



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

ELIMINACIÓN DE HIERRO DE UNA ARCILLA CAOLINÍTICA POR MEDIO DE LIXIVIACIÓN ACIDA INVERSA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

YOSBANI REYES MONTERO

MOA
2012



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA

ELIMINACIÓN DE HIERRO DE UNA ARCILLA CAOLINÍTICA POR MEDIO DE LIXIVIACIÓN ACIDA INVERSA

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Autor: Yosbani Reyes Montero

Firma_____

Tutores: Ing. Sergio R. Cabo de Villa Figueiral

Firma_____

Prof. Aux. Ing. Amaury Palacios Rodríguez, Dr C

Firma_____

MOA

2012

Pensamiento

Tenemos que dar nuestros pasos de avance en sentido tecnológico, crear nuestra técnica, la técnica que son nuestros propios técnicos, suministrar la base para que avancemos nosotros por nuestra propia cuenta, para que no tengamos que recibir siempre técnicos de países amigos que vengan a enseñarnos cada cosa como hay que hacerla, para que después caminemos con nuestros propios pies.

Ernesto "Ché" Guevara

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma sincera la colaboración de todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

- Ø A la revolución cubana por darme la oportunidad de cursar mis estudios y alcanzar el título de Ingeniero.*
- Ø Un agradecimiento muy especial a mis tutores Sergio R. Cabo de Villa, Amaury Palacios Rodríguez y Evangelia por su ayuda incondicional.*
- Ø A mi querida madre Concepción Montero Ramirez, esposa, hermano y familiares.*
- Ø A mi jefe Aníbal Peláez y compañeros de trabajo por su ayuda desinteresada.*
- Ø A Bladimir Rodriguez, por toda su ayuda y apoyo para que esta investigación se realizara.*
- Ø A Carlos Mendoza por su ayuda incondicional.*
- Ø A todas las personas que de una u otras forma me ayudaron y creyeron en mí.*

DEDICATORIA

- ◆ *A mis padres Concepción y Edeleide, cuya educación, valor y ejemplo, me ha permitido alcanzar esta meta.*
- ◆ *A mis tutores, Sergio R. Cabo de Villa, Amaury Palacios y Evangelia García por su ayuda incondicional, dedicación y por todo lo que hicieron por mí.*
- ◆ *A mi esposa Maritza e hijos.*
- ◆ *A mis hermanos(a), Yoel, Odalis, Alejandro, Alexis.*
- ◆ *A todos los que de una forma u otra me ayudaron a la realización de mi tesis, a los que me apoyaron cuando me hizo falta, a los que creyeron en mí.*

RESUMEN

La investigación tiene como objetivo el proceso de lixiviación ácida inversa de la arcilla, determinar la influencia de los principales parámetros que intervienen en el proceso de lixiviación, empleando un agente lixivante. Para llevar a efecto el propósito de la investigación se empleó el diseño factorial completo, donde se estudiaron como variables independientes: la temperatura, la concentración inicial de ácido clorhídrico y la granulometría del mineral, cuya realización fue a escala de laboratorio en un reactor de 1L de capacidad. Se obtuvo un modelo estadístico – matemático, el que permitió analizar la influencia de los principales parámetros, determinándose que los mismos influyen de forma positiva en la extracción de hierro, en el orden siguiente: temperatura (40-80 °C), concentración inicial de ácido clorhídrico (38 %) y granulometría (-0,075 y -0,15).

ABSTRACT

Investigation aims at the process of acid inverse lixiviation of the clay, determining the influence of principal parameters that audit in the process of lixiviation, using a factor lixivante. In order to put the purpose of investigation into effect complete factorial, where they studied themselves like independent variables used the design itself: The temperature, the initial concentration of hydrochloric acid and the classification by size of particles of the mineral, whose realization was to scale of laboratory in 1L's reactor of capability. A model statistician was obtained - mathematician, the one that he permitted examining the influence of principal parameters, being determined that the same ones influence positively the extraction of iron, in the order following: Temperature (40-80 °C), initial concentration of hydrochloric acid (38 %) and classification by size of particles (- 0.075 and -0.15).

ÍNDICE	PÁG.
INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	4
1.1 Antecedentes de la investigación y estado actual del tema	4
1.2 Composición molecular de la arcilla	7
1.3 Forma y tamaño de las partículas	7
1.4 Propiedades de las arcillas	8
1.4.1 Plasticidad	8
1.4.2 Capacidad de absorción	9
1.4.3 Hidratación e hinchamiento	9
1.4.4 Tixotropía	10
1.4.5 Capacidad de la arcilla de endurecer al secarla	10
1.4.6 Retracción de la arcilla	11
1.4.7 Transición durante la cochura al estado pétreo	11
1.4.8 Adiciones a las arcillas para hacerlas útiles	12
1.4.9 Impurezas más comunes en las arcillas	13
1.4.10 Características de las arcillas caolinítica	13
1.4.11 Clasificación de las arcillas	14
1.4.12 Manifestaciones de la arcilla de Cayo Guam	14
1.5 Características de la materia prima arcilla roja de Cayo Guam	15
1.6 Composición Química de la arcilla de Cayo Guam	15
Conclusiones parciales	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1 Reactivos	17
2.2 Materiales y herramientas:	17
2.3 Instalación empleada en el proceso de investigación	17
2.4 Principales factores que influyen en la extracción de hierro de la arcilla, por medio de la lixiviación ácida inversa	19
2.5 Método de modelación estadística	26
2.6 Técnicas de análisis	30
2.6.1 Método de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos-X.	30

2.6.2 Método de Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP).	31
Conclusiones parciales	32
3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	33
3.1 Análisis estadístico	33
3.2 Influencia de la temperatura	36
3.3 Influencia de la granulometría	37
3.4 Influencia de la concentración inicial del ácido clorhídrico	38
3.5 Composición química del sólido obtenido.	39
3.6 Composición química del licor obtenido	40
3.7 Evaluación ecológica	41
3.8 Impacto Ambiental	42
3.9 Problemas ambientales en las diferentes etapas del proceso	42
3.9.1 Beneficio de la materia prima	42
3.9.2 Conformación y Acabado	43
Conclusiones parciales	44
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47

INTRODUCCIÓN

Cuba posee grandes riquezas de minerales y que están diseminadas por todo lo largo y ancho del país, constituye un baluarte económico y son reconocidas internacionalmente. En la provincia de Holguín, municipio de Moa, lo convierte en uno de los mayores productores de Níquel y Cobalto del mundo y una de las principales vías de desarrollo económico de nuestro país. Sin embargo se conoce muy poco de las grandes posibilidades que tienen sus cortezas aluminosas para ser empleadas como arcillas en la industria de la cerámica.

Actualmente, los productos cerámicos constituyen una amplia gama de nuevos materiales que pudieran sustituir incluso a metales y polímeros en la fabricación de componentes de motores térmicos, herramientas de corte y otros accesorios para mejorar la resistencia al desgaste y a la abrasión, a ambientes corrosivos y a altas temperaturas, debido a las excelentes propiedades mecánicas, ópticas, eléctricas, refractariedad y elevada resistencia a los agentes corrosivos.

Actualmente existe una demanda creciente de nuevas tecnologías para el tratamiento y beneficio de diversos minerales, que permitan ampliar su potencialidad de uso industrial. Tal es el caso de los talcos y arcillas caoliníticas utilizados por las industrias de cerámica, del papel, y en la producción de cemento, etc., las cuales requieren estrictas especificaciones de pureza.

Estos requerimientos hacen que muchos de estos minerales no puedan ser usados industrialmente, debido a la presencia de contaminantes tales como el hierro, ya que éste le confiere una indeseable coloración y afecta las propiedades refractarias del producto elaborado.

En los talcos y arcillas caoliníticas, el hierro se encuentra bajo la forma de óxidos, hidratados y anhidros, e hidróxidos (usualmente como Fe^{3+}). Los óxidos e hidróxidos de hierro se pueden encontrar como fases separadas del mineral o adsorbidos en la superficie de éste (hierro coloidal). La presencia del hierro coloidal, usualmente como óxido hidratado, afecta notoriamente el color de la arcilla caoliníticas y del talco cuando éstos son calcinados, y su remoción es dificultosa debido a que está adsorbido fuertemente sobre la superficie del mineral. El hierro también puede encontrarse como pirita, que al igual que el hierro coloidal, modifica la coloración del talco y de la arcilla caoliníticas durante el proceso de calcinación. Además, puede

hallarse formando parte de la estructura cristalina de la arcilla, del talco y de las impurezas, como el clinocloro, el cual habitualmente acompaña al talco.

Los procesos empleados para eliminar el hierro de las arcillas caoliníticas son: separación magnética de alta energía, flotación por espuma, floculación, biolixiviación y lixiviación. Con este último método se puede remover completamente el hierro, pero también provoca el colapso de la estructura de la arcilla como consecuencia de la reducción del hierro estructural. La lixiviación inversa consiste en pasar a la solución los compuestos impurezas del sistema, dejando a la parte útil en el producto sólido, todo lo contrario al concepto de lixiviación.

El municipio Moa posee importantes yacimientos de arcillas diseminadas por todo el territorio y en la actualidad no son aprovechados para fines industriales.

Por lo que el **Problema científico** de esta investigación es el insuficiente conocimiento de la influencia de los principales parámetros tecnológicos que intervienen en la lixiviación ácida inversa, para la eliminación del hierro contenido en la arcilla.

El **Objeto de estudio** es el proceso de lixiviación ácida de la arcilla.

Se propone como **Objetivo** determinar la influencia de los principales parámetros tecnológicos del proceso de lixiviación ácida inversa de la arcilla para la eliminación del hierro contenido en ella.

Como **Hipótesis** se plantea que si se determina la influencia de los principales parámetros tecnológicos del proceso de lixiviación ácida inversa de la arcilla, entonces se podrá extraer el hierro de forma selectiva.

El **Campo de acción:** Transformaciones físico – químicas del proceso de lixiviación.

Objetivos específicos:

- 1- Caracterizar la arcilla caolinítica de la región de Cayo Guam.
- 2- Experimentar en las condiciones de estudio la influencia de los principales parámetros tecnológicos del proceso de lixiviación en la arcilla para la extracción del hierro contenido en ella.

Metodología de la investigación:

Obtenida la información bibliográfica, se aplica el diseño factorial completo de las principales variables que intervienen en el proceso de lixiviación ácida para la

extracción del hierro. El análisis estadístico de correlación y regresión, auxiliados por métodos computacionales como el EXCEL, para analizar la influencia de las principales variables en el proceso de lixiviación ácida para la extracción del hierro.

En lo científico:

- Comportamiento de los principales parámetros tecnológicos del proceso de lixiviación ácida en la arcilla, para la extracción del hierro.

En lo social:

- Disminución de la contaminación ambiental.
- Aprovechamiento racional e integral de los recursos minerales.
- Generación de fuente de empleo.

1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En este capítulo se realiza la búsqueda bibliográfica referente al proceso de lixiviación con el fin de definir las condiciones bajo las cuales se ha llevado a cabo el proceso en estudios precedentes, para de esta forma poder realizar la investigación.

