



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

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA  
REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON  
ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA  
MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Ginger Kim Elinor Starlight Méndez Marroquín**

Asesorado por el Ing. Mariano Arturo J. Eskenasy García

Guatemala, mayo de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA  
REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON  
ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA  
MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**GINGER KIM ELINOR STARLIGHT MÉNDEZ MARRO QUÍN**  
ASESORADO POR EL ING. MARIANO ARTURO J. ESKENASY GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, MAYO DE 2008

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
VOCAL I: Inga. Glenda Patricia García Soria  
VOCAL II: Inga. Alba Maritza Guerrero de López  
VOCAL III: Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón  
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz  
VOCAL V:  
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
EXAMINADOR: Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
EXAMINADORA: Inga. Thelma Maricela Cano Morales  
EXAMINADOR: Ing. Jorge Rodolfo García Carrera  
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 16 de octubre de 2007.

Ginger Kim Elinor Starlight Méndez Marroquí n.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

**Mi madre:**

**Inga. Vera Gladis Marroquín Argueta**

Por darme la inspiración para seguir adelante, porque con su ejemplo de lucha, perseverancia, rectitud y sacrificio, me ha enseñado a ser una mejor persona. Gracias por su cariño y apoyo.

**Mi padre:**

**Ing. José Santiago Méndez Arana**

Por brindarme sabiduría, y contagiarme de tu alegría. Porque el conocimiento que me has brindado me ha hecho crecer.

A ambos; cuando los sentimientos sobran, las palabras faltan.

**Saúl:**

Por ser mi contraparte, el bastón del que me sostengo cuando me siento desfallecer. Por ser más que mi amigo y confidente, mi amor y mi vida. Gracias por tu paciencia y amor.

**Mis hermanos:**

**Farah, Yasser y Galia**

Por formar parte de mi vida, porque aunque existan tantas diferencias entre nosotros que nos aparten, es el cariño del uno hacia el otro, el que nos mantiene siempre juntos.

**Amigos y compañeros:**

Porque gracias a ustedes he aprendido a apreciar de esos momentos simples de la vida, porque juntos hemos atravesado por tantos períodos, algunos triviales, otros difíciles, que han marcado nuestra amistad, y más allá, esos momentos felices que siempre atesoraré en mi corazón. Todos y cada uno de ustedes han dejado una huella en mi ser.

**Milo:**

Porque cuando nadie más está, tú me acompañas y me brindas tu cariño.

**La Universidad de San  
Carlos de Guatemala:**

Por ser mi casa de estudio, el lugar en el que viví los momentos más memorables de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Ing. Jorge Luis Ávalos, Ing.**

**Mariano Eskenasy, Ing. Julio**

**Luna, Inga. Dilma Mexicanos, Lic.**

**Eduardo Orozco, Ing. Rony Ayala**

Por su contribución incondicional en la elaboración de este trabajo de graduación .

**Ing. César Alfonso García Guerra**

Por ser más que nuestro revisor, una persona que entrega su alma para procurar nuestra excelencia académica; usted es un gran profesional, un modelo a seguir. Gracias por todo.

**Mónica**

Por ser más que mi compañera de trabajo de graduación, una gran amiga con la que siempre puedo contar.

**El personal de la Escuela Técnica**

Por su paciencia y apoyo.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....</b>	<b>IX.</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XVII.</b>
<b>GLOSARIO .....</b>	<b>XXI.</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XXV.</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>XXVII.</b>
<b>HIPÓTESIS EXPERIMENTAL .....</b>	<b>XXIX.</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>XXXI.</b>
<b>1. GEOLOGÍA REGIONAL DE CHIQUIMULA .....</b>	<b>1.</b>
1.1. Geología regional de Camotán, Chiquimula	
1.2. Geología general de la Línea Panaluya – El Florido .....	2.
1.2.1. Formación Atima (Cobán) .....	3.
1.3. Distribución de hierro y arcillas en Guatemala	
1.4. Vías de comunicación de Chiquimula .....	4.
1.4.1. Vías de comunicación de Camotán, Chiquimula .....	5.
1.5. Climatología y temperatura	
1.6. Hidrografía	
1.6.1. Aluviones recientes .....	6.
1.6.2. Depósitos de Talus (Qt) .....	7.
<b>2. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE ARCILLAS</b>	
2.1. Caracterización geológica de las arcillas .....	9.
2.1.1. Localización y extensión	
2.1.1.1. Fisiografía	
2.1.1.2. Ambientes de sedimentación. Facies	

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

2.1.2. Relaciones geológicas .....	10.
2.1.2.1. Petrográficas	
2.1.2.2. Estratigráficas .....	11.
2.1.3. Relaciones estructurales	
2.1.4. Muestreo .....	12.
2.2. Composición mineralógica .....	13.
2.2.1. Minerales arcillosos	
2.2.1.1. Filosilicatos bilaminares .....	14.
2.2.1.1.1. Familia de la Kandita .....	15.
2.2.1.1.2. Familia de las Serpentinias	
2.2.1.2. Filosilicatos trilaminares	
2.2.1.2.1. Familia de las esmectitas o minerales expansibles .....	16.
2.2.1.2.2. Familia de las micas .....	17.
2.2.1.2.3. Familia de las Atapulgitas. Minerales fibrosos	
2.2.1.3. Cloritas .....	18.
2.2.1.4. Otros minerales .....	19.
2.2.1.4.1. Minerales de hierro	
2.2.1.4.1.1. Hierro	
2.2.1.4.1.2. Hematita .....	21.
2.2.1.4.2. Minerales en estado coloidal	
2.2.1.4.3. Minerales estatificados	
2.2.2. Importancia del análisis mineralógico .....	25.
2.3. Constitución de los minerales de arcilla	
2.4. Caracterización física y tecnológica (Análisis y ensayo de las arcillas) .....	26.
2.4.1. Color en crudo y en quema .....	28.
2.4.2. Carácter micelar del sistema agua-arcilla	
2.4.3. Tamaño de partícula	
2.4.4. Plasticidad .....	29.
2.4.5. Densidad .....	31.

2.4.6. Contracciones en crudo y quema	
2.4.7. Contracción de húmedo a seco	
2.4.8. Contracción en cocido o al fuego .....	32.
2.5. Otras propiedades de los materiales de arcilla .....	33.
2.6. Industrias derivadas de la arcilla .....	34.
2.6.1. Clasificación de las arcillas de uso cerámico	
2.6.1.1. Por su composición	
2.6.1.2. Por sus propiedades prácticas .....	35.
<b>3. GRANULOMETRÍA DE MINERALES</b>	
3.1. Análisis granulométrico .....	37.
3.2. Métodos de análisis granulométrico	
3.2.1. Método del tamizado .....	38.
3.2.2. Método de sedimentación .....	40.
3.2.2.1. Análisis por levigación	
3.3. Curva granulométrica .....	41.
<b>4. LIXIVIACIÓN</b>	
4.1. Procesos de lixiviación para materiales inorgánicos .....	43.
4.2. Preparación de sólidos para la lixiviación	
4.2.1. Materiales inorgánicos y orgánicos .....	44.
4.3. Métodos de operación en la lixiviación .....	45.
4.4. Tipos de equipo para la lixiviación	
4.4.1. Lixiviación agitada del sólido	
4.5. Tipos de equipo para lixiviación	
4.5.1. Lixiviación agitada del sólido .....	46.
4.5.2. Concentraciones de solvente	
4.5.3. Tamaño de partícula	
4.5.4. Porosidad	

4.5.5. Agitación .....	47.
<b>5. AGITACIÓN Y MEZCLADO</b>	
5.1. Equipo para la agitación .....	49.
5.1.1. Agitador propulsor de tres aspas .....	50.
5.2. Selección del agitador e intervalos de viscosidad .....	51.
5.3. Trayectoria del flujo en la agitación .....	52.
<b>6. FILTRACIÓN .....</b>	<b>55.</b>
6.1. Clasificación de los filtros	
6.1.1. Filtros prensa de placas y marcos .....	56.
6.2. Aplicaciones, ventajas y desventajas del uso del filtro prensa	
6.2.1. Aplicaciones del filtro prensa .....	58.
6.2.2. Ventajas del uso del filtro prensa	
6.2.3. Desventajas del uso del filtro prensa	
6.3. Ciclos de filtración .....	59.
6.3.1. Capacidad de filtración	
6.4. Medios filtrantes .....	61.
6.5. Ayudas de filtración .....	62.
<b>7. SECADO</b>	
7.1. Operaciones de secado .....	63.
7.2. Métodos generales de secado .....	64.
7.3. Equipo de secado	
7.3.1. Secado en bandejas .....	65.
<b>8. IMPACTO AMBIENTAL DE REACTIVOS DE SULFATACIÓN</b>	
8.1. Efectos en la salud .....	67.
8.2. Efectos ambientales .....	68.

## 9. METODOLOGÍA

9.1. Recursos humanos	
9.2. Infraestructura	
9.3. Obtención de las muestras .....	71.
9.4. Condiciones de operación	
9.4.1. Fijas	
9.4.1.1. Tiempo de residencia y relaciones de lixiviación	
9.4.1.2. Condiciones de operación	
9.4.1.2.1. Tamizador	
9.4.1.2.2. Sistema de agitación	
9.4.1.2.3. Reactor	
9.4.1.2.4. Secador de bandejas .....	72.
9.4.2. Variables	
9.4.2.1. Concentraciones y cantidades de reactivos	
9.4.3. Reacción química	
9.4.4. Muestra de cálculo	
9.4.4.1. Cálculo de cantidad teórica de $H_2SO_{4(98\%)}$ respecto al tamaño de lote .....	73.
9.4.4.2. Cálculo de las constantes de lixiviación	
9.4.4.3. Determinación del volumen mínimo de solución con base en los requerimientos de la solución de sulfato de hierro, y los límites de operación del filtro prensa .....	74.
9.5. Material:	
9.5.1. Material de apoyo .....	78.
9.5.2. Materia prima .....	79.
9.6. Equipo	
9.6.1. Especificaciones técnicas de la unidad por equipos.	
9.6.1.1. Tamizador .....	80.
9.6.1.2. Sistema de agitación	

9.6.1.3.Reactor	
9.6.1.4.Compresor .....	81.
9.6.1.5.Bomba de desplazamiento positivo.	
9.6.1.6.Filtro prensa .....	82.
9.6.1.7.Secador de bandejas	
9.6.2. Especificación técnica de la unidad completa de trabajo .....	83.
9.7. Modelo estadístico	
9.8. Manejo de resultados .....	84.
9.9. Manejo de desechos .....	86.
<b>10. RESULTADOS .....</b>	<b>91.</b>
<b>11. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>99.</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>105.</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>107.</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109.</b>
<b>REFERENCIAS ELECTRÓNICAS .....</b>	<b>111.</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>113.</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>115.</b>
<b>Apéndice 1 .....</b>	<b>117.</b>
<b>Apéndice 2 .....</b>	<b>131.</b>
<b>Apéndice 3 .....</b>	<b>135.</b>
<b>Apéndice 4 .....</b>	<b>139.</b>
<b>Apéndice 5 .....</b>	<b>147.</b>
<b>Apéndice 6 .....</b>	<b>149.</b>
<b>Apéndice 7 .....</b>	<b>153.</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>159.</b>
<b>Anexo 1 .....</b>	<b>161.</b>
<b>Anexo 2 .....</b>	<b>167.</b>

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

---

**Anexo 3 ..... 171.**  
**Anexo 4 ..... 177.**

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Estructura elemental de la caolinita .....	15.
2.	Estructura elemental de la montmorillonita .....	17.
3.	Estructura elemental de la illita .....	18.
4.	Arreglos cristalinos del cuarzo .....	20.
5.	Cristales de hematites .....	22.
6.	Estructura del grupo hematites. Lámina basal de octaedros de Corindón ( $Al_2O_3$ ) o hematites, $Fe_2O_3$ con una vacante octaédrica por cada dos octaedros de Al o $Fe^{+3}$ en el centro .....	23.
7.	Hematita roja .....	24.
8.	Micela de arcilla .....	30.
9.	Etapas en la desecación de una pasta de arcilla-agua .....	33.
10.	Tamiz industrial .....	39.
11.	Agitador propulsor de tres aspas .....	50.
12.	Tanque con deflectores y agitador de turbina de paletas planas con patrón de flujo axial	
13.	Agitador de tres aspas .....	51.
14.	Tanque con deflectores con un agitador de turbina de seis aspas con disco, que muestra las dimensiones de la turbina y el tanque .....	52.
15.	Filtro prensa de laboratorio .....	57.
16.	Pasos del ciclo de filtración .....	60.
17.	Secador de bandejas o anaqueles .....	65.
18.	Secador de bandejas .....	66.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

19.	Gráfica de correlación polinomial para datos de la tabla X .....	78.
20.	Diagrama de flujo de proceso de lixiviación de arcillas .....	87.
21.	Equipo para lixiviación de arcillas .....	88.
22.	Diagrama de proceso de lixiviación de arcillas .....	89.
23.	Gráfica de porcentaje de refinación de arcillas ( óxido de hierro extraído) empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación .....	92.
24.	Gráfica de porcentaje de óxido férrico residual en arcillas, empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación para las condiciones de operación utilizadas .....	94.
25.	Gráfica contenido porcentual de los óxidos presentes en la hematita original, y en el sólido residual después del proceso de lixiviación (Tres más importantes) .....	96.
26.	Gráfica contenido porcentual de los óxidos presentes en la hematita original, y en el sólido residual después del proceso de lixiviación (Otros óxidos presentes) .....	97.
27.	Gráfica de porcentajes de lixiviación del material sólido contenido en hematita, después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación .....	98.
28.	Gráfica de la relación diámetro tanque/diámetro impulsor .....	126.
29.	Gráfica de densidad de las muestras de arcilla respecto a la concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	147.
30.	Gráfica de porcentaje de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> lixiviado de la hematita para las tres concentraciones de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> utilizado, en función del tiempo	
31.	Gráfica de correlación para estimar el tiempo de lixiviación completa del óxido férrico en la hematita, para las condiciones experimentales realizadas, utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo .....	148.
32.	Procedimiento para elaborar la tesis .....	150.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

33.	Diagrama esquemático del proceso de lixiviación .....	151.
34.	Diagrama de causa y efecto (Ishikawa) del proceso de lixiviación para refinación de arcillas .....	152.
35.	Pesaje de las muestras de hematita	
36.	Preparación de lote de hematita .....	153.
37.	Preparación de las soluciones de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .	
38.	Momento en el que se agrega la solución de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al lote de hematita .	154.
39.	Proceso de agitación	
40.	Aseguramiento de las placas del filtro prensa .....	155.
41.	Limpieza del filtro prensa.	
42.	Recolección de arcillas .....	156.
43.	Recolección de muestras en solución para análisis de laboratorio	
44.	Equipo de filtración de laboratorio .....	157.
45.	Equipo para medición de pH y densidad de las muestras	
46.	Muestras secas de arcilla. ....	158.
47.	Mapa de Chiquimula .....	171.
48.	Mapa de Camotán, Chiquimula .....	172.
49.	Descripción técnica del Mapa de Camotán, Chiquimula .....	173.
50.	Mapa metalogénico de Guatemala .....	174.
51.	Simbología del mapa metalogénico de Guatemala .....	175.
52.	Espectro de la composición química de la muestra de hematita.	
53.	Espectro de la composición química de la muestra de hematita tratada con la solución de ácido sulfúrico al 20% .....	177.
54.	Espectro de la composición química de la muestra de hematita tratada con la solución de ácido sulfúrico al 25%	
55.	Espectro de la composición química de la muestra de hematita tratada con la solución de ácido sulfúrico al 30% .....	178.

## TABLAS

I	Distribución de hierro y arcillas en Guatemala .....	4.
II	Clasificación de los minerales arcillosos más comunes .....	19.
III	Rango de tamices .....	40.
IV	Relaciones de lixiviación	
V	Condiciones fijas de operación del tamizador	
VI	Condiciones fijas de operación del sistema de agitación	
VII	Condiciones fijas de operación del reactor	
VIII	Condiciones fijas de operación del secador de bandejas .....	72.
IX	Condiciones y cantidades de reactivos .....	73.
X	Tabulación de relación proporcional de porcentaje de Fe(III) extractable, en función de la concentración de ácido, para un lote de 3700g de hematita a temperatura ambiente .....	77.
XI	Descripción física y química del ácido sulfúrico	
XII	Descripción química de la hematita roja .....	79.
XIII	Descripción física de la hematita roja	
XIV	Especificaciones técnicas del tamizador .....	80.
XV	Especificaciones técnicas del sistema de agitación	
XVI	Especificaciones técnicas del reactor	
XVII	Especificaciones técnicas del compresor .....	81.
XVIII	Especificaciones técnicas de la bomba de desplazamiento positivo	
XIX	Especificaciones técnicas del filtro prensa .....	82.
XX	Especificaciones técnicas del secador de bandejas .....	83.
XXI	Datos susceptibles a medición durante y después de la practica experimental, para las muestras arcillosas .....	84.
XXII	Hoja de datos para el análisis de arcillas	
XXIII	Hoja de datos para el análisis de Sulfato férrico .....	85.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

XXIV	Porcentaje de refinación de arcillas en función de las variaciones en el contenido de $Fe_2O_3$ en la hematita, para las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado, y en función del tiempo .....	91.
XXV	Correlaciones polinomiales y puntos de inflexión de las curvas de tiempo en función del porcentaje de refinación, para cada concentración de ácido .....	92.
XXVI	Porcentaje de óxido férrico residual en arcillas para las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado, y en función del tiempo ...	93.
XXVII	Porcentaje en peso del material sólido en hematita residual, en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación	
XXVIII	Relación de extracción de material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación, en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación .....	95.
XXIX	Porcentajes de lixiviación del material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación, en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación .....	96.
XXX	Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores .....	131.
XXXI	Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores .....	132.
XXXII	Porcentaje de $Fe_2O_3$ remanente en las muestras de arcilla empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo .....	133.
XXXIII	Datos intermedios totales de porcentaje de $Fe_2O_3$ remanente en las arcillas, empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo	
XXXIV	Fuentes de variación de porcentaje de $Fe_2O_3$ remanente en las arcillas empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido), en función del tiempo .....	134.
XXXV	Masa y volumen de picnómetro	

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

XXXVI	Datos para cálculo de densidad de las arcillas con el matraz de Le'Chatellier	
XXXVII	Volúmenes de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , agua y pesos teóricos de hematita para el tamaño de lote	
XXXVIII	Recopilación de datos de muestras de arcilla .....	135.
XLIX	Porcentaje en peso del material sólido en hematita residual en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación ....	136.
XL	Recopilación de datos para muestras de sulfato férrico .....	137.
XLI	Recopilación de datos para muestras de sulfato férrico, solución de ácido sulfúrico 20% .....	138.
XLII	Datos del cálculo de la densidad de la solución de sulfato férrico .....	139.
XLIII	Datos del cálculo de la concentración de Fe(III) en solución .....	140.
XLIV	Datos totales para la determinación del porcentaje de refinación de arcillas en función de las variaciones en el contenido de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en la hematita para las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado y en función del tiempo .....	141.
XLV	Datos para determinar la relación de extracción de material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación .....	142.
XLVI	Datos del cálculo en la recuperación de arcillas	
XLVII	Porcentaje de extracción de óxido férrico de la hematita utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo	
XLVIII	Estimación del tiempo de extracción total de óxido férrico de la hematita utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo .....	143.
XLIX	Estimación del punto de inflexión de las curvas de: “porcentaje de refinación de arcillas (óxido de hierro extraído) empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación”	

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

L	Características físicas de la hematita	
LI	Características físicas de las soluciones de ácido sulfúrico .....	144.
LII	Dimensiones de reactor	
LIII	Volumen y altura de operación para cada concentración de ácido	
LIV	Datos intermedios para la determinación de potencia, según la concentración de solución de ácido sulfúrico utilizado .....	145
LV	Valores de potencia, No. de revoluciones de propulsor, viscosidad de solución y No.Re para cada concentración de ácido sulfúrico .....	146.
LVI	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 30min	
LVII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 60 min ....	161.
LVIII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 90min	
LIX	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 120min	
LX	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 30min .....	162.
LXI	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de Ácido 25%, 60min	
LXII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 90min .....	163.
LXIII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 120min	
LXIV	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de Ácido 30%, 30min ....	164.
LXV	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 60min	
LXVI	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 90min .....	165.
LXVII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 120min ...	166.
LXVIII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2 -20%, 0.5 horas	
LXIX	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 1 hora ...	167.
LXX	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2 -20%, 1.5 horas	
LXXI	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2 -20%, 2 horas .	168.
LXXII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 3 horas	
LXXIII	Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2 -20%, 7 horas .	169.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
Ksd	Sierra Madre y grupo Yojoa
Qa	Aluviones cuaternarios
Pzm	Esquistos y gnesses de cuarzo
Qt	Depósitos de Talus
pH	Potencial de hidrógeno
plg	Pulgada
"	Pulgada
cm	Centímetro
mm	Milímetro
m	Metro
g	Gramo
k	Kilo
μ	Nano
C	Celsius
°	Grado
'	Minuto
min	Minuto
"	Segundo
s	Segundo
Å	Armstrong
%	Porcentaje
φ	Abertura
φ	Diámetro
LL	Límite líquido
Ip	Índice de plasticidad
No.	Número
rpm	Revoluciones por minuto
Pa	Pascal
hp	Horse power
cp	Centipoise
ml	Mililitro
A	Amperio

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

---

V	Voltio
L	Litro
psig	Libras por pulgada cuadrada manométrica
bar	Bares
lb	Libra
Hz	Hertz
$d_i$	Diámetro del impulsor
$d_p$	Diámetro de la partícula
g	Aceleración de la gravedad
$g_c$	Factor de conversión
$H_i$	Hipótesis alternativa
$H_o$	Hipótesis nula
$P$	Potencia del agitador transmitida al fluido o lodos.
$P_o$	Número de Potencia, adimensional
$Re_p$	Número de Reynolds de la partícula
$S_s$	Cantidad de compuesto libre de adsorbato
$S_{hL}$	Número de Sherwood de la fase líquida
$Sc_L$	Número de Schmidt de la fase líquida
$T$	Diámetro del tanque / Temperatura absoluta para difusión
$V_{tS}$	Velocidad terminal de asentamiento de esferas simples
$\rho_m$	Densidad de la suspensión debajo de $Z'$
$v_m$	Volumen de la suspensión
$\phi_{Sm}$	Fracción volumen de sólidos en la suspensión debajo de $Z'$ , adimensional
$\mu_l$	Viscosidad del solvente
$\Delta\rho$	Densidad de la partícula/sólido menos densidad del solvente
$\rho_l$	Densidad del solvente

$\phi_{ss}$  Fracción volumen de sólidos en el lecho de sólidos, después de la sedimentación final en un líquido tranquilo.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## GLOSARIO

Adsorción	Proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material.
Aluvión	Material detrítico transportado y depositado transitoria o permanentemente por una corriente de agua, que puede ser repentina y provocar inundaciones.
Basamento	Cuerpo de la columna que comprende la basa y el pedestal. Soporte de una escultura, un arco, etc.
Briozoo	Grupo de invertebrados acuáticos de unos 0, 5 mm de longitud que se caracterizan por tener una corona de tentáculos rodeando la boca y por formar colonias fijas a todo tipo de superficies
Calcáreo	Dícese del material que posee gran porcentaje de cal incluida en su estructura.
Cartografía	Disciplina que integra ciencia, técnica y arte, que trata de la representación de la Tierra sobre un mapa
Chamota	Materiales cerámicos que han sido cocidos, molidos y reducidos a granos de varios grosores y se utiliza como desengrasante.
Coalescencia	Proceso mediante el cual las gotas de agua dentro de una nube chocan entre sí formando gotas de un tamaño mayor.
Concreción	Acumulación de partículas en una masa compacta, formada por depósito o desecación.
Conchoidal	Fractura de superficie curva lisa
Eflorescencia	Conversión espontánea de ciertas sales en polvo, al perder el agua de la cristalización.
Enmienda	Sustancia que se mezcla con las tierras para modificar favorablemente sus propiedades y hacerlas más productivas.
Estratigrafía	Rama de la geología que trata del estudio e interpretación de las rocas

sedimentarias estratificadas, y de la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal; cartografía y correlación de las unidades estratificadas de rocas.

Facie	Cuerpos sedimentarios con características homogéneas que pueden ser definidos y separados de otros por su geometría, litología, estructuras sedimentarias, fósiles, etc., y se forman bajo ciertos procesos de sedimentación que se han mantenido durante un tiempo determinado.
Filón	Masa metalífera o pétreo que rellena una antigua quiebra de las rocas en los terrenos
Ígneo	Se dice de las rocas volcánicas procedentes de la masa en fusión existente en el interior de la Tierra.
Intrusión	Masa de roca consolidada por cristalización de materia fundida (magma), a cierta profundidad bajo la superficie de la Tierra.
Limo	Material suelto con una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla. Es un sedimento clástico incoherente transportado en suspensión por los ríos y por el viento
Mena	Mineral del que se puede extraer un elemento, un metal generalmente, por contenerlo en cantidad suficiente para ser aprovechado.
Micela	Conglomerado de moléculas que constituye una de las fases de los coloides.
Operaciones de Adsorción	Son aquellas operaciones que explotan la capacidad especial de ciertos sólidos, para hacer que sustancias específicas de una solución se concentren en la superficie de la misma .
Paleografía	Estudio de la escritura antigua; es la ciencia que tiene por objeto conocer y descifrar los escritos de épocas anteriores a la nuestra
Roleo	Elemento decorativo realizado mediante elementos enrollados que se puede disponer en capiteles o lienzos exteriores de los muros, conteniendo fundamentalmente motivos vegetales y, a veces, animales.
Sinterizar	Producir piezas de gran resistencia y dureza calentando, sin llegar a la

temperatura de fusión, conglomerados de polvo, generalmente metálicos, a los que se ha modelado por presión:

- Talud                      Inclinación de un terreno o del paramento de un muro. Vertiente submarina que desciende rápidamente desde el borde de la plataforma continental a profundidades de más de 2,000 metros.
- Tixotrópico              Propiedad de un gel (fluido no newtoniano) que al ser agitado, pasa al estado líquido, volviendo por sí mismo al estado coloidal cuando se le deja en reposo; también es un fenómeno que se da en el cemento aún no fraguado y en las mezclas de aceite y limaduras de hierro situadas en un campo magnético.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de graduación consistió en evaluar el método de refinación de arcillas provenientes de hematita mediante la lixiviación de óxido férrico con ácido sulfúrico, para esto se estudiaron tres muestras del mineral, proveniente de Camotán, Chiquimula, en donde el método experimental se inició seleccionando el tamaño de lote y partícula más adecuado para llevar a cabo la reacción.

En el equipo de lixiviación del laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ingeniería, la hematita tamizada se hizo reaccionar con soluciones de ácido sulfúrico a tres diferentes concentraciones (20, 25 y 30% de ácido en volumen), de esta reacción se formó una solución de sulfato férrico debido a la interacción química entre óxido de hierro presente en la hematita y el ácido sulfúrico que funcionó como agente extractor de hierro.

Para determinar el tiempo y concentración de coadyuvante óptimo para esta reacción de lixiviación, se realizaron tres corridas, una para cada concentración de ácido, tomando cada 30, 60, 90 y 120 minutos, alícuotas de la solución obtenida, a partir del momento en el que inició la reacción.

Las alícuotas ya filtradas fueron analizadas por medio de fluorescencia de rayos X para determinar el % Fe(III) presente en ellas, además de determinar sus densidades y valores de pH.

En el proceso a nivel planta piloto, se separó, por medio de un filtro prensa la solución madre, compuesta por sulfato férrico y trazas de ácido, las arcillas contenidas en el filtro fueron posteriormente lavadas para eliminar la acidez y se secaron en un

horno a 200°C, para finalmente analizar su composición química por medio de fluorescencia de rayos X.

De los datos obtenidos, se realizaron varias correlaciones gráficas, de las que se obtuvo que el mejor porcentaje de eliminación de óxido férrico de las muestras arcillosas, se dio al utilizar una solución de ácido sulfúrico al 20%, al fin del proceso de reacción.

Con base en estos resultados y al análisis estadístico, se corroboró la hipótesis alternativa, ya que existen variaciones significativas en el porcentaje de refinación de arcillas con el cambio de concentración de solvente extractor en función del tiempo.

## OBJETIVOS

### General

Evaluar la técnica de refinación de arcillas provenientes de hematita roja mediante lixiviación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con ácido sulfúrico a diferentes concentraciones a nivel de planta piloto.

### Específicos

1. Determinar el porcentaje de refinación de arcillas en función de las variaciones en el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la hematita, para las tres concentraciones de ácido sulfúrico utilizado, en función del tiempo a nivel de planta piloto.
2. Evaluar la eficiencia del proceso de refinación de arcillas por medio del porcentaje de óxido férrico residual empleando tres concentraciones diferentes de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación para las condiciones de operación utilizadas.
3. Determinar la composición química de la hematita residual después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico utilizado, para un tiempo de reacción de tres horas, a nivel de planta piloto.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## **HIPÓTESIS EXPERIMENTAL**

Existen variaciones significativas en el porcentaje de refinación de arcillas , con el cambio de concentración de solvente extractor en función del tiempo.

### **Hipótesis estadísticas**

#### **Ha**

Sí hay diferencias significativas en la refinación de arcillas utilizando el método de lixiviación de hierro, mediante el cambio de concentración de solvente extractor en función del tiempo.

#### **Ho**

No hay diferencias significativas.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## INTRODUCCIÓN

Guatemala, cuenta con diversidad de sectores industriales que aportan bases sólidas para crear una Nación económicamente estable. Un ejemplo de ello es la inclinación por el aprovechamiento de tierras que se da gracias al incremento que los procesos mineros han tenido a nivel mundial, y ahora inicia el ascenso de un vuelo exitoso para el desarrollo de la población, produciendo ingresos y empleos desde hace algunos años, principalmente en la explotación de minerales no metálicos y materiales de construcción, etc.

En el país existen varias minas que presentan conformaciones de hematita, compuestas principalmente por óxido de hierro y que presentan un gran número de materiales adicionales tales como silicatos, magnesio, aluminio, zinc y otros, por lo cual es necesario un proceso de separación y purificación que permita obtener una buena separación de arcillas y de óxido de hierro proveniente de hematitas rojas.

En la industria de la construcción, las arcillas juegan un papel importante, pues con estas se elaboran los distintos tipos de ladrillos, tales como los de alta resistencia, refractarios, ácidos, básicos y neutros.

Con el método de refinación de arcillas se pretende separar el óxido de hierro presente en la hematita, de las arcillas, esto por medio de la interacción química entre el mineral de hematita y un agente extractor (ácido sulfúrico) a diferentes concentraciones de éste, provocando la formación de sulfato de hierro en solución ácida y dejando de esta forma las arcillas libres de óxido de hierro.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

El estudio consistió en tomar muestras de hematita roja provenientes de la mina “Quebrada María” ubicada en Camotán, Chiquimula, que contienen en promedio un 37.37% de óxido de hierro, determinando por medio de la experimentación a nivel planta piloto, las variables fundamentales para optimizar y desarrollar el proceso de refinación de arcillas por el método de lixiviación de hierro con ácido sulfúrico, con el fin de comprobar si el mineral obtenido como arcilla puede ser empleado en diversos procesos, tales como, la fabricación de productos cerámicos, en la industria del vidrio y de papel, en la preparación de bentonas, de suspensiones tixotrópicas y catalizadores de contacto y tierras adsorbentes, dependiendo de la composición química de las arcillas que se obtengan.

## 1. GEOLOGÍA DE CHIQUIMULA

La geología se refiere a los orígenes de los suelos, la era de inicio de su formación, identificando fallas sísmicas y volcanes localizados en cada departamento.

Dentro de las características más relevantes está su conformación geológica, la cuál le ha dado a Chiquimula una diversidad mineralógica verdaderamente rica. Depósitos de hierro, plomo, vestigios de oro y plata, son algunos de ellos. Un sector que alude a esta riqueza es el de las montañas de Concepción las Minas.

La naturaleza entre sierras y mesetas volcánicas del antiguo período Terciario, época de gran actividad volcánica, datan la mayoría de los materiales superficiales de Chiquimula. Hoy, es una zona caracterizada por cerros que muestran los efectos de una intensa erosión, que alterna con mesetas y valles fluviales agrestes e imponentes.

En Chiquimula, se pueden encontrar en gran parte de su territorio, carbonatos neocomianos-campanianos que incluye formaciones Cobán, Ixcoy, Campur, Sierra Madre y grupo Yojoa (Ksd); rocas del período paleozóico, donde predominan las rocas metamórficas sin dividir, filitas, esquistas cloríticas y granatíferos, esquistos y gnesses de cuarzo (Pzm); los Aluviones Cuaternarios (Qa); y Predominan las fallas geológicas: inferidas y cubiertas, que se pueden observar gran cantidad de ella

Las fallas geológicas contribuyen a formar el fuerte escenario que caracteriza al departamento. Algunas, como la de Jocotán, controlan valles alargados, rectilíneos, surcados por ríos y cubiertos del agobiante Chaparral Espinoso. Otras han provocado colosales hundimientos, que han contribuido a modelar el lugar.

**Nota:** El mapa del departamento de Chiquimula se encuentra en la figura 46 de la sección de Anexos.

## **1.1. Geología Regional de Camotán, Chiquimula**

Las paredes del valle del río Grande o Camotán están conformadas por un conjunto de rocas metamórficas de bajo grado de color gris a verde y lustre satinado con lentes de cuarcita. La composición mineralógica desde el punto de vista megascópico presenta alto contenido de sericita en las filitas, así mismo se encuentran estructuras de tipo “Augen” de cuarzo. El color de las capas rojas encontradas es debido a la abundancia de hematita en una matriz arcillosa, el cemento de hematita es muy poco.

En algunos sectores se presentan relieves residuales de rocas calcáreas y a lo largo del corredor Norte, de la línea geológica Palaluya – El Florido, se encuentran tan solo en las cercanías de las localidades de Veguitas y Los Planes lo mismo que en las cercanías de San Juan Ermita.

Se encuentra en contacto fallado hacia el Sur con las rocas del Cretáceo de composición calcárea principalmente por la Falla de Jocotán.

Además cerca del corredor Norte las calizas provenientes de la Formación Atima (Cobán) tienen afloramientos aislados en el valle del río Grande o Camotán al noreste de la población de Camotán.

## **1.2. Geología general de la Línea Panaluya – El Florido**

El corredor Norte se ubica en una de las grandes fallas satélites del límite de placas del Caribe y Centroamérica más concretamente entre el bloque comprendido entre los lineamientos de la Falla de Jocotán y Motagua. Este bloque está constituido principalmente por un basamento metamórfico y algunas cuñas sedimentarias del Cretáceo así como rocas volcánicas recientes del Terciario Superior y la base del Cuaternario. También se destacan algunos cuerpos graníticos en forma de stocks

como los que se ubican al Norte de Jocotán y un cuerpo granítico de tamaño batolítico un poco al Sur de La Fragua.

Más recientemente se han desarrollado algunas franjas de depósitos aluviales paralelos a los ríos principales por los cuáles transcurre la línea como son el río Grande de Zacapa y el río Grande o Camotán y el río Grande o Motagua.

### **1.2.1. Formación Atima (Cobán)**

Consiste principalmente de una caliza gris clara, hay cantidades subordinadas de dolomita localmente y está intercalada con lentes delgados de lutitas (shales), lodolitas y calizas conglomeráticas. Localmente hay zonas fosilíferas con abundante contenido de rudistas, pelesípodos y gasterópodos, muchos fosilizados en calcita y pobremente preservados.

La composición petrográfica es de micritas y esparitas de grano fino así mismo hay bioesparitas que contienen algas, traqueópodos y fragmentos de briozoos. También hay calcedonia y pedernal como material de fosilización. También se han registrado algunos afloramientos de grawacas y calcarenitas, estas rocas contienen principalmente mica y arena fina proveniente de rocas metamórficas de bajo grado así como algunas venas de cuarzo. Estudios paleontológicos revelan que esta formación tiene una edad del Albiano, esta formación es correlacionable con la Formación Cobán.

