overview*. Journal of Hazardous Materials, USA. pp.1-8.

## REFERENCIAS

23. O`Melia C. R. (1972). **Coagulation in Wastewater Treatment**, in Physicochemical Processes for Water Quality Control, Ed. W. J. Weber, New York, USA.
24. Pacheco Gutiérrez, L. (2006). **Propuesta de aprovechamiento integral del agua de proceso de una empresa minera empleando procesos biológicos anaerobios**, Tesis de Maestría en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. México.
25. Paul N. C. y Marcel D. (1995). **Handbook of wáter and wastewater treatment technology**, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc. USA.
26. Peñalosa M. S. (2001). **Problemas ambientales de la minería boliviana**, 1<sup>a</sup> Edición, Fundación MEDMIN, La Paz, Bolivia.
27. Pérez Martínez I. (2005). Tesis: **Procesos de oxidación en una presa de jales en el distrito minero de Zimapán, Hidalgo**. Ciencias Geoquímicas UNAM. México.
28. Planta de cal. (2008). **Planta de cal Mexicana de Cobre**, S. A. de C. V. México.
29. Poewll, S. T. (1954). **Water Conditioning for Industry**, McGraw-Hill, Nueva Cork.
30. Ramírez Z. R. M. (2008). **Aprovechamiento del material fino de desecho de la planta de cal de minera México para recuperar agua y para estabilizar lodos y jales con fines de valoración en el complejo minero de Cananea**, Instituto de Ingeniería, UNAM. México.
31. Ramírez Z. R. M. y Durán M. A. (2000). **Factibilidad para utilizar los polvos y lodos generados en el proceso de producción de mezcla asfáltica**, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
32. Romero F. M. (2004). **Procesos Geoquímicos que controlan la movilidad de metales y metaloides en jales de sulfuros metálicos**, Tesis Doctoral, Taxco Guerrero, México.
33. Romero F.M., Armienta M. y Villaseñor, L. (2006). **Evaluación de la peligrosidad potencial de jales mineros**. Geología y Geofísica Ambiental UNAM, GGA-06. México. pp. 184-186.
34. Ronald L. D. (1997). **Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment**, Ed., John Wiley & Sons, Inc. USA.

## REFERENCIAS

35. Saloma A. R. (2001). **Mejora continua en el proceso de coagulación – floculación para la industria**, Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
36. Sánchez L. E. (1995). **Drenaje de minas el cielo abierto, Aspectos geológicos de protección ambiental**, 1ª Edición, UNESCO. México.
37. Santos Martínez C. (2006). **Determinación de la peligrosidad de jales mineros con base en la normatividad ambiental mexicana y su efecto potencial en el ambiente**. Tesis de Licenciatura en Ingeniería de Minas y Metalurgista. Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
38. Sobek A. A. (1978). **Field and laboratory methods applicable to overburdens and minesoils**. Environmental Protection Agency Cincinnati, Ohio, USA.
39. Susumu K. (2000). **Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities**, 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons Inc. USA.
40. Vidalón Gálvez, J. (2004). **Reactivos de flotación de minerales oxidados y no metálicos**. Colegio de ingenieros del Perú. Perú.
41. Yupari A. (2002). Informe: **Pasivos ambientales mineros en Sudamérica**, pp. 1-23.
42. Zamora Martínez O. (2003). **Evaluación del riesgo asociado a jales mineros. Comportamiento de metales pesados y arsénico**. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química. Facultad de Química, UNAM. México.