1.1 Antecedentes de la investigación y estado actual del tema

En Cuba la industria cerámica ha tenido un amplio desarrollo a partir de 1959, sin embargo, este desarrollo y sobre todo, las investigaciones, estudios y los resultados a los que se ha llegado, no han quedado en la memoria escrita en los archivos.

Existen actualmente muchas normas técnicas para la producción y el control de la calidad de ladrillos, azulejos y otros productos de la industria de los materiales de la construcción, sin embargo no existe mucha información sobre los productos cerámicos utilitarios y ornamentales, los cuales a pesar de tener características similares, no presentan los mismos requerimientos de calidad que los primeros.

Investigadores del territorio (Orozco, 1995; Leyva, 1996) determinaron el origen geológico de las arcillas en Moa, el cual está dado por la existencia de manifestaciones de arcillas caoliníticas, de las cuales una parte considerable se encuentra relacionada con cuerpos de gabros de diversas dimensiones y con una composición química que se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.1 Composición química de los Gabros del yacimiento de Cayo Guam.

% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% FeO	% MgO	% CaO	% K ₂ O	% MnO	% TiO ₂	% P ₂ O ₅
46.04	18.25	0.67	6.10	11.1	10.9	0.08	0.09	0.16	0.05

Según el trabajo realizado por Orozco (1995), luego de realizar un corte muy bien expuesto del yacimiento de Cayo Guam y determina que, en la base del corte afloran gabros muy intemperizados alterados a un material de color blanco y aspecto terroso-arcilloso al tacto, muy deleznable y con una alta plasticidad. Hacia la parte superior existe una transición gradual a materiales parecidos a los de la base del corte que forman una corteza de meteorización de colores variables desde el rosado hasta el

rojo intenso, lo que indica un incremento en el contenido de hierro. A través de un análisis por difracción de RX, se llegó a la conclusión de que la muestra era una caolinita desordenada, o sea, una caolinita tipo D o fireclay mineral y el análisis químico arrojó que durante el proceso de alteración hubo un incremento considerable de alúmina y la consecuente migración de hierro, calcio y magnesio para la formación de la caolinita como mineral residual.

Pons y Leyva (1996), determinaron la composición química de las arcillas ferrocaolínicas gibbsíticas del yacimiento de Centeno, con el objetivo de caracterizarlas para su utilización como material refractario, como revestimiento de cazuelas en la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi), concluyendo que los depósitos de arcillas estudiadas tuvieron su origen en la meteorización de cuerpos de gabros, los cuales forman parte del complejo ofiolítico de la región y son perfectamente utilizables como material refractario.

Trabajos realizados por Ramos (2002) y Fonseca (2003), plantean que las arcillas presentes en los principales yacimientos del municipio, poseen las características desde el punto de vista químico - físico y mineralógico que permite utilizarlas, con previos estudios, como material refractario en las industrias de la región y como materia prima para la obtención de objetos cerámicos.

En las industrias locales del municipio se utiliza como materia prima para la fabricación de materiales de construcción (ladrillos) al mezclarlo con otros materiales desgrasantes, con un bajo porcentaje de hierro.

Las investigaciones de Cabo de Villa (2010) y Díaz (2011), demuestran que la adición de tobas vítreas le proporcionan a las mezcla de arcilla buenos resultados en relación a los parámetros estudiados, lo cual permite proponer que se continúe con el estudio de algunos otros materiales que permitan el mejoramiento de estas mezclas para ser utilizada con fines industriales.

Según los estudios realizados por Ramírez et al. (2011), la mezcla de las arcillas de Centeno más arena sílice, presentan propiedades físico mecánicas requeridas, al demostrar que estas tienen mayor resistencia a la compresión, al utilizar un 40 % de material en la mezcla total.

Actualmente los grandes yacimientos de arcillas de las márgenes del río Cayo Guam no están siendo explotados, no ocurriendo lo mismo con las de Centeno, con las

cuales se producen materiales para la construcción (ladrillos y tuberías acanaladas, etc.).

Actualmente se está desarrollando una nueva clase de cerámicas estructurales de baja densidad, con alta porosidad y que originan una amplia área superficial, los cuales pueden utilizarse como filtros de alta temperatura para aleaciones fundidas y líquidos corrosivos.

En la actualidad se están empleando procesos para eliminar el hierro de las arcillas caoliníticas como son: separación magnética de alta energía, flotación por espuma, floculación, biolixiviación y lixiviación. Con este último método se puede remover completamente el hierro, pero también él provoca el colapso de la estructura de la arcilla como consecuencia de la reducción del hierro estructural.

Los minerales forman mezclas físicas y/o químicas con otras especies carentes de valor, que obligan a los especialistas a procesarlos para separar el elemento útil, empleando diferentes métodos de obtención, uno de estos métodos es la lixiviación ácida.

La tecnología de lixiviación ácida es la de mayor eficiencia metalúrgica, con el empleo de ella es posible extraer el 95 % de níquel y el 90 % de cobalto, la misma fue desarrollada por primera vez en 1959 en Cuba con la puesta en marcha de la Empresa “Comandante Pedro Sotelo Alba”; en la década del 90 se investigan y ponen en marcha varios proyectos en el oeste australiano (Murrin Murrin, Bulong, Cawse) y al noreste de Australia el Proyecto Calliope para menas oxidadas procedentes de Nueva Caledonia, las cuales en su esencia son variantes de la tecnología ácida.

La zona Nicaro-Moa-Baracoa, existen yacimientos lateríticos de estructura compleja que contienen hierro, níquel de cobalto, entre otras especies metálicas, y que son tratados por procesos hidrometalúrgicos aplicando la lixiviación ácida a presión o el proceso de lixiviación carbonato amoniacal (proceso Caron). En estas industrias se vierten al ambiente sustancias contaminantes del suelo, el agua y la atmósfera; entre ellos, los residuos sólidos (colas) constituyen un gran problema ambiental, siendo un asunto de prioridad la búsqueda de alternativas para su tratamiento y manejo.

Se han realizado estudios acerca de la lixiviación como una alternativa que permitiría la recuperación de especies metálicas, y en particular estudios sobre biolixiviación. Un aspecto importante en la lixiviación de las colas es el tipo de agente lixivante y las condiciones que la favorecen. En el caso de las colas amoniacales, se ha realizado,

por ejemplo, la lixiviación con ácido sulfúrico y SO₂ (Pelegrin, 2005), obteniéndose un licor de sulfato ferroso y otros metales (Ni y Co). La biolixiviación de colas del proceso carbonato amoniacal y de lateritas fue realizada por Giralдино et al (1995), los cuales analizaron la capacidad de diferentes cepas en la solubilización de metales como Ni y Co, demostrando que las cepas estudiadas son capaces de producir ácidos orgánicos, logrando extracciones de hasta 34 % de Ni y 75 % de Co.

1.2 Composición molecular de la arcilla

Las arcillas están conformadas como rocas detríticas sedimentarias por varios silicatos de aluminio hidratado que provienen de la descomposición de los feldespatos producido de la erosión.

Como mineral de arcilla tiene la siguiente fórmula:



En esta fórmula las cantidades relativas de los óxidos presentes se establecen como relación molecular más que en porcentaje de peso. En la arcilla una molécula de Al₂O₃ está asociada a dos moléculas de SiO₂ y dos moléculas de H₂O. Esta fórmula, que es típica, prescinde de la compleja disposición de “impurezas” siempre presentes en las muestras reales. Caolinita es el nombre mineralógico que se ha dado a esta sustancia pura.

La arcilla es el producto de envejecimiento geológico de la superficie de la tierra y la descomposición de rocas que contienen feldespato, constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedente de la descomposición de minerales de aluminio, este proceso es continuo y se produce en toda parte. La arcilla es un material extremadamente sencillo, barato y abundante en la naturaleza, con frecuencia puede encontrarse en la tierra ya ablandado por la humedad y listo para ser trabajado.

Las arcillas difieren de todas las rocas, mas por su estado físico que por su constitución química. Las arcillas tales como el caolín y la arcilla plástica tienen un porcentaje relativamente bajo de hierro y otras impurezas, puesto que las mismas están constituidas predominantemente de aluminio y sílice, todos los otros óxidos presentes pueden considerarse impurezas.

1.3 Forma y tamaño de las partículas

Muchas arcillas tienen un gran porcentaje de partículas por debajo de 1 μm de diámetro, las cuales pueden considerarse como cristales simples de arcilla. A través del examen en el microscopio electrónico se ha podido determinar que las partículas de arcilla tienen forma plana, alargada en dos dimensiones y delgada en la otra dimensión.

1.4 Propiedades de las arcillas

1.4.1 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso.

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

Una arcilla es plástica, cuando, previa humectación de la misma, puede con facilidad moldearse en bolas que, comprimidas en una dirección cualquiera, no origina grieta alguna en la pasta cuando el diámetro se ha reducido a su mitad en el sentido de la presión; o cuando la pasta arrollada en cilindro y curvada en forma de anillo no se produzca tampoco grietas, o cuando estirada una tira, se deja notar visiblemente una reducción de la sección antes de producirse la rotura.

Según los datos de Prikłonski, la plasticidad de las arcillas, determinadas por el método de Casagrande, se caracteriza por los valores mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 1.2 Clasificación de las arcillas según su plasticidad

Arcillas	Número de plasticidad
De alta plasticidad	Mayor que 17
Plásticas	7 - 17
De baja plasticidad	0 - 7

1.4.2. Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esméticas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100 % con respecto al peso.

1.4.3 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esméticas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas

aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda llegar a disociar completamente unas láminas de otras.

Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmécticas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esméctica, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si por el contrario, tienen calcio o magnesio como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.

1.4.4. Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si a continuación se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

Al añadir una pequeña proporción de arcilla al agua esta permanece flotando sobre el líquido indefinidamente, alcanzando el estado coloidal. Sin embargo, si se añade aun más, el líquido se torna viscoso y se resiste a fluir; en cambio, si se agita vigorosamente la suspensión, el líquido recupera su fluidez, perdiéndola nuevamente al cesar la agitación. A esta propiedad se le llama tixotropía, y es típica de muchas de las arcillas comunes.

Tiene su asiento en la afinidad por el agua, así como en la capacidad de hinchamiento del espacio interlaminar, el cual puede alcanzar hasta quince veces el volumen original.

1.4.5. Capacidad de la arcilla de endurecer al secarla

Una particularidad de la pasta de arcilla es su capacidad de endurecer al secarla al aire libre. La resistencia mecánica de la arcilla secada viene condicionada por la acción de las fuerzas de Van der Waals y la cementación de los granos de minerales por los iones de impurezas. Las fuerzas de presión capilar atraen las partículas de

arcilla impidiendo su corrosión, a consecuencia de lo que tiene lugar la retracción aérea.

Durante la saturación de agua desaparecen los meniscos, cesa la acción de las fuerzas capilares, las partículas se desplazan libremente en el exceso de agua y la arcilla se empapa.

1.4.6. Retracción de la arcilla

La retracción consiste en que se reducen dimensiones lineales y el volumen de la materia bruta de arcilla durante su secado (retracción térmica). La retracción se expresa en por ciento del tamaño inicial del artículo.

La retracción aérea transcurre en el proceso de evaporación del agua a partir de la materia bruta, como consecuencia de la disminución del espesor de las capas acuosas alrededor de las partículas de arcilla, aparición en los poros de la materia bruta de meniscos y fuerzas de presión capilar, tendientes a cercar las partículas.