El espesor de la unidad en el área de Chiquimula es de aproximadamente 300m, pero su exposición no permite una medida completa de la columna. Algunos tales como Crane le asignan un espesor de 1700 m.

### 1.3. Distribución de hierro y arcillas en Guatemala

Tabla I. Distribución de hierro y arcillas en Guatemala

Mineral	Localización	Uso industrial
Hierro	Chiquimula	Fabricación de acero, ferroaleaciones para imanes, alambre y varillas de construcción, planchas, láminas
Arcillas (Mosmorolinita)	Chiquimula Baja Verapaz	Alfarería y cerámica, baldosas, ladrillos para hornos, acabado superficial de papel, carga para linóleo y hule
Caolín	Chiquimula Santa Rosa	Arcilla pura muy blanca, fabricación de porcelana y baldosas, crisoles para fundición, bujías para motores, carga en fabricación de papel y hule, cosméticos, pulimentador, refractarios, vidrio, fabricación de azulejos
Feldespatos	Baja Verapaz	Fabricación de vidrio, porcelana azulejos, ladrillo vidriado, artefactos sanitarios, lana de vidrio, abrasivo en compuestos limpiadores y jabones.
Bentonita	Chiquimula	Lodos de perforación, refinado de petróleo, blanqueador de aceites y grasas, carga de papel y jabón, agente desentintador, sustituto del talco, aglutinante para arena de moldeo en fundición, agente de fundición para esmaltes, ablandador de agua, repellos.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM)

### 1.4. Vías de comunicación de Chiquimula

El departamento de Chiquimula está situado en la región III o Nor- Oriental en la República de Guatemala, lindante con la frontera de Honduras y El Salvador. Su territorio forma parte de las tierras altas, por lo que se caracteriza por tener montañas de cierta altura y ríos cortos pero caudalosos.

Se ubica en la latitud 14° 47' 58" y longitud 89° 32' 37". Cuenta con una extensión territorial de 2,376 kilómetros cuadrados.

Las ciudades más importantes son Chiquimula, la cabecera departamental, Esquipulas y Alotepeque. Lo cruzan de norte a sur dos importantes ejes de comunicación: la línea ferroviaria Zacapa-San Salvador y la carretera meridiana que

enlaza Zacapa con la frontera salvadoreña. Las principales carreteras que atraviesan el departamento son la ruta nacional 18 que parte de la capital y conduce a Esquipulas, la ruta nacional 20 que proviene de Zacapa, pasa por Concepción Las Minas y conduce a la frontera y la CA-10, que pasa por Esquipulas y llega a la frontera con Honduras.

Quien se dirige a Chiquimula por carretera, tiene que recorrer 168 kilómetros desde la ciudad de Guatemala.

Según datos obtenidos en la Dirección General de Caminos, hasta el año 1997, este departamento cuenta con 139 km. de asfalto, 311 km. de terracería, y 101 km. de caminos rurales.

Tanto las vías antes mencionadas como los accesos propiamente a los sitios de explotación se encuentran permanentemente en buen estado de conservación, lo que permite su uso durante todo del año.

#### **1.4.1. Vías de comunicación de Camotán, Chiquimula**

Camotán, cabecera municipal del municipio de su mismo nombre, está en una pequeña planicie alongada entre la ruta nacional 21 y el río Grande de Camotán que pasa por el lado norte. Tiene una extensión territorial de 232 km<sup>2</sup> Latitud 14° 93' 24”, longitud 89° 22' 24”. La altura de la cabecera municipal es de 450 m.s.n.m. Limita al norte con el municipio de la Unión, Zacapa; al sur con los municipios de Jocotán y Esquipulas; al este con la república de Honduras y al oeste con el municipio de Jocotán. Se llega por la Ruta Norte-21.

**Nota:** El mapa del área de Camotán, Chiquimula se encuentra en la figura 47 de la sección de Anexos.

## **1.5. Climatología y temperatura**

La climatología de la zona depende principalmente del régimen de lluvias, la temperatura y la presión atmosférica, Su territorio es quebrado, y debido a que el macizo montañoso es irregular, pues sus alturas varían entre los 1,350 metros sobre el nivel del mar en Olopa, y los 435 en San José La Arada, su clima aunque es bastante parejo, tiene algunas variantes. Las temperaturas varían entre 20 y 35 grados Celsius, y el clima es subtropical seco.

## **1.6. Hidrografía**

Dentro del departamento existen dos cuencas hidrográficas principales, cuyas corrientes son tributarias de las que hacia el norte descargan sus aguas en el mar Caribe, y por el sur, después de atravesar la república de El Salvador, desembocan en el Océano Pacífico.

En el municipio, penetra procedente de Honduras, el río Copán, conocido después como río Grande o Camotán y aguas abajo como Jocotán, el que después de recibir numerosos afluentes, descarga en el río Grande, el cuál dentro del territorio de Zacapa se denomina Grande o de Zacapa. Hacia el sureste y sur del departamento y sirviendo parcialmente de linderos con Honduras y El Salvador, respectivamente, están los ríos: Frío y Sescapa, Anguiatú y Ostúa, entre los principales de la región.

### **1.6.1. Aluviones Recientes**

Las cuencas de los ríos San José, Shutaque, Carcar y quebrada Torja forman franjas aluviales extensas conformadas principalmente por depósitos aluviales generalmente de régimen torrencial en los canales activos. En algunos

sectores se presentan en forma de conos de deyección coalescentes. También se registran depósitos aluviales en la llanura aluvial del río Motagua.

#### **1.6.2. Depósitos de Talus (Qt)**

Corresponden a acumulaciones de materiales conformados principalmente por cantos angulares con escasa matriz, ubicados normalmente hacia las zonas de transición entre la pendiente fuerte de las rocas resistentes y las llanuras aluviales. Se ubican fundamentalmente en el valle del río Camotán.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## 2. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE ARCILLAS

### 2.1. Caracterización geológica de arcillas

Para llegar a la caracterización de los diferentes aspectos geológicos de un yacimiento, se deben considerar las siguientes fases:

- **Fase I: Exploración.** Establecimiento de criterios de selección de las formaciones geológicas favorables para la presencia de materiales arcillosos. Exploración y cartografía geológica de dichas formaciones. Levantamiento de columnas estratigráficas seriadas y detalladas.
- **Fase II: Ambientes Sedimentarios.** En el caso de unidades geológicas sedimentarias: establecimiento de ambientes y facies de sedimentación, intentando llegar a una reconstrucción paleogeográfica de la cuenca donde se depositaron estos materiales. En el caso de materiales arcillosos producto de la meteorización de rocas ígneas o metamórficas, establecimiento de las características petrográficas de la roca parental.
- **Fase III: Muestras.** Sondeos, análisis de laboratorio, ensayos tecnológicos y evaluación de reservas.

La caracterización geológica debe involucrar además los siguientes aspectos: localización, extensión, infraestructura vial, fisiografía; relaciones estructurales (pliegues y fallas) y las relaciones geológicas (estratigrafía).

### **2.1.1. Localización y extensión**

Aquí se debe establecer cuidadosamente la localización de todas las áreas potenciales para ser estudiadas en una zona de influencia dada, sin descuidar el análisis de la infraestructura vial y de servicios con que cuenta cada sub-zona.

#### **2.1.1.1.Fisiografía**

Al analizar la fisiografía del área, es importante establecer la morfología general, y deducir las condiciones que llevaron a esta conformación, geomorfología de la región a estudiar, pues son los factores determinantes de la meteorización y por ende de la formación de arcillas. La climatología incluirá la compilación y análisis de los datos registrados de pluviometría, termometría y la geomorfología incluirá el estudio y análisis de los aspectos de relieve, drenaje, meteorización física, meteorización química y análisis modal de algunas rocas para determinar su descomposición.

#### **2.1.1.2.Ambientes de sedimentación. Facies**

El ambiente de sedimentación de cada unidad geológica que contiene materiales arcillosos o limosos de posible utilidad debe ser analizado, para llegar, si es posible, a una reconstrucción paleogeográfica de la cuenca donde se depositaron dichos materiales y cuál fue su zona de aportes, pues esto puede dar indicaciones sobre sus posibles componentes y origen.

### **2.1.2. Relaciones geológicas**

Las relaciones geológicas que ofrece cada zona deben obtenerse como resultado de una exploración geológica detallada de las áreas propuestas para estudio, de manera simultánea con su correspondiente cartografía geológica, en

la cuál se determinarán los diferentes estratos o niveles arcillosos, su continuidad lateral, su espesor y la presencia de intercalaciones de materiales arcillosos, limosos o arenosos junto con su potencialidad, grado de cementación y consistencia. El análisis geológico de la zona de estudio incluirá las características petrográficas, las relaciones estratigráficas y las estructuras geológicas, tanto primarias como secundarias, que ofrezcan las unidades geológicas expuestas.

Deberán igualmente hacerse anotaciones sobre el material de los posibles descapotes, su composición, espesor, espesor de horizonte A del suelo o capa vegetal, vocación o uso actual del suelo en el área de estudio.

#### **2.1.2.1. Petrográficas**

Se debe analizar cuidadosamente la petrografía de las rocas expuestas en cada área, ya que ellas ofrecen variadas características y orígenes que inciden en la presencia de materiales arcillosos, limosos o arenosos.

En las diferentes zonas pueden existir desde rocas sedimentarias consolidadas en cuencas continentales a marinas o depósitos no consolidados de formación reciente, hasta rocas ígneas metamórficas y volcánicas y cada una de ellas exige un estudio y análisis diferente como posible productora de materiales arcillosos.

#### **2.1.2.2. Estratigráficas**

Las relaciones estratigráficas están dadas por la secuencia espacio-temporal que ocupan las rocas objeto de estudio. Esto significa que será importante establecer en la caracterización geológica, cuáles son las unidades

infra y supra yacentes a los estratos de interés, a qué unidad geológica corresponden y qué edad se ha calculado para su formación.

### **2.1.3. Relaciones estructurales**

Las relaciones estructurales (pliegues, fallas, lineamientos, diaclasamientos, diques, cuellos volcánicos, etc.) merecen atención en el estudio, ya que pueden tener gran incidencia en la formación o alteración de materiales arcillosos, espesamiento, pinchamiento o pérdida de capas arcillosas.

### **2.1.4. Muestreo**

Del análisis geológico se desprenden los criterios de selección de los sitios de muestreo y la metodología a utilizar en el mismo.

La selección de los sitios de muestreo debe tener en cuenta la presencia en el área a explorar, taludes de minas (en actividad o abandonadas), taludes que forman los cauces del drenaje natural de la zona, taludes artificiales que se han formado por la construcción de carreteras, presas, puentes elevados u otras obras civiles. En estos sitios el muestreo se debe realizar en lo posible, haciendo canales de 10cm\*20cm\*10cm, en la pared del talud, de manera sensiblemente perpendicular al piso y techo, con una recolección del total del material extraído del canal y mediante roleos y cuarteos sucesivos, obtener una muestra de entre 3 y 4kg .

En los sitios donde existen afloramientos naturales se debe tener en cuenta limpiar previamente hasta obtener una superficie que muestre el material fresco, en lo posible no meteorizado. En las áreas que no ofrezcan ni los unos ni los otros se debe programar un muestreo con base en apiques, trincheras o sondeos mecánicos.

Un apique es un hueco vertical que se abre a pica y pala generalmente, y que puede tener un área variable, que en general puede ser de 40cm\*60cm y llegar hasta una profundidad que permita reconocer y obtener muestras de cada uno de los estratos o capas arcillosos, limosos o arenosos.

Una trinchera es un hueco horizontal generalmente de 40cm\*40cm\*50cm, por un largo variable que generalmente es de varios metros y que permite verificar continuidad o variaciones laterales que pueda presentar un material geológico.

Para efectos de los sondeos mecánicos se puede utilizar cualquier equipo rotatorio de perforación que permita la toma de muestras lo más inalteradas posibles. Como en términos generales los materiales arcillosos o limosos son blandos, puede utilizarse el sistema de barrenos tipo Auger (manual o mecánico), estableciendo previamente un retículo geométrico a partir del cuál se obtengan muestras con un espaciamiento tal que permita conocer y muestrear el material de toda el área y responda al estado de la exploración que se requiera.

## **2.2. Composición mineralógica**

La composición mineralógica comprende la identificación de los minerales arcillosos simples e ínter estratificados (Caolinitas, micas, esmectitas, cloritas) y de los demás minerales presentes en mayor o menor proporción (Cuarzo, feldespatos, minerales de hierro, piritas, yeso, carbonatos, etc.).

Su estudio se realizará a partir del *análisis por difracción de rayos X en muestras tanto orientadas como sin orientación definida, complementada en lo posible con microscopía óptica y microscopía electrónica EDAX.*

### 2.2.1. Minerales arcillosos

Actualmente se conoce que *los minerales arcillosos son numerosos y difieren entre sí por su forma, estructura, apilamiento de las capas y por la simetría de la red que forman entre sí.* Estas redes estructurales no son perfectas, generalmente presentan huecos por falta de iones o por sustitución de unos iones por otros que distorsionan la estructura y generan diferencias entre familias.

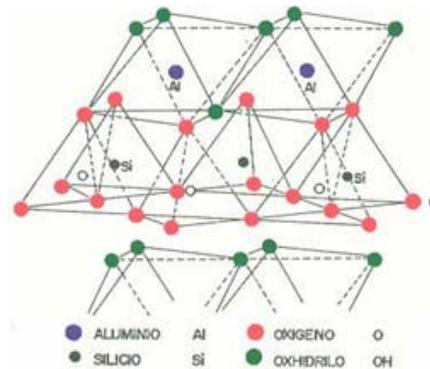
Es bueno tener presente que *en los depósitos naturales siempre coexisten varias clases de minerales arcillosos simples e ínter estratificados acompañados de óxidos de hierro o de titanio, de arenas, piritas, yeso, caliza, feldespatos y otros minerales; por lo tanto, cuando se afronta el estudio de un depósito arcilloso no debe limitarse a los minerales que están en mayor proporción, porque, aún cuando en general las propiedades de los materiales se ven influidos notablemente por los constituyentes mayoritarios, los menores pueden representar un papel importante.* De acuerdo con su distribución estructural los minerales arcillosos se pueden dividir en las siguientes familias o grupos:

#### 2.2.1.1. Filosilicatos bilaminares

Están formados por dos capas una tetraédrica y otra octaédrica por eso reciben los nombres de bilaminares, 1:1 ó T:O (Figura 1). Generalmente los tetraedros son de silicio rodeados de oxígeno, aún cuando en ocasiones el silicio puede estar sustituido por iones de aluminio o de hierro. Los octaedros pueden tener como ión predominante el aluminio o el magnesio y están rodeados de oxígeno o de hidroxilos (OH). Cuando el ión dominante es el aluminio la lámina que se forma se denomina dioctaédrica y cuando el ión dominante es el magnesio se dice que la capa es trioctaédrica. Los diferentes

iones están apilados en tal forma, que se mantiene la electronegatividad entre ellos.

Figura 1. Estructura elemental de la Caolinita



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 3

Las capas tetraédrica y octaédrica constituyen una lámina. La separación entre láminas es del orden de 7 Armstrong (Å). En esta clasificación se distinguen dos familias de minerales la de la Kandita o Caolinita (dioctaédricos) y la de las Serpentinias (trioctaédrico).

#### 2.2.1.1.1. Familia de la Kandita.

Según Besoain (1985) son posiblemente los minerales arcillosos más extendidos y frecuentes en el mundo y comprende la Caolinita, la Haloisita, la Nacrita y la Dickita.

Una arcilla que presente abundancia de caolinita, mayor al 20%, tiende a aumentar su resistencia a la cocción, es decir requiere temperaturas más altas, esto se conoce como poder de refractariedad o refractariedad simplemente, ofrece baja plasticidad, se seca fácilmente y no tiene buena resistencia mecánica.

#### **2.2.1.1.2. Familia de las serpentinas.**

Incluye los minerales trioctaédricos denominados Crisotilo, Lizardita, Antigorita y Bertierina. La composición química de una Serpentina puede expresarse como  $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

#### **2.2.1.2. Filosilicatos trilaminares**

Comprenden tres familias: esmectitas, micas y minerales fibrosos o Atapulgitas. Cada lámina está formada por dos capas de tetraedros de sílice que encierran una capa de octaedros de alúmina o de magnesia, por esta razón se les denomina “trilaminares”, 2:1 ó T:0:T.

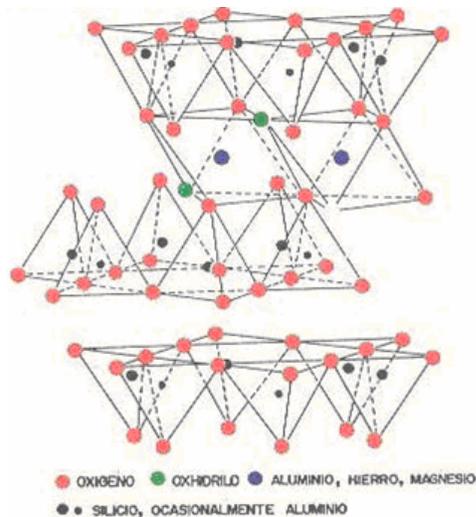
Las láminas no son eléctricamente neutras debido a que se presentan sustituciones de unos iones por otros de diferente carga. La separación entre láminas es del orden de  $10\text{Å}$ .

##### **2.2.1.2.1. Familia de las Esmectitas o minerales expandibles.**

Incluye especies dioctaédricas como la Montmorillonita (Figura 2), la Nontronita y la Beidelita y trioctaédricas como la Saponita, la Sauconita y la Hectorita. Se les da el nombre de Bentonitas, su composición química varía por la capacidad de sustitución elemental y de absorción de agua; una fórmula general para una esmectita es:  $\text{Al}_2\text{-xMg}_x\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ .

Presentan estructuras que permiten que el agua penetre entre las láminas tetraédricas y octaédricas a través de enlaces de hidrógeno, lo cuál determina una expansión de la celda cristalográfica y explica su alto índice de plasticidad.

Figura 2. Estructura elemental de la montmorillonita.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 3

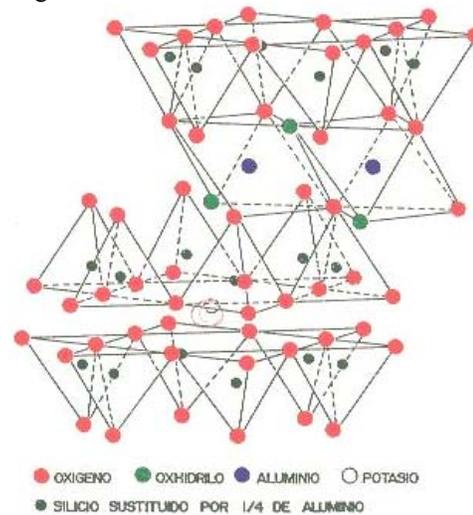
#### 2.2.1.2.2. Familia de las micas.

Esta familia sigue el mismo esquema de cristalización de la anterior pero los minerales no son expandibles; a este grupo pertenecen las vermiculitas, el talco, la pirofillita, la illita, la moscovita

En la celda cristalográfica de las micas algunos silicios pueden estar reemplazados por aluminio y la diferencia de carga está balanceada por iones potasio. La composición química de la illita puede expresarse como  $K Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$ .

El índice de plasticidad de los minerales de esta familia es menor que el de las esmectitas, pero su plasticidad aumenta a medida que disminuye el tamaño del grano; la presencia de potasio en la estructura de la illita le provee cierto poder fundente en el proceso cerámico.

Figura 3. Estructura elemental de la illita.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 3.

#### 2.2.1.2.3. Familia de las Atapulgitas. Minerales fibrosos.

Pertenece a esta familia la Sepiolita y la Paligorskita que están formadas por láminas discontinuas tipo mica. Estas se presentan como fibras. En su estructura se encuentra una capa basal continua de tetraedros y capas discontinuas periódicamente de octaedros.

#### 2.2.1.3. Cloritas.

En este grupo las láminas están compuestas por dos capas tetraédricas y dos octaédricas (Se les denomina 2:1:1 ó T:0:T:0), estas no son eléctricamente neutras debido a sustituciones de unos cationes por otros de distinta carga pero de tamaño semejante. La neutralidad se logra por grupos hidróxidos y por cationes interláminares como sodio, potasio, calcio o magnesio. La separación entre láminas es del orden de 14Å o más.

La fórmula general de las cloritas es  $R_5^{++} R^{+++} Si_3 R^{+++} O_{10} (OH)_8$  en la cuál  $R^{++}$  puede ser Fe o Mg y  $R^{+++}$  puede ser Al ó Fe.

Tabla II. Clasificación de los minerales arcillosos más comunes

	DIOCTAÉDRICOS		TRIAOCTAÉDRICOS	
BILÁMINARES T:O 1:1	KANDITAS	Clorititas Nacrita Dickrita Halloisita	SERPENTINAS	Antigonrita Crisotilo Lizardita Bertierina
	MICAS	Illita Moscovita Paragonita Pirofillita	MICAS	Flogopita Biotita Lepidolita Talco
TRILÁMINARES ST:O:T 2:1	ESMECTITAS (Expansibles)	Montmorillonita Beidelita Nontronita Vermiculita	ESMECTITAS	Saponita Hectorita Sauconita
	ATAPULGITAS (Fibroso)	Paligorskita	ATAPULGITAS	Sepiolita
T:O:T:O 2:1:1	CLORITAS	Sudoitas	CLORITAS	Clinocloros Ploclorita

Fuente: Referencia Bibliográfica No. 3

#### 2.2.1.4.Otros minerales.

*Otros minerales contenidos en las arcillas son: feldespatos, sílice, carbonato de calcio, mineral de hierro, ilmenita, yeso, mineral en estado coloidal como el alofano y los óxidos hidratados.*

- **Feldespatos:** Son aluminosilicatos constituidos por redes tridimensionales de tetraedros de sílice en los cuáles parte del silicio se encuentra sustituido por aluminio, lo que origina una deficiencia de carga que se ve compensada con iones potasio, sodio y calcio, y ocasionalmente con bario o estroncio. Químicamente se dividen en tres grupos:
  - **Potásicos:** Ortoclasa y microclina; la composición de la ortoclasa es:  $K_2O Al_2O_3 6SiO_2$ .

- **Calcosódicos:** Albita y anortita; la composición de la albita es:  $\text{Na Al Si}_3\text{O}_8$
- **Bóricos:** Celsiana e hialofana;  $\text{BaO Al}_2\text{O}_3 2\text{SiO}_2$

Estos minerales presentan alguna plasticidad pero muy baja, por eso pueden considerarse antiplásticos o desgrasantes, además como funden o sinterizan a las temperaturas comunes en el proceso cerámico se usan principalmente como fundentes.

- **La sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en forma de cuarzo.** Constituye el mineral más abundante en la naturaleza, de cristalización más perfecta y de gran pureza. Es el principal constituyente de las arenas. Los cristales de cuarzo cambian su estructura cristalina a  $573^\circ\text{C}$  produciendo cambios de volumen lo cuál afecta el producto cerámico (Figura 4). Por eso debe programarse una menor velocidad de calentamiento entre  $500$  y  $600^\circ\text{C}$  cuando se efectúa el proceso cerámico para que la pasta que los contiene no sufra rupturas por esa situación. Las partículas de sílice no presentan plasticidad y por eso son usadas comúnmente como antiplástico.

Figura 4. Arreglos cristalinos del cuarzo.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 3

#### **2.2.1.4.1. Minerales de hierro.**

Los minerales de hierro que se encuentran comúnmente en las arcillas son: *hematita, magnetita, goethita y pirita*. Las tres primeras son las principales responsables del color de las arcillas y de sus productos.

##### **2.2.1.4.1.1. Hierro**

Entre los elementos de la corteza terrestre, el hierro se ubica en el cuarto lugar en orden de abundancia, constituyendo cerca del cinco por ciento del total. Gran parte de esta cantidad está concentrada en media docena de minerales formadores de roca dispersos entre millones de kilómetros cúbicos de roca que son usualmente bastante inaccesibles.

Actualmente, de los casi trescientos minerales portadores de hierro, *sólo la hematita, magnetita, goethita y siderita contienen porcentajes de hierro suficientemente abundantes para ser considerados como yacimientos económicos.*

##### **2.2.1.4.1.2. Hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).**

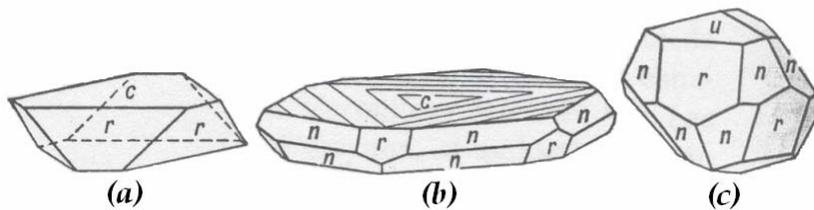
Es el mineral y mena más abundante de hierro, compuesta por óxido de hierro, FeO<sub>3</sub>. Ampliamente distribuida, se encuentra en rocas de todas las épocas, raro en las rocas intrusivas, pero común en las extrusivas, ya que requiere de un ambiente oxidante. También es común en sedimentarias por diagenesis de limonita; en metamórfica de bajo grado y como producto de sublimación en las exhalaciones volcánicas. Denominada originalmente por Teofrasto y Plinio como

haematitis, rojo-sangre en color (de aquí su nombre) y sólida en textura.

Se distingue por pertenecer a los tres grupos de roca: ígneas, sedimentarias y metamórficas, de lustre metálico a opaco, sin hendiduras, con dureza entre 5.5 y 6.5 (Escala de Mohs).

Posee una composición química pura de Fe (70%) y O (30%), puede contener Ti y Mg, por lo que está relacionada con la ilmenita. De textura dura, con densidad entre 4.9-5.3, cuyo color puede estar entre gris acero, oscuro o negro; cuando es terroso su color es rojo.

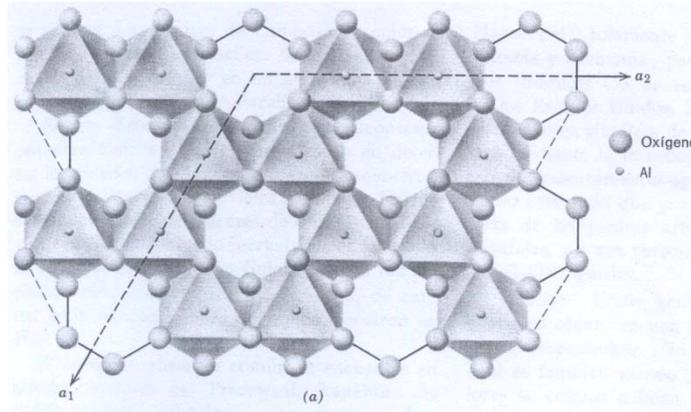
Figura 5. Cristales de Hematites.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 5.

- **Cristalografía;** Hexagonal-R;  $32/m$ , grupo espacial:  $R\bar{3}c$ . Los cristales, normalmente tabulares gruesos o delgados  $\{0001\}$ . Los planos basales muestran frecuentemente marcas triangulares y las aristas de las tablas pueden estar biseladas con formas romboédricas (Fig. 2.5.b). Las tablas finas se agrupan en rosetas (Fig. 2.5.c). Los cristales distintamente romboédricos son raros y tienen ángulos casi cúbicos con maclas casi polisintéticas en  $\{0001\}$  y  $\{1011\}$ .
- **$R\bar{3}c$ :**  $a = 5.04 \text{ \AA}$ ,  $c = 13.76 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ;  $Z = 6$
- **Líneas de DRX (intensidades):**  $d$ 's: 2.69(10) - 2.52(8) - 2.21(4) - 1.843(6) - 1.697(7).

Figura 6. Estructura del grupo hematites. Lámina basal de octaedros en el Corindón ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) o hematites,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  con una vacante octaédrica por cada dos octaedros con Al o  $\text{Fe}^{3+}$  en el centro.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 5.

Lentamente soluble en ácido clorhídrico, sí a la solución se le añade ferrocianuro potásico, se forma un precipitado azul (ensayo de hierro férrico).

Se utiliza para la fabricación de pigmentos y agentes para pulido (en joyería). Para saber si realmente es hematita, sólo se tiene que frotar el mineral contra una placa blanca, y se formará una pequeña cantidad de polvo rojo.

Las principales variedades de este mineral son:

- Hematita roja anhidra, que forma concreciones de brillo metálico.
  - *La variedad terrosa (ocres rojos), que son una mezcla de hematita y arcilla.*
- La hematita parda o limonita son óxidos de hierro hidratados entre cuyas variedades figura la goethita, la lepidocrocita, etcétera.

Su extracción se lleva a cabo mediante el sistema de Cantera, una modalidad de explotación minera a cielo abierto. Las más grandes cantidades de hematita se encuentran en las rocas sedimentarias, generalmente en forma de capas muy finas de cuarzo, o cuarzo criptocristalino.

La hematita es usualmente terrosa y ocre cuando se deposita en condiciones sedimentarias, pero cuando cristaliza bajo las altas temperaturas y presiones que prevalecen a profundidad en el interior de la Tierra, puede formar placas cristalinas brillantes.

Figura 7. Hematita roja.



**Fuente:** Referencia Electrónica No. 3

En las rocas que muestran delgadas placas paralelas se denominan de tipo esquistoso. A causa de que las placas son como espejos, esta variedad es llamada especularita o hematita especular (del latín speculum, espejo)

Algunas veces se encuentran cristales octaedrales que semejan magnetita, pero que no son magnéticos y que además poseen la característica raya rojiza de la hematita. Esos cristales, llamados martita, son pseudomorfos de hematita a partir de magnetita, estos fueron cristales de magnetita que por alteración química cambiaron a hematita sin cambiar su forma externa.

#### **2.2.1.4.2. Minerales en estado coloidal.**

Prácticamente todos los minerales nombrados hasta ahora se presentan en estado cristalino. Sin embargo, en las arcillas y en los suelos existe un grupo abundante de minerales en estado coloidal a amorfo. Los principales son el alofano y los óxidos hidratados de hierro y de aluminio.

- **Alofano**
- **Óxidos hidratados de hierro y aluminio**

#### **2.2.1.4.3. Minerales estratificados.**

En los suelos y en las arcillas pueden presentarse frecuentemente minerales de capas mixtas con partículas sin orientación geométrica preferida o con presencia de varios silicatos láminares semejantes.

### **2.2.2. Importancia del análisis mineralógico**

La presencia o ausencia de cualquiera de estos minerales condiciona el comportamiento de las pastas en todo el proceso o influye en algunos casos en las propiedades del producto y en la durabilidad del mismo.

Actualmente la composición mineralógica se realiza utilizando técnicas de difracción de rayos X, complementadas con análisis químicos, térmicos, petrográfico y de microscopía electrónica.

La *difracción de rayos X* para muestras materiales de grano muy fino, es una técnica instrumental que permite identificar fases cristalinas o planos cristalográficos en muestras sólidas de compuestos químicos o minerales.

La técnica está basada en la ley de Bragg que establece una relación directa entre el ángulo de incidencia de los rayos X y la distancia entre dos planos del cristal. Es una técnica especialmente útil para identificar minerales de arcilla puesto que estos se caracterizan por su pequeño tamaño, difícil de observar al microscopio, y el cuál es precisamente el requerido para el análisis por rayos X.

### **2.3. Constitución de los minerales de arcilla**

La constitución de las arcillas se explica considerando las circunstancias de su formación. A pH adecuado, el sol de sílice,  $\text{Si(OH)}_4$ , formado por el ataque de la roca feldespática se polimerizaría y otro tanto ocurriría con el sol de alúmina. La interacción de los productos de ambos procesos de policondensación daría lugar a moléculas gigantes y coloidales que primero coagularían y después perderían su carácter amorfo al tener tiempo de orientarse los poliedros fundamentales para dar los diferentes minerales de arcilla.

La *caolinita* y *montmorillonita* son los dos minerales-tipo de arcilla más característicos e importantes. De ellos se derivan otras especies, que también forman parte de las arcillas, y cuyas diferencias estructurales provienen de la interposición sustituyente de octaedros de alúmina en las capas de tetraedros de sílice, o viceversa, o de la constitución de unidades de sílice o de alúmina por otros hidróxidos también coloidales, presentes al momento de la policondensación.

### **2.4. Caracterización física y tecnológica (análisis y ensayo de las arcillas)**

Las propiedades tecnológicas de los materiales cerámicos están constituidas por el conjunto de propiedades físicas y fisicoquímicas que determinan el comportamiento de sus formulaciones; aquí se toman en cuenta sólo las que son

importantes en el proceso cerámico de las arcillas para cerámica roja utilizada para la fabricación de ladrillos, tejas, bloques, etc.

El análisis químico es útil para conocer la composición, particularmente a lo que se refiere a la presencia de impurezas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ti O}_2$ ,  $\text{SO}_4\text{Ca}$ , etc.). Se practican:

- **La determinación de la humedad** a  $105^\circ$ , y
- **La pérdida por calcinación**, que corresponde al agua combinada más el  $\text{CO}_2$  de los carbonatos, más la materia orgánica (humus). El residuo se ataca por fusión con carbonato sodopotásico y se valoran en la disolución acuosa del fundido los componentes de la arcilla. Se emplea también el *método Seger* con ácido sulfúrico caliente:
  - En el residuo insoluble quedan el cuarzo y la sílice de la arcilla. Tratando ese residuo con disolución de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  caliente, se disuelve la sílice de la arcilla y queda el cuarzo insoluble.
  - En la disolución pasan como sulfatos el Ca y el Mg, que se valoran y calculan como carbonatos; los álcalis, que se calculan como feldespato; la alúmina, que se adscribe a feldespato la parte correspondiente a la proporción de álcalis, y el resto, con el  $\text{SiO}_2$  soluble, a arcilla.

Así se obtiene, aproximadamente, la “composición potencial” o molecular del producto.

El conocimiento de estas propiedades proporciona una herramienta útil en la formulación de las pastas cerámicas, puesto que permite evaluar la conveniencia de incluir un material dado y su proporción, para la obtención de un fin determinado.

- Del análisis químico de la arcilla se puede deducir su comportamiento refractario, por el método propuesto por LÜDWING. Se funda en la observación de que la *refractariedad aumenta con el contenido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y disminuye con el de*

*óxidos de silicio, alcalinos, alcalinotérreos,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ , etc.*, evaluados los contenidos en fracciones molares y analizados con el gráfico de Lüdwing

#### **2.4.1. Color en crudo y en quema**

Los minerales de hierro presentes naturalmente en la arcilla son los principales, más no los únicos, responsables del color en seco, el cuál también se ve influido por el tamaño de grano y su distribución, así como por el estado de oxidación de las especies químicas presentes. *En arcillas de tonalidades grises, azules o verdosas el hierro se encuentra en su estado de oxidación  $Fe^{+2}$  (ferroso) y en las rojas está en grado de oxidación  $Fe^{+3}$  (férrico).*

Algunos de los minerales presentes son perfectamente blancos, pero en la mezcla natural aparentan diferentes colores debido a factores ópticos. Otros componentes son naturalmente coloreados y lo comunican en mayor o menor grado a todo el mineral. Las sustancias orgánicas que frecuentemente se encuentran en las arcillas naturales y que pueden comunicar color son los ácidos húmicos, las algas y algunas manifestaciones del carbono; generalmente la coloración debida a estas sustancias desaparece por calentamiento y de ahí las diferencias encontradas entre la sustancia seca y la calcinada.

El color después de ser sometido a cocción es una de las propiedades que más interesa en la industria cerámica pues *si quema color piel o crema puede utilizarse para la producción de baldosas para pisos o paredes, pero si quema rojo en diversas intensidades su uso está limitado a la producción de cerámica como ladrillos y bloques y otros productos para construcción como baldosas, tejas y tubos de gres*; también en nuestro país es usada para la producción de objetos varios en forma artesanal.