### Información electrónica

1. Anónimo. (2007). Análisis Granulométrico. Dirección (Consulta, 20 de Agosto 2008): [http://icc.ucv.cl/geotecnia/02\\_laboratorio/manual\\_laboratorio/granulometria.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf)
2. Cámara Minera de México. (2007). Camimex. Dirección (Consulta, 14 de Agosto 2008): <http://www.camimex.org.mx/>, Cámara Minera de México.
3. Corporación Nacional del Cobre, Chile. (2007). CODELCO Educa. Dirección (Consulta, 16 de Marzo 2008): <http://www.codelcoeduca.cl/index.html>

## REFERENCIAS

4. Fibra. (2007). Fabricación de FRP y termoplásticos. Dirección (Consulta, 10 de Septiembre de 2008): <http://www.fibra.cl>.
5. García, L. H. (2004). Dirección (Consulta, 3 de Octubre 2008): <http://www.redescolar.ilce.adu.mx>.
6. Información minera. (2007). Dirección (Consulta, 11 de Octubre 2008): <http://www.mineria.gov.ar/economia/empresas/cgi-bin/infomin.asp?SHOWME=369>
7. Juanicó. (2008). Consultores Ambientales Ltd. Dirección (Consulta, 4 de Septiembre 2008): <http://www.juanico.co.il/index.html>.
8. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. (2008). Dirección (Consulta, 30 de Septiembre 2008): [http://www.conanp.gob.mx/pdf/leygra\\_equilibrio.pdf](http://www.conanp.gob.mx/pdf/leygra_equilibrio.pdf).
9. Litoral de Chile. (2007). Organización para asegurar la salud del agua potable. Dirección (Consulta, 6 de Noviembre 2008): <http://www.litoraldechile.com>.
10. Neofronteras, (2009). Noticias de Ciencia y Tecnología. Dirección. (Consulta, 6 de Noviembre 2008): <http://www.neofronteras.com>.
11. Norma Oficial Mexicana: NOM-052-SEMARNAT-2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Dirección (Consulta, 9 de Noviembre 2008): [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx).
12. Norma Oficial Mexicana: NOM-141-SEMARNAT-2003. Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales. Dirección (Consulta, 9 de Noviembre 2008): [www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx).
13. Procesos de extracción primaria. (2008). Dirección (Consulta, 12 de Noviembre 2008): <http://www.monografias.com/trabajos15/biolixiviacion/biolixiviacion.shtml#bacterias>
14. Proyecto Preliminares para las Plantas Industriales. (2008). Taiwan Turnkey Project Association. Dirección (Consulta, 10 de Noviembre 2008): <http://turnkey.taiwantrade.com.tw>,

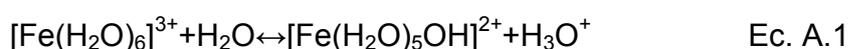
## REFERENCIAS

15. QUIMINET. (2005). Fabricante de especialidades químicas para la industria. Dirección (Consulta, 15 de Octubre 2008): <http://www.quiminet.com.mx>.
16. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. (2008). Dirección (Consulta, 22 de Septiembre 2008): [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LGEEPA\\_MEIA.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGEEPA_MEIA.pdf).
17. Science Direct. (2008). Dirección (Consulta, 15 de Octubre 2008): [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob](http://www.sciencedirect.com/science?_ob)
18. Tratamiento de residuos peligrosos. (2008). Dirección (Consulta, 13 de Agosto 2008): <http://www.elergonomista.com/residuos3se01.htm>
19. UNIVITUAL. (2005). Universidad Nacional de Colombia. Dirección (Consulta, 11 de Julio 2008): <http://www.virtual.unal.edu.co>.
20. Wikipedia. (2007). Mina El Teniente. Dirección (Consulta, 18 de Marzo de 2008): [http://es.wikipedia.org/wiki/El\\_Teniente\\_%28mina%29](http://es.wikipedia.org/wiki/El_Teniente_%28mina%29).