Para diferentes arcillas la retracción aérea lineal oscila entre 2 - 3 y 10 - 12 % en función del contenido de las fracciones finas. Para disminuir las tenciones de retracción, se le añaden a las arcillas grasas desgrasantes, las materias tensoactivas introducidas en la pasta arcillosa en cantidad de 0,05 - 0,2 %, mejoran la mojabilidad de las partículas de arcilla por el agua, permitiendo reducir la humedad de moldeo y disminuir la retracción aérea.

1.4.7. Transición durante la cochura al estado pétreo

Durante el proceso de cocción de las sustancias arcillosas se produce un conjunto de transformaciones físico - químicas que varía su estructura química y cristalina, aumentando su resistencia mecánica.

- I. De 0 a 400 °C. En este intervalo de tiempo se produce la desecación (eliminación del residuo de agua) y el quemado de las materias orgánicas (o sea, las impurezas que contenga). En esta etapa hay dilatación, no se produce cambios químicos ni estructurales.
- II. De 400 a 600 °C. En esta etapa se desprende el agua químicamente unida, descomponiéndose la arcilla en óxidos, cesa la dilatación y comienza la contracción en volumen.
- III. De 600 a 900 °C. Se forma un metacaolín muy inestable que tiende a formar alúmina, muy higroscópico (es decir, absorbe mucha agua).

- IV. De 900 a 1000 °C. Durante este periodo reacciona la alúmina con la sílice agregada y se forma el silicato de aluminio ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) llamado en mineralogía sillimanita.
- V. Más de 1000 °C. La sillimanita tiende a transformarse en mullita, un mineral de gran dureza ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

1.4.8. Adiciones a las arcillas para hacerlas útiles

Generalmente es necesario hacer adiciones o mezclas a la arcilla natural para ajustarla a las necesidades de conformación y cocción de acuerdo con las finalidades prácticas, sobre todo en arcillas con alto contenido de Hierro, como las existentes en la región de Centeno.

Tales exigencias pueden ser por ejemplo; plasticidad excepcional para hacer la arcilla adecuada para el torneado, o una densidad completa a una temperatura de cocción determinada, o blancura y translucidez cuando está cocida o el desarrollo de ciertos colores y texturas deseados.

Para llegar a obtener mezclas adecuadas para un uso dado, se deben comprender las propiedades físicas de las arcillas y su respuesta a la cocción y también las propiedades físicas y térmicas de otros materiales utilizados en las mezclas de arcilla.

Los materiales que constituyen las mezclas de arcilla pueden ser considerados como:

- Plásticos (arcilla)
- Relleno o desengrasantes, que son materiales no plásticos, tales como el pedernal, la chamota o arcilla calcinada
- Fundente, tales como el feldespatos o las fritas

Los plásticos dan la trabajabilidad y plasticidad necesarias a la pasta de arcilla; los rellenos o desengrasantes hacen posible que la arcilla se seque con seguridad sin deformación o agrietamiento indebidos y disminuyen el valor de la contracción. Los fundentes controlan el punto de fusión y endurecimiento de la arcilla y hacen que se cueza a un grado satisfactorio de densidad a cualquier temperatura.

La arcilla se puede cambiar de las siguientes maneras:

- Cambios de color o textura: puede desearse modificar el color de cocción de la arcilla para hacerlo más claro o de tono más oscuro, aumentar o disminuir su rugosidad granular o textura.

- Cambios de la plasticidad: puede desearse hacer la arcilla más plástica o menos plástica.
- Cambios para disminuir la contracción o mejorar el secado y cocción, con el mínimo de deformación o agrietamiento.

1.4.9. Impurezas más comunes en las arcillas

Localizando el yacimiento de arcilla, se debe determinar su posible uso en la cerámica. Esto está determinado por algunas sustancias que se consideran contaminantes de las arcillas, ya que la presencia de estos contaminantes las inhabilita para ser usadas con estos fines. Algunas de estas sustancias son por ejemplo los álcalis solubles, los cuales pueden detectarse por las costras o coloración blancas en las arcillas secas. La cal es otra de las sustancias que no debe contener la arcilla, debido a que cuando se cuecen cambian de carbonato a óxido cálcico, el cual es inestable en la atmósfera porque absorbe agua y se hincha provocando la rotura de las piezas a los pocos días o incluso a meses de cocida la pasta. Otras de las impurezas que contiene la arcilla son las materias orgánicas que son perjudiciales como son pequeños trozos de madera y hojas, ya que vuelve a la arcilla demasiado pegajosa cuando se endurece. Las piedras de tamaño mediano y de tamaño pequeño que contienen, también son perjudiciales, ya que al elaborar la pasta y a la hora de secarla o cocerla, se observa unos incrustamientos en la pasta y son una de las causas de formación de grietas, llevando consigo la rotura de la muestra.

1.4.10. Características de las arcillas caoliníticas

Un caolín es una roca que contiene una cierta proporción de minerales del grupo de caolín, que puede ser económicamente extraída y concentrada. Se trata, generalmente, de una arcosa o arena caolinífera, granito o gneis caolinitizado, que es necesario procesar para enriquecer en minerales del grupo del caolín.

La arcilla caolinífera es también un caolín en sentido amplio. Igualmente, se trata de una arcilla compuesta, fundamentalmente, de minerales del grupo del caolín. Esta no se procesa, se usa tal cual, e inicialmente los porcentajes en minerales del grupo del caolín son más altos que en el caolín (>50 %). Cuando el caolín se usa para cerámica blanca recibe la denominación de China Clay.

El caolín, tal como se obtiene en una explotación mineral (caolín bruto/todo uno) posee un contenido variable de caolinita y/o halloysita que, a veces no llega al

20 %, además suele tener cuarzo, feldespatos, micas, y, dependiendo de la roca madre otro tipo de minerales accesorios.

Para concentrar el mineral es preciso someterlo a diferentes procesos que eleven el contenido en filosilicatos por encima del 80 %. El producto final, generalmente, recibe el nombre de caolín lavado.

Como la caolinita tiene un tamaño de partícula muy pequeño, el lavado de las fracciones groseras conduce a un material con alto contenido en caolinita. Es evidente que cuanto mayor sea el contenido en fracciones finas del caolín bruto, mayor será también el porcentaje en caolinita. Un caolín comercial de alta calidad a penas deberá tener partículas superiores a los 20 μm , lo que garantizaría una riqueza en caolinita superior al 80%.

Los caolines puro son de color blanco, ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), tiene forma de tierra suelta, poco plástica, se deseca muy rápidamente después de amasado y se contrae muy poco, esta forma es poco común, en su mayoría, las arcillas son coloreadas a causa de la presencia de impurezas, como el cuarzo, el carbonato de calcio, sulfatos sódicos, los óxidos de hierro, las sustancias orgánicas, etcétera.

1.4.11. Clasificación de las arcillas

- Arcillas puras, rica en alúmina, color blanco.
- Arcillas ricas en alúmina y pobres en hierro.
- Arcillas pobre en alúmina y rica en hierro, color rojo.
- Arcillas pobres en alúmina, ricas en hierro y cal, color rojo.

1.4.12. Manifestaciones de la arcilla de Cayo Guam

Esta manifestación se ubica aproximadamente en dirección noreste del molino de piedra. En el afloramiento artificial se observan grandes taludes donde se pueden diferenciar sectores con variedades de tonalidades, desde blanco amarillo pardo entre otras, estos afloramientos tienen una extensión de más de 100 metros y un espesor promedio de más de 200 metros.

Las arcillas de esta región están conformadas como rocas detríticas sedimentarias por varios silicatos de aluminio hidratado que provienen de la descomposición de los feldespatos producido de la erosión y su composición química es muy diversa.

Por sus orígenes de formación, tiene colores muy diversos como son, color blanco con aspecto terroso – arcilloso al talco, muy deleznable y con una alta plasticidad, en

la parte superior tiene colores variable más intensos desde rosado hasta el rojo intenso, lo que indica un incremento en el contenido de hierro.

1.5 Características de la materia prima arcilla roja de Cayo Guam

La arcilla es un mineral terroso compuesto en gran parte de hidrosilicato de alúmina que se hace plástica cuando se humedece y semejante a la roca cuando se cuece, proviene de la disgregación y descomposición de las rocas feldespáticas producido de la erosión. El mineral de arcilla es llamado silicato de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Presenta coloraciones diversas después de la cocción debido a la presencia en ellas de óxido de hierro, carbonato cálcico, entre otros.

Tienen un gran porcentaje de partículas por debajo de $1\ \mu\text{m}$ de diámetro, estas pueden considerarse como cristales simples de arcilla. A través del examen en el microscopio electrónico se ha determinado que las partículas de arcilla tienen forma plana, alargada en dos dimensiones y delgada en la otra dimensión como podemos observar en las figuras 1.1 y 1.2 Además por el borde de la hojuela se encuentra formado por una serie de láminas apiladas una sobre la otra que al ponerse en contacto con el agua, se separan una de otras, abriéndose; y al secarse se unen contrayéndose el espacio interlaminar.



Figura 1.1 Hojuela de arcilla amplificada 15 000 veces.

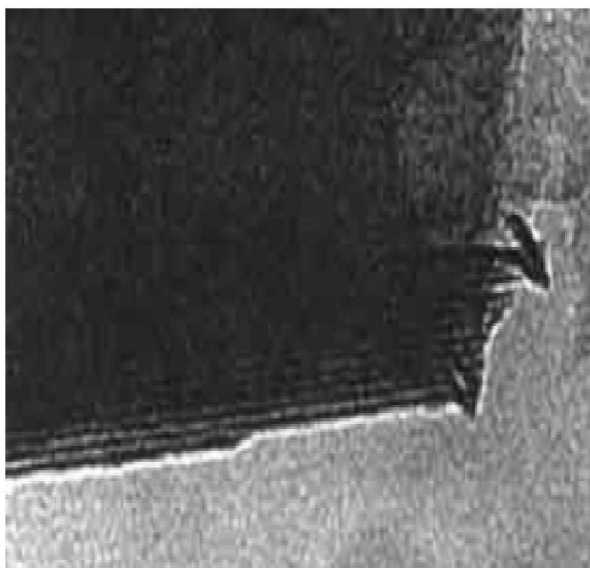


Figura 1.2 Borde de la hojuela amplificado 20 000 veces.

1.6 Composición Química de la arcilla de Cayo Guam

Tabla 1.3 Composición Química de la arcilla de Cayo Guam

% NiO	% CoO	% FeO	% MgO	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂	% CrO	% MnO	% CuO	% ZnO
0.080	0.059	10.2	0.18	23.39	41.91	0.04	0.05	0.022	0.003

Conclusiones parciales

1. Existen grandes reservas en Cuba de yacimientos de arcillas para ser utilizada en la industria de la cerámica y en la industria de materiales.
2. En las investigaciones se determinan algunas de las características, formaciones, composición y propiedades de las arcillas que sirven de punto de partida para la presente investigación.
3. Es posible emplear el ácido Clorhídrico como agente lixiviante de la arcilla.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este capítulo tiene como objetivo exponer las metodologías para la experimentación de la lixiviación ácida inversa de la arcilla para determinar la influencia de los principales parámetros que influyen en el proceso. A continuación se exponen y explican los materiales, reactivos y equipos empleados durante la experimentación.