El color del objeto cocido se afecta por el ambiente oxidante o reductor del horno y por el grado de cocción, siendo más intenso a medida que aumenta el grado de vitrificación; por eso en ocasiones el color de los objetos producidos industrialmente difiere del determinado en condiciones de laboratorio. Además el color superficial del objeto suele ser diferente del de la parte interior pues las superficies están sometidas a diferentes reacciones según sea mayor o menor la acción oxidante o reductora de la atmósfera del horno.

#### **2.4.2. Carácter micelar del sistema agua-arcilla**

La estructura y naturaleza de las uniones entre las capas explica que los minerales de arcilla sean fácilmente desintegrables por planos de exfoliación originando partículas de carácter laminar y de tamaño tan pequeño ( $10^{-2}$  a  $10^{-6}$  mm) que cae dentro de las dimensiones coloidales. Estas partículas se dispersan fácilmente en el agua formando *micelas* cargadas negativamente, de estructura compleja.

#### **2.4.3. Tamaño de partícula (Ver capítulo 3 )**

#### **2.4.4. Plasticidad**

Significa que estas mezclas minerales pueden absorber agua, hasta que con una cantidad dada adquieren un estado tal que por aplicación de presión se deforman sin romperse y conservan la nueva forma cuando desaparece la presión.

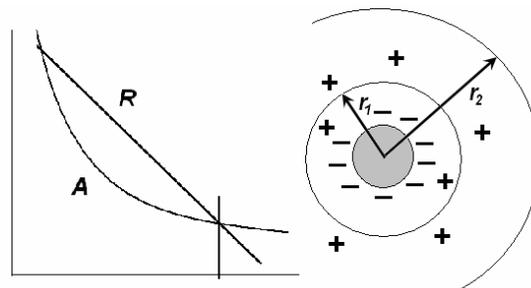
La plasticidad está íntimamente ligada a las relaciones fisicoquímicas entre las partículas coloidales y el agua y de las partículas entre sí, por lo tanto depende de la composición mineralógica, del tamaño y distribución de las

partículas, de su área superficial, de su pH y de la tensión superficial del agua (Singer, 1963).

Esta propiedad no se debe solo a la presencia de los minerales arcillosos sino también a la materia orgánica presente naturalmente en el material, la cuál se encuentra en forma coloidal y se incrementa durante el almacenamiento previo al procesamiento, bajo las condiciones necesarias de humedad y temperatura. Por consiguiente, también está relacionada con la resistencia mecánica del material.

Podría decirse que no habría plasticidad si no se diera la forma tabular de las partículas de la arcilla, su carácter coloidal y la sucesión de fenómenos que la acompañan. Fijación de  $\text{OH}^-$ , atracción de iones positivos y formación de una biosfera envolviendo a la partícula (Fig. 8). Por eso toda acción que modifique alguna de esas condiciones influye sobre la plasticidad.

Figura 8. Micela de arcilla



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 10

Uno de los procedimientos para estimar la plasticidad de los materiales arcillosos es el planteado por Atterberg, con el cuál pueden determinarse con cierta seguridad los siguientes límites de cambio:

- Límite líquido (LL).
- Límite plástico (LP).
- Índice de plasticidad (IP).

- Límites de contracción o de retracción.

#### 2.4.5. Densidad

La densidad es la masa por unidad de volumen y a este valor contribuyen las densidades de todos los componentes de la mezcla natural de una arcilla, ya sean minerales o materia orgánica.

La densidad de la arcilla se afecta en el proceso de cocción debido a las diferentes reacciones que suceden entre los diversos constituyentes tales como pérdida de agua de constitución, los cambios de estado y formación de nuevas fases, la oxidaciones y la descomposición con desprendimiento de gases, vitrificación, cambios de volumen, etc.

- El volumen bruto de un sólido poroso es el volumen del sólido y de toda la porosidad que hay dentro de sus partículas.
- El volumen aparente es el volumen del sólido y de los poros inaccesibles por un fluido.
- El volumen neto o último es el volumen de las fases sólidas.
- La **densidad aparente** de las partículas es igual a la densidad neta cuando todos los poros en las partículas son penetrados por el fluido y el volumen del fluido desplazado es igual al volumen de las fases sólidas. Para esta determinación de picnometría líquida que determina la densidad aparente promedio de las partículas; pesando el picnómetro calibrado que contiene el polvo, se agrega el líquido de densidad conocida y se vuelve a pesar el picnómetro.

La exactitud depende de que las partículas se humecten completamente y se elimine totalmente el aire entre ellas. *Otro método muy usado es el del Matraz de LeChatelier que puede describirse así:*

Al matraz que contiene un volumen determinado de un líquido orgánico no volátil de densidad conocida se añade una cantidad exactamente pesada de mineral finamente pulverizado y se dejan en contacto mínimo tres horas a temperatura controlada, para asegurar humectación completa. Al final del tiempo se lee el volumen desplazado por el mineral y se calcula la densidad a dicha temperatura.

#### **2.4.6. Contracciones en crudo y en quema**

El grado de contracción que sufren las arcillas en los procesos de secado y de cocción, pueden ser determinados según la variación de las dimensiones de un objeto elaborado con la mezcla de arcilla y agua utilizando el método descrito en la norma ASTM C-326.

#### **2.4.7. Contracción de húmedo a seco.**

Inicialmente en la pasta húmeda todas las partículas sólidas se encuentran rodeadas de películas de agua. En el proceso de secado la arcilla húmeda cede agua gradualmente, primero a velocidad constante y posteriormente con velocidad decreciente hasta que ya no tiene agua libre, cuanto más agua ha absorbido la arcilla tanto mayor será su contracción.

#### **2.4.8. Contracción en cocido o al fuego.**

En el proceso de cocción se registran variaciones en el volumen de la arcilla debido a las reacciones químicas que se producen entre sus componentes y a expansiones o contracciones generadas en arreglos estructurales. En general la arcilla cocida ocupa menos volumen que cuando está seca, aún cuando es posible que por ejemplo, los gases que se desprenden queden retenidos así sea por poco tiempo y ayuden a mantener el volumen.

Figura 9. Etapas en la desecación de una pasta de arcilla-agua (Norton). La pérdida de agua eleva la capacidad y la acción mutua entre las partículas



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 10

#### **Etapas del proceso de cocido:**

- Fase de desecación (Hasta los 120°C)
- Fase de deshidratación (120-250°C)
- Fase de descomposición (termina en los 700°C)
- Fase de reacción (700-1200°C)
- Fase de fusión (Inicia hacia los 1500°C)

Una alta contracción total indica que el cuerpo resultante es denso y fuerte pero que puede romperse por agrietamiento. Para contrarrestar la excesiva contracción se debe agregar una cantidad adecuada de materiales que reducen la contracción, materiales desengrasantes, tales como el cuarzo o restos de anteriores productos ya cocidos, denominados comúnmente como chamota, que permitan mantener la forma y el tamaño apropiados sin que se formen grietas o se produzca deformaciones.

#### **2.5. Otras propiedades de los materiales de arcilla**

Hay un grupo de propiedades interesantes, de importancia práctica, como lo son:

- **Facilidad con que pueden dializarse las dispersiones de arcilla** (que emigran al ánodo donde se centra la suspensión en mineral puro), utilizado industrialmente para purificar caolines.

- **Capacidad adsorbente** consecuencia de su gran desarrollo superficial, por lo que se emplean ciertas arcillas como catalizadores y como decolorantes de grasas y fracciones petrolíferas, en particular los minerales de tipo montmorillonítico, de estructura más suelta y accesible;
- **Capacidad de cambio de los cationes**, importante en los silicatos llamados zeolitas.

## 2.6. Industrias derivadas de la arcilla

- Se aprovecha la capacidad adsorbente de los minerales de estructura montmorillonítica para preparara **catalizadores de contacto** y “**tierras**” **adsorbentes** (decoloranes). Para mejorar las propiedades adsorbentes naturales, se muelen las tierras y se las trata con ácidos fuertes (ClH, SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub>) para eliminar adsorbatos, como el Ca, que bloquean parte de la estructura accesible.
- La **preparación de suspensiones tixotrópicas** (minerales montmorilloníticos y beidelíticos) para lubricar las cabezas perforadoras de terrenos y arrastrar al exterior las materias arrancadas. Se favorece la tixotropía adicionando taninos que son adsorbidos por la montmorillonita.
- Productos llamados “**bentonas**”, que se obtienen haciendo reaccionar bentonita sódica con aminas de diez o más átomos de carbono. Empapan muy bien los aceites minerales y dan grasas consistentes muy estables (usualmente se utilizan jabones para este fin). Las bentonas se adicionan momentos antes de la polimerización, como carga, mejorando la elasticidad y resistencia al envejecimiento. Otras aplicaciones se fundan en su capacidad de melificar en líquidos no polares.
- **Cerámica**, designación que deriva del griego *keramos*, que significa objeto de barro. La industria cerámica, aplicación más importante de arcillas, consiste en amasar agua y arcilla, y aprovechando el grado de plasticidad de estas masas de

arcilla caolínica, conformar objetos (ladrillos, azulejos, etc.), que luego se secan y cuecen para estabilizar la forma pretendida.

### 2.6.1. Clasificación de las arcillas de uso cerámico

Principalmente se utilizan dos formas de clasificación: la composición y las propiedades prácticas, aunque ambas están ligadas.

#### 2.6.1.1. Por su composición:

- **Arcillas grasas:** las muy puras, muy ricas en sustancia arcillosa.
- **Micáceas o alcalinas:** Contienen hasta 20% de mica, junto a otras impurezas en menor proporción.
- **Siliciosas:** Tienen hasta un 50% de sílice (cuarzo).
- **Ferríticas:** Con proporciones importantes de óxido o hidróxido de hierro.
- **Margosas (margas):** Con abundante proporción de carbonato de calcio.
- **Salinas:** Que contienen ClNa, ClK, yeso, etc.
- Es frecuente la materia orgánica (humus): Son tierras de sabor

#### 2.6.1.2. Por sus propiedades prácticas:

- **Fusibles:** Son de mala calidad refractaria; abundan impurezas alcalinas (micas)
- **Vitrificables:** Tienen menos álcalis que las anteriores, por lo que se vitrifican a más temperatura que aquellas, aunque antes de los 1500°.
- **Refractarias:** Comienzan a fundir por encima de los 1500°.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

### 3. GRANULOMETRÍA DE MINERALES

Muchas de las propiedades de las arcillas y de los productos cerámicos están relacionadas con el tamaño y la distribución de las partículas presentes. Entre ellas las más importantes son: plasticidad, porosidad, gravedad específica, homogeneidad, permeabilidad y penetrabilidad.

El análisis granulométrico debe tener en cuenta tanto el tamaño de las partículas como la proporción en que se encuentran. Según James (1988) se da el nombre de partícula a una unidad sólida separable, que puede ser de composición simple o compuesta. A los grupos de partículas que se comportan como una gran pseudo-partícula, se les da el nombre de aglomerados.

Si las partículas se mantienen fuertemente unidas y no se dispersan fácilmente, se denominan agregados, en los cuáles las uniones se han desarrollado por reacción química o sinterización.

*Debido a la enorme complejidad que presenta cada arcilla es necesario establecer experimentalmente en cada caso cuál es la mejor distribución de tamaños de partícula para el proceso que se va a aplicar.*

#### 3.1. Análisis granulométrico

Es el proceso para determinar la proporción (gradación del suelo) en que participan los granos del suelo, en función de sus tamaños. La gradación por tamaños es diferente al término geológico en el cuál se alude a los procesos de construcción (agradación) y la destrucción (degradación) del relieve, por fuerzas y procesos tales como tectonismo, vulcanismo, erosión, sedimentación, etc.

### **3.2. Métodos de análisis granulométrico**

Para los análisis granulométricos las normas ASTM D422 y C325, utilizan dos métodos que son:

- El método de tamizado para las partículas grueso–granulares (gravas, arenas) y,
- El método de sedimentación para la fracción fina del suelo (limos, arcillas), que no son discriminables por tamizado (Tema que no se tratará en este trabajo)

#### **3.2.1. Método del tamizado**

El tamizado es un método de separación de partículas basado exclusivamente en el tamaño de las mismas. Se realiza en húmedo, se efectúa con adición de agua al material, con el fin de que el líquido arrastre a través del tamiz a las partículas más finas, si bien, lo más frecuente es operar en seco. El tamizado en seco se aplica a materias que contienen poca humedad natural o que fueron desecadas anteriormente.

Se fundamenta en el hecho de que al pasar un material debidamente dispersado, a través de un tamiz de apertura nominal conocida, las partículas menores de este tamaño pasarán por él. Si se colocan sucesivamente tamices de aperturas conocidas en tamaños de orificio cada vez más pequeños, las partículas del material se separarán selectivamente en fracciones comprendidas entre dos diámetros esféricos equivalentes a la apertura nominal de los dos tamices sucesivos, por medio de sacudidas horizontales y golpes verticales, mecánicos o manuales, logrando que el suelo pase por la serie de tamices, de arriba abajo, para luego pesar por separado el suelo retenido en cada malla.

Los tamices industriales se construyen con tela metálica, telas de seda o plástico, barras metálicas, placas metálicas perforadas, o alambres de sección transversal triangular. Se utilizan diferentes metales, siendo el acero al carbono y el acero inoxidable los más frecuentes.

Figura 10. Tamiz industrial



Fuente: Centro de Investigaciones de ingeniería (USAC)

Las designaciones de los tamices patrones americanos más usados y su tamaño de apertura, según la especificación ASTM E11 están comprendidos entre 4 plg. y 400 mallas, y se dispone de tamices comerciales de tela metálica con aberturas tan pequeñas como  $1\mu\text{m}$ .

Los tamices más finos, aproximadamente de 150 mallas no se utilizan habitualmente debido que con partículas muy finas generalmente resultan más económicos otros métodos de separación.

La separación en el intervalo de tamaños entre 4 y 48 mallas recibe el nombre de tamizado fino y para tamaños inferiores a 48 mallas el tamizado se considera ultra-fino.

Tabla III. Rango de tamices

Descripción	$\phi$ abertura (mm)	Descripción	$\phi$ abertura ( $\mu$ m)
3plg	75	No. 16	1180
2plg	50	No. 20	850
1½plg	37.5	No. 30	600
1plg	25	No. 40	425
<sup>3</sup> / <sub>4</sub> plg	19	No. 50	300
<sup>3</sup> / <sub>8</sub> plg	9.5	No. 60	250
No. 4	4.75	No. 80	180
No. 8	2.36	No. 100	150
No.10	2	No. 140	106
		No. 200	75
		No. 325	45

Fuente: Referencia electrónica No. 7

El método ASTM D422 define las fracciones según los tamaños así:

- **Gravilla:** pasa tamiz de 76,2 mm. (3 pulgadas) y es retenida por tamiz No. 4 (4,75mm).
- **Arena gruesa:** pasa tamiz No. 4 y es retenida por tamiz No. 10.
- **Arena mediana:** pasa tamiz No. 10 y es retenida por tamiz No. 40.
- **Arena fina:** pasa tamiz No. 40 y es retenida por tamiz No. 200.

### 3.2.2. Método de sedimentación

Son dos, ambos basados en las características de la sedimentación de las partículas del suelo en un medio acuoso. Se aplican al “suelo fino”, es decir, al que ha quedado en el fondo de los tamices y que se denomina “pasa – 200”, material constituido por limos y arcillas.

Los tiempos de análisis fluctúan desde pocos minutos a varias horas dependiendo como ya se dijo de la densidad y el tamaño de las partículas. Para la determinación del punto final se usan diferentes instrumentos como el hidrómetro y el sedígrafo.

El hidrómetro es un densímetro que se usa corrientemente en determinaciones de rutina y que permite conocer grupos de partículas que según su tamaño se denomina como:

**Arenas:** cuando el tamaño fluctúa entre 2 y 0,05 mm.

**Limos:** cuando el tamaño fluctúa entre 0,05 y 0,002 mm.

**Arcillas:** *tamaños menores de 0,002 mm.*

### 3.2.2.1. Análisis por levigación

Permite separar granulométricamente el producto. *Se considera “arcilla” los granos de menos de 0.01mm; arcilla de menor calidad, los de 0.01-0.025mm.*

Actualmente se encuentran en el comercio equipos llamados sedígrafos que utilizan diferentes técnicas físicas para determinar el tamaño de partícula en función del tiempo de sedimentación, entre las cuáles se pueden citar técnicas de difracción láser, dispersión de rayos X y de fluctuación de la intensidad de la luz.

### 3.3. Curva granulométrica

Los resultados de los ensayos de tamizado y sedimentación se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica. La fracción gruesa tendrá denominaciones, según el sistema:

- Para el **suelo grueso–granular**, el diámetro equivalente está referido al agujero cuadrado de la malla.
- Para **finos**, al diámetro de una esfera.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## 4. LIXIVIACIÓN

Para separar el soluto deseado o eliminar un soluto indeseable de la fase sólida, ésta se pone en contacto con una fase líquida. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos se difunden desde el sólido a la fase líquida, lo que permite una separación de los componentes originales del sólido. Este proceso se llama *lixiviación líquido sólido* o simplemente, *lixiviación*. La operación unitaria se puede considerar como una *extracción*, aunque el término también se refiere a la extracción líquido-líquido. Cuando la lixiviación tiene por objeto eliminar con agua un componente indeseable de un sólido, el proceso recibe el nombre de *lavado*.

En lixiviación, la cantidad de material soluble separado es con frecuencia mayor que en el lavado de la filtración ordinaria y las propiedades de los sólidos pueden variar considerablemente durante la operación de lixiviación. Una alimentación de sólidos troceados, duros o granulados, pueden desintegrarse para formar una pulpa cuando se retira su contenido de material soluble.

### 4.1. Procesos de lixiviación para materiales inorgánicos.

Los procesos de lixiviación son de uso común en la industria metalúrgica. Los metales útiles suelen encontrarse en mezclas con grandes cantidades de constituyentes indeseables, y la lixiviación permite extraerlos en forma de sales solubles. Las sales de cobre se disuelven o se lixivian de los minerales molidos que contienen otras sustancias por medio de soluciones de ácido sulfúrico o amoniacales. Las sales de cobalto y níquel se lixivian de sus minerales con mezclas de ácido sulfúrico-amoniaco-oxígeno. La lixiviación de oro a partir de sus minerales, se basa en el uso de una solución acuosa de cianuro de sodio. El hierro se lixivía de hematitas a partir de una solución de ácido sulfúrico

### 4.2. Preparación de sólidos para la lixiviación

#### **4.2.1. Materiales inorgánicos y orgánicos.**

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

Si la materia soluble está rodeada de una matriz de materia insoluble, el disolvente se debe difundir hacia el interior para ponerse en contacto y disolver el material soluble, y después difundirse hacia afuera. Esto ocurre en muchos procesos hidrometalúrgicos, en los que se lixivian sales metálicas de minerales metálicos. En estos casos se procede a una trituración y molienda previa de los materiales para aumentar la velocidad de lixiviación, pues de esta manera las porciones solubles quedan más accesibles a la acción del disolvente.

Si la sustancia soluble está en solución sólida o ampliamente distribuida en la totalidad del sólido, la acción de lixiviación del disolvente forma canales pequeños. Esto hace que el paso de disolvente adicional resulte más fácil, por lo cual se puede prescindir de la molienda a tamaños muy pequeños.

La molienda de las partículas es innecesaria cuando el material soluble está disuelto en una solución adherida al sólido. Entonces se puede emplear un simple lavado similar al de precipitados químicos.

### 4.3. Métodos de operación en la lixiviación.

Existen varios métodos generales de operación para realizar la lixiviación en sólidos, pueden llevarse a cabo en estado no estacionario (lotes), o en estado estacionario. También se pueden usar equipos de tipo continuo o por etapas, ya sea para la operación en estado estacionario o no estacionario.

En la lixiviación en estado no estacionario, uno de los métodos más comunes empleados en la industria mineral es la *lixiviación in situ*, donde se permite que el disolvente pase por el mineral por percolación. En otros casos, el licor de lixiviación se bombea sobre una pila de mineral triturado y se recolecta al nivel del suelo a medida que escurre de dicha pila. El cobre se lixivía por este procedimiento con soluciones de ácido sulfúrico, a partir de minerales de sulfuro.

Los sólidos triturados suelen lixiviarse por percolación a través de lechos sólidos, estacionarios en recipientes con fondos perforados, para permitir el drenaje del disolvente. Los sólidos no deben ser demasiado finos, pues habría una alta resistencia al flujo. Algunas veces se colocan varios tanques en serie, que constituyen una *batería de extracción*, y se agrega disolvente nuevo al sólido que está casi extraído. Los tanques pueden ser de tipo abierto o bien cerrado, en cuyo caso se llaman *difusores*.

El disolvente fluye a través de los tanques en serie, y se extrae del tanque más recientemente cargado, lo que simula una operación continua a contracorriente. Después de que un tanque ha sido lixiviado por completo, se añade carga nueva al tanque del otro extremo, a través de tuberías múltiples, de manera que no hay necesidad de mover los tanques para la operación a contracorriente (*sistema Shanks*).

En otros procesos, las partículas de sólido triturado se desplazan en forma continua por medio de transportadores de cangilones o con alimentadores de tornillo. El disolvente fluye a contracorriente al lecho móvil.

*Los sólidos finamente molidos pueden lixiviarse en recipientes con agitación o en espesadores.* El proceso puede ser de tipo no estacionario, o bien, los recipientes se pueden colocar en serie para obtener un proceso a contracorriente por etapas.

#### **4.4. Tipos de equipo para la lixiviación.**

- Lixiviación en lechos fijos
- Lixiviación con lechos móviles
- Lixiviación agitada del sólido

##### **4.4.1. Lixiviación agitada del sólido**

*Cuando el sólido se puede moler hasta cerca de 200 mallas (0.074mm), es posible mantenerlo en suspensión aplicándole agitación, y lograr una lixiviación continua a contracorriente, colocando varios agitadores en serie con tanques de sedimentación o espesadores entre cada agitador.*

#### **4.5. Variables que afectan la velocidad de lixiviación**

##### **4.5.1. Lixiviación agitada del sólido**

Al aumentar la temperatura se aumenta la velocidad porque la solubilidad es mayor, el aumento de temperatura es muy usado en procesos de reacción química. La temperatura máxima para cada sistema está limitada por: el punto de

ebullición del solvente, el punto de degradación del producto o del solvente, solubilidad de impurezas y por economía.

#### **4.5.2. Concentraciones del solvente**

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

#### **4.5.3. Tamaño de partícula**

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

#### **4.5.4. Porosidad**

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

#### **4.5.5. Agitación**

La agitación da una mayor eficiencia en la extracción debido a que disminuye la película de fluido que cubre la superficie del sólido en reposo y que actúa como una resistencia a la difusión.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## 5. AGITACIÓN Y MEZCLADO

En las industrias químicas de procesos y en otras semejantes, muchas operaciones dependen en alto grado de la agitación y mezclado eficaz de los fluidos. Generalmente, la *agitación* se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El *mezclado* implica partir de dos fases individuales, tales como un fluido y un sólido pulverizado o dos fluidos, y lograr que ambas fases se distribuyan al azar entre sí.

Existen varios objetivos en la agitación de fluidos y algunos de ellos son:

- Disolución de sólidos en líquidos, tales como sal en agua.
- Dispersión de un gas en un líquido en forma de burbujas pequeñas, como en el caso del oxígeno del aire en una suspensión de microorganismos para la fermentación, o para el proceso de activación de lodos en el tratamiento de aguas de desperdicio.
- Suspensión de partículas sólidas finas en un líquido, tal como en la hidrogenación catalítica de un líquido, donde las partículas del catalizador sólido y las burbujas de hidrógeno se dispersan en un líquido.
- Agitación de un fluido para aumentar la transferencia de calor entre dicho fluido y un serpentín o una camisa en las paredes del recipiente.

### 5.1. Equipo para la agitación

Generalmente, los líquidos se agitan en un recipiente cilíndrico que puede estar cerrado o abierto. La altura del líquido debe equivaler en forma aproximada al diámetro del tanque. Un motor eléctrico impulsa al propulsor agitador, que está montado en un eje.

- Agitador propulsor de tres aspas
- Agitadores de paletas
- Agitadores de turbina
- Agitadores de banda helicoidal

Figura 11. Agitador propulsor de tres aspas.

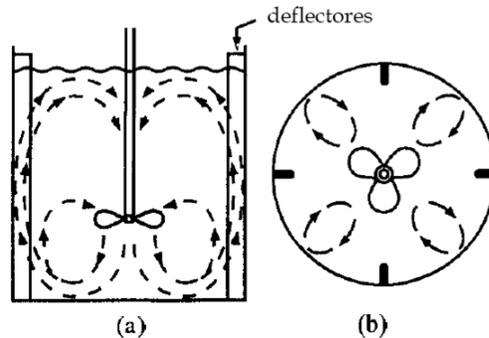


Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería (USAC).

### 5.1.1. Agitador propulsor de tres aspas

Existen varios tipos de agitadores de uso común. Uno de los más conocidos es el agitador de tres aspas de tipo marino, similar a la hélice de un motor fuera de borda para lanchas. El agitador puede ser móvil para introducirlo lateralmente en el tanque o estar montado en la pared de un tanque abierto, en posición desplazada del centro. Estos agitadores giran a velocidades de 400 a 1750 rpm (revoluciones por minuto) y son propios para líquidos de baja viscosidad. En la Figura 12 se muestra el patrón de flujo en un tanque con deflectores y con un propulsor colocado en el centro del tanque.

Figura 12. Tanque con deflectores y agitador de turbina de paletas planas con patrón de flujo axial.  
a) vista lateral, b) vista del fondo.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 4

Este tipo de patrón de flujo se llama flujo *axial*, ya que el fluido fluye axialmente hacia abajo en el eje central o eje de la hélice y hacia arriba a los lados del tanque, como se muestra en la citada figura.

Figura 13. Agitador de tres aspas.



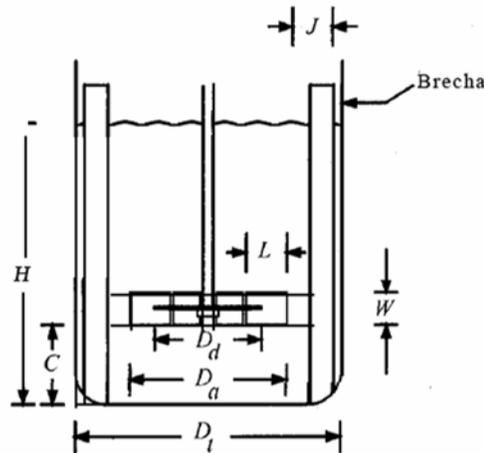
Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería (USAC).

## 5.2. Selección del agitador e intervalos de viscosidad.

La viscosidad del fluido es uno de los diferentes factores que influyen en la selección del tipo de agitador. *Los propulsores se usan para viscosidades del fluido inferiores a 3 Pa\*s (3000 cp)*; las turbinas pueden usarse por debajo de unos 100 Pa\*s (100000 cp); las paletas modificadas como los agitadores tipo ancla se pueden usar desde más de 50 Pa\*s hasta unos 500 Pa\*s (500000 cp); los agitadores helicoidales y de tipo banda se suelen usar desde arriba de este intervalo hasta cerca de 1000 Pa\*s y se han utilizado hasta para más de 25000 Pas.

Para viscosidades mayores de unos 2.5 a 5 Pa\*s (5000 cp) o más, los deflectores no se necesitan porque hay poca turbulencia.

Figura 14. Tanque con deflectores con un agitador de turbina de seis aspas con disco, que muestra las dimensiones de la turbina y el tanque.



Fuente: Referencia Bibliográfica No. 4

### 5.3. Trayectoria del flujo en la agitación

La trayectoria del flujo en un tanque de agitación depende de las propiedades del fluido, de la geometría del tanque, del tipo de deflectores y del propio agitador. Si el propulsor u otro agitador va montado verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo tipo remolino. Esto suele ser indeseable debido a que se atrapa aire, se desarrolla un vórtice considerable y ocurren oleadas y otros efectos perjudiciales, en especial cuando se opera a velocidades altas. Para evitar esto, puede usarse una posición angular desplazada del centro cuando se trata de propulsores de baja potencia. Sin embargo, para agitación vigorosa a potencias altas, las fuerzas no equilibradas pueden ser severas y limitar el uso de esas potencias.

Para lograr una agitación vigorosa con agitadores verticales, se acostumbra el empleo de deflectores para reducir el tamaño del remolino y obtener así un buen mezclado. En la Figura 14 se muestran deflectores montados en las paredes en posición vertical. Casi siempre basta con cuatro deflectores, que tengan anchura de cerca de  $\frac{1}{4}$  del diámetro del tanque para turbinas y propulsores.

El impulsor de la turbina fuerza al líquido en dirección radial hasta las paredes donde se divide, en una porción que fluye hacia arriba, hasta tocar la superficie para regresar hacia el propulsor, mientras la otra porción fluye hacia abajo. Algunas veces, cuando se trata de tanques con grandes profundidades de líquido en comparación con el diámetro del tanque, se montan dos o tres propulsores en el mismo eje, y cada uno actúa como un mezclador individual. El propulsor inferior está cerca de 1 diámetro del propulsor por arriba del fondo del tanque.

En un sistema de agitación, el gasto volumétrico del fluido que mueve el impulsor (esto es, la velocidad de circulación), es un factor muy importante para asegurarse de agitar la totalidad del volumen del mezclador en tiempo razonable. Además, la turbulencia en la corriente de agitación es decisiva para el mezclado, puesto que arrastra al material hacia la corriente. Algunos sistemas de agitación requieren una alta turbulencia con velocidades de circulación bajas; otros se basan en turbulencias bajas con altas velocidades de circulación. Esto casi siempre depende de los tipos de fluidos que se mezclan y del grado de mezclado que se solicite.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## 6. FILTRACIÓN

En la filtración, las partículas suspendidas en un fluido, ya sea líquido o gas, se separan mecánica o físicamente usando un medio poroso que retiene las partículas en forma de fase separada que permite el paso del filtrado sin sólidos. Las filtraciones comerciales cubren una amplia gama de aplicaciones. El fluido puede ser un gas o un líquido. Las partículas sólidas suspendidas pueden ser muy finas (del orden de micrómetros) o bastante grandes, muy rígidas o plásticas, esféricas o de forma muy irregular, agregados o partículas individuales. El producto valioso puede ser el filtrado sin sólidos o la torta sólida. En algunos casos, se requiere una eliminación completa de las partículas sólidas y en otros, basta con una eliminación parcial.

La alimentación o suspensión de entrada puede contener una gran carga de partículas sólidas o una proporción baja. Cuando la concentración es mínima, los filtros operan por tiempos muy largos, antes de que sea necesario limpiar el medio filtrante. Debido a la gran diversidad de problemas de filtración, se ha desarrollado un enorme número de equipos de filtración.

El equipo industrial de filtración difiere del de laboratorio únicamente en lo que respecta a la cantidad de materia que se maneja y en la necesidad de operar a costos bajos. En un embudo de Büchner el flujo del líquido a través de la tela o papel filtro se produce debido al vacío en el extremo de salida. La suspensión consta del líquido y las partículas suspendidas. Las pequeñas aberturas de los poros de la tela bloquean el paso de las partículas. Se usa un soporte con orificios bastante grandes, sobre el cuál se apoya la tela filtrante.

Las partículas sólidas se acumulan en forma de una torta de filtrado a medida que se verifica el proceso, la cuál también actúa como filtro de las partículas suspendidas. La resistencia al flujo aumenta a medida que la torta crece.

## **6.1. Clasificación de los filtros**

Existen diversos métodos para clasificar los equipos de filtración, en una de las agrupaciones, los filtros se clasifican dependiendo de que la torta de filtrado sea el producto deseado o bien el líquido transparente.

En cualquier caso, la suspensión puede tener un porcentaje de sólidos relativamente alto, lo que conduce a la formación de una torta, o a tener muy pocas partículas en suspensión. Los filtros también se clasifican de acuerdo con su ciclo de operación: por lotes, o de manera continua.

En otra clasificación, los filtros pueden ser de gravedad, donde el líquido simplemente fluye debido a la presencia de una carga hidrostática, o bien se puede usar presión o vacío para incrementar la velocidad de flujo. Un método de clasificación muy importante se basa en la colocación mecánica del medio filtrante. La tela filtrante puede estar en serie, en forma de placas planas encerradas, como hojas individuales sumergidas en la suspensión, o sobre cilindros giratorios que penetran en la suspensión.

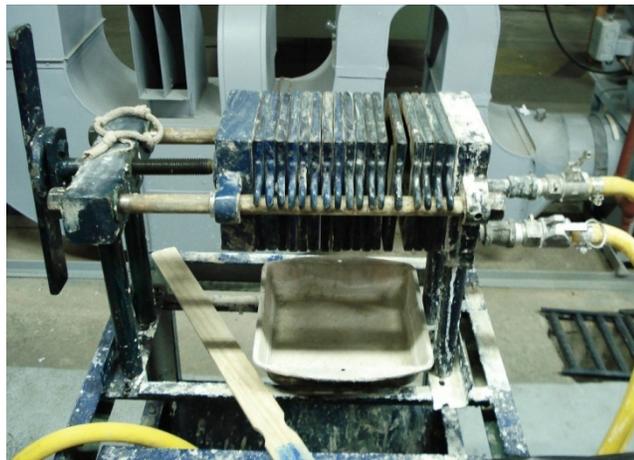
### **6.1.1. Filtros prensa de placas y marcos**

Uno de los tipos de filtros más importantes es el filtro prensa de placas y marcos. Estos filtros consisten de placas y marcos alternados con una tela filtrante a cada lado de las placas, Las placas tienen incisiones con forma de canales para drenar el filtrado en cada placa. La suspensión de alimentación se bombea en la prensa y fluye a través del conducto al interior de cada uno de los

marcos abiertos, de manera que va llenando los espacios vacíos. El filtrado fluye entre la tela filtrante y la superficie de la placa, a través de los canales y hacia el exterior, mientras los sólidos se acumulan como torta en los marcos.

La filtración continúa hasta que los marcos quedan completamente llenos de sólidos. En muchos casos, el filtro prensa tiene una descarga abierta individual para cada marco, que permite una inspección visual para verificar la transparencia del líquido filtrado. Si una de las salidas descarga líquido turbio debido a una perforación de la tela o a otras causas, se puede cerrar por separado y continuar con la operación. Cuando los espacios están totalmente llenos, las placas y los marcos se separan y se extraen las tortas. Después se vuelve a armar el filtro y se repite el ciclo. Si se desea lavar la torta, ésta se deja en los marcos y se procede a un lavado transversal.

Figura 15. Filtro prensa de laboratorio.



**Fuente:** Laboratorio de Operaciones Unitarias, Facultad de Ingeniería (USAC)

En este tipo de prensa existe un canal aparte para la entrada del agua de lavado, que penetra a la unidad y a las placas a través de aberturas situadas detrás de las telas filtrantes, en placas alternadas. El agua de lavado fluye a través de la tela, pasa por la totalidad de la torta (no por una mitad, como en la filtración), a

través de la tela filtrante, del otro lado de los marcos, y por último, pasa al canal de descarga.

Las prensas de placas y marcos presentan los inconvenientes comunes a todos los procesos por lotes. El costo de mano de obra para extraer las tortas y volver a ensamblar la unidad, más los costos fijos por tiempos muertos, pueden constituir una porción muy elevada de los costos totales de operación. Algunos modelos modernos de prensas de placas y marcos tienen un juego duplicado de marcos montados en un eje giratorio. Mientras se usa la mitad de los marcos, la otra mitad se descarga y se limpia, lo que reduce los costos de mano de obra. Existen también sistemas automatizados que se han aplicado a estos tipos de filtros.

Los filtros prensa se usan en los procesos por lotes pero no se pueden emplear para procesos de alto rendimiento. Se manejan con facilidad, son versátiles y de operación flexible y se pueden utilizar a altas presiones si es necesario, con soluciones viscosas o cuando la torta de filtro tiene una gran resistencia.

## **6.2. Aplicaciones, ventajas y desventajas del uso del filtro prensa**

### **6.2.1. Aplicaciones del filtro prensa**

- Cuando el líquido turbio tiene gran cantidad de precipitado.
- Cuando la suspensión es difícil de filtrar.
- Cuando el precipitado es preciso lavarlo hasta el agotamiento.
- Cuando la producción no es excesivamente grande.