## ANEXO A

## A1. Hidrólisis del las sales de hierro

La hidrólisis del hierro es similar a la del aluminio. Por tanto, el hierro experimenta una serie de reacciones hidrolíticas y de olación en las que se forman complejos polinucleares e hidroxio-férricos. El tipo hidrolítico de reacción se representa como a continuación se indica:



El hierro tiene una tendencia más elevada que el aluminio para polimerizarse por mediación de la reacción de olación, para formar polímeros hidroxio-metálicos del tipo:

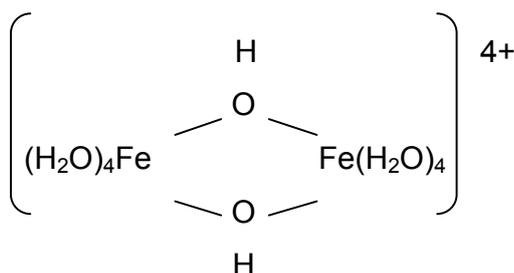


Figura A.1 Polímero hidroxio – metálicos de hierro. (Cohen Y Hannah, 1971)

Es preciso considerar los factores que determinan que las partículas permanezcan en suspensión, así como también aquellos que producen la coagulación. Estas condiciones se describen con los términos “estabilidad” y “inestabilidad” de las suspensiones coloidales.

Por estabilidad se entiende la propiedad inherente de las partículas coloidales a permanecer en dispersión en el transcurso del tiempo, mientras que por inestabilidad se expresa la tendencia de dichas partículas a coagularse, siempre que entren en contacto entre sí.

## ANEXOS

En vista de que el objetivo de la coagulación es la desestabilización de las partículas con objeto de lograr la formación de agregados, se describe por medio de fuerzas las eléctricas de atracción o repulsión. Las fuerzas que tienden a mantener a las partículas separadas y, en consecuencia dan lugar a suspensiones coloidales estables, son la hidratación, que resulta en una envoltura protectora de moléculas de agua, y la capa eléctrica doble, que produce potenciales eléctricos que hacen a veces de barrera y evitan una aproximación demasiado estrecha de otras partículas.

La inestabilidad de las suspensiones (coagulación) es el resultado del contacto entre partículas; la energía cinética para la translocación la aporta el movimiento browniano en el caso de las partículas más pequeñas; pero en un grado más importante, la energía producida en la suspensión coloidal es resultado del mezclado o de la turbulencia, que aumenta enormemente la probabilidad de las colisiones entre las partículas, si las fuerzas de repulsión se producen en un grado suficiente y si la capa de hidratación es lo bastante delgada. Una vez que se ha establecido el contacto entre las partículas, las fuerzas de Van der Waals determinarán que aquellas se adhieran entre sí y se registre una aglomeración progresiva de las mismas.

La estabilidad no se debe a la repulsión eléctrica entre dos partículas primarias, sino que esta relación debe tener en cuenta la interacción entre dos partículas, cada una de las cuales esta rodeada por una capa eléctrica doble. La capa doble tiene por misión que las partículas no se acerquen a distancias en las que las fuerzas de corto alcance London-Van der Waals pudieran provocar la coagulación. Sin embargo, el efecto neto de la adición de electrolitos disminuye el espesor de la doble capa eléctrica y, para determinadas concentraciones, según el ion de que se trate, especialmente de su valencia se presentará la coagulación debido a la reducción de la barrera que impide que las partículas se aproximen demasiado.

### ANEXO B

#### PRUEBAS FISICOQUÍMICAS

##### B.1 Determinación de pH

El principio básico de la medición electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones hidrógeno mediante la medición potenciométrica utilizando un electrodo de vidrio y uno de referencia. El potenciométrico se calibra potenciométricamente con soluciones buffer para crear una escala que permita medir.

Material:

- Potenciómetro digital marca Thermo Orion 3 – Star.
- Buffers de pH = 4, 7, 10
- Solución muestra

Procedimiento:

1. Calibrar el electrodo con las soluciones buffer.
2. Introducir el electrodo en la solución y esperar a que se estabilice.