2.1 Reactivos

- Ácido Clorhídrico concentrado (HCl) al 38 % de pureza.
- Arcilla Roja de Cayo Guam ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).
- Agua (H_2O).

2.2 Materiales y herramientas:

1. Reactor (beaker de 1 L).
2. Agitador magnético.
3. Balanza.
4. Papel de filtro.
5. Termómetro de referencia.
6. Bomba al vacío (para la filtración).
7. Probeta.
8. Molino de bola
9. Tamices (0,075 hasta 0,15)

2.3 Instalación empleada en el proceso de investigación

Con el fin de lograr los objetivos propuestos en la investigación, la parte experimental estuvo dirigida a simular a escala de laboratorio el proceso de lixiviación ácida inversa de la arcilla roja de la región de cayo Guam, para lo que se empleó la instalación que se muestra en la figura 2.1



Figura 2.1 Descripción de la instalación.

El pesaje de las muestras y de los reactivos se realizó en una balanza digital, una vez realizado el proceso de lixiviación las muestras tomadas se sometieron a un proceso de filtración con una bomba de vacío, como se muestra en la (figura 2.2 2.3)



Figura 2.2 Balanza digital



Figura 2.3 Bomba de vacío

El secado de las muestras se realizó en una estufa a 100 °C durante 24 horas como se muestra en la figura 2.4



Figura 2.4 Estufa

2.4 Principales factores que influyen en la extracción de hierro de la arcilla, por medio de la lixiviación ácida inversa

Una vez montada la instalación se pasó a determinar los principales factores que influyen en la extracción de hierro contenido en la arcilla, por medio de la lixiviación ácida inversa.

Los rangos experimentales de los parámetros de estudio se tomaron a partir de las experiencias. Además de los parámetros de temperatura y composición química del sólido referidos en el capítulo anterior, es necesario determinar la influencia de las variables que intervienen directamente en el proceso de lixiviación.

Los parámetros de estudio son:

- Granulometría del sólido (-0,075 - +0,15).
- Temperatura del proceso.
- Concentración inicial de ácido Clorhídrico.

En la investigación se trabajó con parámetros constante como la agitación (250 rpm), porcentaje de sólido (30 %), Se tuvo en cuenta las características de la materia prima (Arcilla).

Se utilizó una muestra representativa de la arcilla extraída del yacimiento de Cayo Guam para conocer el comportamiento durante la lixiviación.

La metodología utilizada para la realización de los experimentos se muestra en el figura 2.5.

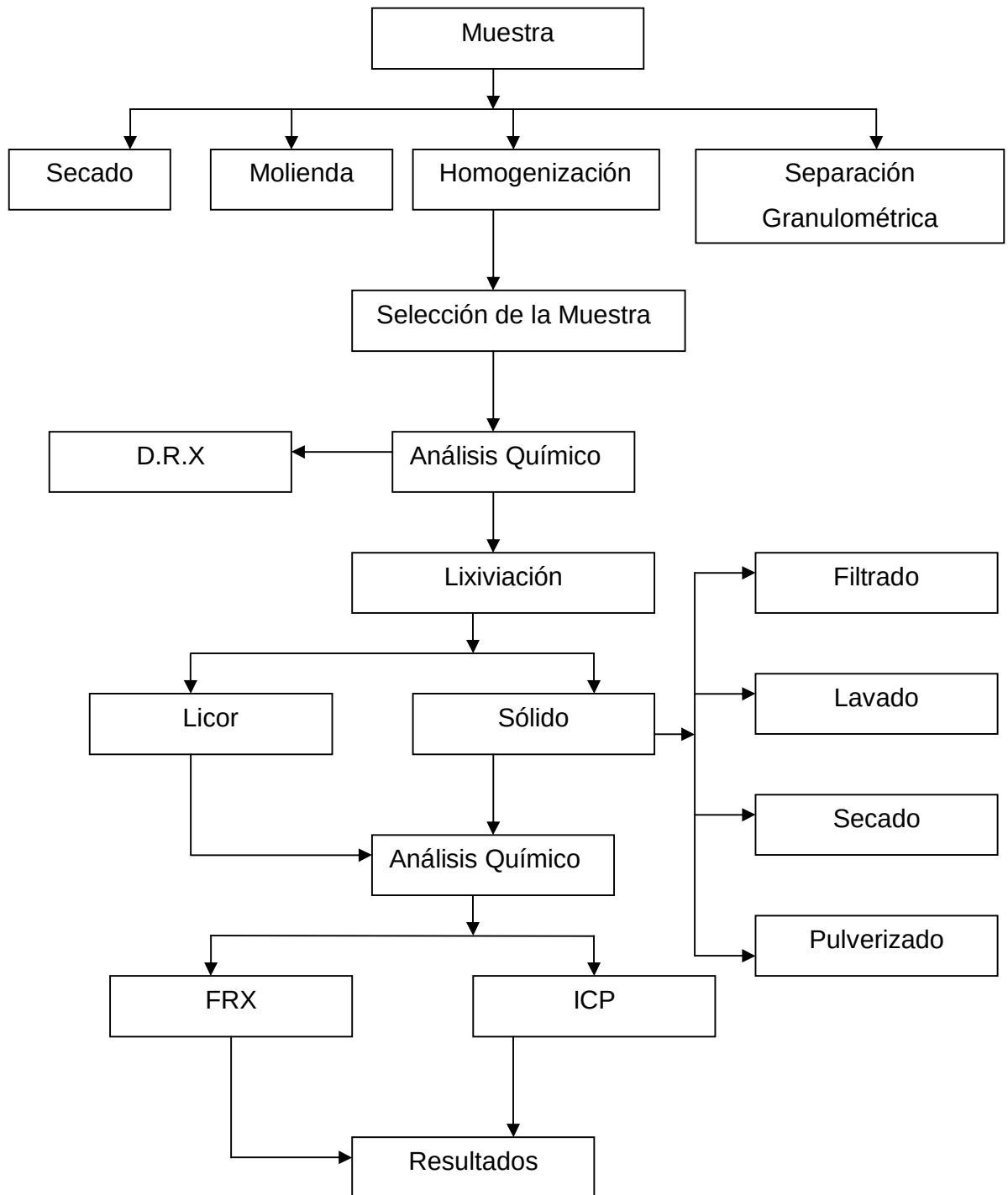


Figura 2.5 Proceso de lixiviación ácida inversa de la arcilla

1. **Toma de Muestra:** se tomó del yacimiento de Cayo Guam utilizando el método por surco de la parte media de su altura del yacimiento, para obtener una muestra representativa de la arcilla.
2. **Secado:** se seco la muestra a una temperatura de 100 °C por 4 horas, con el objetivo de eliminar el exceso de humedad contenida en ella y poder someterla a una preparación mecánica (molienda)
3. **Molienda:** se realiza con el fin de obtener partículas más fina a la granulometría deseada para llevara a cabo un mejor resultado de la investigación.
4. **Homogenización:** una buena homogenización del mineral, ayuda a tener una amplia representatividad de su composición química.
5. **Separación Granulométrica:** después de obtener una buena homogenización del mineral se procedió a la separación granulométrica, con fin de obtener dos composición granulométrica, material cernido a -0,075 y material cernido - 0,15 mm, dentro del rango de (-0,075 a +0,15 mm).
6. **Selección de la muestra:** después de obtener las dos composiciones granulométricas, se escogió el material utilizando el método por cuarteo.
7. **Análisis Químico:** Una parte de esta separación granulométrica se sometió a análisis químico por fluorescencia de rayos X para determinar la composición de la materia prima.
8. **Proceso de Lixiviación ácida inversa:** se procede al tratado del mineral por vía ácida, obteniendo como producto final licor y sólido tratado.
9. **Filtrado del sólido:** el filtrado se lleva a cabo en una bomba de vacío, para separar el liquido del solidó.
10. **Lavado del sólido:** se realiza para eliminar todos los residuos de ácido contenido en el y obtener una mejor pureza del sólido.
11. **Secado del sólido:** el secado como bien lo dice, se realiza con el objetivo de eliminar el exceso de agua en el sólido y no dificulte los demás tratamiento-
12. **Pulverización del sólido:** obtener una granulometría más fina, según los requerimientos para su posterior análisis.
13. **Análisis Químico:** es un proceso que se realiza para determinar la composición química de los minerales, en este caso la arcilla y permite tener una referencia al investigador sobre los elementos contenidos en ella, se utilizan varias técnicas

para el método que se utilizó fue: Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectrofotometría de plasma acoplado inductivamente (ICP), Espectroscopia de Emisión Óptica de Plasma Inductivamente (ICP), (Figura 2.6 y 2.7).

La investigación se llevó a cabo a escala de laboratorio en la instalación propuesta para tal objetivo Figura 2.6, donde se realizó el cálculo para determinar el volumen útil, debido a que los experimentos se realizaron en un reactor de 1L, pero se trabajó con una capacidad de 0,500L. De ahí que el volumen de trabajo, para un coeficiente de utilización (α) del 50 % es:



Figura 2.6 Laboratorio de Lixiviación.

$$V_{trab} = V_{útil} \cdot \alpha$$

$$V_{trab} = 0,500 \cdot 0,50$$

$$V_{trab} = 0,25L$$

A partir del conocimiento de la información obtenida y de la matriz de experimentación codificada que se muestra en la tabla 2.6, se determinaron las cantidades de reactivos involucradas en las pruebas.

Para el diseño de la matriz de experimentación se utilizó el método factorial completo, que está basado en todas las posibles combinaciones entre las variables de estudio y los niveles escogidos, para ello se usó la siguiente fórmula:

$$N = n^{\theta}$$

donde:

N: número de experimento;

n: número de niveles;

θ : número de factores.

Durante la investigación se estudiaron tres variables y dos niveles, donde se obtuvo la cantidad de pruebas siguientes: $2^3 = 8$.

Tabla 2.1 Matriz de experimentación codificada

Pruebas	X ₁	X ₂	X ₃
1	+	+	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	-	-	+
5	+	+	-
6	-	+	-
7	+	-	-
8	-	-	-

Teniendo en cuenta el diseño, se procede al cálculo y determinación de los factores y niveles de experimentación, los cuales se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.2 Factores y niveles de experimentación

Factores Niveles	Temperatura (°C)	Concentración de HCL (g/L)	Granulometría (mm)
Mínimo	40	47	-0,075
Básico	60	94	+0,075
Máximo	80	141	-0,15

Una vez obtenido los valores a los cuales se realizaran los experimentos se procede a la realización de la matriz real, la cual se muestra en la tabla 2.5

Tabla 2.3 Matriz real de experimentación

Factores Pruebas	Temperatura (°C)	Concentración de HCL(g/L)	Granulometría (mm)
1	80	0,3	2
2	40	0,3	2
3	80	0,1	2

4	40	0,1	2
5	80	0,3	1
6	40	0,3	1
7	80	0,1	1
8	40	0,1	1

Considerando que la densidad de la materia prima empleada es de 2,13 para una granulometría de -0,075 y 2,10 para -0,15 kg/L y usando la expresión:

$$\frac{1}{\rho_{pulpa}} = \frac{X_{sólido}}{\rho_{sólido}} = \frac{1 - X_{sólido}}{\rho_{líquido}} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ_{pulpa} : Densidad de la pulpa;

$\rho_{sólido}$: Densidad del sólido;

$\rho_{líquido}$: Densidad del líquido;

$X_{sólido}$, $1 - X_{sólido}$: Fracción másica del contenido de sólido y líquido.