### **6.2.2. Ventajas del uso del filtro prensa**

- Es muy versátil (se emplea para amplia gama de materiales).
- Coste de material bajo.
- Proporciona gran área de filtración en un espacio reducido.
- Se obtienen elevadas presiones.
- Resulta adecuado tanto si el producto principal es la torta como el líquido.

### 6.2.3. Desventajas del uso del filtro prensa

- Funcionamiento intermitente
- Deterioro rápido de la tela filtrante
- Elevados tiempos muertos (carga y descarga)

## 6.3. Ciclos de filtración

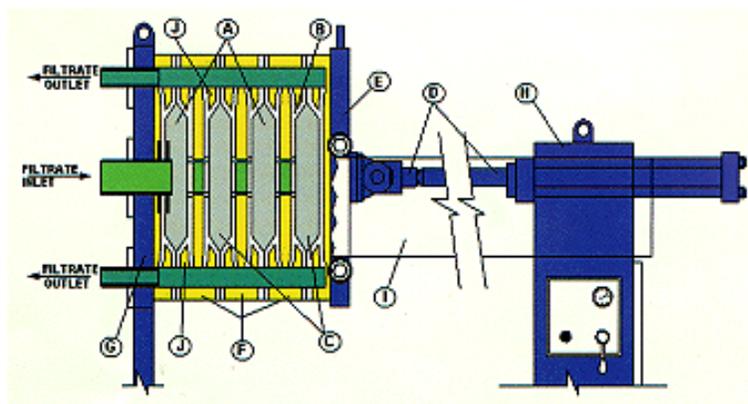
Los filtros de prensa son sistemas de deshidratación intermitente. Cada operación de prensado supone los siguientes pasos:

- **Cerramiento de la prensa:** Cuando el filtro está totalmente vacío, la cabeza móvil que es activado por el sistema hidráulico-neumático cierra las placas. La presión de cerramiento es auto regulada mediante la filtración.
- **Rellenado:** La cámara se llena con lodos para su filtración, el tiempo depende del flujo de la bomba de alimentación. Para lodo con gran capacidad de filtración es mejor rellenar el filtro rápidamente para evitar la formación de pasta en la cámara primaria antes de que se haya rellenado del todo.
- **Filtración:** La llegada del lodo a tratar para ser desaguado provoca un aumento de la presión debido a la formación de una capa espesa de lodo en las membranas. Esta fase puede reducirse de manera manual, mediante un temporizador o un indicador del flujo que activa una alarma de parada cuando se alcanza el final de la capacidad de filtración. Cuando se ha parado la bomba de

filtración, los circuitos de filtración y ductos centrales, que están llenos de lodo se les aplica aire comprimido para su purgado.

- **Apertura del filtro:** La cabeza movable se retira para desarmar la primera cámara de filtración. La pasta cae por su propio peso. Un sistema mecanizado tira de las placas una por unas. La velocidad en la separación de las placas puede ajustarse teniendo en cuenta la textura de la pasta.
- **Limpieza:** La limpieza de las membranas puede llevarse a cabo entre 15-30 operaciones del proceso. Para unidades largas o medias esto tiene lugar en prensados usando spray de agua a altas presiones (80-100 bar). La limpieza esta sincronizada con la separación de las placas.

Figura 16. Pasos del ciclo de filtración



Fuente: Referencia bibliográfica No. 4.

En la figura 16 se observa la operación del filtro prensa. El lodo líquido es bombeado a las cámaras (A) rodeadas por lonas filtrantes (B). Al bombear la presión se incrementa y fuerza al lodo a atravesar las lonas, provocando que los sólidos se acumulen y formen una pasta seca (C). El pistón (D) hidráulico empuja la Placa de acero (E) contra las Placas de polietileno (F) haciendo la prensa. El cabezal (G) y el soporte terminal (H) son sostenidos por rieles de las Barras de soporte (I), diseñados especialmente El filtrado pasa a través de las lonas y es dirigido hacia los canales de las placas y Puertos de drenado (J) del

cabezal para descarga. Este filtrado típicamente contendrá menos de 15 ppm (mg/l) en sólidos suspendidos.

### **6.3.1. Capacidad de filtración**

La capacidad de producción de un filtro de prensa es de entre 1.5 y 10 kg de sólidos por m<sup>2</sup> de superficie de filtración. Para cada modelo de filtro de prensa el volumen de la cámara y la superficie de filtración depende del número de placas del filtro. Y la velocidad de filtración depende de:

- Espesamiento de la pasta
- Concentración de lodo
- Resistencia específica
- Coeficiente de compresibilidad.

Otra de las ventajas de los filtro prensa es que pueden aceptar lodo con distinta capacidad de filtración. Es recomendable espesar el lodo antes de la operación en el filtro de prensado. Aunque el lodo presenta gran capacidad de filtración permite capacidades mayores de producción, los filtros de prensa aceptan igualmente lodo con condiciones poco precisas para su filtrado. Esta tolerancia significa que el sistema presenta condiciones de operabilidad seguras y con pocos riesgos.

### **6.4. Medios filtrantes**

El medio para filtraciones industriales debe tener ciertas características. La primera y más importante es que permita separar los sólidos de la suspensión y producir un filtrado transparente. Además, los poros no se deben obstruir con

facilidad para que la velocidad del proceso no sea demasiado lenta. El medio filtrante debe permitir la extracción de la torta sin dificultades ni pérdidas.

Obviamente, debe tener una resistencia suficiente para no rasgarse y no ser afectado por los productos químicos presentes. Algunos medios filtrantes de uso común son telas gruesas de loneta o sargas, tejidos pesados, fibra de vidrio, papel, fieltro de celulosa, telas metálicas, de lana, de nylon, de dacrón y otros tejidos sintéticos. Las fibras de hilacha de materiales naturales, son más eficaces para partículas finas que las fibras plásticas o metálicas.

Algunas veces, el filtrado sale un poco lechoso al principio, antes de que se depositen las primeras capas de partículas que ayudan al filtrado subsecuente. El filtrado se puede recircular para una nueva filtración.

### **6.5. Ayudas de filtración**

En algunos casos se usan ayudas de filtración para acelerar el proceso. Por lo general, son tierras diatomáceas o kieselguhr, que están constituidos principalmente por sílice no compresible. También se usa celulosa de madera, asbesto y otros sólidos porosos inertes.

Estas ayudas se pueden usar de diferentes maneras; por ejemplo como recubrimiento previo antes de filtrar la suspensión, evitando que los sólidos gelatinoso obstruyan el medio filtrante y permite obtener un filtrado más transparente. También se pueden añadir a la suspensión antes de la filtración, aumentando la porosidad de la torta y reduciendo su resistencia durante el proceso.

## 7. SECADO

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones y con frecuencia, el producto que se extrae de un secador para empaquetado.

Debido a la gran variedad de materiales que se secan y a los muchos tipos de equipo que se utilizan, no existe una sola teoría de secado que comprenda todos los materiales y tipos de secadores.

Las variaciones posibles en forma y tamaño de los materiales, de la humedad de equilibrio, de los mecanismos del flujo de humedad a través del sólido, así como en el mecanismo de transmisión de calor que se requiere para la vaporización, impiden que se pueda hacer un tratamiento unificado. Son conocidos, sin embargo, los fundamentos generales, que se utilizan en forma semi cuantitativa. Los secaderos rara vez se diseñan por los usuarios, sino que se adquieren a compañías especializadas en la ingeniería y fabricación de este tipo de equipos.

### 7.1. Operaciones de secado

Existen varios tipos de operaciones de secado, que se diferencian entre sí por la metodología seguida en el procedimiento de secado; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire; también puede ser por eliminación de agua mediante adsorción de un sólido, y por reducción de del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado, mediante evaporación en presencia de un gas.

Los sólidos que se secan pueden tener formas diferentes (escamas, gránulos, cristales, polvo, tablas o láminas continuas) y poseer propiedades muy diferentes.

El producto que se seca puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto da lugar a que en el mercado exista un gran número de tipos de secadores comerciales. Las diferencias residen fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite calor.

## 7.2. Métodos generales de secado

Los métodos y procesos de secado se clasifican de diferentes maneras; se dividen en procesos de:

- **Lotes:** cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un período;
- **Continuos:** si el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua:

- En la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire;
- En el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación (también pueden usarse bajas temperaturas con vacío para ciertos materiales que se decoloran o se descomponen a temperaturas altas);

- En la liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado.

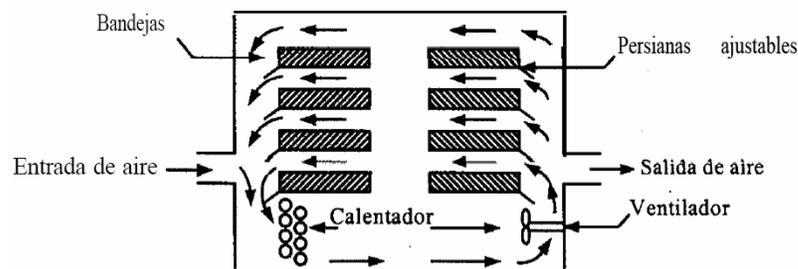
### 7.3. Equipo para secado

- Secadores de bandeja
- Secadores indirectos al vacío con anaqueles
- Secadores continuos con túnel
- Secadores rotatorios
- Secadores de tambor
- Secadores por aspersión

#### 7.3.1. Secado en bandejas

En el *secador de bandejas*, que también se llama secador de anaqueles, de gabinete, o de compartimientos, el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100mm de profundidad. Un secador de bandejas típico, tal como el que se muestra en la Figura 17, tiene bandejas que se cargan y se descargan de un gabinete.

Figura 17. Secador de bandejas o anaqueles.



Fuente: Referencia Bibliográfica No.4.

Un ventilador recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas.

También se usa calor eléctrico, en especial cuando el calentamiento es bajo. Entre el 10 al 20% del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo, y el resto es aire recirculado.

Figura 18. Secador de bandejas



**Fuente:** Centro de Investigaciones de ingeniería (USAC)

Después del secado, se abre el gabinete y las bandejas se remplazan por otras con más material para secado. Una de las modificaciones de este tipo de secadores es el de las bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. Esto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador.

En el caso de materiales granulares, el material se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Entonces, con este secador de circulación cruzada, el aire pasa por un lecho permeable y se obtienen tiempos de secado más cortos, debido a la mayor área superficial expuesta al aire.

## **8. IMPACTO AMBIENTAL DE REACTIVOS DE LIXIVIACIÓN**

### **8.1. Efectos en la salud**

Los efectos en la salud debido al uso de reactivos de lixiviación de arcillas, como ácido sulfúrico han sido documentados mediante pruebas de laboratorio de la casa de donde proviene el producto en cuestión (ficha técnica del producto). La ejecución de estas pruebas condujo al desarrollo de los límites de exposición, tales como los valores iniciales límites y los niveles de exposición en períodos cortos y su propósito es establecer los límites de concentración a los que los trabajadores pueden ser expuestos.

La trasgresión de dichos límites de exposición podría causar trastornos en la salud de los trabajadores, tales como irritación de la piel y pulmones, o la formación de acumulaciones en los tejidos del cuerpo.

El uso y el manejo responsable de los reactivos de lixiviación puede ser puesto en práctica mediante el uso de ropa de trabajo y controles técnicos apropiados, tales como las cubiertas de descarga y el aislamiento del proceso. Se deberá seleccionar el equipo teniendo como base el tipo de exposición.

Con el fin de asegurar que los efectos en la salud del trabajador sean mínimos, se deben desarrollar e implementar programas de capacitación en los que se exponga en forma resumida, al personal, los potenciales efectos dañinos en la salud, causado por los reactivos en uso en las operaciones.

La capacitación al trabajador ayudará a la correcta comprensión de los posibles efectos en la salud y la necesidad de usar apropiadamente el equipo protector, como respiradores, guantes y ropa especial. En general, aumentará considerablemente la comprensión por parte del trabajador respecto al uso apropiado de los reactivos de flotación y los métodos de protección del personal más adecuado.

El área en la que los trabajadores se encuentran expuestos a los agentes de lixiviación es el área de preparación de reactivos. En estos lugares los reactivos se encuentran en bruto y en altas concentraciones, por lo que es más probable que causen efectos nocivos para la salud. Se deberán desarrollar procedimientos operativos que influyan el manipuleo de reactivos en bruto. La implementación de estos procedimientos operativos deberá darse preferentemente bajo la forma de capacitación.

En el caso de los reactivos de lixiviación, los riesgos de incendio y explosión para las mezclas y concentraciones diluidas (tanques de servicio) son mínimos siempre que se sigan los procedimientos adecuados de almacenamiento, prevención de derrames y primeros auxilios. Se capacitará al personal y se le mantendrá actualizado sobre la correcta implementación de los procedimientos.

## **8.2. Efectos ambientales**

El impacto ambiental de los derrames de reactivos es mínimo, si se toman en consideración los procedimientos adecuados de prevención de derrames y almacenamiento. Sin embargo, el impacto ambiental más grave que podría producirse en el caso de una descarga descontrolada de reactivos será que éstos entren en contacto con ríos, arroyos o lagos adyacentes. En un caso como este el reactivo podría ser tóxico para la vida acuática.

Los usuarios que utilicen el agua en áreas cercanas a la planta de procesamiento (agua para riego y potable) también podrían verse negativamente afectados por estos elementos.

También pueden registrarse daños en otros elementos constitutivos del ambiente, como los suelos, el agua freática y la vegetación. Las descargas descontroladas en el suelo no presentan un daño grave; sin embargo, de no procederse a la limpieza o a controlar dichas descargas la responsabilidad ambiental es mayor, sobre todo si la vegetación o el agua subterránea se ve afectada. Más aún, las reiteradas descargas sin control hacia la capa freática pueden originar efectos costosos y difíciles de remediar en el largo plazo. Algunos de los reactivos de lixiviación se caracterizan por su alta o parcial volatilidad, por lo que, pueden representar un peligro sustancial en términos de emisiones atmosféricas.

Sin embargo, el uso de reactivos en procesos de lixiviación puede dar origen a emisiones molestas en el aire del área de trabajo. Se pueden utilizar controles técnicos como la ventilación industrial en instrumentos para el monitoreo de la calidad del aire con el propósito de caracterizar y controlar las emisiones.

Por lo general, una mina o fundición descarga aguas de proceso que pueden contener concentraciones residuales de reactivos (como las arcillas y la hematita). En caso que las concentraciones respectivas excediesen los niveles tóxicos para la vida acuática, sería necesario tratar esta agua para eliminar los reactivos de la descarga. Por tanto, la protección ambiental presupone la protección y cuidado de los cuerpos receptores que discurren aguas abajo

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## 9. METODOLOGÍA

### 9.1. Recursos humanos:

**Asesor:** Ing. Mariano Arturo J. Eskenasy García  
**Responsables del proyecto:** Ginger Kim Elinor Starlight Méndez Marroquín.  
Mónica Saraí Soto Pivaral.

### 9.2. Infraestructura:

- Laboratorio de Operaciones Unitarias de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala para la realización de la práctica experimental.
- Laboratorio de Química industrial de la carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala para las pruebas de laboratorio.
- Laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para los análisis de % de Fe(III)
- Laboratorio de control de calidad de Cementos Progreso S.A. para la evaluación química de las arcillas.

### 9.3. Obtención de las muestras

El material de hematita para la realización de la practica experimental se obtuvo de la Mina “Quebrada María”, ubicada en Camotán, Chiquimula, mediante la empresa “Geo-Minas” (Ver información del lugar de explotación minera , capítulo 1)

## 9.4. Condiciones de operación

### 9.4.1. Fijas

#### 9.4.1.1. Tiempo de residencia y relaciones de lixiviación

Tabla IV. Relaciones de lixiviación

Relación de lixiviación respecto a la Hematita (g de hematita/ml de $H_2SO_{4(98\%)}$ )	2.62
Relación de lixiviación respecto a las arcillas (g de arcillas/ml de $H_2SO_{4(98\%)}$ )	1.58

Fuente: Laboratorio de química y muestra de cálculo, sección 9.4.4.2.

#### 9.4.1.2. Condiciones de operación

##### 9.4.1.2.1. Tamizador

Tabla V. Condiciones fijas de operación del tamizador

Mesh (tamaño de partícula) de Hematita	140 (106 $\mu m$ ) - 200 (75 $\mu m$ )
--	--

Fuente: Referencia bibliográfica No. 3 y laboratorio de operaciones unitarias

##### 9.4.1.2.2. Sistema de agitación

Tabla VI. Condiciones fijas de operación del sistema de agitación

Angulo de agitador	0°
Velocidad Promedio del agitador	1000rpm

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias

##### 9.4.1.2.3. Reactor

Tabla VII. Condiciones fijas de operación del reactor

Tamaño de lote (Hematita) (g)	3700
Cantidad de $Fe_2O_3$ (g)	1382.69

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias y muestra de cálculo, sección 9.4.4.1.

##### 9.4.1.2.4. Secador de bandejas

Tabla VIII. Condiciones fijas de operación secador de bandejas

Temperatura de secado	200°C
-----------------------	-------

Fuente: Referencia bibliográfica No. 10

## 9.4.2. Variables

### 9.4.2.1. Concentraciones y cantidades de reactivos

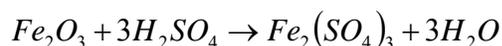
Tabla IX. Condiciones y cantidades de reactivos

Concentración de ácido (% Volumen)	Peso de hematita (g)	Cantidad de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	Volumen de ácido (ml)
98	3700	1382.69	1412.79
30	3700	1382.69	4615.12
25	3700	1382.69	5538.14
20	3700	1382.69	6922.67

Fuente: Muestra de cálculo, sección 9.4.4.3.

Estas consideraciones de operación se utilizaran, dadas las restricciones del equipo y especificaciones para la recuperación de sulfato de hierro.

### 9.4.3. Reacción química



### 9.4.4. Muestra de cálculo

#### 9.4.4.1. Cálculo de cantidad teórica de H<sub>2</sub>SO<sub>4(98%)</sub> respecto al tamaño de lote.

$$3700g \text{ _Hematita} * \frac{0.3737g \text{ _Fe}_2\text{O}_3}{1g \text{ _Hematita}} * \frac{1mol \text{ _Fe}_2\text{O}_3}{159.7g \text{ _Fe}_2\text{O}_3} * \frac{3mol \text{ _H}_2\text{SO}_4}{1mol \text{ _Fe}_2\text{O}_3} * \frac{98.08g \text{ _H}_2\text{SO}_4}{1mol \text{ _H}_2\text{SO}_4}$$

$$* \frac{100g \text{ _H}_2\text{SO}_{498\%}}{98g \text{ _H}_2\text{SO}_{4100\%}} * \frac{1ml \text{ _H}_2\text{SO}_{498\%}}{1.84g \text{ _H}_2\text{SO}_{498\%}} = 1412.79ml \text{ _H}_2\text{SO}_{498\%}$$

#### 9.4.4.2. Cálculo de las constantes de lixiviación

Ejemplo:

$$\text{Rel.Lixiviacion} = \frac{3700g \text{ _Hematita}}{1412.79ml \text{ _}H_2SO_{498\%}} = 2.62 g \text{ _Hematita/ml _}H_2SO_{498\%}$$

De esta forma se efectúa para cada caso.

#### 9.4.4.3. Determinación del volumen mínimo de solución con base en los requerimientos de la solución de sulfato de hierro y los límites de operación del filtro prensa (9% de hierro (III) mínimo en solución, 2228g de arcillas)

Ejemplo:

- **Determinación del sulfato férrico, de acuerdo a la relación estequiométrica:**

$$3700g \text{ _Hematita} * \frac{0.3737g \text{ _}Fe_2O_3}{1g \text{ _Hematita}} * \frac{1mol \text{ _}Fe_2O_3}{159.7g \text{ _}Fe_2O_3} * \frac{1mol \text{ _}Fe_2(SO_4)_3}{1mol \text{ _}Fe_2O_3} * \frac{399.874g \text{ _}Fe_2(SO_4)_3}{1mol \text{ _}Fe_2(SO_4)_3}$$

$$= 3462.13g \text{ _}Fe_2(SO_4)_3$$

- **Determinación de hierro presente en la solución de sulfato férrico, de acuerdo a la relación estequiométrica:**

$$3700g \text{ _Hematita} * \frac{0.3737g \text{ _}Fe_2O_3}{1g \text{ _Hematita}} * \frac{1mol \text{ _}Fe_2O_3}{159.7g \text{ _}Fe_2O_3} * \frac{1mol \text{ _}Fe_2(SO_4)_3}{1mol \text{ _}Fe_2O_3} * \frac{2mol \text{ _}Fe^{+3}}{1mol \text{ _}Fe_2(SO_4)_3}$$

$$* \frac{55.85gFe^{+3}}{1mol \text{ _}Fe^{+3}} = 967.10g \text{ _}Fe^{+3}$$

Entonces el valor porcentual máximo de recuperación de  $Fe^{+3}$  es:

Ecuación 1.

$$\% \text{ } Fe^{+3} \text{ en solución} = \frac{g \text{ } Fe^{+3}}{g \text{ } Fe_2(SO_4)_3 \text{ solución}}$$

$$\% \text{ } Fe^{+3} \text{ en solución} = \frac{967.10 g \text{ } Fe^{+3}}{3462.13 g \text{ } Fe_2(SO_4)_3} = 27.93\% \text{ de } Fe^{+3} / \text{Solución de } Fe_2(SO_4)_3$$

- **Por lo tanto, ya que el porcentaje mínimo es 9% de  $Fe^{+3}$ , se determinará a continuación el volumen mínimo de solución de ácido sulfúrico para ese porcentaje:**

Ejemplo:

(Determinación del volumen de ácido al 75%, según la ecuación 2)

Ecuación 2.

$$V_2 = \frac{C_1 V_1}{C_2}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 6

Donde:

$V_1, V_2$  = Volumen de soluciones.

$C_1, C_2$  = Concentración de soluciones.

1412.49 = Volumen teórico de de  $H_2SO_{4(98\%)}$  respecto a 3700g hematita utilizada.

$$V_2 = \frac{(1412.49)(98\%)}{75\%} = 1846.05 ml \text{ } H_2SO_{475\%}$$

De esta forma se efectúa para cada concentración de ácido.

- **A partir de este valor, se calculó la cantidad de agua de dilución, con base en la ecuación 3:**

Cálculo para un volumen de ácido sulfúrico al 75%:

Ecuación 3.

$$mlH_2O_{en\_solución} = mlH_2SO_{4\ X\%} - mlH_2SO_{4\ 98\%}$$

$$mlH_2O_{en\_solución} = (1846.05 - 1412.79)mlH_2SO_4 = 433.26ml$$

Tomando que la densidad del agua a condiciones estándar de operación es 1g/ml, entonces:

$$gH_2O_{en\_solución} = 433.26mlH_2O_{en\_solución} = 433.26gH_2O_{en\_solución}$$

- **Determinación de peso total de sulfato de hierro diluido obtenido:**

Ecuación M.4.

$$g\_Fe_2(SO_4)_3 = g\_Fe_2(SO_4)_{3\ 100\%} + g\_H_2O_{en\_solución}$$

Cálculo para un volumen de ácido sulfúrico al 75%:

$$g\_Fe_2(SO_4)_3_{en\_solución} = 3462.13g\_Fe_2(SO_4)_3 + 433.26g\_H_2O$$

$$g\_Fe_2(SO_4)_3_{en\_solución} = 3895.38g\_Fe_2(SO_4)_3_{Soluc.}$$

- **Determinación del porcentaje en peso de hierro (III) en función de las distintas concentraciones de ácido sulfúrico:**

Según ecuación 1:

$$\% \text{ } Fe^{+3} \text{ solución} = \frac{967.10g \text{ } Fe^{+3}}{3895.38g \text{ } Fe_2(SO_4)_3 \text{ Soluc.}} = 24.83\% \text{ de } Fe^{+3} / \text{Solucion de } Fe_2(SO_4)_3$$

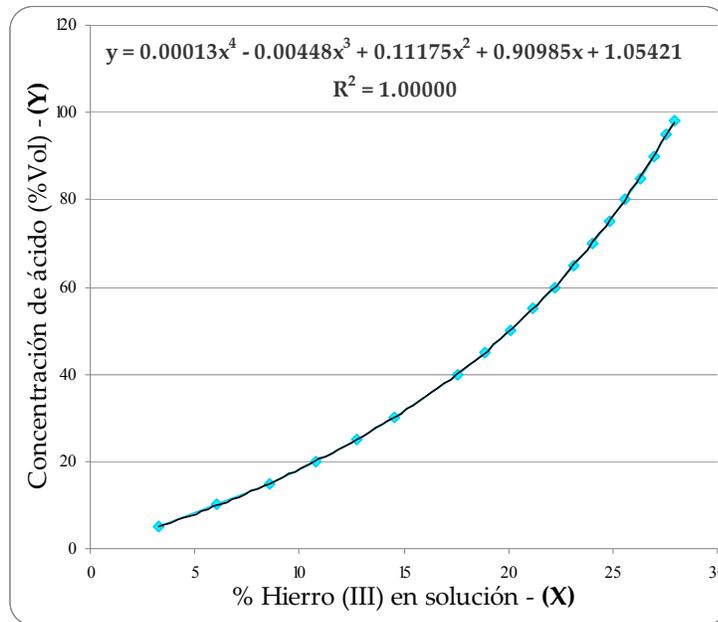
A continuación se presenta una tabla resumen indicando todos los datos intermedios obtenidos para la determinación de las concentraciones de operación, con base en los requerimientos de la solución de sulfato de hierro y los límites de operación del filtro prensa (9% de hierro (III) mínimo en solución, 2228g de arcillas):

Tabla X. **Tabulación de relación proporcional de porcentaje de Fe(III) extractable en función de la concentración de ácido, para un lote de 3700g de hematita a temperatura ambiente.**

Concentración de ácido (% Vol.) (Y)	Volumen ácido (ml)	Agua en solución (g)	Solución de Sulfato de hierro (g)	Hierro (III) (g) (X)	% Hierro (III) en solución (peso/peso)
98	1412.79	0	3462.13	967.10	27.93
95	1457.40	44.61	3506.74	967.10	27.58
90	1538.37	125.58	3587.71	967.10	26.96
85	1628.86	216.07	3678.20	967.10	26.29
80	1730.67	317.88	3780.01	967.10	25.58
75	1846.05	433.26	3895.38	967.10	24.83
70	1977.91	565.12	4027.24	967.10	24.01
65	2130.05	717.26	4179.39	967.10	23.14
60	2307.56	894.77	4356.89	967.10	22.20
55	2517.34	1104.55	4566.67	967.10	21.18
50	2769.07	1356.28	4818.41	967.10	20.07
45	3076.74	1663.95	5126.08	967.10	18.87
40	3461.34	2048.55	5510.67	967.10	17.55
30	4615.12	3202.32	6664.45	967.10	14.51
25	5538.14	4125.35	7587.48	967.10	12.75
20	6922.67	5509.88	8972.01	967.10	10.78
15	9230.23	7817.44	11279.57	967.10	8.57
10	13845.35	12432.56	15894.68	967.10	6.08
5	27690.69	26277.90	29740.03	967.10	3.25

Fuente: Cálculos de sección 9.4.4.3.

Figura 19. Gráfica de correlación polinomial para datos de la tabla X



Fuente: Tabla X.

Según la ecuación de correlación polinomial de grado cuatro, encontrada a partir de la tabla M.7., la concentración mínima de ácido sulfúrico para cumplir con las condiciones de operación, debe ser de 15.92%, pero para asegurar la completa recuperación del hierro (III) y cumplir las medidas necesarias de seguridad, se manejarán concentraciones de 20, 25 y 30%.

## 9.5. Material:

### 9.5.1. Material de apoyo

- Agua desmineralizada “Salvavidas<sup>®</sup>”.
- Cal hidratada (hidróxido de calcio) “Horcalca<sup>®</sup>”.
- Energía eléctrica suministrada a la unidad de trabajo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.; Voltaje 220V, Amperaje 30A, Corriente Alterna.
- Contenedores de polietileno para la materia prima, desechos y productos.
- Potenciómetro.

### 9.5.2. Materia prima

- Ácido Sulfúrico
  - Descripción física y química

Tabla XI. Descripción física y química del ácido sulfúrico

Nombre	Ácido Sulfúrico 98%
Formula química	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Solubilidad en agua (20°C)	Soluble (Desprendimiento de calor)
Masa molar	98.08 g/mol
pH (20°C)	Fuertemente ácido
Punto de fusión	15°C
Punto de ebullición	330°C
Clase de toxicidad	(CH)2
Presión de vapor (20°C)	0.0001mbar
Absorbencia de agua	Higroscópico
Color y consistencia	Líquido incoloro
Densidad específica (20°C)	1.84g/ml

Fuente: Referencia bibliográfica No. 6

- Hematita roja (materia prima)
  - Descripción física y química

Tabla XII. Descripción química de la hematita roja

Composición química	
SiO <sub>2</sub>	36.59 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.37 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.04 %
CaO	0.51 %
MgO	0.00 %
K <sub>2</sub> O	2.07 %
Na <sub>2</sub> O	0.59 %
SO <sub>3</sub>	0.27 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31 %
TiO <sub>2</sub>	0.75 %
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08 %
MnO	0.03 %
LOI (950°C)	8.98 %
Total	97.59 %

Fuente: Sección de anexos

Tabla XIII. Descripción física de la hematita roja

Color	Café rojizo
Consistencia	Terroso
Mesh (Tamaño de partícula)	140 (106 $\mu\text{m}$ ) - 200 (75 $\mu\text{m}$ )
Densidad	2.71g/ml

Fuente: Referencia bibliográfica No. 3 y laboratorio de química

## 9.6. Equipo

- Recipientes de polietileno de 5 y 10 gal.
- Unidad de lixiviación y filtración.
- Secador de bandejas.
- Equipo de laboratorio para análisis químicos inorgánicos.

### 9.6.1. Especificaciones técnicas de la unidad por equipos.

#### 9.6.1.1. Tamizador

Tabla XIV. Especificaciones técnicas del tamizador

Mesh (tamaño de partícula)	140 (106 $\mu\text{m}$ ) - 200 (75 $\mu\text{m}$ )
Diámetro de bastidor	21 cm
Alto de bastidor	7cm
Profundidad a la tela	5cm
Material de bastidor	Cobre
Material de la red de tamizado	Acero inoxidable
Voltaje máximo de uso	110V

Fuente: Centro de Investigaciones de ingeniería (USAC)

Tamizador eléctrico marca “Humbold” de carga y descarga manual, que consta de 8 bastidores marca “Soiltest” en serie vertical, colocados sobre una base agitadora y asegurados por un brazo móvil que a su vez golpea la parte superior de la torre de bastidores para generar mayor vibración en la muestra y mejor tamizado.

### 9.6.1.2. Sistema de agitación.

Tabla XV. Especificaciones técnicas del sistema de agitación

Tipo de agitador	Propulsor de tres aspas
Angulo de agitador	0°
Velocidad Promedio del agitador	1000rpm
Diámetro de propulsor	14.5cm
Potencia	1hp
Voltaje máximo	220V
Amperaje	3.6A

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias

Agitador metálico marca “Kenstar” tipo marítimo de tres aspas con un ángulo fijo de 0° que opera a una velocidad promedio de 1000 rpm a una potencia de 1hp, con un diámetro de propulsor de 14.5cm.

### 9.6.1.3. Reactor.

Tabla XVI. Especificaciones técnicas del reactor

	Reactor rojo	Reactor azul
Volumen de reactor	10gal	5gal
Diámetro inferior	44cm	25
Diámetro superior	63cm	30
Altura del reactor	51cm	33
Material	Polietileno	

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias

Recipiente de polietileno marca “Guateplast”, resistente a bajos valores de pH.

### 9.6.1.4. Compresor.

Tabla XVII. Especificaciones técnicas del compresor

Potencia	3.4hp
Volumen	50L
Presión máxima	13bar (175psig)
Voltaje máximo	240V
Amperaje	20A

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias

### 9.6.1.5. Bomba de desplazamiento positivo.

Tabla XVIII. Especificaciones técnicas de la bomba de desplazamiento positivo

Máxima presión de aire	8.5bar (125psig)
Material de cámaras y colectores	Polipropileno, PVDF, Teflon® PFA
Material de sección central	Polipropileno
Válvulas de aire	Cobre o Nickel-Plata
Máximo diámetro de sólidos	1/16" (1.6 mm)
Máxima capacidad de levantamiento por succión	Levantamiento en seco 13' (3.9 m)

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias

Bomba de desplazamiento positivo Turbo-Flow™ T1 - 13 mm (1/2") Plastic Pump, marca “Wilden”, fabricada principalmente de polipropileno, que puede manejar un máximo diámetro de sólidos de 1.6mm, soportando una máxima presión de aire de 8.5bar, produciendo una capacidad máxima de levantamiento por succión en seco de 3.9m

### 9.6.1.6. Filtro prensa

Tabla XIX. Especificaciones técnicas del filtro prensa

Capacidad del filtro	5lb
No. De placas	8
No. De marcos	9
Área de contacto por hoja	100cm <sup>2</sup>
Mecanismo de compresión de placas	Tornillo
Medio filtrante	Lona cruda (100% algodón)

Fuente: Laboratorio de operaciones unitarias

Filtro prensa de ocho placas y nueve marcos alternados de 10\*10cm cada uno, con un área de 100cm<sup>2</sup> por unidad, que utiliza como medio filtrante lona cruda, sostenidos por un soporte y presionados unos contra otros con un mecanismo cerrado de tornillo.

### 9.6.1.7. Secador de bandejas

Tabla XX. Especificaciones técnicas del secador de bandejas

No. De bandejas	15
Área de bandeja	1000cm <sup>2</sup>
No. bandejas	2
Material	Acero inoxidable
Dimensiones del secador	110*111*131cm
Dimensiones de la cámara de secado	94*94*89cm
Rango de temperaturas de operación	40-204°C
Tiempo de recuperación de temperatura	1min
Máxima capacidad de carga	273kg
Potencia	1hp
Voltaje máximo	240V
Amperaje	21.7A
Frecuencia	50/60Hz

Fuente: Centro de Investigaciones de ingeniería (USAC)

Secador de bandejas marca “Despatch”, modelo LBB 2-27 de convección forzada, tiene una combinación de corrientes de aire, horizontales y verticales que ofrecen una excelente uniformidad de temperatura, utilizado para secado de materiales cerámicos, arcillosos y similares.

### 9.6.2. Especificación técnica de la unidad completa de trabajo

Se cuenta con una unidad que consta de un tanque de tratamiento de polietileno, cuyo volumen es de 5gal, con un agitador propulsor de tres aspas, un filtro prensa de ocho placas y nueve marcos alternados de 10cm\*10cm cada uno, con un área de 100cm<sup>2</sup> por unidad, que utiliza como medio filtrante lona cruda, sostenidos por un soporte y presionados unos contra otros con un mecanismo cerrado de tornillo. La suspensión de alimentación es impulsada por una bomba de desplazamiento positivo hacia el filtro prensa (Ver diagramas de flujo, Figura 20, 21 y 22). Para eliminar la humedad de la muestra ya filtrada se utiliza un secador de 2 bandejas cuadradas.

### 9.7. Modelo estadístico.

Se utilizó un diseño completamente aleatorio involucrando combinaciones de tratamientos factoriales. Las variables a manejar son; 3 concentraciones de ácido sulfúrico, 4 tiempos de residencia, evaluados en dos corridas para cada combinación, lo que da un total de  $4 \times 3 \times 2 = 24$  unidades experimentales.

Con estos registros se obtendrán los siguientes datos estadísticos:

- Porcentaje de error en la recuperación de arcillas respecto a la cantidad teórica esperada.
- Porcentaje de error en la recuperación de arcillas respecto a la relación de lixiviación.