##### B.2 Color

El color verdadero es provocado por sustancias disueltas en el agua. El color aparente está dado por los sólidos en suspensión más el color verdadero de la muestra. El método que se utiliza con mayor frecuencia para evaluarlo es la escala Pt – Co (platino cobalto). En el agua potable, el color es muy importante, ya que puede dar una indicación rápida de la calidad: además, junto con el olor, determina la aceptación por aparte del consumidor. El color en el agua puede ser originado por la presencia de iones metálicos como el hierro y manganeso, sustancias húmicas, plancton, algas y proceso industriales.

Materiales:

- Espectrofotómetro con rango de recuperación de 400 a 700 nm.

Procedimiento:

1. Ajustar el espectrofotómetro a una longitud de onda de 455 nm.
2. Colocar agua destilada hasta la marca y programar al instrumento para indicar que es el blanco.
3. Colocar la muestra en el espectrofotómetro y registrar al valor de color en unidades de PtCo para el valor de color aparente.

### **B.3 Turbiedad**

La turbiedad es el parámetro que mide qué tanto es absorbida o dispersada la luz por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua. La turbiedad no es un análisis cuantitativo de los sólidos suspendidos. Actualmente se utilizan los métodos nefelométricos (basados en la medición de la luz que es dispersada en un ángulo de 90° al atravesar una muestra). La turbiedad se mide, por lo tanto, en Unidades Técnicas de Nefelometría (UTN).

Materiales:

- Nefelómetro con celdas de lectura.
- Agua destilada.

Procedimiento:

1. Colocar en la celda un volumen de agua destilada hasta la marca de la celda y programar el instrumento para el blanco (NTU = 0).
2. Introducir en la celda la muestra hasta la marca indicada y realizar la medición.

### **B.4 Conductividad**

La conductividad representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados,

concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura. Para el agua, el valor de la conductividad se ajusta a la superficie de la celda, se denomina conductividad específica y se expresa en S/cm. Este parámetro se adapta fácilmente a monitoreos continuos y es indicador rápido de concentración en cuerpos de agua. Se puede evaluar con ella el contenido de sólidos disueltos en forma rápida si es que se conoce el factor de conversión, el cual oscila para agua potable, entre  $5.5 \times 10^{-9}$  y  $9 \times 10^{-9}$  S/cm.

Materiales:

- Conductímetro con electrodo
- Solución de KCl para la calibración

Procedimiento:

1. Calibrar el conductímetro con la solución de KCl (a 25° C).
2. Introducir el electrodo en la solución y determinar su conductividad, esperar a que el valor se estabilice y registrar el valor en S/cm.

### B.5 Sólidos

Se entiende por sólido como todo residuo remanente después de la evaporación completa de la muestra. Los sólidos se clasifican en tres grupos:

*Sólidos Sedimentables.* Corresponde al volumen retenido en el fondo de un cono (Imhoff) después de 1 hora decantación y representa la fracción sólida de los contaminantes que serán fácilmente removidos por desarenación o sedimentación primaria. Unidades, mL/L.

*Sólidos Suspendidos totales (SST).* Son los sólidos retenidos al pasar el agua a través de un filtro con apertura de poro de  $0.45 \mu\text{m}$ . representa la fracción contaminante susceptible de ser eliminada por sedimentación, floculación o

## ANEXOS

filtración. Un tratamiento secundario convencional de agua residual arroja un resultado del orden de 30 mg/L de SST.

*Sólidos disueltos (SD) (filtrables)*. Son los sólidos que atraviesan un filtro con poro de 0.45  $\mu\text{m}$ . se componen de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste de partículas con diámetro de  $10^{-3}$  a 1  $\mu\text{m}$ . se ha establecido, con base en un límite de 500 mg/L de SD propiedades organolépticas, el intervalo usual de SD en agua de abastecimiento es de 25 a 5,000 mg/L, la concentración normalmente deseable es de 200 mg/L.