Sustituyendo los valores los valores en la expresión:

$$\frac{1}{\rho_{pulpa}} = \frac{0,3}{2,10} = \frac{0,7}{1}$$

$$\frac{1}{\rho_{pulpa}} = 0,84$$

$$\rho_{pulpa} = 1,19$$

La masa total de la pulpa se determina por la siguiente expresión:

$$m_{pulpa} = \rho_{pulpa} \cdot V_{útil} \quad (2.2)$$

Sustituyendo y empleando la expresión (2.2) se determina la masa total de la pulpa.

$$m_{pulpa} = 1,19 \cdot 0,500 \frac{kg}{L} \cdot L$$

$$m_{pulpa} = 0,595 \text{ kg}$$

Una vez determinada la masa de la pulpa, se emplea la siguiente expresión:

$$m_{pulpa} = m_{30\%} \cdot (1 - \%sól) \quad (2.3)$$

El 40 % de la pulpa es sólido, conociendo el porcentaje de sólido se sustituye en la expresión (2.3) y se determina la masa del sólido en la pulpa.

$$m_{sólido} = m_{pulpa} \cdot (1 - \%sól)$$

$$m_{sólido} = 0,595 \cdot (1 - 0,3)$$

$$m_{sólido} = 0,178 \text{ kg}$$

Para determinar la masa del líquido en la pulpa se emplea la expresión (2.3)

$$m_{líquido} = m_{líquido} \cdot (1 - \%líquido)$$

$$m_{líquido} = m_{sólido} = 0,595 \cdot (1 - 0,7)$$

$$m_{líquido} = 0,416 \text{ kg}$$

Para determinar la masa de ácido clorhídrico se calculó estequiométricamente, basados en la composición química del mineral y la posible extracción a escala de laboratorio.

Masa de ácido Clorídrico (HCL)

Para la determinación de la masa de ácido clorhídrico que se va añadir se tuvieron en cuenta el % de concentración de ácido, la masa de sólido y el % de agua que se va añadir.

Cálculo de la relación ácido mineral.

$$m_{HClS} = \frac{\%concHCL \cdot m_{sólido}}{1}$$

$$m_{HClS} = \frac{0,1 \cdot 178}{1}$$

$$m_{HClS} = 17,8 \text{ g}$$

Cálculo de cantidad de HCL que se añadirá al sólido

$$m_{HCL} = \frac{m_{SL} \cdot 100}{concHCL}$$

$$m_{HCL} = \frac{17,8 \cdot 100}{38}$$

$$m_{HCL} = 47 \text{ g}$$

Cálculo de la cantidad de agua que hay en 0,1 de HCL.

$$\%agua = \frac{msl \cdot \%aguaHCL}{\%CONCHCL}$$

$$\%agua = \frac{17,8 \cdot 62}{38}$$

$$\%agua = 29,1 \text{ g}$$

Cálculo de la cantidad de agua que se va añadir.

$$H_2O = mliquido - H_2Oen0,1HCL$$

$$H_2O = 416,3 - 29,1$$

$$H_2O = 387,2 \text{ g}$$

2.5 Método de modelación estadística

Los resultados obtenidos fueron tratados por métodos estadísticos y analizados técnicamente, para obtener el modelo estadístico- matemático, según la metodología que se muestra:

1. Control de homogeneidad de los valores (según filas).

a) Por cada una de las filas se toman los valores dudosos, por apreciación del investigador (y^*).

b) Determinación del valor promedio (sin tener en cuenta el error)

$$\bar{y} = \frac{y_a + y_b + \dots y_n}{n-1} \quad n: \# \text{ de repeticiones}$$

c) Determinación de la desviación cuadrática (sin incluir el dudoso)

$$Dc = \sqrt{\frac{\left(\bar{y}_1 - y_a\right)^2 + \left(\bar{y}_1 - y_b\right)^2 + \dots \left(\bar{y}_1 - y_n\right)^2}{n-1}}$$

d) Cálculo del valor del criterio t de Student. $t_{calc} = \frac{y - y_1}{Dc}$

e) Determinación de t_{tab} – grados de libertad $f = n - 1$, nivel de significación $\alpha = 0,05$.

f) Comparación de los criterios $t_{calc} - t_{tab}$.

Si $t_{calc} < t_{tab}$, el valor se corresponde con los otros valores de la serie y participa en el resto de los cálculos (NO hay que eliminarlo).

El valor promedio de cada una de las filas estará en función del análisis anterior.

Si durante las pruebas realizadas no existen errores, pasar directamente al punto

2

2. Cálculo de la dispersión por fila y control de su homogeneidad.

a) Se determina la dispersión por cada una de las filas según:

$$S_1^2 = \left[\left(\bar{y}_1 - y_a \right)^2 + \left(\bar{y}_1 - y_b \right)^2 + \dots + \left(\bar{y}_1 - y_n \right)^2 \right] \cdot \frac{1}{n-1}$$

b) Suma de las dispersiones.

$$\sum_{i=1}^N S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2 \quad N: \# \text{ de experimentos}$$

c) Cálculo del criterio de Cochran (G) para cada fila.

$$G_{calc} = \frac{S_{i\text{máx}}^2}{\sum S_i^2}$$

Para 1 grado de libertad $f_1 = n - 1, f_2 = N, \alpha = 0,05$

Si $G_{calc} < G_{tab}$, la dispersión es homogénea de cada fila analizada con respecto a la población.

3. Cálculo de la dispersión de reproducibilidad.

$$a) \quad S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_i^2$$

$$b) \quad \text{Error de reproducibilidad. } S_y = \sqrt{S_y^2}$$

$$c) \quad \text{Cálculo del criterio t Student } t_{calc} = \frac{S_y}{S_y^2}$$

d) Determinación t_{tab} , $f = N(n - 1)$, $\alpha = 0,05$.

e) Comprobación de los criterios $t_{calc} - t_{tab}$.

Si $t_{calc} > t_{tab}$, la diferencia entre los valores de la respuesta en diferentes puntos del plano está comprobada estadísticamente.

4. Cálculo del valor medio de respuesta y control del significado de su diferencia.

a) Valor del criterio de t Student
$$t_{calc} = \frac{\bar{y}_{m\acute{a}x} - \bar{y}_{m\acute{i}n}}{S_y \cdot \sqrt{\frac{1}{n_{m\acute{a}x}} + \frac{1}{n_{m\acute{i}n}}}} .$$

b) Determinación de t_{tab} , $f = n_{max} + n_{min}$.

c) Comprobación del criterio $t_{calc} - t_{tab}$

Si $t_{calc} > t_{tab}$, la diferencia entre los valores de la respuesta en diferentes puntos del plano está comprobado estadísticamente.

5. Determinación de los coeficientes de la ecuación de regresión.

$$b_o = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N} \quad b_1 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2 + \bar{y}_3 \cdots - \bar{y}_N}{N} \quad b_n = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_2 - \bar{y}_3 \cdots + \bar{y}_N}{N}$$

Este cálculo se realiza tomando los valores verticales de la matriz.

La ecuación de regresión es: $\xi = b_o + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \cdots + b_{12} X_1 X_2 + \cdots + b_N X_N$

6. Control estadístico del significado de los coeficientes de la ecuación de regresión.

a) Error de la prueba. $S_p = \frac{S_y}{\sqrt{N \cdot n}}$

b) Cálculo del criterio t Student. $t_{calc} = \frac{b_o}{S_p}; t_{calc} = \frac{b_1}{S_p}; t_{calc} = \frac{b_N}{S_p}$

c) Determinación t_{tab} , $f = N(n-1)$, $\alpha = 0,05$.

d) Comprobación de los criterios $t_{calc} - t_{tab}$.

Si $t_{calc} > t_{tab}$, los coeficientes de la ecuación son significativos.

Si $t_{calc} < t_{tab}$, los coeficientes de la ecuación no son significativos.

7. Control de la adecuación de la ecuación de regresión.

a) Se realiza el cálculo para cada punto del plano.

$$\hat{y}_1 = \pm b_o \pm b_1 \pm b_2 + \cdots \pm b_N$$

$$\hat{y}_2 = \pm b_o \pm b_1 \pm b_2 + \cdots \pm b_N$$

$$\hat{y}_N = \pm b_o \pm b_1 \pm b_2 + \cdots \pm b_N$$

b) Dispersión de adecuación.

$$S_{adec}^2 = \frac{n}{N-n-1} \left[\left(\bar{y}_1 - \hat{y}_1 \right)^2 + \left(\bar{y}_2 - \hat{y}_2 \right)^2 + \dots + \left(\bar{y}_n - \hat{y}_n \right)^2 \right]$$

c) Se calcula el criterio de Fisher. $F_{calc} = \frac{S_{adec}^2}{S_y^2}$

d) Determinación $F_{tab} : f_1 = N - (n - 1), f_2 = N (n - 1), \alpha = 0,05$.

e) Comprobación del criterio $F_{calc} - F_{tab}$.

Si $F_{calc} < F_{tab}$; el modelo es adecuado al objeto investigado.

8. Cálculo del coeficiente de correlación.

Prueba	$\bar{y}_i$	$\hat{y}_i$	$\left(\bar{y}_1 - \hat{y}_1 \right)^2$	$y_G = \frac{\sum \bar{y}_1}{N}$	$\left(\hat{y}_1 - y_G \right)^2$
1					
2					
3					
N					
	$\sum \bar{y}_i =$		$\sum (1)^2$		$\sum (2)^2$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (1)^2}{\sum (2)^2}}$$

Los coeficientes de correlación pueden tomar los siguientes significados.

- 1- $R = 0$, No hay correlación.
- 2- $R = 1$, Relación positiva.
- 3- $R = -1$, Relación negativa

Todo el análisis estadístico fue auxiliado de programas profesionales de la materia como el EXCEL.

Cada una de las pruebas diseñadas se repitió tres veces y en las tablas y figuras se expresa el valor medio, con su previa limpieza de datos en los casos necesarios.

Los cálculos de extracción se realizaron según la expresión:

$$\xi_{Me} = \frac{\%Me_{\text{mineral}} - \%Me_{\text{cola}} \cdot f}{\%Me_{\text{mineral}}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

Donde:

ξ_{Me} : Extracción del metal hacia la solución, %;

$\%Me_{\text{mineral}}$: Contenido de metal en la muestra inicial, %;

$\%Me_{\text{cola}}$: Contenido de metal en la muestra lixiviada, %;

f : Factor de variación del elemento trazador.

2.6 Técnicas de análisis

2.6.1 Método de Espectrometría por Fluorescencia de Rayos-X.

El tubo de rayo X emite una radiación primaria suficiente para excitar los átomos de la muestra y provocar la emisión de una radiación secundaria fluorescente de la misma. La radiación fluorescente pasa a través de un colimador (para eliminar las interferencias y organizar el haz de radiación) e irradia el cristal. La función del mismo es reflejar la radiación en un ángulo de reflexión específico para cada elemento hasta los detectores (de flujo y de centelleo).