### 9.8. Manejo de resultados.

A continuación se presenta una tabla con los datos a obtener durante la experimentación y las pruebas de laboratorio:

Tabla XXI. Datos susceptibles a medición durante y después de la práctica experimental para las muestras arcillosas

	<b>Arcillas</b>												
<b>Datos medibles durante de la experimentación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peso húmedo y seco de las muestras.</li> <li>▪ Densidad (Matraz de Lechatelier).</li> </ul>												
<b>Determinaciones de laboratorio después de la experimentación</b>	Porcentaje de: <table style="display: inline-table; vertical-align: middle; border: none;"> <tr> <td>▪ <math>\text{SiO}_2</math></td> <td>▪ <math>\text{SO}_3</math></td> <td>▪ <math>\text{MgO}</math></td> </tr> <tr> <td>▪ <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></td> <td>▪ <math>\text{P}_2\text{O}_5</math></td> <td>▪ <math>\text{K}_2\text{O}</math></td> </tr> <tr> <td>▪ <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></td> <td>▪ <math>\text{TiO}_2</math></td> <td>▪ <math>\text{MnO}</math></td> </tr> <tr> <td>▪ <math>\text{CaO}</math></td> <td>▪ <math>\text{Cr}_2\text{O}_3</math></td> <td>▪ <math>\text{Na}_2\text{O}</math></td> </tr> </table>	▪ $\text{SiO}_2$	▪ $\text{SO}_3$	▪ $\text{MgO}$	▪ $\text{Fe}_2\text{O}_3$	▪ $\text{P}_2\text{O}_5$	▪ $\text{K}_2\text{O}$	▪ $\text{Al}_2\text{O}_3$	▪ $\text{TiO}_2$	▪ $\text{MnO}$	▪ $\text{CaO}$	▪ $\text{Cr}_2\text{O}_3$	▪ $\text{Na}_2\text{O}$
▪ $\text{SiO}_2$	▪ $\text{SO}_3$	▪ $\text{MgO}$											
▪ $\text{Fe}_2\text{O}_3$	▪ $\text{P}_2\text{O}_5$	▪ $\text{K}_2\text{O}$											
▪ $\text{Al}_2\text{O}_3$	▪ $\text{TiO}_2$	▪ $\text{MnO}$											
▪ $\text{CaO}$	▪ $\text{Cr}_2\text{O}_3$	▪ $\text{Na}_2\text{O}$											

**Fuente:** Sección de marco teórico.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

La siguiente tabla muestra el formato de hoja de toma de datos:

Tabla XXII. Hoja de datos para el análisis de arcillas.

Prueba	Ácido 20%	% <sub>Error</sub>	Ácido 25%	% <sub>Error</sub>	Ácido 30%	% <sub>Error</sub>	$\bar{X}$	$\sigma$
<b>Peso húmedo</b>								
<b>Peso seco</b>								
<b>Densidad</b>								
SiO <sub>2</sub> Na <sub>2</sub> O Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> CaO TiO <sub>2</sub> MgO Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> K <sub>2</sub> O MnO	La evaluación química de composición de la arcilla se realizará por medio de análisis de laboratorio.							

Tabla XXIII. Hoja de datos para el análisis de Sulfato férrico.

(Ácido 20%)												
Prueba	30min		$\bar{X}$	60min		$\bar{X}$	90min		$\bar{X}$	120min		$\bar{X}$
	C1	C2		C1	C2		C1	C2		C1	C2	
Densidad (g/ml)												
pH												
Hierro férrico (% peso/peso)												
Vol. de recuperación (ml)	7160											
(Ácido 25%)												
Prueba	30min		$\bar{X}$	60min		$\bar{X}$	90min		$\bar{X}$	120min		$\bar{X}$
	C1	C2		C1	C2		C1	C2		C1	C2	
Densidad (g/ml)												
pH												
Hierro férrico (% peso/peso)												
Vol. de recuperación (ml)	7160											
(Ácido 30%)												
Prueba	30min		$\bar{X}$	60min		$\bar{X}$	90min		$\bar{X}$	120min		$\bar{X}$
	C1	C2		C1	C2		C1	C2		C1	C2	
Densidad (g/ml)												
pH												
Hierro férrico (% peso/peso)												
Vol. de recuperación (ml)	7160											

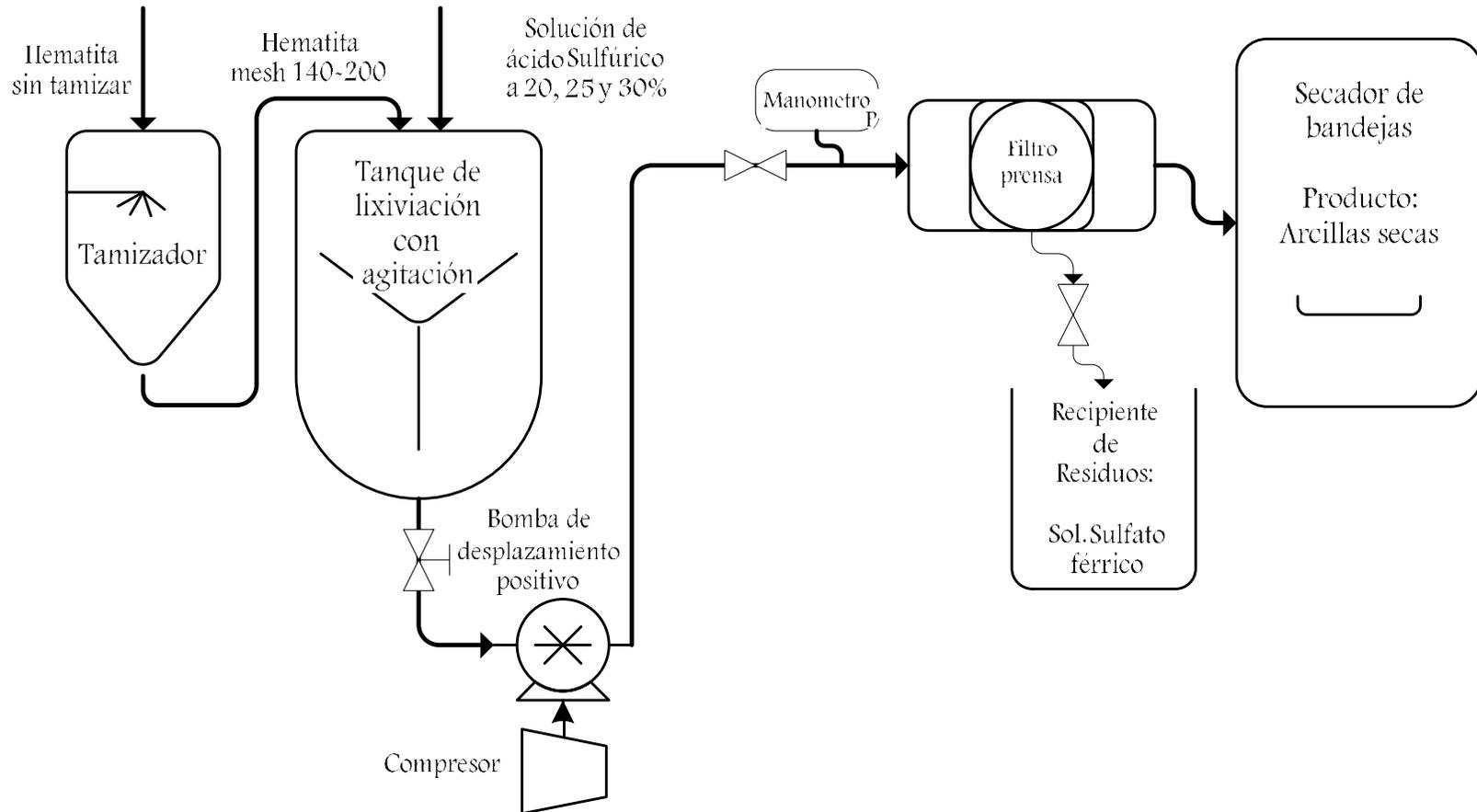
Donde:

C1 y C2 = Corrida 1 y 2 respectivamente.

### **9.9. Manejo de desechos.**

Los residuos de sulfato férrico fueron neutralizados con hidróxido de calcio (cal hidratada) que al reaccionar forman una combinación de sulfato de calcio y sulfato férrico, y dadas sus cualidades no tóxicas funcionan como una buena enmienda de tierras, por lo que se vertieron, junto con los desechos de arcilla lavada, en la tierra de los jardines de la facultad.

Figura 20. Diagrama de flujo de proceso de lixiviación de arcillas.



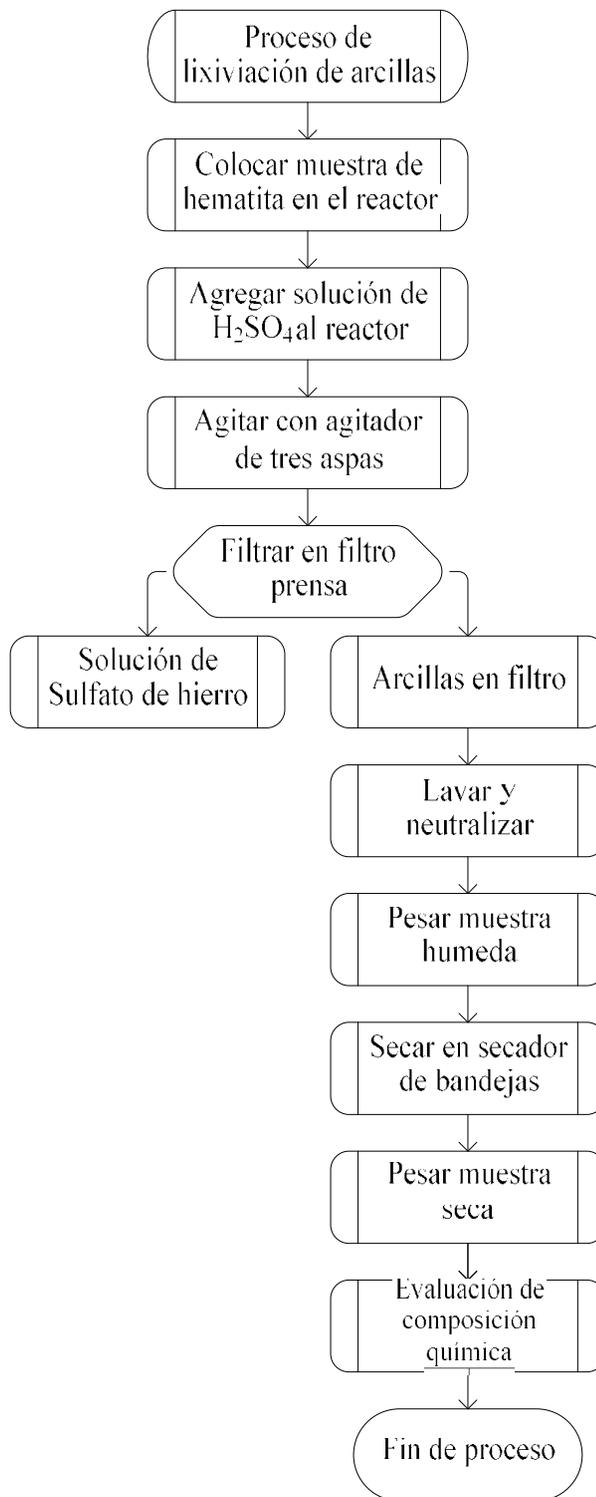
Fuente. Laboratorio de Operaciones Unitarias. Facultad de Ingeniería (USAC)

Figura 21. Equipo de lixiviación.



**Fuente.** Laboratorio de Operaciones Unitarias. Facultad de Ingeniería (USAC)

Figura 22. Diagrama de proceso de lixiviación de arcillas.



**Fuente:** Laboratorio de Operaciones Unitarias. Facultad de Ingeniería (USAC)

---

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## 1. RESULTADOS

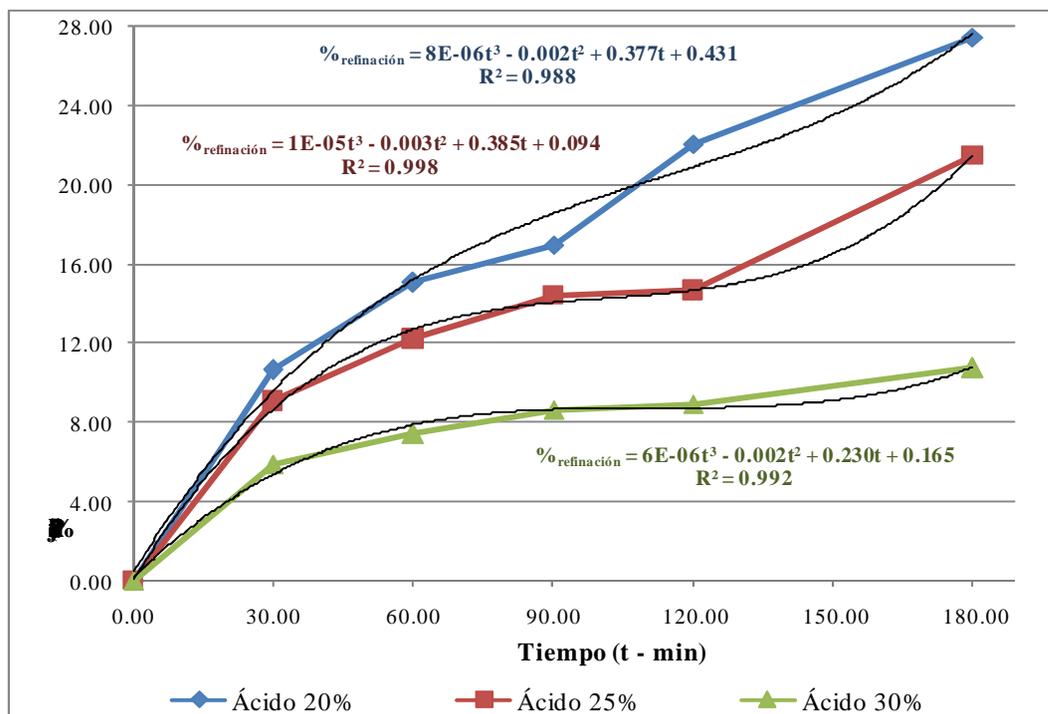
Tabla XXIV. Porcentaje de refinación de arcillas en función de las variaciones en el contenido de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la hematita para las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado y en función del tiempo

Solución	Tiempo (min)	Porcentaje de refinación (%)
20	0.00	0.00
	30.00	10.65
	60.00	15.06
	90.00	16.99
	120.00	22.10
	180.00	27.48
25	0.00	0.00
	30.00	9.08
	60.00	12.23
	90.00	14.39
	120.00	14.67
	180.00	21.51
30	0.00	0.00
	30.00	5.91
	60.00	7.42
	90.00	8.64
	120.00	8.93
	180.00	89.24

Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLIV.

EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.

Figura 23. Gráfica de porcentaje de refinación de arcillas (óxido de hierro extraído) empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación



Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLIV.

Tabla XXV. Correlaciones polinomiales y puntos de inflexión de las curvas de tiempo vs. porcentaje de refinación, para cada concentración de ácido.

Concentración de ácido (% Vol)	Ecuación cubica				Punto de inflexión
	$t^3$	$t^2$	$t$	$c$	$t$ (min)
20	$8 \cdot 10^{-6}$	-0.002	0.377	0.431	113.84
25	$1 \cdot 10^{-5}$	-0.003	0.385	0.094	101.61
30	$6 \cdot 10^{-6}$	-0.002	0.230	0.165	111.12

Fuente. Figura 23, resultados y tabla XLIX, datos calculados.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

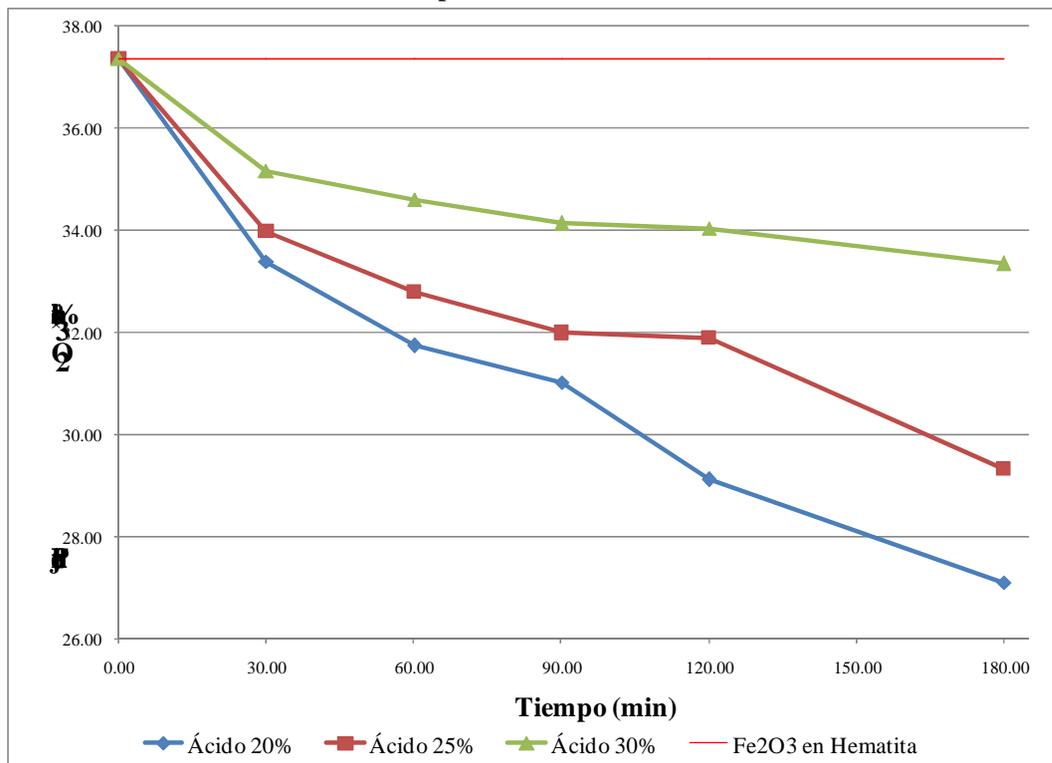
**Tabla XXVI. Porcentaje de óxido férrico residual en arcillas para las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado y en función del tiempo**

<b>Solución</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Porcentaje residual de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en arcillas (%)</b>
20	0.00	37.37
	30.00	33.39
	60.00	31.74
	90.00	31.02
	120.00	29.11
	180.00	27.10
25	0.00	37.37
	30.00	33.98
	60.00	32.80
	90.00	31.99
	120.00	31.89
	180.00	29.33
30	0.00	37.37
	30.00	35.16
	60.00	34.60
	90.00	34.14
	120.00	34.03
	180.00	33.35

**Fuente.** Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLIV.

EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.

Figura 24. Gráfica de porcentaje de óxido férrico residual en arcillas empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación para las condiciones de operación utilizadas



Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLIV.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

**Tabla XXVII. Porcentaje en peso del material sólido en hematita residual en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación**

<b>Composición química</b>	<b>Original</b>	<b>Ácido 20%</b>	<b>Ácido 25%</b>	<b>Ácido 30%</b>
SiO <sub>2</sub>	36.59	39.19	35.81	32.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.37	27.10	29.33	33.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.04	13.40	12.67	10.91
CaO	0.51	0.33	0.34	0.18
MgO	0.00	0.09	0.07	0.02
K <sub>2</sub> O	2.07	2.86	2.83	2.41
Na <sub>2</sub> O	0.59	0.47	0.43	0.31
SO <sub>3</sub>	0.27	1.84	2.28	3.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.15	0.16	0.20
TiO <sub>2</sub>	0.75	0.95	0.92	0.80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.02	0.02	0.02
MnO	0.03	0.01	0.02	0.01
*LOI (950°C)	8.98	13.49	14.85	16.92
Total	97.59	99.54	99.73	100.89

**Fuente.** Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLV.

\*Perdidas por ignición.

**Tabla XXVIII. Relación de extracción de material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación**

<b>Composición química</b>	<b>Relación de extracción</b>		
	<b>(Ácido 20%)</b>	<b>(Ácido 25%)</b>	<b>(Ácido 30%)</b>
SiO <sub>2</sub>	-2.60	0.78	4.14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.27	8.04	4.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-3.36	-2.63	-0.87
CaO	0.18	0.17	0.33
MgO	-0.09	-0.07	-0.02
K <sub>2</sub> O	-0.79	-0.76	-0.34
Na <sub>2</sub> O	0.12	0.16	0.28
SO <sub>3</sub>	-1.57	-2.01	-3.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.15	0.11
TiO <sub>2</sub>	-0.20	-0.17	-0.05
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.06	0.06
MnO	0.02	0.01	0.02

**Fuente.** Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLV.

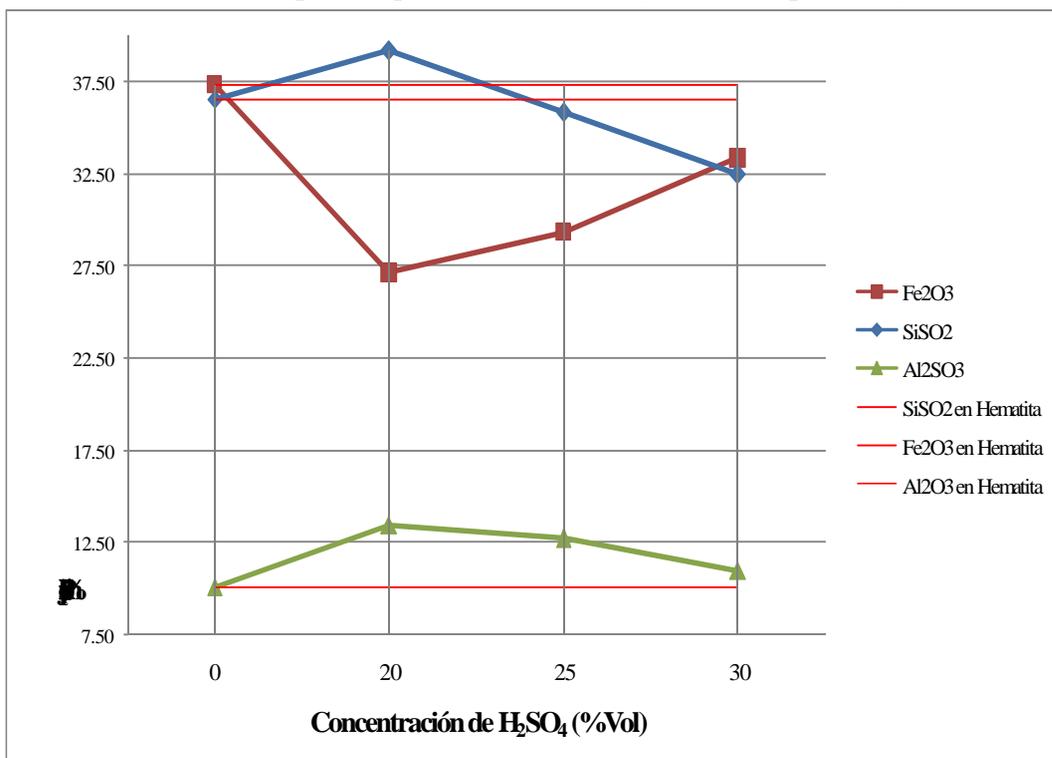
**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

Tabla XXIX. Porcentajes de lixiviación del material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación

Composición química	Composición porcentual			
	Original	Ácido 20%	Ácido 25%	Ácido 30%
Total sin lixiviar	88.61	86.41	84.88	83.97
Total sin lixiviar (%)	100.00	97.52	95.79	94.76
Total lixiviado (%)	0.00	2.48	4.21	5.24

Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLV.

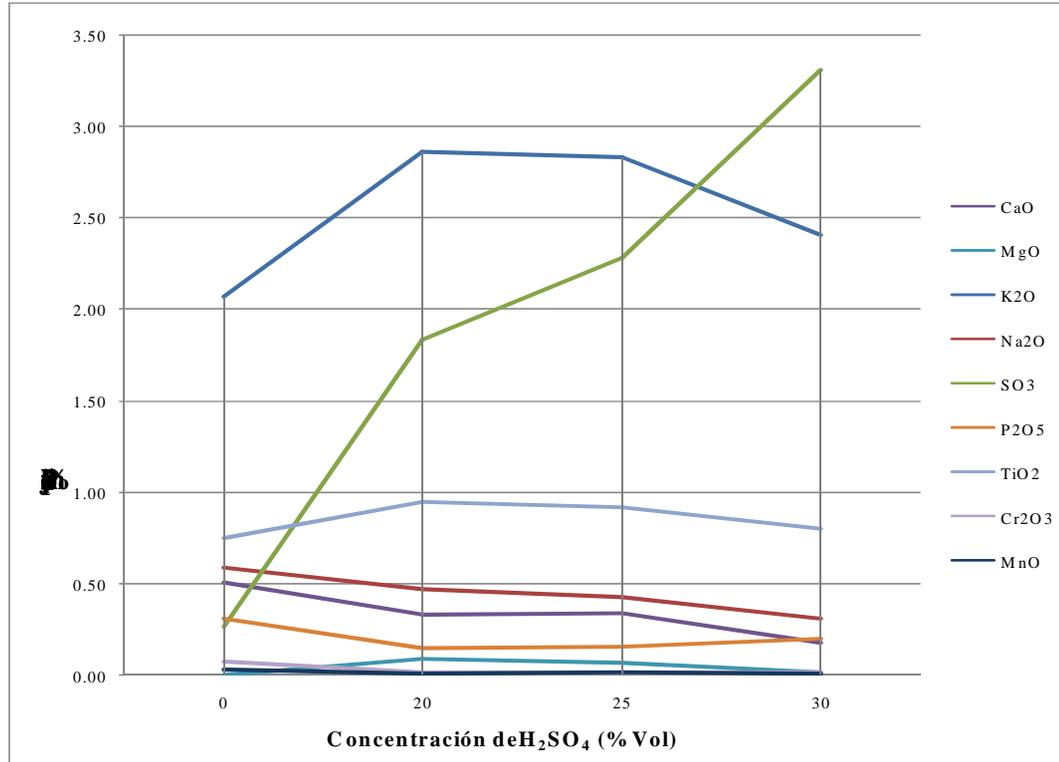
Figura 25. Gráfica contenido porcentual de los óxidos presentes en la hematita original y en el sólido residual después del proceso de lixiviación (Tres más importantes)



Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLV.

EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
 PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
 MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.

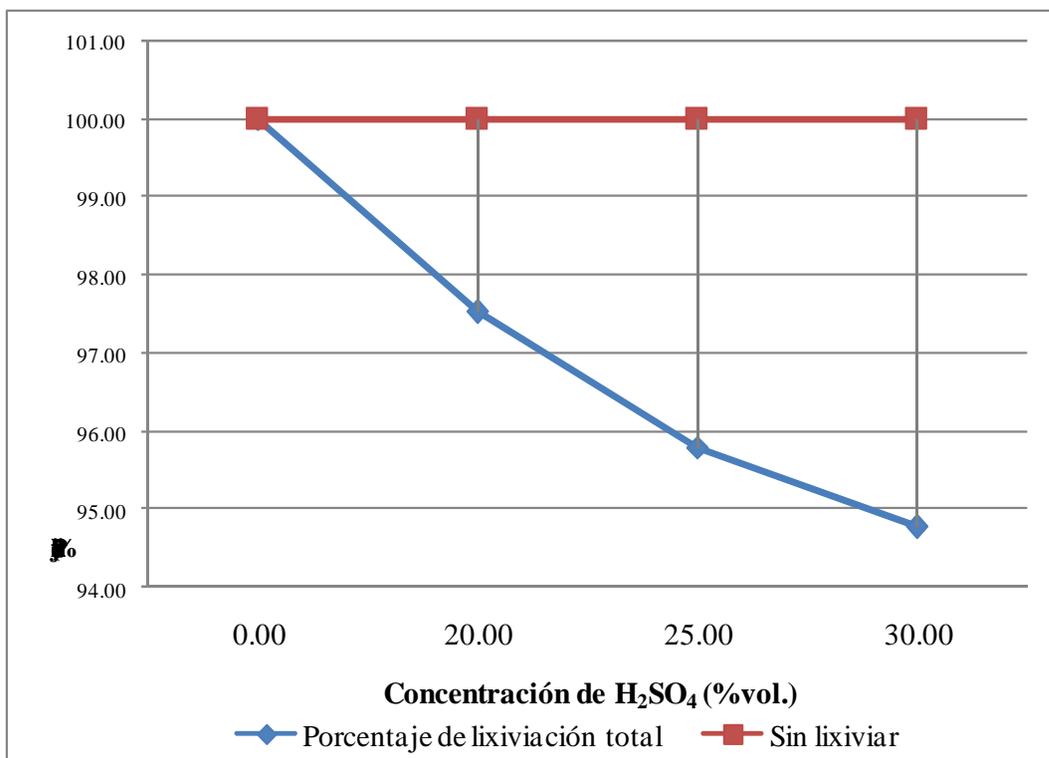
Figura 26. Gráfica contenido porcentual de los óxidos presentes en la hematita original y en el sólido residual después del proceso de lixiviación (Otros óxidos presentes)



Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLV.

EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.

Figura 27. Gráfica de porcentajes de lixiviación del material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación



Fuente. Apéndice 4: Sección de datos calculados, tabla XLV.

## 2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La evaluación del método de refinación de arcillas provenientes de hematita roja mediante el proceso de lixiviación de óxido férrico con ácido sulfúrico, para determinar el tiempo óptimo de operación dadas varias concentraciones de agente extractor, se basa en la siguiente reacción química  $Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$ , producida por la interacción entre el óxido de hierro presente en el mineral de hematita y el solvente extractor, en este caso, ácido sulfúrico diluido, que funciona como coadyuvante.

La realización del experimento se llevo a cabo en la unidad de lixiviación del laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ingeniería. La materia prima utilizada, proveniente de la mina “Quebrada María” ubicada en Camotán, Chiquimula, era hematita que contenía un porcentaje del 37.37% de  $Fe_2O_3$ , un 36.59% de  $SiO_2$  y un 10.04% de  $Al_2O_3$ , como componentes más representativos, además de otros materiales tales como  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $SO_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $TiO_2$ , etc.

Para que se realizara la eliminación de óxido de hierro del mineral de hematita se utilizó como medio extractor ácido sulfúrico diluido al 20, 25 y 30% en volumen, que se hizo reaccionar con el material arcilloso, en tres corridas diferentes, una para cada concentración de ácido, trabajando con un tamaño constante de lote de 3700g a una relación estequiométrica de ácido puro, tomando dos alícuotas de la solución madre, a los 30, 60, 90 y 120 min, para cada concentración de ácido, después de iniciada la reacción, las cuáles se filtraron para separar las arcillas presentes de la solución formada, y por medio de un análisis de fluorescencia de rayos X realizado en el laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, se determinó la cantidad de Fe(III) y otros metales presentes en ellas, evaluando con ello, el avance de la reacción

y por medio de análisis estequiométrico obtener la cantidad de óxido férrico (%) presente en el material sólido (Ver datos en tabla XLIV).

Al finalizar el tiempo de reacción, se procedió a separar la masa sólida de la solución formada, por medio del uso de un filtro prensa, posteriormente, las arcillas contenidas en el filtro se lavaron para eliminar la acidez presente en ellas, provocada por la presencia de solución de sulfato férrico y ácido sin reaccionar. Después de esto, el mineral se retiró del filtro, se pesó, y se dejó secar durante un par de horas en un secador de bandejas a una temperatura de 200°C, para ser pesado nuevamente, con el fin de determinar la cantidad de humedad retenida y el porcentaje de recuperación de arcillas (Ver tabla XLVI).

A las muestras sólidas secas se les efectuó el análisis físico y químico, el primero, en el laboratorio de Química Industrial de la facultad de ingeniería, determinando la densidad de las arcillas por medio del uso del matraz de Le'Cha tellier (Ver tabla XLVI). El análisis de la composición química se realizó en el laboratorio de control de calidad del Centro tecnológico de Cementos Progreso S.A., obteniendo los porcentajes de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ , etc presentes en las muestras, y con estos datos poder determinar el porcentaje de óxido férrico contenido y eliminado del mineral, para obtener la eficiencia del método de refinación. (Ver tablas en el apéndice 4).

A partir de los valores porcentuales de refinación, se realizó un análisis de varianza de dos factores (concentración de ácido sulfúrico y tiempo de reacción) (Ver apéndice 2), y se concluyó que existe una diferencia significativa en la cantidad de refinación de arcillas al emplear distintas concentraciones de solvente extractor, y que si existe una diferencia sensible en la extracción de óxido férrico en función del tiempo de reacción. Por lo tanto existe interacción entre la concentración de solvente extractor y el tiempo de reacción, comprobando la hipótesis alternativa planteada.

De los datos calculados, se realizaron varias gráficas comparativas entre el porcentaje de refinación del mineral respecto al tiempo de reacción, las concentraciones de reacción, densidad, etc., para establecer el comportamiento del proceso de reacción química.

Al relacionar el porcentaje de refinación de las muestras arcillosas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  extraído) respecto la concentración de ácido a diferentes tiempos, se observó que al finalizar el tiempo de 180min de reacción (tiempo total que se dejó reaccionar el mineral mediante lixiviación), para cada curva de porcentaje de ácido, el porcentaje de refinación aumentaba, presentando una mejor extracción en las muestras que se trataron con ácido sulfúrico al 20%, obteniéndose como máximo de refinación un porcentaje de 27.48% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  extraído, entonces, a menor concentración de ácido y mayor tiempo de reacción, mayor %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  extraído de las arcillas (Ver figura 23 y tabla XXIV de la sección de resultados).

Además, el comportamiento de las curvas de reacción se asemeja al de una ecuación cúbica, mostrando en cada una de ellas un punto de inflexión que indicaba el momento de tiempo en el cuál iniciaba con mayor eficiencia el proceso de refinación, ya que el gradiente de porcentaje de refinación/tiempo aumentaba claramente, por lo tanto se obtuvieron las curvas de correlación correspondientes para cada curva experimental y se determinaron estos puntos, ubicados entre los 101min y los 114min (Ver figura 23 y tabla XXV, sección de resultados).

Este cambio de pendiente a partir del punto de inflexión ocurría en el momento en el que la partícula empezaba a mojarse internamente (absorción), ya que antes de ese momento, el ataque químico de las soluciones de ácido sulfúrico en el mineral, solo se daba superficialmente (adsorción), limitando el porcentaje de óxido de hierro extraíble. La presencia de mayor cantidad de volumen líquido (Que aumentaba, al disminuir el porcentaje en volumen de ácido) propicio la mejora en la absorción en las suspensiones ,

ya que esto permitía que las partículas tuvieran mayor espacio para interactuar con el extractor y que este penetrara en ellas, logrando eliminar un porcentaje mayor de óxido férrico que el extraído solamente por adsorción, con lo que se explica el porque de los resultados obtenidos.

Al comparar el porcentaje de óxido férrico residual en las arcillas para cada concentración de ácido y en función del tiempo, se observó que a menor concentración de solución acida utilizada, menor era el porcentaje de óxido férrico remanente en el mineral, como era de esperarse, según lo expuesto anteriormente, obteniéndose una extracción máxima del 10.27% respecto al dato teórico y el dato experimental, con la solución de ácido al 20%, después de transcurridas tres horas.

Al relacionar la densidad del material sólido obtenido con el porcentaje de refinación, se observó que la densidad era inversamente proporcional al porcentaje de refinación, a mayor refinación, menor densidad. (Figura 29, Apéndice 5), esto significa que al separar mayor cantidad de óxido férrico del mineral, se pierde una porción de la composición original en peso del material de hematita, ya que el hierro reacciona para formar sulfato férrico. Coincidiendo con lo antes expuesto en las otras figuras, así, a menor concentración de agente extractor, menor es la densidad del mineral obtenido, esto debido a que existe mayor porcentaje de reacción de óxido férrico con el ácido para formar sulfato férrico.

Con fines evaluativos, se realizaron tomas de pH para las alícuotas de sulfato férrico en los diferentes tiempos del proceso de reacción, estos registros mostraron datos de alta acidez, en el rango de -0.05 y 0.27, comparado con los valores esperados para estas soluciones que son entre 1 y 2, esto parece indicar que la reacción no se dio completamente y aun se encontraban grandes cantidades de ácido sulfúrico en la solución, lo que corrobora el porque se dieron tan bajos rendimientos de refinación de óxido férrico.