Materiales:

- Estufa
- Cápsulas de papel aluminio
- Balanza analítica
- Sistema de filtración (Kitasato, embudo, filtro de papel #40 Whatman, servicio de vacío)

Procedimiento:

1. Pesar la cápsula de papel aluminio y el papel filtro (P1) (completamente secos).
2. Filtrar al vacío 10mL de la muestra.
3. Colocar el papel filtro con la muestra en la capsula de papel aluminio.
4. Introducir la muestra a la estufa a (115° C) durante 15 minutos y pesar.
5. Nuevamente, introducir la muestra a la estufa a (115° C) durante 15 minutos y pesar.
6. Repetir los pasos 4 y 5 hasta que el peso sea constante (P2).
7. Calcular el contenido de Sólidos Suspendidos Totales con la siguiente formula:

$$SST = (P2 - P1)(g) * 1000 * 100 = mg / L$$

### B.6 Prueba de Potencial de Neutralización

De acuerdo con el Anexo normativo 5 de la Norma Oficial Mexicana (NOM – 141 – SEMARNAT – 2003) se realizó el método establecido por esta norma para la determinación del Potencial de Neutralización (PN).

a) En primer término se realiza la medición cualitativa de carbonatos:

Se coloca 1 gramo de muestra finamente molido sobre papel aluminio y se agregan unas gotas de HCl al 25 %. Se observa el grado de efervescencia que produce la transformación de carbonatos en dióxido de carbono (gas) y se clasifica como “nulo”, “bajo”, “moderado” o “fuerte”.

b) Medición del poder de neutralización

-Se pesan 2g de Jal por muestra homogeneizada secada a temperatura ambiente, se colocan en un matraz de 250mL y se agregan 90ml de agua destilada (mezcla 1). Se prepararon 2 muestras por jal.

-Al inicio de la prueba al tiempo cero. Se agrega un volumen de HCl 1N, indicado en la Tabla 1 del anexo normativo 5 Prueba II Balance ácido-base para Jales, de acuerdo al grado de efervescencia. (mezcla 2) Se registra el vol. Añadido ( $V_a$ ).

-Se agita la mezcla 2 a temperatura ambiente por 2h. Se agrega HCl 1N indicado en la Tabla 1 para el tiempo de 2h (mezcla 3). Se registra el vol. añadido ( $V_b$ ).

-Se agita la mezcla 3 por 22h y al término se mide el pH, si es mayor a 2.5 se añade HCl 1N para disminuir la acidez hasta un valor de 2 a 2.5 y se continúa la agitación por 2 h más. Se registra el volumen añadido ( $V_c$ ).

\*Si el pH a las 24h es menor a 2.0, es necesario repetir la medición del poder de neutralización.

-Se adiciona agua destilada al matraz hasta un volumen final aproximado de 125mL y se titula con una solución de NaOH 0.1N hasta un pH final de 8.3.

Tabla B.1. Cálculo del volumen de HCl para determinar el PN (efervescencia)

## ANEXOS

Grado de reacción (neutralización carbonatos)	HCl solución 1.0 N (mL)	
	"Tiempo 0"	"Tiempo 2 horas"
Nulo	1.0	1.0
Bajo	2.0	1.0
Moderado	2.0	2.0
Fuerte	3.0	2.0

Se calcula los mL gastados de HCl 1N:

$$V_f = V_a + V_b + V_c$$

Se calcula el potencial de neutralización (PN) expresado como Kg<sub>CaCO3</sub>/ ton de jales, con:

$$PN = \frac{(V_f \text{ en mL de HCl}) - (0.1 * \text{Vol. en mL de NaOH})}{\text{Peso de la muestra en g}} * 50$$

## ANEXO C

### PRUEBAS GRANULOMETRICAS DE LOS POLVOS DE CALIZA

#### C.1 Determinación de tamaño de partícula

Se realizaron pruebas granulométricas para determinar el tamaño efectivo (P<sub>10</sub>) y el coeficiente de uniformidad de los polvos de caliza.