La calidad de radiación fluorescente emitida depende de la concentración de elementos presente en la muestra y tiene una longitud de onda (un ángulo) específica para cada elemento.

Se utilizan los patrones (muestra de concentración conocida) y se construye las curvas de calibración para cada elemento y usando estas por medio de modelos matemáticos se pueden analizar las muestras de concentración desconocida.

El Espectrómetro secuencial automático de rayo X Axios-minerales es un instrumento compacto y de alta velocidad el cual se usa para el análisis de los elementos desde bromo hasta uranio. Es de alta flexibilidad, controlado por el microprocesador.

Para excitar la muestra se utiliza como fuente de radiaciones el tubo de rayo X Philips con una ventana Rh de 3 kw de potencia figura 2.7.



Figura 2.7. Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X.

2.6.2 Método de Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Inductivamente Acoplado

La Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Inductivamente Acoplado (ICP) se basa en la vaporización, disociación, ionización y excitación de los diferentes elementos químicos de una muestra en el interior de un plasma.

Durante el proceso de desexcitación de los átomos neutros e iones en el interior de un plasma, se producen las emisiones de radiación electromagnética en la zona del UV-visible. Estas radiaciones, características de cada elemento, se separan en función de su longitud de onda y finalmente se mide su intensidad. La selección de la longitud de onda nos permite determinar el metal cualitativamente, mientras que la intensidad de la radiación emitida nos proporcionará la información para poder cuantificarlo.

El plasma donde es atomizada la muestra es un gas ionizado, eléctricamente neutro y confinado en un tubo de descarga. Es un estado de equilibrio entre partículas cargadas y neutras de un gas ionizado. Las temperaturas alcanzadas son notablemente superiores a la de la Absorción Atómica (AA).

En la figura 2.8 se muestra una fotografía del equipo de Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP).



Figura 2.8: Equipo de Espectroscopia de Emisión Óptica (ICP)

Conclusiones parciales

1. Las arcilla poseen un 32 % de poros lo que es muy favorable para la lixiviación, así el agente lixivante penetra con mayor facilidad, es un mineral de fina granulometría, debido a las previas operaciones tecnológicas de trituración y molienda, la cual se realiza hasta 80 % de las partículas menores de 0,075 mm.
2. Se empleó el método de diseño experimental factorial completo para evaluar la influencia de los principales factores en la extracción del hierro contenido en la arcilla caolinítica.
3. Se estudio el origen de la arcilla y su composición química para ver los % de concentración de cada mineral contenida en ella.

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

A continuación se muestran los principales resultados de la investigación, así como el análisis realizado a cada uno de las variables de estudio.

3.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico, se realizó con el fin de obtener un modelo de regresión que se adecuará a los parámetros de estudio.

Los resultados de laboratorio obtenidos fueron sometidos en primer orden a un control de homogeneidad y luego se determinó los valores de extracción, para el caso de la influencia de los principales parámetros sobre la extracción de hierro. Los valores promedios de extracción se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Extracciones promedios de los elementos.

Extracciones promedio de los elementos (%)								
Pruebas	1	2	3	4	5	6	7	8
Ni	84,23	68,23	83,05	80,78	68,96	87,54	86,45	62,14
Co	81,83	31,20	37,22	29,61	78,44	14,53	61,02	54,77
Mg	15,32	15,37	25,59	15,40	10,10	41,63	36,34	36,54
Fe	68,49	48,99	52,40	33,40	54,55	40,37	31,21	28,20
Al	21,14	11,94	13,71	54,26	16,48	44,25	49,25	54,13
SiO ₂	9,65	10,31	16,44	3,88	16,94	17,44	11,59	16,39

Posteriormente los datos fueron sometidos a la determinación de la dispersión por filas y control de la homogeneidad basada en el criterio de Cochran como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Dispersión por filas

Hierro (Fe)			Aluminio (Al)		
No.	Dispersión S_i^2	Cochran (G)	No.	Dispersión S_i^2	Cochran (G)
1	0,33	0,033	1	1,63	0,213
2	0,51	0,050	2	0,13	0,018
3	1,80	0,175	3	0,86	0,113
4	0,51	0,049	4	1,09	0,143
5	1,11	0,108	5	1,03	0,134
6	0,79	0,077	6	1,14	0,149
7	2,83	0,275	7	0,25	0,033
8	2,41	0,234	8	1,50	0,197
Sílices (SiO ₂)			Magnesio (Mg)		
1	0,60	0,087	1	0,00	0,005
2	0,49	0,070	2	0,01	0,040
3	4,13	0,597	3	0,17	0,557
4	0,20	0,029	4	0,02	0,070
5	0,04	0,006	5	0,02	0,066
6	0,30	0,043	6	0,04	0,115
7	0,63	0,091	7	0,04	0,120
8	0,52	0,076	8	0,01	0,028

En la tabla 3.3 se muestran los valores del criterio de Cochran calculado y tabulado, los cuales se emplean para determinar la homogeneidad de los valores de las filas de las pruebas realizadas.

Tabla 3.3 Criterio de Cochran calculado y tabulado.

Cochran calculado	Cochran tabulado
0,13	0,6798

El valor del criterio de Cochran calculado es menor que el valor tabulado, por lo que existe una homogeneidad entre los valores de las diferentes filas que muestran las pruebas.

Partiendo del conocimiento anterior se determina la dispersión de reproducibilidad y el error de reproducibilidad, los que se emplean para calcular el criterio de t de Student de las pruebas y comparar con el tabulado. Los valores se muestran en la tabla 3.4

Tabla 3.4 Dispersión y error de reproducibilidad

Dispersión de Reproducibilidad, S_y^2	Error de Reproducibilidad, S_y	t_{cal}	t_{tab}
1,29	1,13	1,92	1,86

En el caso de estudio el valor calculado es mayor que el tabulado, por lo que es reproducible.

Luego del análisis de la representatividad de la información se llegó al modelo estadístico de regresión siguiente:

$$\xi_{co} = 44,70 + 6,96 \cdot T + 8,40 \cdot c(\text{HCl}) + 6,12 \cdot (\text{granulometría}) + 1,46 \cdot T \cdot c(\text{HCl}) + 2,66 \cdot T \cdot (\text{granulometría}) - 0,48 \cdot c(\text{HCl}) \cdot (\text{granulometría}) - 1,33 T \cdot c(\text{HCl}) \cdot (\text{granulometría})$$

El control estadístico del coeficiente de la ecuación de regresión por medio de la comparación de los valores del criterio de la t de Student calculada con el valor tabulado.

Resultó ser el error de la prueba. $S_p = 0,28$

En la tabla 3.5 se muestra cada coeficiente de la ecuación de regresión con su respectiva t de Student calculada y la t de Student tabulada.

Tabla 3.5 Significación de los coeficientes de la ecuación de regresión

Coeficientes	Valor	t_{calc}	Coeficientes	Valor	t_{calc}
b_o	44,7	499,74	$b_{T \cdot c(\text{HCl})}$	1,46	16,31
b_t	6,96	77,8	$b_{T \cdot c(\text{HCl})}$	2,66	29,77
$b_{c(\text{HCl})}$	8,4	93,88	$b_{c(\text{HCl})}$	-0,48	-5,34
$b_{c(\text{granul.})}$	6,12	68,41	$b_{T \cdot c(\text{HCl}) \cdot c(\text{granul.})}$	-1,33	-14,91
$t_{tabulado} = 1,86$					

Los valores modulares de t de Student calculados que son inferiores al valor t de Student tabulado son considerados no significativos, por lo que son excluidos de la ecuación.

La adecuación de la ecuación de regresión se determina por la dispersión de adecuación de cada uno de los puntos del plano de investigación y comparando con el valor del criterio de Fisher, se obtiene que la dispersión de adecuación es:

$S^2_{\text{adec}} = 0,00$ y el valor del criterio Fisher tabulado es 2,31.

Como el F_{cal} es menor que el F_{tab} , el modelo es adecuado al objeto investigado en los parámetros de estudio, lo que corrobora que el coeficiente de correlación entre la extracción de hierro y las demás variables independientes es $R = 1$.

Partiendo de este criterio se obtiene el modelo de regresión para la extracción de hierro siguiente:

$$\xi_{\text{co}} = 44,70 + 6,96 \cdot T + 8,40 \cdot c(\text{HCl}) + 6,12 \cdot (\text{granulometría}) + 1,46 \cdot T \cdot c(\text{HCl}) + 2,66 \cdot T \cdot (\text{granulometría}) - 0,48 \cdot c(\text{HCl}) \cdot (\text{granulometría}) - 1,33 T \cdot c(\text{HCl}) \cdot (\text{granulometría})$$

Según el modelo obtenido para el rango de parámetros estudiados, la extracción de hierro media es de 44,7 %.

Los efectos b_t , granulometría y $b_{c(\text{HCl})}$ miden cómo afecta cada factor a la extracción de hierro. La variable que provoca un mayor cambio de rendimiento es la concentración de $b_{c(\text{HCl})}$, el valor $b_{c(\text{HCl})} = 8,40$ indica que el rendimiento aumenta en esa cantidad al variar la concentración inicial de ácido clorhídrico, en orden decreciente el segundo parámetro que más influye es la temperatura. Al variar la temperatura de 40 a 80 °C, trae consigo un incremento en la recuperación de hierro de 13,92 %, el tercer parámetro que influye en la lixiviación es la granulometría, para optimizar el proceso de lixiviación ácida de las arcillas, es necesario realizar los principales ajustes en la concentración de ácido clorhídrico en primer orden, seguido de la temperatura, y por último la granulometría.

3.2 Influencia de la temperatura

Los resultados estadístico experimental del proceso de lixiviación del hierro a partir de la arcilla caolinítica con ácido clorhídrico señalan a la temperatura como uno de los factores principales que determinan la extracción del hierro.

En la figura 3.1, se muestra los porcentajes de extracción para los promedios mínimos y máximos a diferentes valores de temperatura en la extracción de hierro. La temperatura como una de las variables del proceso de lixiviación ácida inversa, expone los mayores valores de extracción de hierro a 80 °C; donde se obtiene una extracción promedio de hierro de 51,66 %, mientras que para temperaturas de 40 °C, la extracción es de 37,74 % para un tiempo de lixiviación de 20 min, como se aprecia en la figura a medidas que aumenta la temperatura la extracción de hierro aumenta en un 13,92 %.

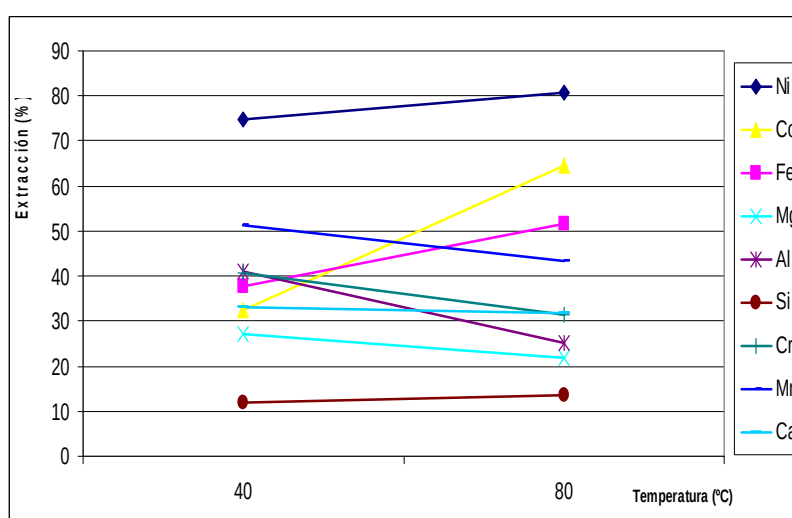


Figura 3.1 Extracción de especies metálicas variando la temperatura

La extracción de aluminio, magnesio es inversamente proporcional a la temperatura, a medida que aumenta la temperatura son menores los valores de extracción de estos elementos. No así la sílice que a temperatura de 80 °C la extracción promedio es de 13,65 y a 40 °C se extrajo un 12 %. Lo que indica que existe una influencia significativa de la temperatura en la extracción de hierro.