Con los datos de la composición química de las muestras sólidas, se realizaron dos gráficas, la primera con los tres óxidos más representativos en la composición del material ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), relacionando el comportamiento porcentual antes y después del proceso de lixiviación para cada concentración de ácido utilizado, y determinar si el ataque químico estaba afectando a estos óxidos, provocando que estos reaccionaran para formar sulfatos, y se observó que en el caso del sílice, conforme aumentaba la concentración del ácido, este era más susceptible a reaccionar, disminuyendo su valor porcentual en la muestra, de igual manera ocurría con la alumina.

Originalmente, la técnica de lixiviación utilizada pretendía separar completamente el óxido férrico, sin generar otras reacciones paralelas de extracción en los otros minerales, ya que estos son parte esencial de la constitución de una arcilla, esto, según la figura 25, ocurrió de manera más perceptible al trabajar con ácido al 20%, ya que en este punto, ni la alumina ni la sílice reaccionaban, y al aumentar la concentración de coadyuvante empezaban hacerlo.

Para la segunda gráfica (Figura 26, resultados) se analizó el comportamiento porcentual de los otros elementos presentes en el material en función de la concentración de ácido utilizada, y se observó que a excepción del  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O}$ , todos los óxidos eran susceptibles a extracción, que para algunos casos ocurría de manera más eficiente a menores concentraciones de extractor y para algunos otros ocurría lo contrario, pero como estos óxidos se encontraban como trazas, no afectaban significativamente el proceso de refinación de arcillas.

Al evaluar el porcentaje de lixiviación total de los óxidos presentes en la hematita, se obtuvo mayor extracción utilizando ácido al 30%, ya que a esa concentración no solo se había extraído cierto porcentaje de óxido férrico, sino también un porcentaje de sílice, material que no debía reaccionar ya que este forma parte de la constitución esencial de las arcillas.

Para encontrar el tiempo necesario de refinación completa de las arcillas por lixiviación según las condiciones experimentales de operación, se creó una gráfica de correlación de porcentaje de óxido férrico lixiviado de la hematita en función del tiempo (0.5, 1, 1.5, 2, 3, 7 y 12 horas, iniciada la reacción) empleando ácido sulfúrico al 20%, concentración en la que proceso fue más eficiente, (figura 31, apéndice 5) y se generó una curva de correlación exponencial, cuya ecuación es:  $\%lixiviado_{Fe_2O_3} = 5.318t^{0.513}$ , la cuál indica que la extracción del total 37.37% de  $Fe_2O_3$  ocurrirá a las 44.73 horas después de iniciado el proceso de lixiviación, situación que no es ajena a la realidad, ya que la mayoría de procesos metalúrgicos requieren de tiempos largos de reacción, los cuáles pueden llegar a optimizarse si se manipulan e identifican las variables clave de operación.

Un factor determinante, que afectó la eficiencia de la técnica de refinación de arcillas se manifestó por el tamaño del diámetro del impulsor utilizado (0.145m) y la potencia necesaria (0.0042hp) de este para que las partículas sólidas de la suspensión pudieran mantenerse en movimiento, y aunque esta última era menor a la utilizada (1hp), no contribuyó con la reacción, ya que el diámetro calculado del agitador era de 0.19m (Ver apéndice 1), por lo tanto, el utilizado no cumplía con el tamaño mínimo para que las partículas pudieran movilizarse adecuadamente, provocando que estas quedaran sedimentadas en el reactor, además que teniendo un tamaño de partícula tan pequeño contribuía a que se diera ese efecto.

## CONCLUSIONES

1. Se obtuvo mayor porcentaje de extracción de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (27.48%), con la solución de ácido sulfúrico al 20% a un tiempo final de tres horas.
2. Existe variación significativa en el porcentaje de extracción de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de la hematita en relación a la variación en la concentración de coadyuvante (ácido sulfúrico).
3. El tiempo de reacción fue un factor determinante, ya que a mayor tiempo de reacción, mayor porcentaje de refinación se obtuvo.
4. La mayor pérdida de arcillas como  $\text{SiO}_2$  por lixiviación fue de 4.14% cuando se utilizó ácido sulfúrico al 30% , en un tiempo de tres horas de lixiviación.
5. La reactividad del  $\text{Fe(III)}$  y el  $\text{Al(III)}$ , es inversamente proporcional a la concentración de ácido sulfúrico utilizado en el proceso.
6. El tiempo para extracción completa del hierro de la hematita es calculado en 44.73 horas con solución al 20% con base en el modelo matemático  $\%_{\text{Lixiviado}} = 5.318t^{0.513}$  .
7. El porcentaje total de lixiviación (5.24%) fue mayor al utilizar ácido sulfúrico al 30%.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## RECOMENDACIONES

1. Para maximizar el proceso de reacción es conveniente utilizar coadyuvante en exceso, puesto que en la hematita existen otros óxidos que también reaccionan con el ácido sulfúrico.
2. De los cálculos efectuados del tamaño del agitador resultó reducido en su diámetro, con relación al diámetro del tanque. Por lo que es conveniente la construcción de otros agitadores para la unidad de lixiviación.
3. Realizar otros estudios de trabajo de graduación para analizar las condiciones de operación en relación a factores como tamaño de partícula, lote, concentración de coadyuvante, velocidad de reacción, etc.
4. Incrementar el número de placas para mejorar el proceso de filtración en la unidad de lixiviación.
5. Realizar otros estudios de trabajos de graduación, utilizando otros minerales tales como cromita, así como otros coadyuvantes como ácido clorhídrico, salmueras, etc.
6. Al realizar este tipo de estudios experimentales, procurar utilizar el material, equipo de seguridad personal y de laboratorio necesario para llevar a cabo la operatoria respectiva.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bonis, S. **Síntesis Geológica de Guatemala.**
2. Clemons, Russell E. **Geology of the Chiquimula Cuadrangle, Guatemala, Central America.** Austin Texas, 1966.
3. Espitia, Carlos Julio y Otros. **Catálogo de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las arcillas para cerámica roja en los centros urbanos de Medellín, Ibagué y Sabana de Bogotá.** Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería. Bogotá D.C. Enero de 2003.
4. Geankoplis, Christie J. **Procesos de transporte y operaciones unitarias.** 3ra Edición. Editorial CEGSA. México. 1998. Pág. 579-584, 800-810, 895-900.
5. Hurlbut, Cornelius S. Jr., y Otros. **Manual de mineralogía de dana.** 3ra Edición. Editorial Reverté, S.A. España. 1991. Pág. 279-290, 297, 298, 201, 202.
6. Perry, Robert H. y Cecil H. Chilton. **Manual del Ingeniero Químico.** 5ta Edición. Editorial McGraw Hill. Pág. 21-73 a 21-77.
7. Raymond, Kira, S. D. Othmer. **Enciclopedia de Tecnología Química.** Tomo VIII. Editorial Hispanoamericana. Pág. 180-232. México 1962.
8. Treybal, Robert, **Operaciones de transferencia de masa.** 2da. Edición. Editorial McGraw-Hill, México. Pág. 2002, 23-42, 656-669, 792-797.

9. Valdivia, Alma y M., Luís. **Expedición a la cordillera de los Andes: consideraciones sobre el hierro y estudio del yacimiento ferrífero El Laco, Chile.** Instituto de Geofísica (UNAM). Octubre 2003.
  
10. Vian Ortuño, A. **Curso de introducción a la Química Industrial.** Editorial Alambra S.A. España. 1979. Pág. 111-125.
  
11. Walpole, Ronald E., Raymond H. Myers y Sharon L. Myers. **Probabilidad y estadística para Ingenieros.** 6ta Edición, México, Pearson Education, 1999. Pág. 461-468, 687.
  
12. Zorilla A. Santiago y Torres X. Miguel. **Guía para elaborar la Tesis.** 2da Edición. Editorial McGraw Hill. Pág. 4-87. México 1992. Reimpresión 2005.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

1. Alvarado, Carlos y Rosa, Oscar. **Guía del inversionista minero**.  
[http://www.lib.utexas.edu/benson/lagovdocs/guatemala/federal/minas/guia -  
inversionista-minero.pdf](http://www.lib.utexas.edu/benson/lagovdocs/guatemala/federal/minas/guia-inversionista-minero.pdf). Guatemala 1999
2. Anónimo. **Hematita**. <http://es.wikipedia.org/wiki/Hematita>.
3. Anónimo. **Hematita**.  
[http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi\\_rocas/hermatita.htm](http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/hermatita.htm)
4. Anónimo. **Caracterización de la minería en Guatemala**. MEM.  
[http://www.cadep.ufm.edu.gt/naturalezahumana/Lecturas/JGC%20Caracterizacion%  
20de%20la%20Mineria%20en%20Guatemala.pdf](http://www.cadep.ufm.edu.gt/naturalezahumana/Lecturas/JGC%20Caracterizacion%20de%20la%20Mineria%20en%20Guatemala.pdf) . Guatemala. 2004.
5. Anónimo. **Classificazione di alcuni minerali secondo i sette sistemi cristallini**.  
[www.itchiavari.org/chimica/lab/minerali.html](http://www.itchiavari.org/chimica/lab/minerali.html) . Dipartimento di Chimica, Istituto e  
Liceo Tecnico Statale di Chiavari.
6. Anónimo. **Hematites**.  
<http://www.uned.es/cristamine/fichas/hematites/hematites.htm> .
7. Anónimo. **Curva granulométrica**.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Curva\\_granulom%C3%A9trica](http://es.wikipedia.org/wiki/Curva_granulom%C3%A9trica).
8. Anónimo. **Secado de sólidos**.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Secado\\_de\\_s%C3%B3lidos](http://es.wikipedia.org/wiki/Secado_de_s%C3%B3lidos) .

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

9. Guevara, Mario. **Chiquimula, La perla de Oriente.**  
[www.chiquimulaonline.com/mapa\\_chiquimula.jpg](http://www.chiquimulaonline.com/mapa_chiquimula.jpg). Copyright ©2003 - 2005,  
ChiquimulaOnline.com

## BIBLIOGRAFÍA

1. Chang, Raymond. **Química**. 4ta edición. Editorial Mc Graw-Hill. México 1984.
2. Chupina De León, Alejandra Margarita. “**Estudio comparativo entre las técnicas más utilizadas para la caracterización de arcillas y su aplicación industrial en la fabricación de ladrillos**”. Universidad de San Carlos de Guatemala. Enero 2006.
3. Dana, Edward S. y William E. Ford. **Tratado de mineralogía**. 13<sup>a</sup> reimpresión traducida de la 4<sup>a</sup> en español, México, Compañía Editorial Continental S.A. de C.V., 1986.
4. Kirk, Raymond y Donald Othmer. **Enciclopedia de tecnología química**. (Volumen 1). México: Editorial Hispanoamericana. 1962.

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## APÉNDICES

1	Muestra de cálculo .....	117
2	Análisis de error .....	131
3	Datos originales .....	135
4	Datos calculados .....	139
5	Gráficas de referencia .....	147
6	Diagramas ilustrativos .....	149
7	Fotografías de la experimentación .....	153

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

## Apéndice 1

### Muestra de cálculo

1. **Determinación de los valores promedios de los datos obtenidos para cada corrida:**

Ecuación 5.

$$\bar{X} = \frac{\sum X_n}{n}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 11

Donde:

$X_n$  = Dato

n = No. De dato.

Ejemplo:

(Ácido 20%, Tiempo 30min, corrida 1 y 2. Datos de pH)

$$\bar{X} = \frac{0.11 + 0.13}{2} = 0.12$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLII.

## 2. Determinación de la densidad de soluciones de Sulfato férrico:

Ecuación 6.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 11

Donde:

$\rho$  = Densidad

$m$  = Masa (g, kg)

$V$  = Volumen (ml, l,  $\text{cm}^3$ )

Ejemplo:

(Ácido 20%, Tiempo 30min)

$$\rho = \frac{1.221g}{0.982ml} = 1.24338g/ml = 1243.38g/l$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLII.

## 3. Determinación del porcentaje de refinación de arcillas:

### a. Determinación del porcentaje de hierro en las soluciones de sulfato férrico.

Ejemplo 1:

(Según datos de análisis de fluorescencia de rayos X, Ácido 20%, Tiempo 30min)

$$14.27 \frac{\text{gFe}^{+3}}{\text{l}_{\text{solución}}\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{\text{ml}_{\text{solución}}\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{1243.38 \text{gFe}_2(\text{SO}_4)_3} * 100 = 1.15\% \left( \text{gFe}^{+3} / \text{gFe}_2(\text{SO}_4)_3 \right)$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLIII.

**b. Determinación de la cantidad en gramos de Fe(III) en las soluciones de sulfato férrico:**

Según los datos obtenidos del análisis de fluorescencia de rayos X, se tiene:

Ejemplo 1:

(Ácido 20%, Tiempo 30min, 9872.01g de solución de Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> formada)

$$1.15 \frac{\text{gFe}^{+3}}{\text{gFe}_2(\text{SO}_4)_3} * \frac{9872.01 \text{g}_{\text{solución}}\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}{100} = 102.96 \text{gFe}^{+3}$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLIV.

**c. Determinación de la cantidad en gramos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> lixiviado:**

Ejemplo 1:

(Ácido 20%, Tiempo 30min)

$$102.96 \text{gFe}^{+3} * \frac{1 \text{mol}_{\text{Fe}^{+3}}}{55.85 \text{gFe}^{+3}} * \frac{1 \text{mol}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{2 \text{mol}_{\text{Fe}^{+3}}} * \frac{159.7 \text{g}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}{1 \text{mol}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} = 147.21 \text{g}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLIV.

**d. Determinación de la cantidad de  $Fe_2O_3$  no lixiviado (presente en arcillas):**

Ecuación 7.

$$Fe_2O_3 \text{ _remanente _en _arcillas} = (Dato_{\text{estequiométrico}} - Dato_{\text{experimental}}) \text{ de } Fe_2O_3$$

Ejemplo 1:

(Ácido 20%, Tiempo 30min)

$$(1382.69 - 147.21)g \text{ _} Fe_2O_3 = 1235.48g \text{ _} Fe_2O_3$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLIV.

**e. Determinación de la cantidad porcentual de  $Fe_2O_3$  no lixiviado (presente en arcillas):**

Ecuación 8.

$$\%_{\text{Recuperación}} = \frac{D_E}{D_T} * 100$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 11

Donde:

$D_T$  = Dato teórico

$D_E$  = Dato experimental

Ejemplo 1:

(Ácido 20%, Tiempo 30min)

$$\frac{147.21g \text{ } Fe_2O_3}{1382.69g \text{ } Fe_2O_3} * 100 = 89.35\%$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLIV.

**f. Determinación de la relación porcentual de  $Fe_2O_3$  presente en las arcillas tratadas, respecto a la cantidad porcentual original de la muestra de hematita**

Ejemplo 1:

(Ácido 20%, Tiempo 30min. 37.37%  $Fe_2O_3$ )

$$\frac{37.37 * 89.35}{100} = 33.39\%$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla XLIV.

**g. Determinación del porcentaje de refinación de arcillas:**

Ecuación 9.

$$\%_{\text{Re refinación}} = \left| \frac{D_T - D_E}{D_T} \right| * 100$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 11

Donde:

$D_T$  = Dato teórico

$D_E$  = Dato experimental

Ejemplo:

(Ácido 20%, Tiempo 30min. 37.37%  $Fe_2O_3$ )

$$\%_{Re\ finación} = \left| \frac{37.37\% - 33.39\%}{37.37\%} \right| * 100 = 10.65\%$$

De esta forma se efectúa para cada caso. Ver datos finales en tabla No. XLIV.

**4. Determinación de la potencia teórica mínima del impulsor, necesaria para suspender partículas de tamaño y densidad uniforme hasta una altura arriba del plano medio del impulsor superior, según las condiciones iniciales de operación.**

**Ejemplo:**

(Ácido 20%)

Se desea extraer el Fe(III) presente en muestras de mineral de hematita. La relación sólido- líquido es 0.53 gr de materia prima/ ml de solvente. Se utilizará un lote 3700g de hematita y de 6.92 litros ácido sulfúrico al 20% (v/v), el volumen ocupado por la mezcla es de 8.29 litros ( $V_m$ ), y la distancia del impulsor hasta el fondo del tanque es de 0.04m (C).

**a. Volumen del sólido**

$$V_{sólido} = 3.7kg \_ Hematita * \frac{1m^3 \_ Hematita}{2710kg \_ Hematita} = 0.001365m^3 \_ Hematita$$

**b. Volumen de la suspensión:**

Ecuación 11.

$$V_{suspensión} = V_{sólido} + V_{líquido}$$

Para determinar el volumen del líquido, ver tabla X, en la sección de metodología, para cada concentración de ácido sulfúrico utilizado.

$$V_{suspensión} = (0.0014 + 0.0069)m^3$$

$$V_{suspensión} = 0.0083m^3$$

**c. Altura de la suspensión en el reactor:**

Ya que el reactor era un cono truncado, la ecuación de volumen total es:

$$V_{suspensión} = \pi \int_0^h \left( \frac{5 * y}{66} + \frac{1}{8} \right)^2 dy$$

Donde:

y = Altura total del reactor

dy = Diferencial de altura

V = Volumen de suspensión

h = Altura ocupada por la suspensión

Entonces:

$$V_{suspensión} = \frac{h(3267 + 1980h + 400h^2)\pi}{209088}$$

Despejando h, se obtiene:

$$h = -\frac{33}{20} + \frac{311^{2/3}(11\pi^3 + 1280\pi^2 V_{suspensión})^{1/3}}{20\pi}$$

**Sustituyendo el valor de  $V_{suspensión}$ :**

$$h = -\frac{33}{20} + \frac{311^{2/3}(11\pi^3 + 1280\pi^2(0.0083m^3))^{1/3}}{20\pi}$$

$$h = 0.15402m$$

**d. Fracción de volumen de sólidos en la suspensión debajo de Z'**

Ecuación 12.

$$\phi_{Sm} = \frac{\text{Volumen sólido}}{\text{volumen suspensión}}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

$$\phi_{Sm} = \frac{0.001365m^3 \text{ Hematita}}{0.008288m^3 \text{ Suspensión}} = 0.164734(m^3 \text{ Hematita}/m^3 \text{ Suspensión})$$

**e. Densidad de la suspensión debajo de Z'**

Ecuación 13.

$$Pm = \phi_{Sm}\rho_p + (1 + \phi_{Sm})\rho_L$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

$$\rho_m = 0.164734 * \left( \frac{2710 \text{kg}}{\text{m}^3} \right) + (1 - 0.164734) \left( \frac{1234.6238 \text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\rho_m = 1477.6686 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### f. Velocidad terminal de sedimentación

Ecuación 14.

$$V_{ts} = \frac{gd_p^2 \Delta \rho}{18 \mu_L}$$

Fuente: Referencia bibliográfica No. 8

La viscosidad de la solución de ácido sulfúrico a 25°C es de 0.0019228 kg/m\*s

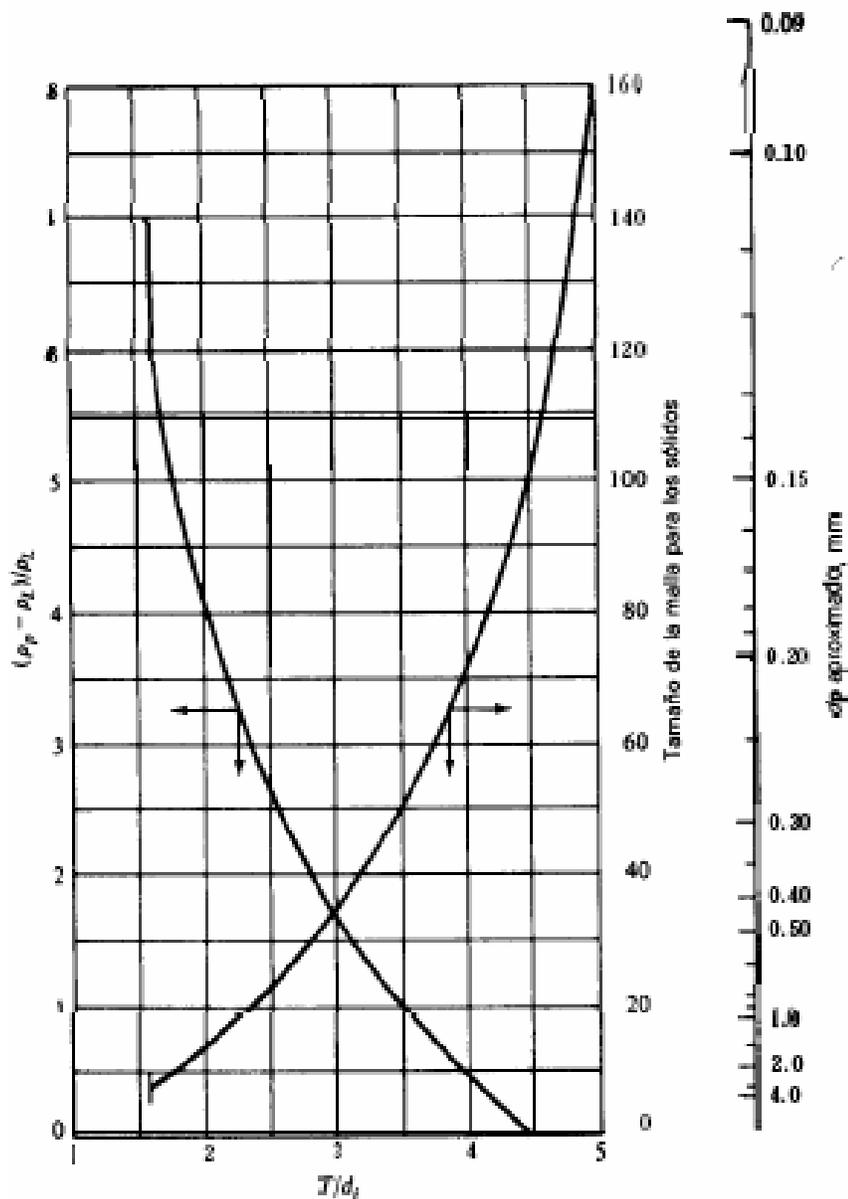
$$V_{ts} = \frac{(9.8 \text{m/s}) * (0.000106 \text{m})^2 * ((2710 - 1234.62) \text{kg/m}^3)}{18 * (0.001922784 \text{kg*s})} = 0.004343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### g. Determinación de la relación diámetro tanque / diámetro del impulsor

Dicha relación se determina en Figura 27:

$$\frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l} = \frac{(2710 - 1234.62) \text{kg/m}^3}{1234.62 \text{kg/m}^3} = 1.01501$$

Figura 28. Gráfica de la relación diámetro tanque/diámetro impulsor



Fuente. Referencia bibliografía No. 8

Este valor se encuentra en eje Y de la gráfica, intersecándola con la curva dando una relación  $T/d_1$  de 3.5.

El tamaño de la partícula es de 0.106mm, este valor se busca en el eje Y de la gráfica, intersecándola con la curva dando una relación y un  $T/d_2$  0.9.

El valor del diámetro (T) es de 0.273m, por lo tanto:

$$\begin{aligned} \frac{T}{di_1} &= 3.5 & \frac{T}{di_2} &= 3.5 \\ di_1 &= \frac{0.273m}{3.5} = 0.078096m & di_2 &= \frac{0.273m}{0.9} = 0.303707m \end{aligned}$$

Ecuación 15.

$$di_{ipromedio} = \frac{di_1 + di_2}{2}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

Entonces:

$$di_{ipromedio} = \frac{(0.078096 + 0.303707)m}{2} = 0.190901m$$

#### **h. Determinación de la potencia mínima:**

Ecuación 16.

$$\frac{Pg_c}{gn\rho_m v_m V_{tS}} = \phi_{Sm}^{2/3} \left( \frac{T}{d_i} \right)^{1/2} \exp\left( 4.35 \frac{Z'}{T} = 0.1 \right)$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

Sustituyendo valores en ecuación No.16

$$\frac{P * 1}{9.8 * 3 * 1477.668582 * 0.008288 * 0.004343} = 0.164734^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{0.273336}{0.190901}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(4.35 * \frac{0.114018}{0.273336} - 0.1\right)$$

$$P = 3.1231 \text{ Watt}$$

$$P = 0.004185 \text{ hP}$$

**i. Determinación de las revoluciones por minuto del agitador:**

Ecuación 17.

$$g_o P = P_o \rho_m D_i^5 N^3$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

Calculándose por ecuación No. 17. El número de Potencia (Po) se asume de 1, las revoluciones por minuto serían:

$$N = \left(\frac{1 * 3.123084}{1 * 1477.668582 * (0.190901)^5}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$N = 2.03 \text{ rps}$$

$$N = 121.66 \text{ rpm}$$

El valor de las revoluciones por minuto debe dar un número de Reynolds del impulsor mayor a 1000. Si este es menor, deben modificarse las suposiciones.

**j. Determinación del No. de Reynolds del impulsor:**

Ecuación 18.

$$Re = \frac{(d_i^2 * N * \rho_m)}{\mu_m}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

Donde:

- **La viscosidad de la solución se calcula por medio de:**

Ecuación 19.

$$\mu_m = \frac{\mu_L}{\left(1 - \frac{\phi_{Sm}}{\phi_{SS}}\right)^{1.8}}$$

**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 8

$$\mu_m = \frac{0.001923 \text{ kg/m} * \text{s}}{\left(1 - \frac{0.164734}{0.6}\right)^{1.8}} = 0.003426 \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}$$

**Entonces Re es:**

$$Re = \frac{(0.190901)^2 * 2.03 * 1477.668582}{0.003426} = 31866.76$$

- Ya que el valor de Re es mayor a 25,000, el valor de potencia obtenido no necesita correcciones.

De esta forma se efectúa para cada concentración de ácido. Ver resultados totales en tablas L a LV.

**5. Determinación del punto de inflexión de las ecuaciones de correlación de la figura 23 (Sección de resultados), para determinar el tiempo en el cuál aumenta el gradiente de refinación de arcillas:**

**Ejemplo:**

(Curva de Ácido 20%)

$$\%_{\text{refinación}} = 0.0000078t^3 - 0.0026639t^2 - 0.3777513t + 0.4310828$$

▪ **Determinando la primera derivada:**

$$\%_{\text{refinación}}^1 = 0.0000234t^2 - 0.0053278t + 0.277751$$

▪ **Determinando la segunda derivada:**

$$\%_{\text{refinación}}^2 = 0.0000468t - 0.0053278$$

▪ **Igualando a cero y despejando t:**

$$0 = 0.0000468t - 0.0053278$$

$$t = 113.84\text{min}$$

De esta forma se efectúa para las otras ecuaciones de la figura 23.

## Apéndice 2

### Análisis estadístico

#### 1. Análisis de varianza de dos factores

Este análisis de varianza se emplea en un experimento de dos factores utilizando observaciones repetidas en un diseño completamente aleatorio, considerando el caso de  $n$  réplicas de combinaciones de tratamiento determinadas por  $a$  niveles del factor  $A$  y  $b$  niveles del factor  $B$ . Cada combinación define una celda en un arreglo de la siguiente forma.

Tabla XXX. Celda arreglo para el análisis de varianza de dos factores

A	B				Total	Media
	1	2	....	b		
1	$y_{111}$	$y_{121}$	....	$y_{1b1}$	$T_{1..}$	$y_1$
	$y_{112}$	.....		$y_{1b1}$		
.	.			.		
.	.			.		
.	$y_{11n}$	.....		$y_{1bn}$	$T_{2..}$	$y_2$
2	$y_{211}$			$y_{2b1}$		
.	.			.		
.	.			.		
.	.			.		
a	$y_{a1n}$	....		$y_{abn}$		$y_n$
Total	$T_1$	$T_2$	....	$T_b$	$T_{...}$	
Media	$y_1$	$y_2$	....	$y_b$		$y_{....}$

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

La finalidad de este estudio es comprobar cuál hipótesis es la que mejor se ajusta a la parte experimental del estudio, aceptando las hipótesis nulas o las hipótesis alternativas. El método expresó una medida de la variación total de un conjunto de datos como una suma de términos, que se pueden atribuir a fuentes o causas específicas de variación. Para este análisis se emplean las siguientes ecuaciones.

Tabla XXXI. Ecuaciones para el análisis de varianza de dos factores

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	$f$ calculada
Concentración de ácido	$SSA = \frac{\sum_{i=1}^a T_{i..}^2}{bn} - \frac{T^2 \dots}{abn}$	$a - 1$	$S_1^2 = \frac{SSA}{a - 1}$	$f_1 = \frac{s_1^2}{s^2}$
Tiempo de reacción	$SSB = \frac{\sum_{j=1}^b T_{j..}^2}{an} - \frac{T^2 \dots}{abn}$	$b - 1$	$S_2^2 = \frac{SSB}{b - 1}$	$f_2 = \frac{s_2^2}{s^2}$
Interrelación	$SS(AB) = \frac{\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij..}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^a T_{i..}^2}{bn} - \frac{\sum_{j=1}^b T_{j..}^2}{an} + \frac{T^2 \dots}{abn}$	$(a - 1)(b - 1)$	$S_1^2 = \frac{SS(AB)}{(a - 1)(b - 1)}$	$f_1 = \frac{s_{31}^2}{s^2}$
Error	$SSE = SST - SSA - SSB - SS(AB)$	$ab(n - 1)$	$S_1^2 = \frac{SSE}{ab(n - 1)}$	
Total	$SST = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{T^2 \dots}{abn}$	$N - 1$		

Fuente: Referencia bibliográfica No. 10

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

**Ho:** No existe diferencia en el porcentaje de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> remanente en las arcillas al emplear distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido)

**H<sub>0</sub>'**: No existe diferencia en el porcentaje de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> remanente en las arcillas en función del tiempo de reacción.

**H<sub>0</sub>''**: No existe interacción entre la concentración de solvente extractor y los tiempos de reacción.

H<sub>1</sub>: Al menos una de las C<sub>i</sub>'s no es igual a cero

H<sub>1</sub>' : Al menos una de las t<sub>j</sub>'s no es igual a cero

H<sub>1</sub>'' : Al menos una de las (Ct)<sub>ij</sub>'s no es igual a cero

$\alpha = 0.05$

Regiones críticas: a)  $f > 3.89$ , b)  $f > 3.49$ , c)  $f < 3.00$

Las  $f$  tabuladas se obtuvieron con base en la Referencia bibliográfica No. 12.

Para determinar cuál de las tres concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) y tiempo de reacción es preferible, se determinó el porcentaje en peso de Fe(III) extraído de las arcillas una vez finalizada la reacción, analizando las muestras en cuatro tiempos distintos. En el experimento se obtuvieron observaciones duplicadas de remanentes de Fe(III) en cada combinación de tratamientos, según la siguiente tabla:

Tabla XXXII. **Porcentaje de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> remanente en las muestras de arcilla empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo**

<b>Concentración de ácido sulfúrico</b>	<b>Tiempo de reacción</b>			
	<b>t1</b>	<b>t2</b>	<b>t3</b>	<b>t4</b>
<b>C1</b>	33.4440	31.6869	30.9184	28.9343
	33.3373	31.7943	31.1190	29.2823
<b>C2</b>	33.9843	32.7787	31.9962	31.8978
	33.9718	32.8214	31.9871	31.8786
<b>C3</b>	35.1534	34.6115	34.1404	34.0190
	35.1688	34.5843	34.1395	34.0445

Fuente: Datos experimentales

Con base en la tabla anterior se creó la tabla de totales:

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

Tabla XXXIII. Datos intermedios totales de porcentaje de  $Fe_2O_3$  remanente en las arcillas empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo

Concentración de ácido sulfúrico	Tiempo de reacción				
	t1	t2	t3	t4	Total
<b>C1</b>	66.7813	63.4812	62.0374	58.2166	250.5166
<b>C2</b>	67.9560	65.6001	63.9833	63.7764	261.3158
<b>C3</b>	70.3223	69.1958	68.2799	68.0636	275.8615
<b>Total</b>	205.0596	198.2771	194.3005	190.0566	787.6938

Y empleando las ecuaciones de la tabla XXX se obtuvieron las  $f$  calculadas

Tabla.XXXIV. Fuentes de variación de porcentaje de  $Fe_2O_3$  remanente en las arcillas empleando distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido) en función del tiempo

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	$f$ calculada	$f$ tabulada
<b>Concentración de ácido sulfúrico</b>	40.4402	2.0000	20.2201	2,577.4370	> 3.89
<b>Tiempo de reacción</b>	20.3438	3.0000	6.7813	864.4033	> 3.49
<b>Interrelación</b>	5.7366	6.0000	0.9561	121.8726	< 3.00
<b>Error</b>	0.0941	12.0000	0.0078		
<b>Total</b>	66.6147	23.0000			

De lo que se concluye que:

**H<sub>1</sub>**: Sí existe diferencia en el porcentaje de  $Fe_2O_3$  remanente en las arcillas al emplear distintas concentraciones de solvente extractor (ácido sulfúrico diluido)

**H<sub>1</sub>'**: Sí existe diferencia en el porcentaje de  $Fe_2O_3$  remanente en las arcillas en función del tiempo de reacción.

**H<sub>1</sub>''**: Sí existe interacción entre la concentración de solvente extractor y los tiempos de reacción.

Con lo anterior se confirma la hipótesis alternativa planteada, ya que sí existe variación significativa en el porcentaje de refinación de arcillas respecto el cambio en la concentración de solvente extractor en función del tiempo.

## Apéndice 3

### Datos originales

Tabla XXXV. Masa y volumen de picnómetro

	Picnómetro
Masa (g)	4.053
Volumen (ml)	0.982

Tabla XXXVI. Datos para cálculo de densidad de las arcillas con el matraz de Le'Chatellier

	Ácido 20%	Ácido 25%	Ácido 30%
Masa muestra (g)	5.000	5.000	5.000
Volumen desplazado (ml)	2.1	2.00	1.90

Tabla XXXVII. Volúmenes de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, agua y pesos teóricos de hematita para el tamaño de lote

Concentración de ácido (% Volumen)	Peso de hematita (g)	Cantidad de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	Volumen de ácido (ml)	Agua en solución (g)
98	3700	1382.69	1412.79	0
30	3700	1382.69	4615.12	3202.32
25	3700	1382.69	5538.14	4125.35
20	3700	1382.69	6922.67	5509.88

Tabla XXXVIII. Recopilación de datos de muestras de arcilla

Prueba	Hematita	Ácido 20%	Ácido 25%	Ácido 30%
Peso húmedo (g)	----	2300	2100	2500
Peso seco (g)	----	1700	1500	2100
Densidad (g/ml)	2.7100	2.5265	2.5641	2.6316

**EVALUACIÓN TÉCNICA PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS A PARTIR DE MINERAL DE HEMATITA ROJA  
PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA” UBICADA EN CAMOTÁN, CHIQUIMULA, POR EL  
MÉTODO DE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO A NIVEL PLANTA PILOTO.**

---

Tabla XXXIX. **Porcentaje en peso del material sólido en hematita residual en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación**

<b>Composición química</b>	<b>Original</b>	<b>Ácido 20%</b>	<b>Ácido 25%</b>	<b>Ácido 30%</b>
SiO <sub>2</sub>	36.59	39.19	35.81	32.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.37	27.10	29.33	33.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.04	13.40	12.67	10.91
CaO	0.51	0.33	0.34	0.18
MgO	0.00	0.09	0.07	0.02
K <sub>2</sub> O	2.07	2.86	2.83	2.41
Na <sub>2</sub> O	0.59	0.47	0.43	0.31
SO <sub>3</sub>	0.27	1.84	2.28	3.31
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.31	0.15	0.16	0.20
TiO <sub>2</sub>	0.75	0.95	0.92	0.80
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	0.02	0.02	0.02
MnO	0.03	0.01	0.02	0.01
*LOI (950°C)	8.98	13.49	14.85	16.92
<b>Total</b>	<b>97.59</b>	<b>99.54</b>	<b>99.73</b>	<b>100.89</b>

**Fuente.** Anexo 3.

\*Perdidas por ignición.