Tabla C.1 Análisis granulométrico de los polvos de caliza de almacenamiento corto (AC).

No. Tamiz	Diámetro (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	% Retenido (%)	% Que pasa (%)
14	1.4	192.3	192.3	64.68	35.32
18	1	14.6	206.9	69.59	30.41
25	0.71	13.9	220.8	74.27	25.73
30	0.6	4.4	225.2	75.75	24.25
50	0.3	19	244.2	82.14	17.86
80	0.18	15.1	259.3	87.22	12.78
100	0.15	7.4	266.7	89.71	10.29
140	0.106	7.4	274.1	92.20	7.80
200	0.075	18.6	292.7	98.45	1.55
325	0.045	3.9	296.6	99.76	0.24
Colector		0.7	297.3	100.00	0.00
	Suma	297.3			

## ANEXOS

Con estos datos se calculó el porcentaje de gruesos y de finos. En el caso de los polvos de caliza de almacenamiento corto el 64.68% tiene un tamaño de partícula mayor a 0.6 mm (porcentaje de gruesos) y el porcentaje de finos corresponde al 35.32% del total de la muestra.

Tabla C.2 Análisis granulométrico de los polvos de caliza de almacenamiento largo (AL).

No. Tamiz.	Diámetro (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	% Retenido (%)	% Que pasa (%)
14	1.4	216.6	216.6	70.53	29.47
18	1	10.6	227.2	73.98	26.02
25	0.71	10	237.2	77.24	22.76
30	0.6	4.4	241.6	78.67	21.33
50	0.3	16.5	258.1	84.04	15.96
80	0.18	9.5	267.6	87.14	12.86
100	0.15	5.1	272.7	88.80	11.20
140	0.106	7.4	280.1	91.21	8.79
200	0.075	20.1	300.2	97.75	2.25
325	0.045	6.2	306.4	99.77	0.23
Colector		0.7	307.1	100.00	0.00
	Suma	307.1			

De igual forma se calculó el porcentaje de gruesos y finos, para los polvos de caliza de almacenamiento largo, el 70.53% tiene un tamaño de partícula mayor a 0.6 mm (porcentaje de gruesos) y el porcentaje de finos corresponde al 29.47% del total de la muestra.

### C.2 Determinación del número de equivalentes de NaOH (0.1M) para neutralizar agua ácida de la presa de jales

Para la neutralización del agua ácida de la presa de jales, se realizaron pruebas para obtener la curva de neutralización de esta agua, adicionando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración 0.1M, para determinar la cantidad de equivalentes de NaOH que se requieren para neutralizar 250mL de agua ácida y obtener un pH neutro. Los resultados obtenidos se presentan en la

## ANEXOS

tabla C.3. Se determinó que se requieren 0.054 moles de una solución de NaOH 0.1M, para neutralizar 250mL de agua acida y obtener un pH neutro (pH = 7).

Tabla C.3 Dosificación de NaOH 0.1M en el agua ácida

pH	Moles o equivalentes de NaOH/250mL Agua ácida	pH	Moles o equivalentes de NaOH/250mL Agua ácida
2.16	0	7.27	0.056
2.38	0.0016	7.52	0.0568
2.56	0.0032	7.59	0.0576
2.7	0.0048	7.33	0.058
2.89	0.0064	7.53	0.0584
3.03	0.008	7.68	0.0588
3.2	0.012	7.94	0.0592
3.73	0.016	8.08	0.0596
4	0.02	8.21	0.06
4.15	0.024	8.35	0.0604
4.21	0.028	8.47	0.0608
4.3	0.032	8.62	0.0612
4.39	0.036	8.75	0.0616
4.48	0.04	8.82	0.062
4.8	0.044	8.94	0.0624
5.45	0.048	9.01	0.0628
6.47	0.052	9.08	0.0632
7.07	0.054	9.14	0.0636