3.3 Influencia de la granulometría

La influencia de la granulometría durante la lixiviación ácida inversa de la arcilla caolinítica. Como se puede observar en la figura 3.2

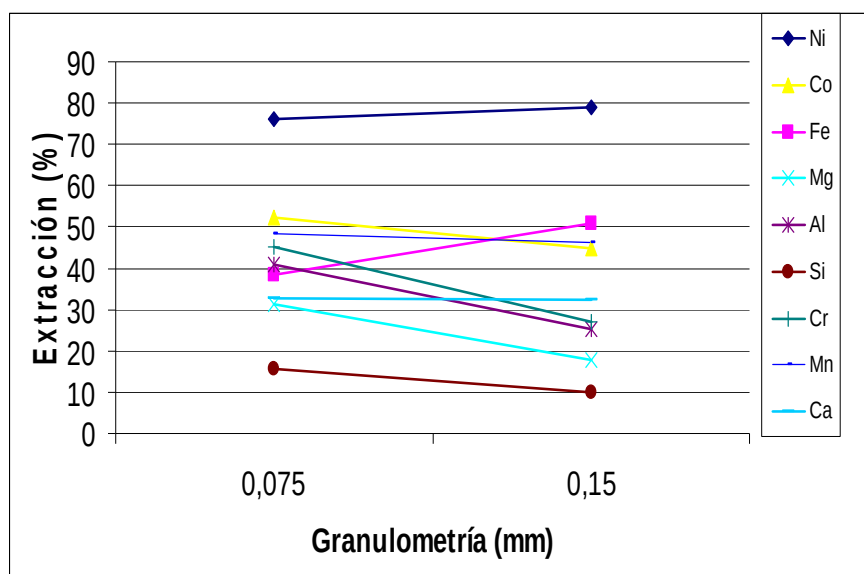


Figura 3.2 Extracción de especies metálicas variando la granulometría

La granulometría como una de las variables de estudio tiene una gran importancia en el proceso de lixiviación ácida inversa. Como se puede observar los valores máximos promedios de extracción de hierro se obtuvieron a una granulometría dentro de un rango de +0,075 a -0,15 mm, extrayéndose un 50,82 % del hierro contenido en la arcilla. Para una granulometría de 0,075 mm el valor promedio de extracción es de 38,58 %, el comportamiento de níquel es similar al del hierro no así la sílice, magnesio y el aluminio, poseen un carácter descendente. Estos últimos son inversamente proporcionales a la granulometría, es decir que a medida que aumenta la granulometría los valores de extracción de estos elementos disminuye.

3.4 Influencia de la concentración inicial del ácido clorhídrico

La concentración inicial del agente lixiviante juega un papel fundamental en la extracción del hierro a partir de la arcilla caolinítica. En la práctica industrial como parámetro que refleja el contenido de ácido en la pulpa de lixiviación es la relación ácido: mineral.

La regulación de la concentración inicial de ácido clorhídrico en el proceso de lixiviación depende de:

Velocidad de sedimentación de la pulpa lixiviada.

Ø Porcentaje de sólido.

Ø Ácido libre.

- Ø Eficiencia del proceso.
- Ø Tiempo de retención de la pulpa.

En la figura 3.3 se muestra la curva de influencia de la concentración inicial de ácido clorhídrico en la extracción de hierro contenido en la arcilla caolinítica.

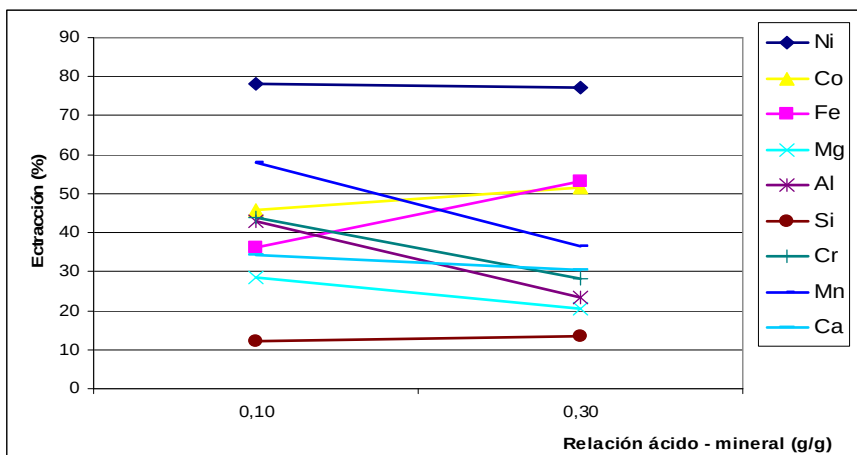


Figura 3.3 Extracción de hierro variando la concentración inicial de ácido clorhídrico

Según se puede observar en la figura 3.3, la concentración inicial de ácido clorhídrico (agente lixiviante) influye sobre la extracción de hierro, es decir, la mayor extracción promedio de hierro se logró a una concentración inicial de 0,3 g/L, el valor de extracción de hierro es de 53,10 % y para la concentración de 0,1 g/L, el valor de extracción es de 36,3 %. En las curvas se observa la tendencia a un crecimiento de la extracción de hierro de 16,80 % a medida que aumenta la concentración de ácido clorhídrico, el cobalto se comporta similar al hierro, no así el manganeso, aluminio y cromo, estos últimos son inversamente proporcionales a la concentración de ácido clorhídrico. El tiempo de lixiviación fue de 20 min y a partir de ese tiempo los incrementos son mínimos hasta que se hacen prácticamente constantes.

3.5 Composición química del sólido obtenido.

En la tabla 3.6 se muestra la composición química del sólido obtenido, se selecciono los tres mejores resultados obtenido en las muestras,

Tabla 3.6 Composición química del sólido de los mejores resultado.

# de M	Ni	Co	Fe	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Cu	Zn
1	0,11	0,78	3,2	0,16	18,74	38,24	0,04	0,03	0,038	0,003
2	0,09	0,081	5,3	0,15	20,75	37,94	0,05	0,03	0,036	0,003
5	0,07	0,064	4,6	0,18	20,79	37,88	0,03	0,03	0,044	0,003

Las tres muestras fueron escogidas teniendo en cuenta el diseño de la tabla 2.3 matriz real de experimentación. Como se puede apreciar los resultados son positivo, en las tres muestras la coloración del sólido es de coloración blanca como se muestra en la Figura 3.4 y 3.5, se obtuvo una arcilla caolinítica rica en alúmina y pobre en hierro según la clasificación en el punto 1.4.11.



Figura 3.4 sólido de color blanco

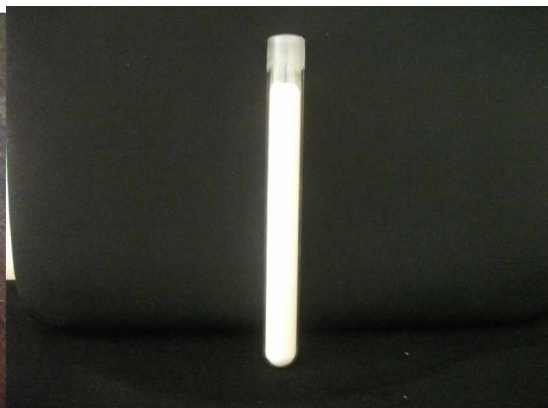


Figura 3.5 sólido pulverizado

3.6 Composición química del licor obtenido

En la tabla 3.5 se muestra la composición química del licor residual obtenido.

Tabla 3.7 Composición química del licor residual obtenido.

No. M	HCl %	Ni g/L	Co g/L	Fe g/L	Mg g/L	Al g/L	Si g/L	Cr g/L	Mn g/L	Cu g/L	Zn g/L
1	7,34	0,010	0,108	18,02	0,071	2,872	0,732	0,131	6,45	0,210	0,245
2	8,09	0,061	0,113	18,26	0,107	3,274	0,610	1,274	0,201	0,636	0,52
3	11,82	0,060	0,027	6,33	0,087	1,288	0,294	0,108	3,136	0,118	0,190
4	4,71	0,007	0,016	4,06	0,092	1,398	0,488	8,894	1,189	0,097	0,170

Se muestra que la especie química de mayor concentración en el licor residual de la lixiviación es el hierro, debido a la acción del agente lixivante en las condiciones dada, la otra especie que posee elevadas concentraciones es el manganeso, seguida del aluminio, el resto de las especies se encuentra en contenidos muy por debajo de las especificadas anteriormente.

3.7 Evaluación ecológica

Teniendo en cuenta la posibilidad del tratamiento de la arcilla como materia prima fundamental para la extracción de hierro como elemento principal en el proceso de lixiviación ácida, es posible proponer un diseño de una tecnología para el procesamiento de este, el cual se muestra en la figura 3.6.

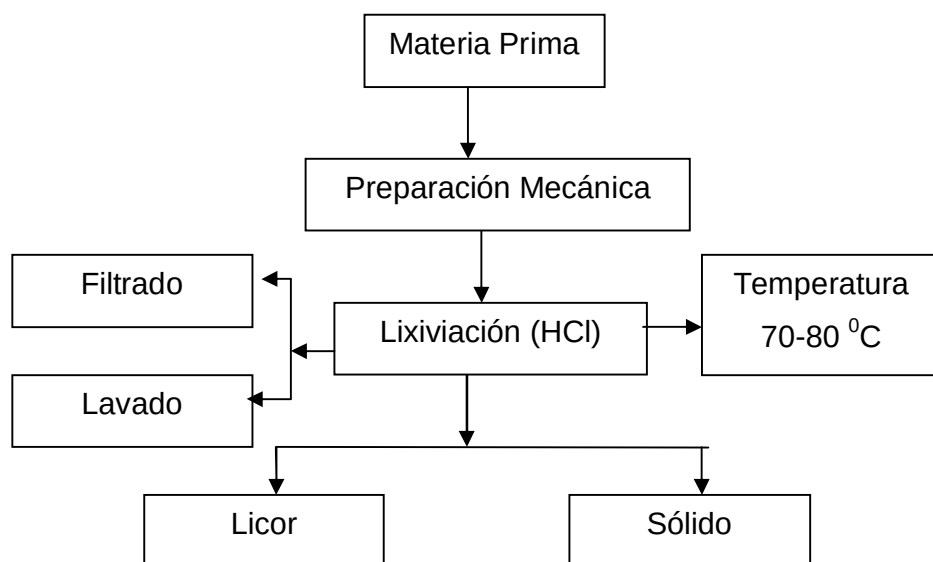


Figura 3.6 Diseño tecnológico para el tratamiento de la arcilla

Unos de los procesos fundamentales es el del lavado con agua después de la lixiviación, es eliminar los restos de ácido clorhídrico que queda presente en la materia prima. Ecológicamente será factible en un futuro poder diseñar una tecnología que trate estas agua residuales para evitar la contaminación ambiental, sería de gran utilidad ya que se recuperaría el cloro residual y parte del hierro contenida en ella, lo cual proporcionará grandes beneficios a la economía del país, además ayudaría a eliminar las grandes acumulaciones de este desecho.