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

Tabla XL. Recopilación de datos para muestras de sulfato férrico

<b>(Ácido 20%)</b>												
Prueba	30min		$\bar{X}$	60min		$\bar{X}$	90min		$\bar{X}$	120min		$\bar{X}$
	C1	C2		C1	C2		C1	C2		C1	C2	
Densidad (g/ml)	1.262	1.225	1.243	1.294	1.331	1.313	1.301	1.336	1.319	1.295	1.352	1.324
pH	0.11	0.13	0.12	0.23	0.27	0.25	0.27	0.25	0.26	0.26	0.28	0.27
Hierro férrico (ppm)	142.88	142.50	142.69	212.17	214.05	213.11	242.19	240.90	241.54	315.18	315.48	315.33
Vol. de recuperación (ml)	8120											
<b>(Ácido 25%)</b>												
Prueba	30min		$\bar{X}$	60min		$\bar{X}$	90min		$\bar{X}$	120min		$\bar{X}$
	C1	C2		C1	C2		C1	C2		C1	C2	
Densidad (g/ml)	1.345	1.333	1.339	1.333	1.347	1.340	1.342	1.340	1.341	1.341	1.345	1.343
pH	0.09	0.11	0.1	0.22	0.20	0.21	0.23	0.21	0.22	0.26	0.24	0.25
Hierro férrico (ppm)	155.35	154.50	154.92	208.75	209.02	208.88	246.00	246.04	246.02	250.68	251.59	251.14
Vol. de recuperación (ml)	7160											
<b>(Ácido 30%)</b>												
Prueba	30min		$\bar{X}$	60min		$\bar{X}$	90min		$\bar{X}$	120min		$\bar{X}$
	C1	C2		C1	C2		C1	C2		C1	C2	
Densidad (g/ml)	1.394	1.406	1.400	1.400	1.404	1.402	1.410	1.406	1.408	1.413	1.428	1.421
pH	-0.04	-0.06	-0.05	0.06	0.02	0.04	0.05	0.07	0.06	0.25	0.23	0.24
Hierro férrico (ppm)	119.99	120.21	120.10	149.99	151.90	150.95	177.13	176.16	176.65	183.92	184.36	184.14
Vol. de recuperación (ml)	6340											

Tabla XLI. Recopilación de datos para muestras de sulfato férrico, solución de ácido sulfúrico 20%

Tiempo (horas)	Porcentaje de Fe(III) lixiviado (g Fe(III)/gFe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )
0	0.00
0.5	1.16
1	1.41
1.5	1.72
2	2.24
3	2.96
7	4.12
12	5.49

## Apéndice 4

### Datos calculados

Tabla XLII. Datos del cálculo de la densidad de la solución de sulfato férrico

Concentración de ácido (%)	Masa picnómetro (g)	Volumen picnómetro (ml)	Masa de solución + masa de picnómetro (g)			Densidad (g/ml)			Densidad (g/l)
			C1	C2	$\bar{X}$	C1	C2	$\bar{X}$	$\bar{X}$
20	4.053	0.982	5.292	5.256	5.274	1.262	1.225	1.243	1243.381
	4.053	0.982	5.324	5.36	5.342	1.294	1.331	1.313	1312.627
	4.053	0.982	5.331	5.365	5.348	1.301	1.336	1.319	1318.737
	4.053	0.982	5.325	5.381	5.353	1.295	1.352	1.324	1323.829
25	4.053	0.982	5.374	5.362	5.368	1.345	1.333	1.339	1339.104
	4.053	0.982	5.362	5.376	5.369	1.333	1.347	1.340	1340.122
	4.053	0.982	5.371	5.369	5.370	1.342	1.340	1.341	1341.141
	4.053	0.982	5.370	5.374	5.372	1.341	1.345	1.343	1343.177
30	4.053	0.982	5.422	5.434	5.428	1.394	1.406	1.400	1400.204
	4.053	0.982	5.428	5.432	5.43	1.400	1.404	1.402	1402.240
	4.053	0.982	5.438	5.434	5.436	1.410	1.406	1.408	1408.350
	4.053	0.982	5.441	5.455	5.448	1.413	1.428	1.421	1420.570

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

Tabla XLIII. Datos del cálculo de la concentración de Fe(III) en solución

Concentración de ácido (%)	Fe <sup>+3</sup> en solución diluida (mg/l)			Factor de dilución	Fe <sup>+3</sup> en solución real (mg/l)	Fe <sup>+3</sup> en solución real (g/l)	Fe <sup>+3</sup> en solución real (gFe <sup>+3</sup> /g <sub>solución</sub> )
	C1	C2	$\bar{X}$		$\bar{X}$	$\bar{X}$	$\bar{X}$
20	142.88	142.50	142.69	100	14268.82	14.27	0.0114758
	212.17	214.05	213.11	100	21311.07	21.31	0.0162354
	242.19	240.90	241.54	100	24154.19	24.15	0.0183162
	315.18	315.48	315.33	100	31532.85	31.53	0.0238194
25	155.35	154.50	154.92	100	15492.34	15.49	0.0115692
	208.75	209.02	208.88	100	20888.13	20.89	0.0155867
	246.00	246.04	246.02	100	24602.23	24.60	0.0183443
	250.68	251.59	251.14	100	25113.65	25.11	0.0186972
30	119.99	120.21	120.10	100	12009.95	12.01	0.0085773
	149.99	151.90	150.95	100	15094.59	15.09	0.0107646
	177.13	176.16	176.65	100	17664.79	17.66	0.0125429
	183.92	184.36	184.14	100	18414.24	18.41	0.0129626

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Tabla XLIV. Datos totales para la determinación del porcentaje de refinación de arcillas en función de las variaciones en el contenido de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en la hematita, para las diferentes concentraciones de ácido sulfúrico utilizado, y en función del tiempo**

Solución	Tiempo (min)	Porcentaje de Fe(III) lixiviado (g Fe(III)/gFe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Fe(III) extraído (g)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
				Extraído (g)	Remanente en arcillas (g)	Porcentaje remanente (%)	Porcentaje de refinación (%)	Porcentaje de error (%)
20	0.00	---	---	---	---	37.37	0.00	100.00
	30.00	1.15	102.96	147.21	1235.48	33.39	10.65	89.35
	60.00	1.62	145.66	208.26	1174.43	31.74	15.06	84.94
	90.00	1.83	164.33	234.95	1147.74	31.02	16.99	83.01
	120.00	2.38	213.71	305.54	1077.15	29.11	22.10	77.90
	180.00	---	---	---	---	27.10	27.48	72.52
25	0.00	---	---	---	---	37.37	0.00	100.00
	30.00	1.16	87.78	125.50	1257.19	33.98	9.08	90.92
	60.00	1.56	118.26	169.08	1213.61	32.80	12.23	87.77
	90.00	1.83	139.19	199.00	1183.69	31.99	14.39	85.61
	120.00	1.87	141.86	202.83	1179.86	31.89	14.67	85.33
	180.00	---	---	---	---	29.33	21.51	78.49
30	0.00	---	---	---	---	37.37	0.00	100.00
	30.00	0.86	57.16	81.73	1300.96	35.16	5.91	94.09
	60.00	1.08	71.74	102.57	1280.12	34.60	7.42	92.58
	90.00	1.25	83.59	119.51	1263.18	34.14	8.64	91.36
	120.00	1.30	86.39	123.51	1259.18	34.03	8.93	91.07
	180.00	---	---	---	---	33.35	10.76	89.24

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

Tabla XLV. Datos para determinar la relación de extracción de material sólido contenido en hematita después del proceso de lixiviación en función de tres concentraciones de ácido sulfúrico a tres horas de lixiviación

Composición química	Composición porcentual				Relación de extracción		
	Original	Ácido 20%	Ácido 25%	Ácido 30%	Ácido 20%	Ácido 25%	Ácido 30%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	36.59	39.19	35.81	32.45	-2.60	0.78	4.14
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	37.37	27.10	29.33	33.35	10.27	8.04	4.02
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10.04	13.40	12.67	10.91	-3.36	-2.63	-0.87
<b>CaO</b>	0.51	0.33	0.34	0.18	0.18	0.17	0.33
<b>MgO</b>	0.00	0.09	0.07	0.02	-0.09	-0.07	-0.02
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2.07	2.86	2.83	2.41	-0.79	-0.76	-0.34
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.59	0.47	0.43	0.31	0.12	0.16	0.28
<b>SO<sub>3</sub></b>	0.27	1.84	2.28	3.31	-1.57	-2.01	-3.04
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0.31	0.15	0.16	0.20	0.16	0.15	0.11
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.75	0.95	0.92	0.80	-0.20	-0.17	-0.05
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0.08	0.02	0.02	0.02	0.06	0.06	0.06
<b>MnO</b>	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
<b>Total sin lixiviar</b>	88.61	86.41	84.88	83.97	2.20	3.73	4.64
<b>Total sin lixiviar (%)</b>	100.00	97.52	95.79	94.76	2.48	4.21	5.24
<b>Total lixiviado (%)</b>	0.00	2.48	4.21	5.24	----	----	----

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

Tabla XLVI. Datos del cálculo en la recuperación de arcillas

Prueba	Ácido 20%	Ácido 25%	Ácido 30%
Peso seco (g)	1700	1500	2100
Masa teórica de recuperación de arcillas según tamaño de lote (g)	2228	2228	2228
% <sub>error</sub> recuperación de arcillas según tamaño de lote	76.30	67.32	94.26
Densidad (g/ml)	2.5265	2.5641	2.6316

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

Tabla XLVII. Porcentaje de extracción de óxido férrico de la hematita, utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo

Tiempo (horas)	Porcentaje de Fe(III) lixiviado (g Fe(III)/gFe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> )	Porcentaje remanente de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Porcentaje lixiviado de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
0	0.00	37.37	0.00
0.5	1.16	33.35	4.02
1	1.41	32.48	4.89
1.5	1.72	31.41	5.96
2	2.24	29.6	7.77
3	2.96	27.11	10.26
7	4.12	23.09	14.28
12	5.49	18.34	19.03

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

Tabla XLVIII. Estimación del tiempo de extracción total de óxido férrico de la hematita, utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo

Porcentaje lixiviado de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Tiempo total de reacción (horas)
37.37	44.73

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo y apéndice 5, gráfica 31.

Tabla XLIX. Estimación del punto de inflexión de las curvas de: “porcentaje de refinación de arcillas (óxido de hierro extraído) empleando tres diferentes concentraciones de ácido sulfúrico en función del tiempo de lixiviación”

Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%Vol.)	Tiempo (min)
20	113.84
25	101.61
30	111.12

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo y resultados, gráfica 23.

Tabla L. Características físicas de la hematita

Tamaño de lote de hematita – Ss (kg)	Densidad de hematita (kg/m <sup>3</sup> )	Diámetro de partícula (d <sub>p</sub> )		
		µm	m	mm
3.700	2710	106.00	0.000106	0.106

Fuente. Datos originales y Apéndice 1, muestra de cálculo.

Tabla LI. Características físicas de las soluciones de ácido sulfúrico

Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%Vol.)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad	
		cP	kg/m*s
20	1234.6238	1.9228	0.001923
25	1291.7114	1.5986	0.001599
30	1344.9072	1.3290	0.001329

Fuente. Datos originales y metodología.

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

Tabla LII. Dimensiones de reactor

Reactor				
Radio inferior (m)	Radio superior (m)	Altura (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Altura al propulsor (C) (m)
0.125	0.15	0.33	0.0196546	0.04

Fuente. Datos originales y metodología.

Tabla LIII. Volumen y altura de operación para cada concentración de ácido.

Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%Vol.)	Volumen de solvente (m <sup>3</sup> )	Volumen de hematita (m <sup>3</sup> )	Volumen total - V <sub>m</sub> (m <sup>3</sup> )	Altura ocupada en el reactor - h (m)	Diámetro ocupado en el reactor - T (m)	Z' (h-C)
20	0.0069	0.0014	0.0083	0.1540	0.2733	0.1140
25	0.0055	0.0014	0.0069	0.1300	0.1349	0.0900
30	0.0046	0.0014	0.0060	0.1138	0.1336	0.0738

Fuente. Datos originales y Apéndice 1, muestra de cálculo.

Tabla LIV. Datos intermedios para la determinación de potencia, según la concentración de solución de ácido sulfúrico utilizado.

Concentración de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%Vol.)	Relación sólido/líquido (kg/L)	Relación $\frac{m}{sm}$	Densidad de suspensión - $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Velocidad terminal de sedimentación - V <sub>ts</sub> (m/s)	Relación de densidades	t/d <sub>i1</sub>	t/d <sub>i2</sub>
20	2.6189	0.1647	1477.6686	0.0043	1.0150	3.5000	0.9000
25	2.6189	0.1979	1572.4132	0.0054	1.0980	3.4500	0.8500
30	2.6189	0.2283	1656.5535	0.0068	1.1950	3.4000	0.8000

Fuente. Apéndice 1, muestra de cálculo.

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

Tabla LV. Valores de potencia, No. de revoluciones de propulsor, viscosidad de solución y No.Re para cada concentración de ácido sulfúrico.

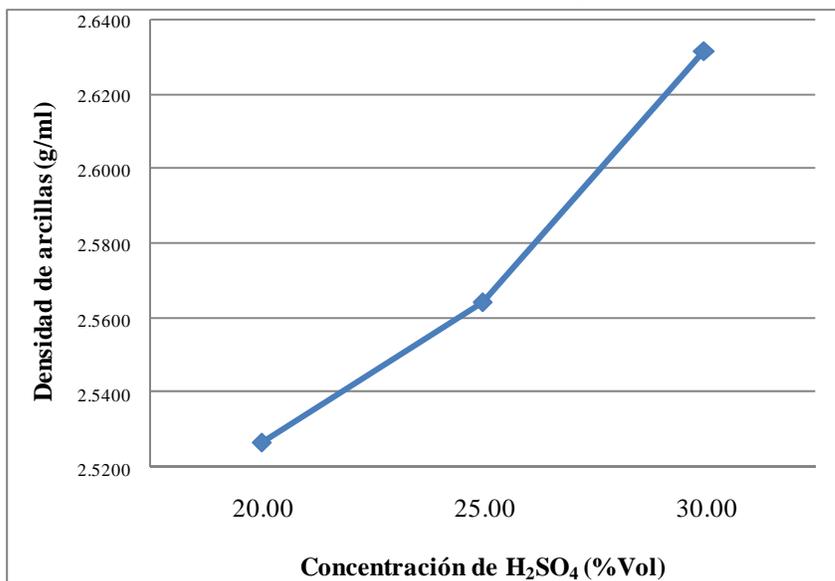
$d_{i_1}$ (m)	$d_{i_2}$ (m)	$d_i$ (m)	Potencia (Watt)	No. de revoluciones del propulsor - N		Viscosidad de la solución - $\mu_m$ (kg/m*s)	Re
				(rps)	(rpm)		
0.0781	0.3037	0.1909	3.1231	2.0276	121.6574	0.0034	31866.7621
0.0391	0.1586	0.0989	11.3333	9.1379	548.2713	0.0033	42744.4749
0.0393	0.1670	0.1032	8.4091	7.5736	454.4170	0.0031	42433.5809

**Fuente.** Apéndice 1, muestra de cálculo.

## Apéndice 5

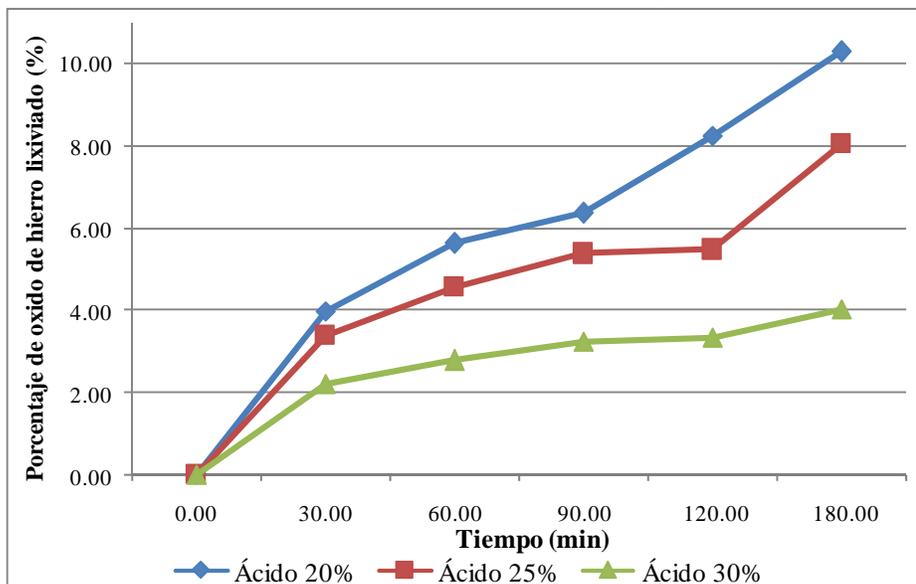
### Gráficas de referencia

Figura 29. Gráfica de densidad de las muestras de arcilla respecto la Concentración de  $H_2SO_4$



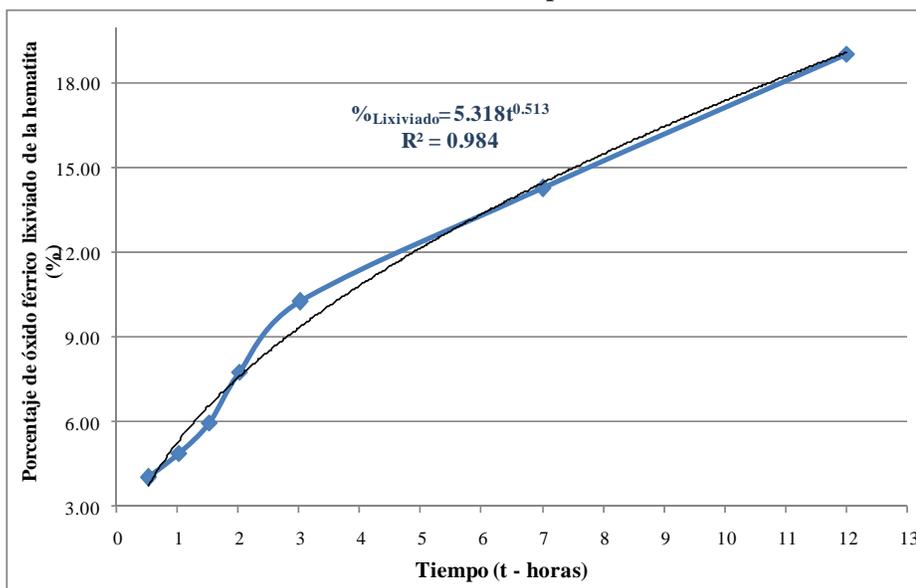
Fuente: Apéndice 4: Sección de datos calculados. Tabla XLVI.

Figura 30. Gráfica de porcentaje de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  lixiviado de la hematita para la tres concentraciones de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  utilizado, en función del tiempo.



Fuente: Apéndice 4: Sección de datos calculados. Tabla XLIV.

Figura 31. Gráfica de correlación para estimar el tiempo de lixiviación completa del óxido férrico en la hematita, para las condiciones experimentales realizadas, utilizando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo



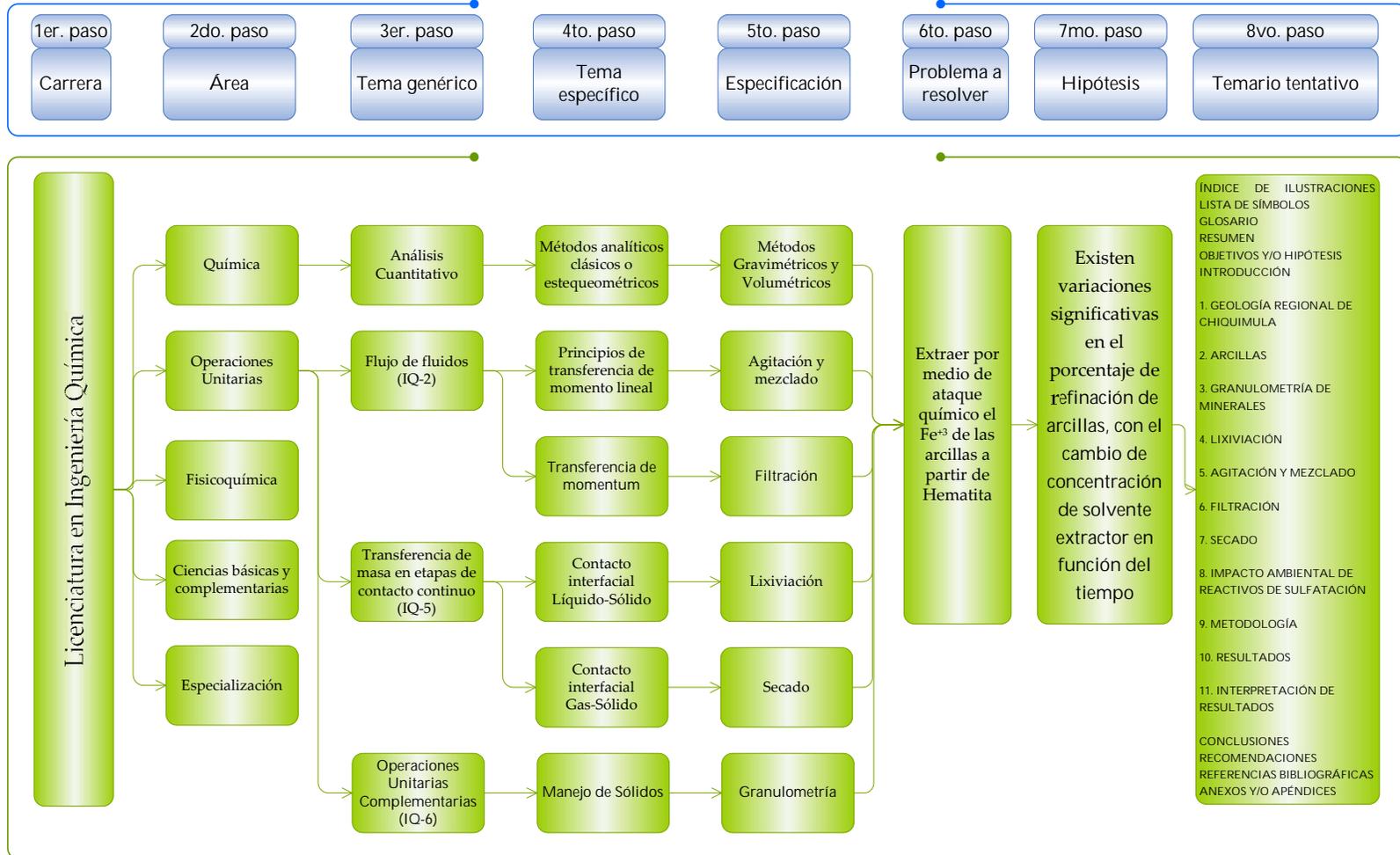
Fuente: Apéndice 4: Sección de datos calculados. Tabla XLVII.

## **Apéndice 6**

### **Diagramas ilustrativos**

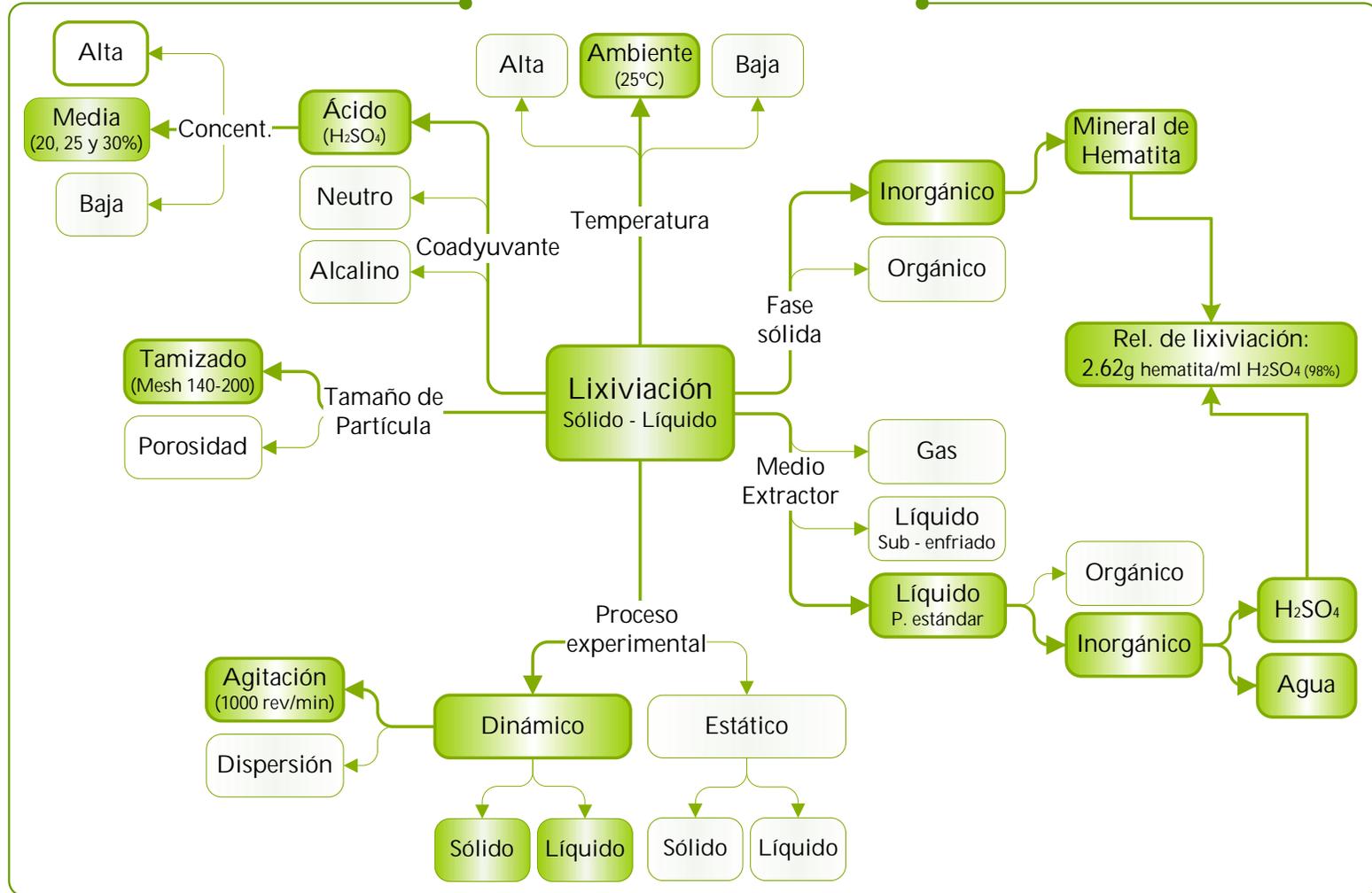
**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Figura 32. Procedimiento para elaborar la tesis**



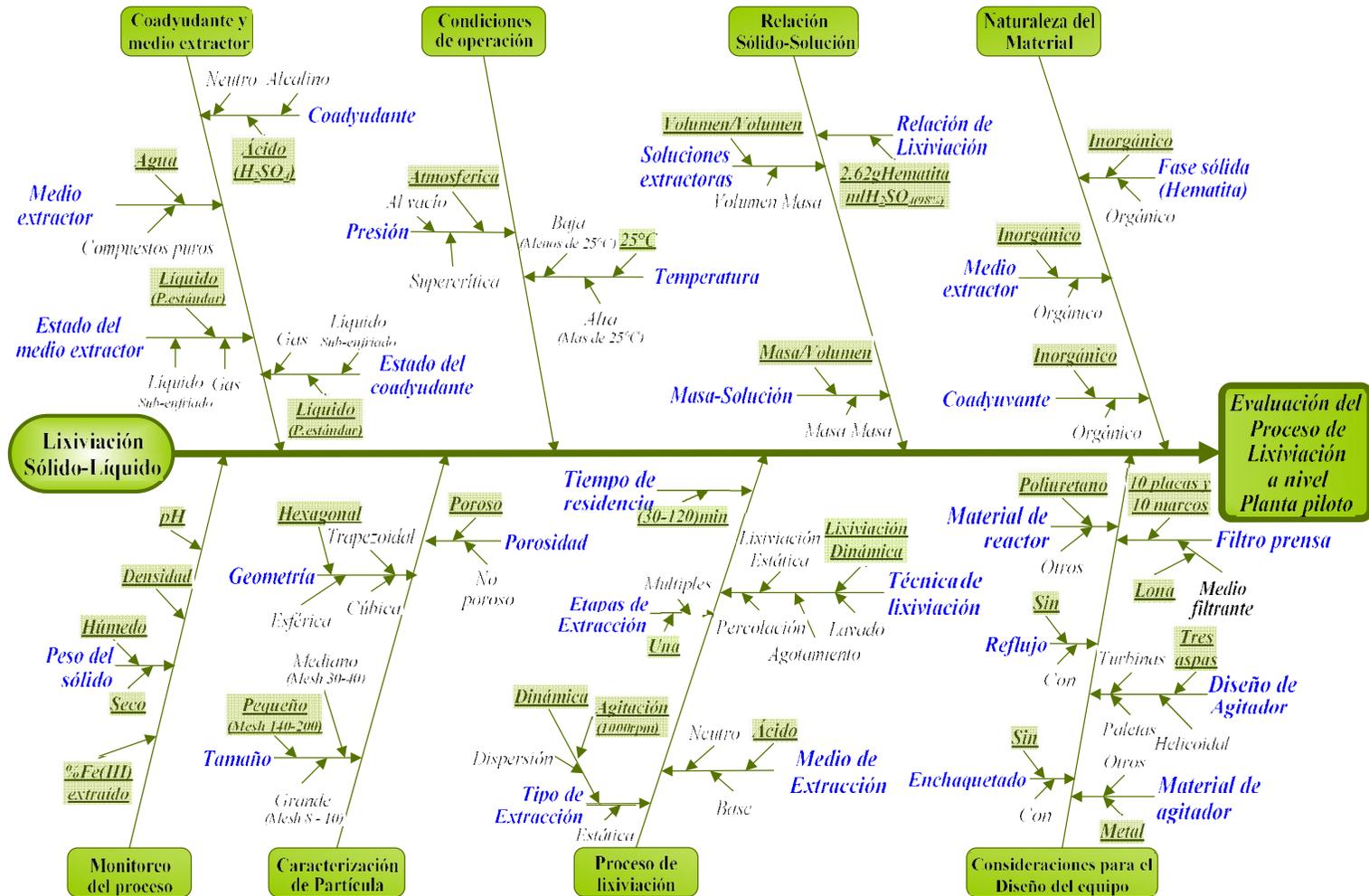
**Fuente:** Referencia bibliográfica No. 12

Diagrama 33. Diagrama esquemático del proceso de lixiviación.



EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

Diagrama 34. Diagrama de causa y efecto (Ishikawa) del proceso de lixiviación para refinación de arcillas.



## Apéndice 7

### Fotografías de la experimentación

Figura 35. Pesaje de las muestras de hematita.



Figura 36. Preparación de lote de hematita.



**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

**Figura 37. Preparación de las soluciones de  $H_2SO_4$ .**



**Figura 38. Momento en el que se agrega la solución de  $H_2SO_4$  al lote de hematita.**



**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

**Figura 39. Proceso de agitación.**



**Figura 40. Aseguramiento de las placas del filtro prensa.**



Figura 41. Limpieza del filtro prensa.

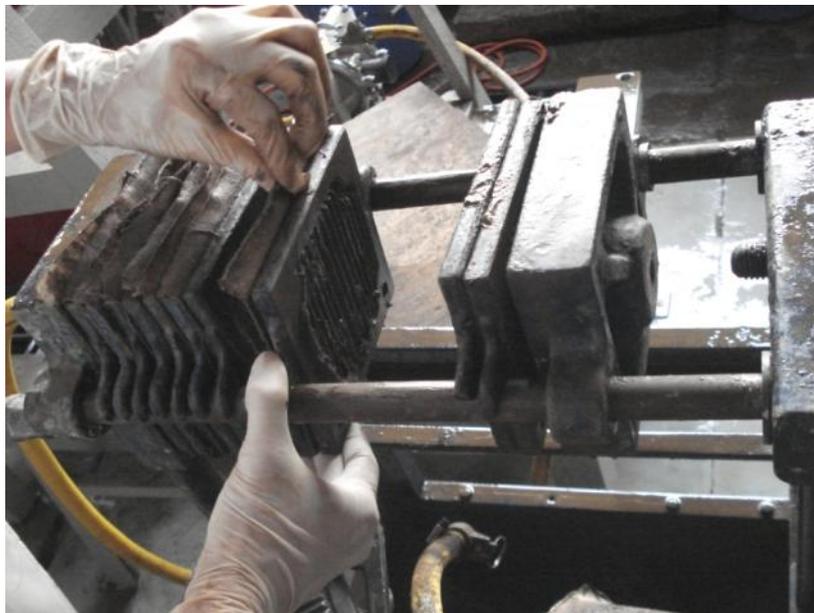


Figura 42. Recolección de arcillas.



**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

**Figura 43. Recolección de muestras en solución para análisis de laboratorio.**



**Figura 44. Equipo de filtración de laboratorio.**



**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

Figura 45. Equipo para medición de pH y densidad de las muestras .



Figura 46. Muestras secas de arcilla.



## ANEXOS

1	Análisis de fluorescencia de rayos X para las muestras de sulfato férrico ...	161
2	Análisis de fluorescencia de rayos x de las muestras de sulfato férrico empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo .....	167
3	Mapas .....	171
4	Análisis de fluorescencia de rayos X para las muestras de arcilla .....	177

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## ANEXO 1

### Análisis de fluorescencia de rayos x de las muestras de sulfato férico empleando ácido sulfúrico a tres diferentes concentraciones (20, 25 y 30% Vol.), en función del tiempo.