3.8 Impacto Ambiental

El desarrollo de la industria cerámica en el municipio de Moa, requiere un estudio detallado y minucioso de las grandes reservas de minerales arcillosos con que cuenta la región, como el análisis del impacto que provocaría su explotación en gran escala, al medio ambiente.

Para el estudio de los problemas ambientales es necesario abarcar desde la prospección de la materia prima (minería de las arcillas), como primera actividad contaminadora, hasta el vertimiento de los desechos propios del proceso productivo (conformación y procesamiento de los objetos cerámicos).

La fabricación de objetos cerámicos comprende las etapas siguientes:

- Extracción de la materia prima.
- Beneficio de las arcillas.
- Conformación y acabado del producto.

El proceso de extracción de las arcillas, generalmente se realiza por debajo de la capa vegetal, esto trae consigo problemas a los suelos, provocando su erosión y afectando desde la vegetación hasta la fauna típica de la zona de minado, así como la contaminación del aire por la emisión de polvo a la atmósfera.

3.9 Problemas ambientales en las diferentes etapas del proceso

Es de mucha importancia el control del impacto ambiental provocado por la minería de las arcillas, por eso es importante poner en práctica algunas medidas.

- Guardar la parte orgánica del suelo (humus) en forma apropiada para luego usarla en la fase de cierre y rehabilitación.
- Evitar los deslizamientos de pendientes a la hora de su extracción.
- Evitar la destrucción de la flora y la fauna en los lugares donde se va a extraer el material.
- Plantar árboles para evitar la erosión de los suelos y conserven su entorno.

3.9.1 Beneficio de la materia prima

Esta etapa comprende los procesos siguientes:

- Mezclado de las materias primas.
- Clasificación.

- Filtración.

Los principales riesgos específicos de la industria cerámica provienen del uso y manipulación de las diferentes materias primas.

- De los componentes de las arcillas.
- De las emisiones del horno de cocción.

3.92 Conformación y Acabado

En esta etapa del proceso se producen desechos sólidos y gaseosos fundamentalmente, por el proceso de horneado y los residuos de materiales después de la elaboración de las piezas. Debido al propio proceso de cocción en los hornos se generan gases tóxicos, los cuales enrarecen el ambiente laboral y contaminan directamente el aire.

El combustible utilizado es el carbón mineral o la leña, cuya combustión produce gases de diferentes tipos, entre ellos: Compuestos de azufre, óxidos de carbono (entre los cuales se encuentran el monóxido de carbono que se produce por la combustión incompleta de combustibles orgánicos y el dióxido de carbono gas que se encuentra normalmente en la atmósfera ya que se produce durante la espiración de los seres vivos. La leña, desprenden grandes volúmenes de humo durante el proceso de combustión, estos arrastran gran cantidad de cenizas y microgotas de combustible sin quemar. Además, del excesivo calor a que están expuestos los operadores del horno

El proceso contamina a la atmósfera y produce cambios climáticos a largo plazo, que provocan una reducción de la visibilidad y la destrucción total de la vegetación debido a la lluvia ácida.

Los daños directos sobre el hombre se refieren principalmente a enfermedades agudas susceptibles de causar la muerte; intoxicaciones o irritaciones. El monóxido de carbono se combina con la hemoglobina de la sangre formando un complejo estable e irreversible disminuyéndose así la capacidad de transporte de oxígeno. Diversas sustancias producen bronquitis, asma, tos crónica, enfisema, neumonía, obstrucciones broncopulmonares, y cáncer.

El control de la contaminación producto de los gases de combustión deberá estar enfocado a:

- Monitoreo y análisis permanente del aire mediante la instrumentación adecuada.
- Cambios de las materias primas o los procesos para evitar la generación de contaminantes, puede afectarse la rentabilidad.
- Separación de los contaminantes después de su generación y antes de su dispersión.

Estas sustancias pueden ser recicladas aprovechándolas en algún otro proceso.

Conclusiones parciales

1. Estadísticamente se demostró que las variables de estudio influyeron positivamente sobre eliminación del hierro de un 44,70 %, siendo un orden decreciente, en primer lugar la acción del reactivo lixivante, seguida de la temperatura y por último la granulometría, aunque todos con valores muy cercanos.
2. La variación de concentración inicial del ácido clorhídrico de mena, tiene tendencia ascendente en la eliminación del hierro, con variabilidad de 15 % desde la relación de 0,1 a 0,3.
3. También la variación granulométrica desde 0,075 hasta 0,15, conlleva a una variabilidad de 13 % con la eliminación del hierro.
4. De manera similar ocurre en la temperatura desde la variabilidad es de 10 %

CONCLUSIONES

Se demostró que las variables de estudio influyeron positivamente sobre eliminación del hierro (44,70 %), siendo en orden decreciente, en primer lugar la acción del reactivo lixivante, seguida de la temperatura y por último la granulometría, aunque todos con valores muy cercanos. Se obtuvo los resultados esperados con respecto al producto final, la eliminación del hierro.

Se obtuvo el modelo estadístico – matemático que se adecua al rango de parámetros seleccionados para la extracción del hierro contenido en la arcilla:

$$\xi_{co} = 44,70 + 6,96 \cdot T + 8,40 \cdot c(\text{HCl}) + 6,12 \cdot (\text{granul}) + 1,46 \cdot T \cdot c(\text{HCl}) + 2,66 \cdot T \cdot (\text{granul}) - 0,48 \cdot c(\text{HCl}) \cdot (\text{granul}) - 1,33T \cdot c(\text{HCl}) \cdot (\text{granul})$$

RECOMENDACIONES

1. Investigar la influencia de otros factores en el proceso de lixiviación.
2. Realizar el estudio cinético del comportamiento de los diferentes elementos.
3. Realizar escalado de la investigación.
4. Realizar el estudio del licor obtenido.
5. Estudiar las transformaciones ocurrida dentro de la red cristalina del sólido
6. Elaborar un esquema de diseño para la recuperación del hierro extraído y del ácido consumido.

BIBLIOGRAFÍA

ASPECTOS GEOLÓGICOS DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. Instituto Tecnológico Geo-minero. Madrid. España. 1991.

BASCHINI, MIRIA. Minerales Arcillosos: Un Enfoque Químico.

BLANCO T.R.Y SOTO G.L.D.1983. Materiales de Construcción. La Habana, Cuba. Editorial Pueblo y Educación. 147 p.

COLECTIVO DE AUTORES. Características de las arcillas.

DE PABLO, G. L. "Las arcillas. 1964. Clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales". Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, tomo XXVII, 2, 49-92, México.

ERIKA G. TUESTA, MAGALI VIVAS, ROSARIO SUN Y ABEL GUTARRA. 2005. Modificación química de arcillas y su aplicación en la retención de colorantes. Rev. Soc. Quím. Perú, 71, Nº 1, (26-36).

FIGUEIRAL, S. R. C. D. V. 2010. Valoración de Mezclas de Arcillas de la Región de Centeno para su Utilización en la Industria de Materiales Locales. [ISMM]. Moa 48 p.

FONSECA NAVARRO, DARIS; GÓNGORA LEYVA, EVER; RODRÍGUEZ SUÁREZ, ARIANA Y MARTÍNEZ FRÓMETA, OSVALDO. 2004. Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Centeno, Moa, Cuba. Ingenierías, Enero-Marzo Vol. VII, No. 22.

FONSECA R. D. 2003. Evaluación de mezclas de arcillas de la región de centeno, Moa. Pons Herrera, J.(Tutor). Tesis de Maestría. ISMM.72 p

GONZÁLES J. A.; PINO E Y RUIZ M. DEL C. 2003. Blanqueado de arcilla mediante la eliminación de hierro en la etapa de quemado. Jornada Sam/Conamet/Simposio Materia. Argentina Sam Luz.

GORCHAKOV G. I. 1984. Materiales de Construcción. Moscú. Editorial MIR. 400 p.

HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ R. A.; LEGORRETA GARCÍA F.; HERNÁNDEZ CRUZ L.E.; MATA MUÑOZ P.F.; OLIVER A VENEGAS P. N. y MARTÍNEZ LUÉVANOS., A. 2011. Decoloración de arcillas caoliníferas por lixiviación para la obtención de caolín con alto índice de blancura. Memorias del XX Congreso Internacional en Metalurgia Extractiva, Hemosillo, Sonora, México, 18-20 de mayo.

<http://www.medioambiente.cu/legislacion/leyes/L-81.htm>

<http://www.monografias.com/trabajos7/miar/miar.shtml>, 2002

http://www.mycoad.com/mycoad/spa_5_14.htm, 2002

J. L LOP; M. D. NOTARI; E. BARRACHINA; I. N EBOT; I. NÚÑEZ y J.B. CARDA. 2010. Tratamientos en arcillas con vistas a mejorar sus coordenadas cromáticas para el proceso de fabricación de gres porcelánico. Bol. Soc. Esp. Ceram. V. 49, 6, 413-422.

LEY DE MINAS. Portal del Medio ambiente cubano, 21-12-1994.
<http://www.medioambiente.cu/legislacion/leyes/L-76.htm>

LEY DEL MEDIO AMBIENTE. Portal del Medio ambiente cubano, 11-07-1997.

MAYO, O. & I. R. 2002. Geología de los yacimientos de arcillas para la cerámica. Quinta Conferencia Científico Técnica de la Construcción, Jornada Iberoamericana, La Habana. Editorial SOFTCAL, IR 824-831.

NAVARRO, D. E. F. 2003. Evaluación de Mezclas de Arcillas de la Región de Centeno, Moa. [ISMM]. Moa 85 p.

OROZCO, G. 1995: Caracterización de las arcillas de Cayo Guam. Informe técnico. ISMM.

ORTÍZ RAMÍREZ, TERESA. 1992. Recopilación bibliográfica y estudio preliminar de las materias primas de la región de Moa con posibilidades en la cerámica refractaria. Informe técnico. ISMM.

PONS HERRERA, J. A. & C. LEYVA. 1996. Empleo de las arcillas ferrocaoliniticas – gibbsíticas de la región de Moa en los talleres de fundición. Revista Minería y Geología XIII (3):93 p.

PONS HERRERA, JOSE A y LEYVA, CARLOS. 1996. Empleo de las arcillas

- RAMÍREZ, Y. C.; ALMENARES, R. S.R. y OCHOA, Y. M. 2011: Evaluación de mezclas de arcilla de la región de centeno, Moa, Cuba y arena sílice residual.
- ZELIKMAN. A .N; VOLDMAN G.M Y BELIAEVSKAYAL. V. 1982. Teoría de los Procesos Hidrometalúrgicos. Moscú. Editorial Pueblo y Educación. 493 p.