Tabla LVI. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 30min

Corrida 1			Corrida 2		
REPORTE DE CONCENTRACIONES Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1			REPORTE DE CONCENTRACIONES Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	1346.5374	0.0000	Si	1246.5474	0.0000
S	37505.7188	0.0000	S	36505.7188	0.0000
Ar	231.4965	No Detectable	Ar	231.4965	No Detectable
K	1509.9366	4.3574	K	1409.9366	4.3674
Ca	1501.5338	5.3307	Ca	1501.5338	5.3307
Cr	279.8409	0.4254	Cr	269.8409	0.4154
Cr	298.1887	0.4532	Cr	298.1787	0.4632
Fe	127657.3516	142.8882	Fe	127559.3516	142.5004
Zn	18899.4023	24.4210	Zn	18899.4022	24.4210
Y	1855.0765	5.0000	Y	1855.0765	5.0000
Rh	733.1279	No Detectable	Rh	733.1279	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LVII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 60 min

Corrida 1			Corrida 2		
REPORTE DE CONCENTRACIONES Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1			REPORTE DE CONCENTRACIONES Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
S	28999.2656	0.0000	S	28899.2656	0.0000
Ar	278.1721	0.0000	Ar	288.1731	0.0000
Cr	342.8135	0.4924	Cr	342.8135	0.4924
Fe	201756.5156	212.1700	Fe	201876.5156	214.0505
Zn	12574.6572	15.3549	Zn	12574.6572	15.3549
Y	1962.0277	5.0000	Y	1963.0277	5.0000
Rh	829.8481	No Detectable	Rh	819.8481	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Tabla LVIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 90min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	2013.2827	0.0000	Si	2013.2827	0.0000
S	6344.1128	0.0000	S	6344.1128	0.0000
Ca	562.9722	12.6066	Ca	562.9722	12.6066
Fe	34259.9102	242.1900	Fe	34259.9102	240.9060
Zn	2434.0442	19.8385	Zn	2434.0442	19.8385
Y	294.1019	5.0000	Y	294.1019	5.0000
Ru	129.1899	No Detectable	Ru	129.1899	No Detectable
Rh	1286.4552	No Detectable	Rh	1286.4552	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**Tabla LIX. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 20%, 120min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Fe	67436.5781	315.18	Fe	67437.9856	315.48
Zn	2935.5857	17.4573	Zn	2945.5857	17.4673
Zn	2975.2859	17.6934	Zn	2945.2859	17.6954
Y	403.0834	5.0000	Y	403.0834	5.0000
Ru	641.3408	No Detectable	Ru	741.3408	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**Tabla LX. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 30min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	3589.3601	0.0000	Si	3589.3601	0.0000
S	5957.0850	0.0000	S	5957.0850	0.0000
Ar	271.1050	No Detectable	Ar	271.1050	No Detectable
Fe	22194.2168	154.5000	Fe	22198.2859	155.3505
Zn	2988.7319	24.1178	Zn	2988.7319	24.1178
Y	297.0483	5.0000	Y	297.0483	5.0000
Rh	2501.1797	No Detectable	Rh	2501.1797	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Tabla LXI. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de Ácido 25%, 60min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	1672.6210	0.0000	Si	1672.6210	0.0000
S	7440.0054	0.0000	S	7440.0054	0.0000
Ar	705.3879	No Detectable	Ar	705.3879	No Detectable
Cr	120.4340	0.6861	Cr	120.4340	0.6861
Fe	49862.9180	208.8813	Fe	49872.7765	208.75
Zn	3875.1082	18.7663	Zn	3875.1082	18.7663
Y	494.9739	5.0000	Y	494.9739	5.0000
Rh	197.9914	No Detectable	Rh	197.9914	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**Tabla LXII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 90min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	3589.4978	0.0000	Si	3589.4988	0.0000
S	38918.4648	0.0000	S	38918.4668	0.0000
Ar	291.3838	No Detectable	Ar	291.3838	No Detectable
Ca	2380.9719	10.2089	Ca	2380.9819	10.2099
Cr	299.6779	0.5501	Cr	299.7779	0.5551
Cr	290.4862	0.5333	Cr	290.4862	0.5333
Fe	182245.4531	246.0223	Fe	182265.4531	246.0400
Zn	14821.7148	23.1307	Zn	14821.7148	23.1307
Y	1535.9828	5.0000	Y	1535.9828	5.0000
Rh	1658.8171	No Detectable	Rh	1758.1258	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Tabla LXIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 25%, 120min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	3889.4978	0.0000	Si	3589.4988	0.0000
S	3888.4648	0.0000	S	38918.4668	0.0000
Ar	296.3838	No Detectable	Ar	291.3838	No Detectable
Ca	2380.9719	10.2089	Ca	2381.9819	10.2099
Cr	299.6779	0.5501	Cr	298.7779	0.5651
Cr	290.4862	0.5333	Cr	290.4862	0.5333
Fe	182245.4531	250.68	Fe	182748.4531	251.59
Zn	14921.7148	23.1307	Zn	14821.7148	23.1307
Y	1635.9828	5.0000	Y	1835.9828	6.0000
Rh	1658.8171	No Detectable	Rh	1758.1258	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**Tabla LXIV. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de Ácido 30%, 30min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	397.7366	0.0000	Si	399.7666	0.0000
S	7878.3257	No Detectable	S	7878.3268	No Detectable
Ar	239.8315	No Detectable	Ar	240.8315	No Detectable
Cr	276.8685	0.8030	Cr	276.8685	0.8030
Fe	56312.2422	120.0995	Fe	56310.2589	119.99
Zn	4966.3560	12.2447	Zn	4966.3560	12.2447
Y	972.2223	5.0000	Y	972.2223	5.0000
Rh	944.6155	No Detectable	Rh	944.6155	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Tabla LXV. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 60min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	802.7828	0.0000	Si	902.7999	0.0000
S	17169.7246	0.0000	S	17169.6586	0.0000
Ar	169.4493	No Detectable	Ar	169.4493	No Detectable
Cr	254.3699	0.3699	Cr	254.3699	0.3699
Fe	141149.5313	151.9094	Fe	141149.4313	149.99
Zn	9522.4053	11.7723	Zn	9587.4053	11.7823
Y	1938.9302	5.0000	Y	1938.9302	5.0000
Rh	999.5897	No Detectable	Rh	999.5897	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**Tabla LXVI. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 90min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	1820.3035	0.0000	Si	1820.3035	0.0000
S	11108.0654	0.0000	S	11108.0654	0.0000
Ar	279.7265	No Detectable	Ar	279.7265	No Detectable
Cr	371.6596	0.7125	Cr	371.6596	0.7125
Fe	125301.3750	176.6479	Fe	125301.3750	176.6479
Zn	11303.2520	18.4217	Zn	11303.2520	18.4217
Y	1470.7930	5.0000	Y	1470.7930	5.0000
Rh	957.5160	No Detectable	Rh	957.5160	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

Tabla LXVII. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 30%, 120min**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	932.7004	0.0000	Si	932.7004	0.0000
S	12890.0869	0.0000	S	12890.0869	0.0000
Ar	373.4822	No Detectable	Ar	373.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.0137	Cr	400.4605	1.2139
Fe	98919.5156	183.92	Fe	98919.5156	184.36
Zn	8396.7129	18.0698	Zn	8396.7129	18.1698
Y	1113.8641	5.0000	Y	1113.8641	5.0000
Rh	788.8373	No Detectable	Rh	801.6370	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

## ANEXO 2

### Análisis de fluorescencia de rayos x de las muestras de sulfato férrico, empleando ácido sulfúrico al 20% en función del tiempo

Tabla LXVIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 0.5 horas

Corrida 1			Corrida 2		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	931.4589	0.0000	Si	932.7004	0.0000
S	12780.0869	0.0000	S	12890.0869	0.0000
Ar	389.4822	No Detectable	Ar	373.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.01478	Cr	400.4605	1.2139
Fe	98929.5156	146.3698	Fe	98919.5156	145.698
Zn	8496.7129	17.0796	Zn	8396.7129	18.1698
Y	1113.8641	5.0000	Y	1113.8641	5.0000
Rh	788.8373	No Detectable	Rh	788.8373	No Detectable
Rh	801.6370	No Detectable	Rh	801.6370	No Detectable

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXIX. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 1 hora

Corrida 1			Corrida 2		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	922.7004	0.0000	Si	932.7004	0.0000
S	17890.0869	0.0000	S	12890.0869	0.0000
Ar	229.4822	No Detectable	Ar	373.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.0137	Cr	4010.4605	1.2139
Fe	99919.5478	181.4589	Fe	99819.5156	180.45
Zn	8396.7129	18.0698	Zn	8396.7229	18.1698
Y	1113.8641	5.0000	Y	1113.8941	5.0000
Rh	788.8373	No Detectable	Rh	789.8389	No Detectable
Rh	801.6370	No Detectable	Rh	803.6470	No Detectable

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

Tabla LXX. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 1.5 horas**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	831.4589	0.0000	Si	732.7004	0.0000
S	13780.0869	0.0000	S	12890.0869	0.0000
Ar	379.4512	No Detectable	Ar	542.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.01478	Cr	300.9605	1.2139
Fe	199929.51	222.1200	Fe	198919.88	221.2469
Zn	8596.7329	17.0796	Zn	8397.7129	18.1698
Y	1115.8641	5.0000	Y	1113.8641	5.0000
Rh	758.8473	No Detectable	Rh	788.8373	No Detectable
Rh	821.7370	No Detectable	Rh	801.6370	No Detectable

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

Tabla LXXI. **Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 2 horas**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
REPORTE DE CONCENTRACIONES			REPORTE DE CONCENTRACIONES		
Estándar Interno = Y			Estándar Interno = Y		
Factor de Dilución = 1			Factor de Dilución = 1		
ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN	ELEMENTO	ÁREA	CONCENTRACIÓN
(mg/l)			(mg/l)		
Si	922.7004	0.0000	Si	952.784	0.0000
S	17890.0869	0.0000	S	12890.0760	0.0000
Ar	449.4822	No Detectable	Ar	473.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.0137	Cr	402.4705	1.2139
Fe	194819.78	298.4567	Fe	1989829.55	297.4512
Zn	8396.7129	18.0698	Zn	8396.7229	18.1698
Y	1113.8641	5.0000	Y	1213.8941	5.0000
Rh	788.8373	No Detectable	Rh	789.8389	No Detectable
Rh	801.6370	No Detectable	Rh	811.6487	No Detectable

Fuente: Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

**Tabla LXXII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 3 horas**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
<b>REPORTE DE CONCENTRACIONES</b> Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1 ELEMENTO    ÁREA    CONCENTRACIÓN (mg/l)			<b>REPORTE DE CONCENTRACIONES</b> Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1 ELEMENTO    ÁREA    CONCENTRACIÓN (mg/l)		
Si	931.4589	0.0000	Si	932.7004	0.0000
S	12780.0869	0.0000	S	12890.0869	0.0000
Ar	389.4822	No Detectable	Ar	373.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.01478	Cr	400.4605	1.2139
Fe	98929.5156	398.4570	Fe	98919.5156	583.1204
Zn	8496.7129	17.0796	Zn	8396.7129	18.1698
Y	1213.8641	5.0000	Y	1113.8641	5.0000
Rh	789.8473	No Detectable	Rh	788.8373	No Detectable
Rh	801.6370	No Detectable	Rh	801.6370	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

**Tabla LXXIII. Análisis de fluorescencia de rayos X, muestra de ácido 2-20%, 7 horas**

<b>Corrida 1</b>			<b>Corrida 2</b>		
<b>REPORTE DE CONCENTRACIONES</b> Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1 ELEMENTO    ÁREA    CONCENTRACIÓN (mg/l)			<b>REPORTE DE CONCENTRACIONES</b> Estándar Interno = Y Factor de Dilución = 1 ELEMENTO    ÁREA    CONCENTRACIÓN (mg/l)		
Si	922.8004	0.0000	Si	932.7004	0.0000
S	17990.0869	0.0000	S	12890.0869	0.0000
Ar	230.4822	No Detectable	Ar	373.4822	No Detectable
Cr	400.4605	1.0137	Cr	401.4605	1.2139
Fe	19198.5478	584.7895	Fe	1899819.59	583.1204
Zn	8396.7129	18.0698	Zn	8396.7229	18.1698
Y	1113.8641	5.0000	Y	1223.8941	5.0000
Rh	798.8473	No Detectable	Rh	789.8389	No Detectable
Rh	811.6370	No Detectable	Rh	803.6470	No Detectable

**Fuente:** Laboratorio fisicoquímica, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia

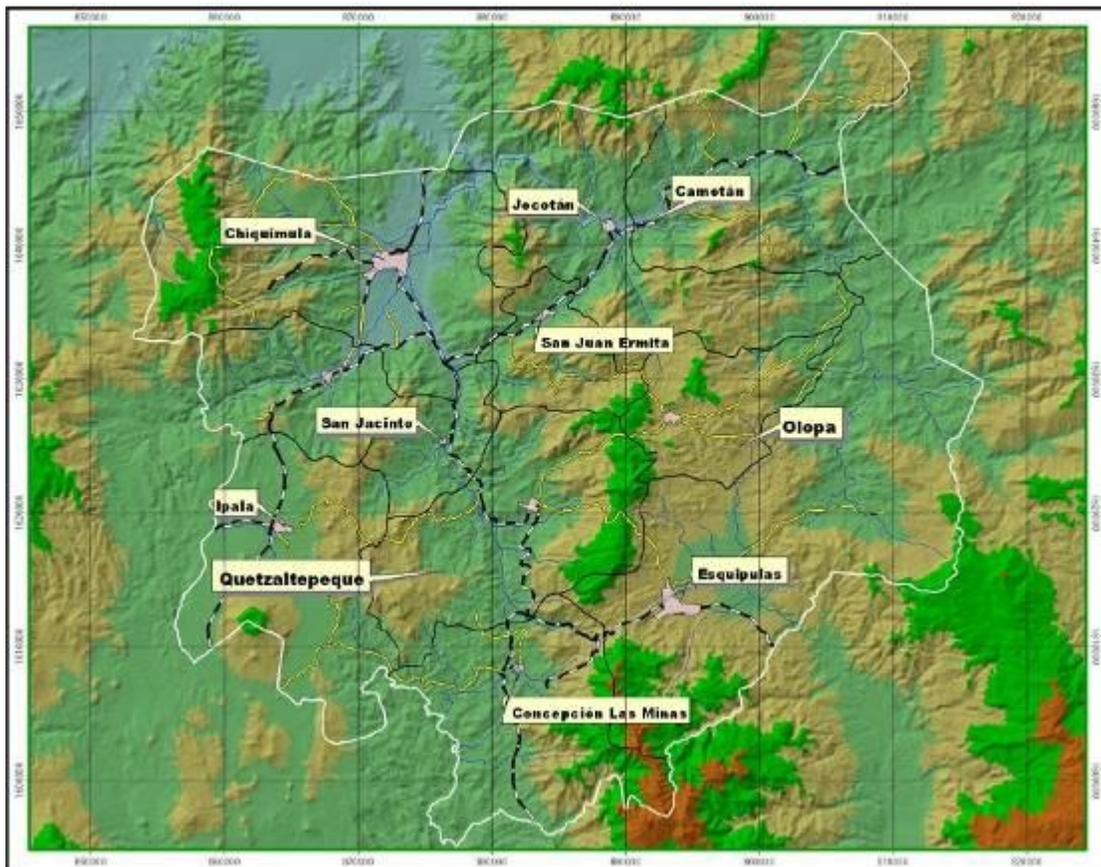
**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE  
LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA  
“QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## ANEXO 3

### Mapas

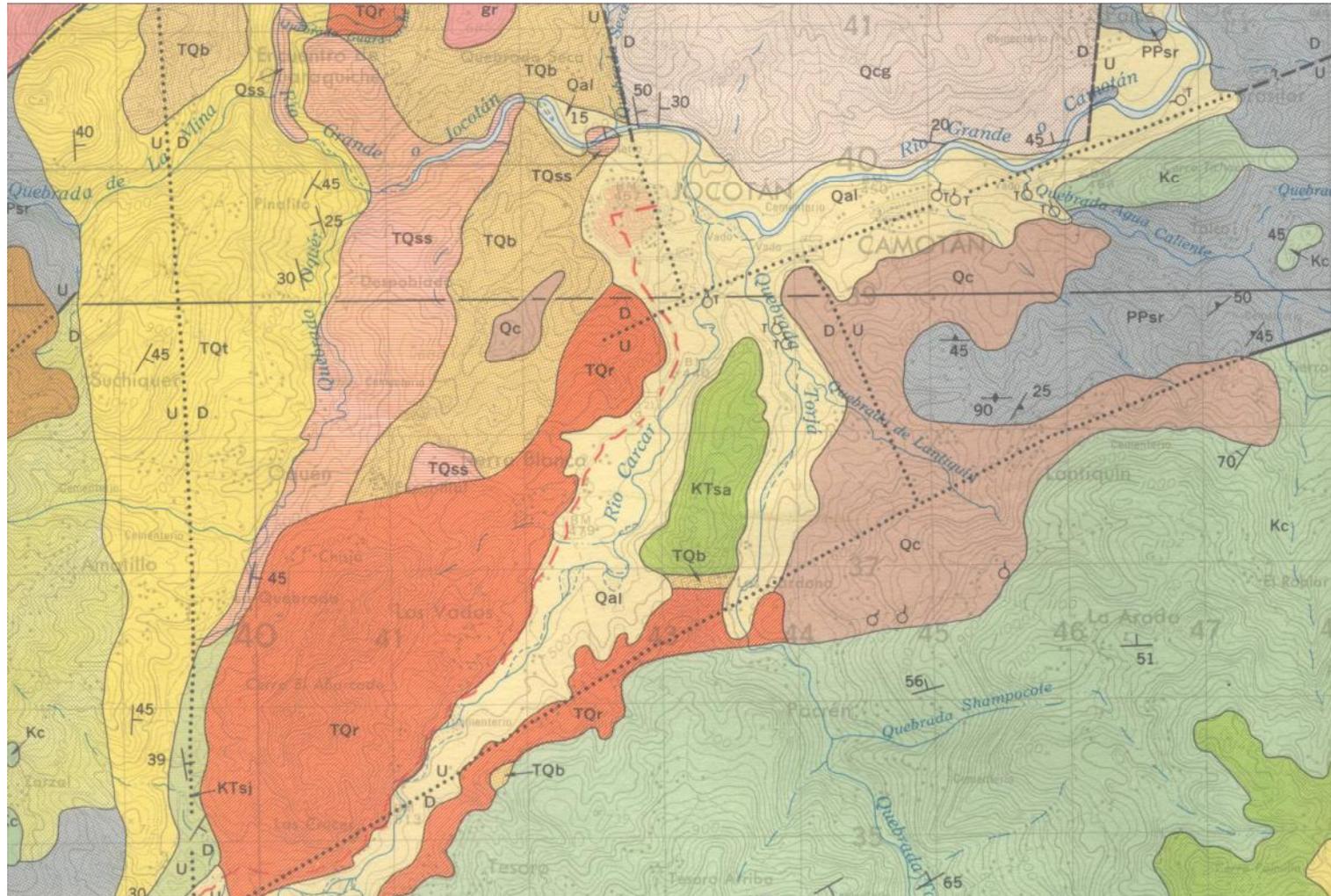
Figura 47. Mapa de Chiquimula



Fuente: Referencia electrónica No. 9

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

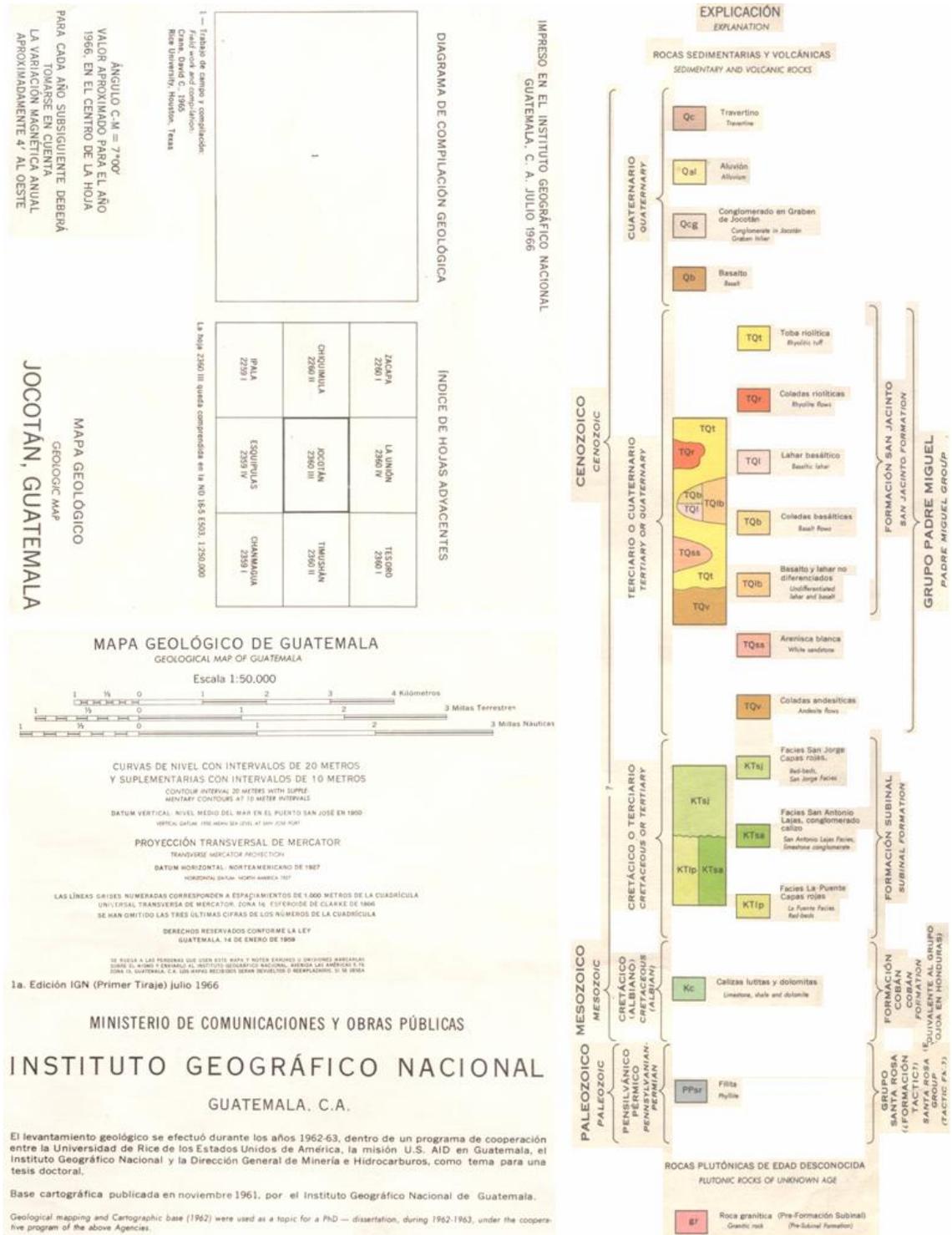
Figura 48. Mapa de Camotán, Chiquimula



Fuente. CECM, USAC

**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

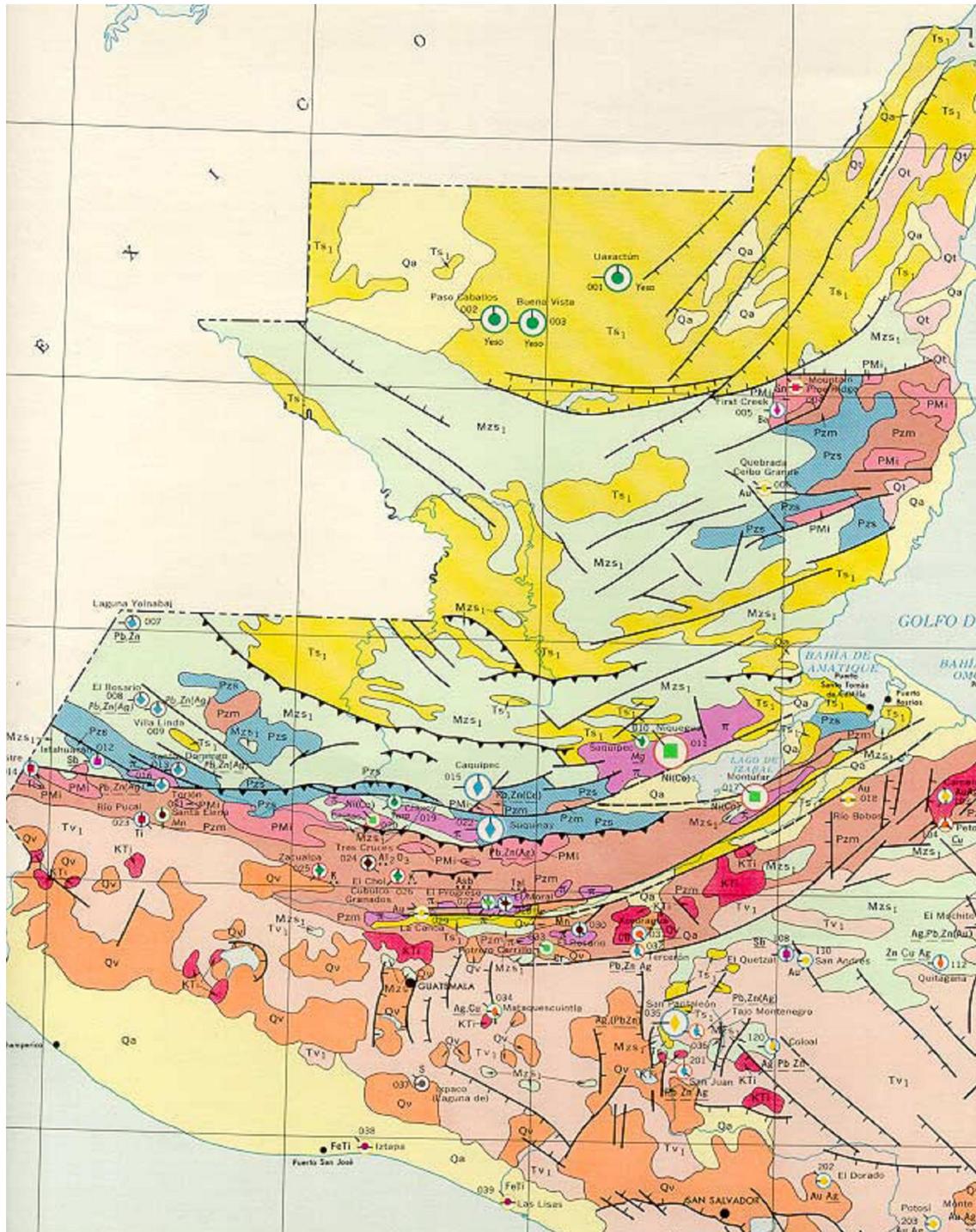
**Figura 49. Descripción técnica de Mapa de Camotán, Chiquimula**



Fuente. CECM, USAC

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

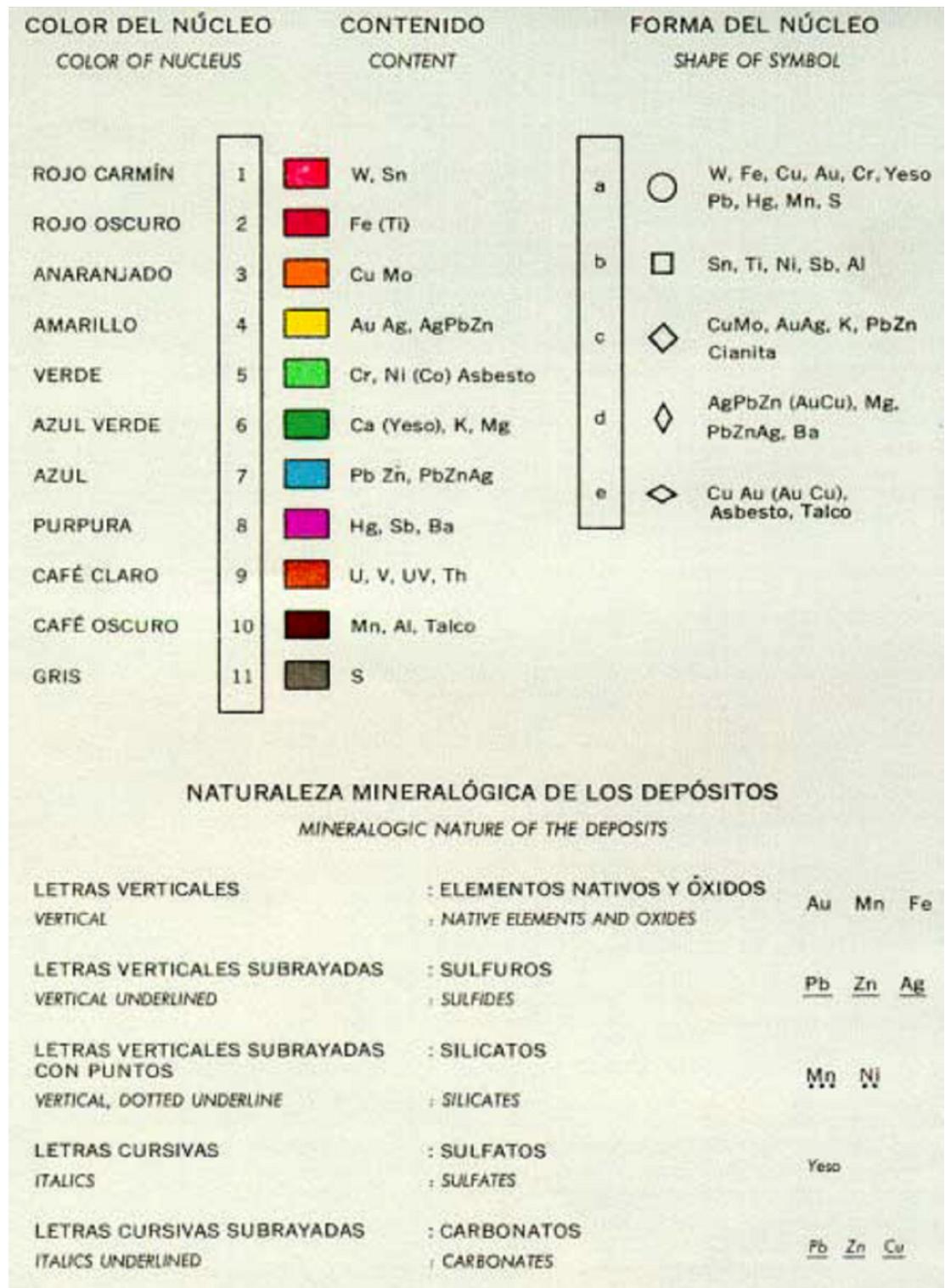
Figura 50. Mapa metalogénico de Guatemala



Fuente. Referencia electrónica No. 1

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

Figura 51. Simbología del mapa metalogénico de Guatemala



Fuente. Referencia electrónica No. 1

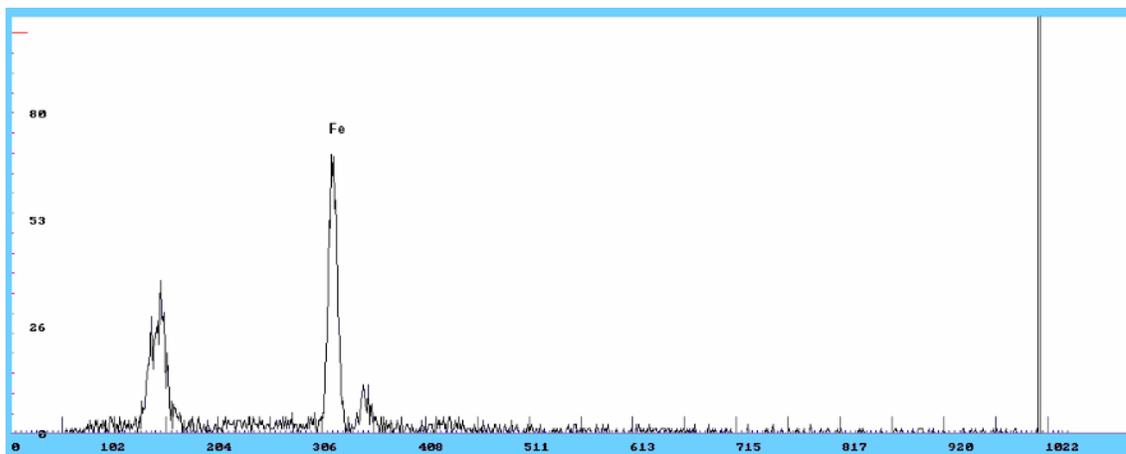
**EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.**

---

## ANEXO 4

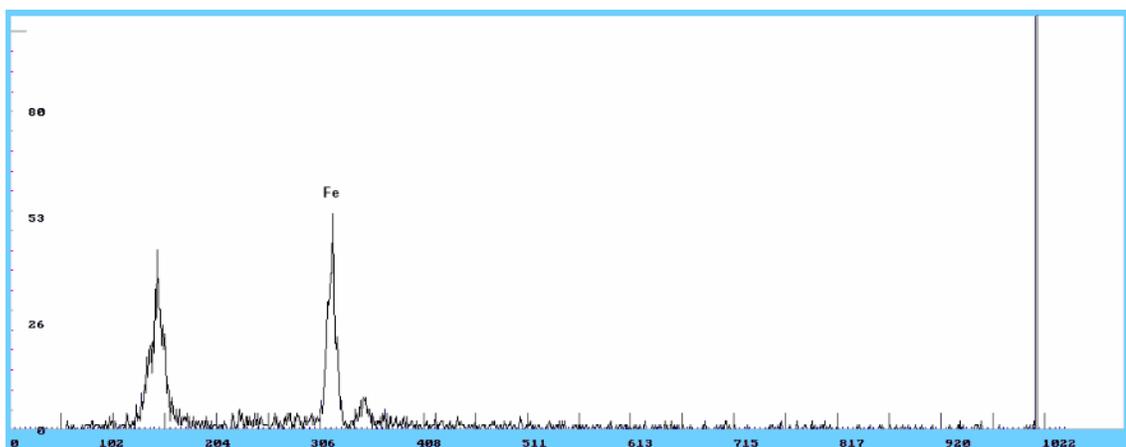
### Análisis de fluorescencia de rayos X de las muestras de arcilla

Figura 52. Espectro de la composición química de la muestra de hematita.



Fuente. Laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Figura 53. Espectro de la composición química de la muestra de hematita , tratada con la solución de ácido sulfúrico al 20%.

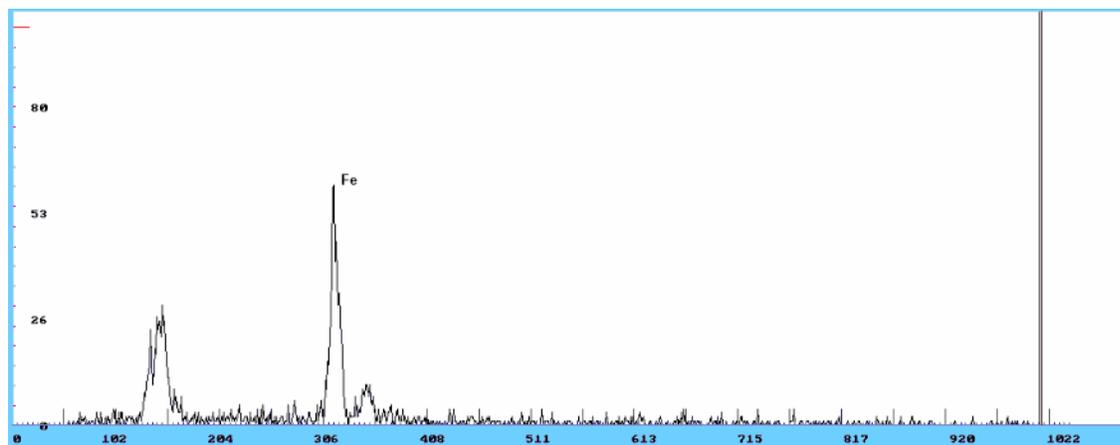


Fuente. Laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

EVALUACIÓN TÉCNICA A NIVEL PLANTA PILOTO PARA LA REFINACIÓN DE ARCILLAS, MEDIANTE LIXIVIACIÓN DE HIERRO CON ÁCIDO SULFÚRICO, A PARTIR DE HEMATITA PROVENIENTE DE LA MINA “QUEBRADA MARÍA”, CAMOTÁN, CHIQUIMULA.

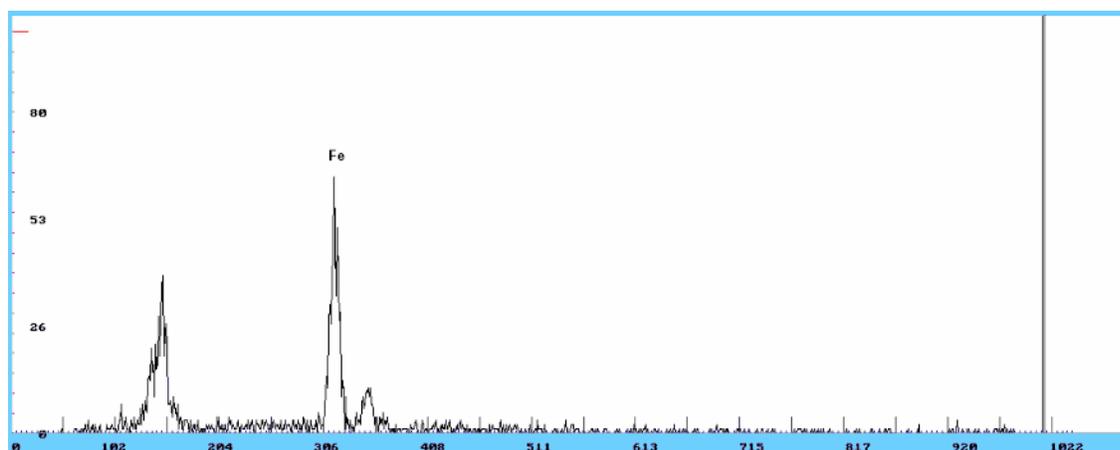
---

Figura 54. Espectro de la composición química de la muestra de hematita , tratada con la solución de ácido sulfúrico al 25%.



Fuente. Laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.

Figura 55. Espectro de la composición química de la muestra de hematita , tratada con la solución de ácido sulfúrico al 30%.



Fuente. Laboratorio de fisicoquímica de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia.