



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA

***CARACTERIZACIÓN Y BENEFICIO DEL CAOLÍN QUE SE PRODUCE EN EL
MUNICIPIO DE AGUA BLANCA: UNA NUEVA ALTERNATIVA PARA SU
PURIFICACIÓN***

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Que para obtener el título
de Ingeniero Industrial

Presenta:

JUAN CARLOS FLORES SEGURA

Bajo la dirección del

DR. FELIPE LEGORRETA GARCÍA

Mineral de la Reforma, Julio de 2010.

*El Autor y el Director del presente Trabajo de Investigación agradecen a **FOMIX HIDALGO** por haber apoyado el proyecto:*

“CARACTERIZACIÓN Y NUEVAS PROPUESTAS DE PROCESAMIENTO DE CAOLÍN QUE SE PRODUCE EN EL MUNICIPIO DE AGUA BLANCA EN EL ESTADO DE HIDALGO: VIABILIDAD DEL INCREMENTO DE SU VALOR AGREGADO”

CLAVE 97367

Del cual el presente forma parte.



Agradezco:

A Dios por darme la oportunidad de experimentar la vida...

A la vida por ponerme en los lugares y momentos precisos...

A mi Madre por mantener su Fe en mí...

A mis Padres por su apoyo Incondicional...

A los que me han apoyado y aún más a los que no...

Al Dr. Felipe por su confianza, paciencia y ayuda...

Al Dr. Víctor por sus enseñanzas, apoyo y aportaciones...

A mis Hermanos...

A mis Amigos Luis, Edith, Daniel, Patricia y Elizabeth...

Y finalmente a Dios de nuevo, por ser luz, principio y fin...

¡Gracias!

*“Quien conozca todo pero no conozca su Interior, no conoce NADA”
Thomas J. Chalko*

**ÍNDICE**

	Pág.
Índice de figuras	iii
Índice de Tablas	v
Introducción	vi
Objetivo General	vii
Objetivos Particulares	viii
Hipótesis	viii
Capítulo 1. Antecedentes	1
1.1 ¿Qué es el Caolín?	1
1.2 Propiedades Físicas y Químicas del Caolín	7
1.3 Aplicaciones Industriales del Caolín	10
1.4 Los Yacimientos de Caolín	21
1.4.1 Los Yacimientos de Caolín más Importantes en el Mundo	21
1.4.2 Los Yacimientos de Caolín en México	25
1.4.3 El Yacimiento de Agua Blanca, Hidalgo	26
1.4.4 La explotación actual del Yacimiento de Agua Blanca.	29
1.5 El Mercado del Caolín	30
1.5.1 Balanza Comercial Mexicana del Caolín	33
1.6 Técnicas Actuales de Tratamiento del Caolín	33
1.7 Trabajos de Investigación sobre Métodos de Purificación para el Caolín	40
Capítulo 2. Desarrollo Experimental	42
2.1 Estrategia Experimental	42
2.2 Experimentación	43
Capítulo 3. Resultados y Discusión	46
3.1 Experimentación Preliminar.	46



	Pág.
3.2 Análisis de Distribución de Tamaño de Partícula	46
3.2.1 Caracterización del Mineral de Entrada	48
3.3 Estudio de Microelectrólisis	52
3.3.1 Estudio Voltamperométrico	52
3.3.2 Estudio Cronopotenciométrico	55
3.4 Estudio de Macroelectrólisis	58
3.5 Caracterización del Mineral de Salida	60
3.6 Propuesta de Mejora al Proceso para la Purificación del Caolín	64
Conclusiones	66
Bibliografía	68
Anexo 1	70
Glosario	71



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de Caolín	2
Figura 2. Diagrama esquemático de una hoja tetraédrica.	3
Figura 3. Diagrama esquemático de una hoja octaédrica.	3
Figura 4. Estructura cristalina de la caolinita	4
Figura 5. Vista frontal y lateral de la estructura de la caolinita con sus parámetros de red.	5
Figura 6. Fotografía de la halosita vista con un microscopio Electrónico de Barrido	6
Figura 7. Micrografía de la caolinita vista con un microscopio electrónico de barrido.	6
Figura 8. Ejemplo de la explotación selectiva del caolín.	29
Figura 9. Producción de caolín en México 2000-2008.	32
Figura 10. Diagrama de las acumulaciones de caolín también llamadas flóculos.	36
Figura 11. Diagrama del procedimiento actual de purificación de caolín más usado en los yacimientos más importantes del mundo.	39
Figura 12. Diagrama de flujo de la estrategia experimental	43
Figura 13. Celda de macroelectrólisis de caolín con configuración horizontal.	45
Figura 14. Distribución del tamaño de partícula en la muestra analizada de la solución de caolín.	47
Figura 15. Microscopía de la muestra de caolín con el microscopio electrónico de barrido (MEB) antes del proceso electroquímico.	49
Figura 16. Microscopía (MEB) a 5000 aumentos.	50



	Pág.
Figura 17. Difractograma del caolín de mina.	51
Figura 18. Voltamperograma obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminados con óxidos de hierro en una celda horizontal	53
Figura 19. Voltamperograma obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminados con óxidos de hierro proveniente del municipio de Agua Blanca a un velocidad de barrido = 20 mV/ s en una celda vertical	54
Figura 20. Transitorio cronopotenciométrico obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminada con óxidos de hierro proveniente del municipio de Agua Blanca cuando se impone una corriente de -1.46×10^{-3} A en una celda horizontal.	56
Figura 21. Transitorio cronopotenciométrico obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminada con óxidos de hierro proveniente del municipio de Agua Blanca cuando se impone una corriente de -1.46×10^{-3} A en una celda Vertical.	57
Figura 22. Una muestra de Caolín después de haber sido sometida a un proceso electroquímico de macroelectrólisis	59
Figura 23. Imagen comparativa entre el caolín antes del proceso y después del proceso	60
Figura 24. Gráfica del contenido de Óxidos de fierro con respecto a los diferentes potenciales aplicados a la celda.	62
Figura 25. Diagrama del método propuesto para el tratamiento en la purificación de caolín	65



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Distribución de cargas en la capa de la caolinita.	4
Tabla 2. Resumen de las propiedades físicas y químicas más importantes del caolín, así como algunas constantes físicas representativas.	9
Tabla 3. Principales minas de caolín en la Región de Agua Blanca.	28
Tabla 4. Producción de caolín por país en miles de toneladas.	31
Tabla 5. Balanza comercial Mexicana del Caolín 2004 a 2008.	33
Tabla 6. Caracterización del mineral de entrada.	48
Tabla 7. Resultados de los análisis realizados a las muestras de caolín sometidas a macro-electrólisis, con respecto al óxido de fierro, cuando se impone un potencial de celda en el intervalo de 3.5 a 4.3 V	61
Tabla 8. Resultados de los análisis realizados a las muestras de caolín sometidas a macro-electrólisis, con respecto al óxido de titanio, cuando se impone un potencial de celda en el intervalo de 3.5 a 4.3 V.	63



INTRODUCCIÓN

La explotación de caolín en México ha adquirido gran importancia económica en los últimos años, su demanda va en aumento debido a que el crecimiento poblacional genera un mayor consumo de productos tales como, papel, pinturas, tintas, goma, plásticos, entre otros, estos productos requieren para su fabricación de éste mineral. Un estudio realizado por Freedonia Group (2009), ha calculado que la demanda mundial de caolín para 2013 será de 24.8 millones de toneladas.

El rezago económico que presenta nuestro país, es en parte por la falta de tecnología que nos permita aumentar el valor agregado de nuestros productos, éste rezago se hace igualmente presente en las industrias caolíneas; las técnicas de explotación y tratamiento del mineral, en nuestro país, son muy rudimentarias y no agregan ningún valor al mineral, por lo que la existencia de la explotación y el beneficio que se obtiene de él, es únicamente por el valor inherente que el mineral posee.

El enorme déficit que presenta la balanza comercial del caolín es alarmante, a pesar de tener importantes yacimientos en México se tiene que comprar el caolín a otros países a un precio mucho mayor ya que ha sido tratado y purificado para poder usarlo en la industria de la fabricación de los diferentes productos.

Aun que ya hay métodos de purificación probados, éstos requieren de una gran inversión en equipos y mantenimiento, haciendo que muy pocas empresas tengan la posibilidad de invertir en ellos. Los yacimientos de caolín mexicanos, son muy heterogéneos y presentan una gran cantidad de impurezas que degradan su valor comercial, estas hacen que el caolín pierda sus propiedades y no pueda ser usado directamente en la industria. Además, yacimientos como el del municipio de Agua Blanca, Hidalgo, están muy poco estudiados, por lo que es necesaria su investigación para generar propuestas de técnicas alternativas de purificación, que hagan factible un procedimiento viable, que requiera de menor inversión y que sea altamente efectivo.



Todo esto es también a causa que el caolín es un mineral no renovable, las condiciones en las que se forma, son hechos fortuitos, principalmente causados por movimientos y acontecimientos volcánicos. Su proceso de formación dura millones de años.

En la actualidad no existe ninguna técnica de fabricación de caolín, la creación de caolín sintético es todavía una realidad muy lejana.

Ante esta problemática, la búsqueda de alternativas de purificación nos hace voltear la mirada a técnicas industriales no convencionales de las cuales, algunas de ellas son las técnicas electroquímicas, éstas son ampliamente usadas en diversas industrias, sobre todo para la extracción selectiva de metales en medios donde los métodos convencionales no son efectivos, y debido a que las principales impurezas presentes en el caolín del municipio de Agua Blanca son óxidos de fierro y de titanio, éstas técnicas representan una excelente oportunidad de investigación con alta probabilidad de ser efectivas.

Debido a esto, en el presente trabajo se realiza un estudio sistemático de caolín proveniente del municipio de Agua Blanca, el cual fue procesado mecánicamente, sometido a estudios electroquímicos y posteriormente a macroelectrólisis con un electrodo de plata y contra electrodo DSA® (Dimensionally Stable Anode), con el fin de encontrar las condiciones energéticas necesarias para su tratamiento a fin de ayudar a purificarlo.

OBJETIVO GENERAL

Crear un método de procesamiento alternativo para que el mineral de caolín que se extrae del yacimiento del municipio de Agua Blanca, Hidalgo, mejore su calidad y se ayude a aumentar su valor agregado.



OBJETIVOS PARTICULARES

- Procesar mecánicamente el caolín de mina a fin de dejarlo en condiciones que permitan una buena respuesta electroquímica.
- Encontrar las condiciones energéticas necesarias para la remoción de óxidos de fierro presentes en el caolín.
- Determinar si las técnicas electroquímicas son una alternativa viable en la purificación del caolín proveniente de Agua Blanca.

HIPÓTESIS

Se pueden extraer los óxidos de fierro presentes en caolín proveniente de Agua Blanca, Hidalgo, mediante el uso de técnicas electroquímicas.

Con el fin de generar el marco teórico adecuado y situar el interés del lector en los estudios realizados en este trabajo, se presenta:

Una breve descripción del caolín, sus tipos, características y usos así como los principales yacimientos existentes a nivel mundial y nacional, las técnicas actuales de procesamiento, una breve descripción del mercado de caolín y la balanza comercial mexicana con respecto a este mineral (Capítulo 1)

Se propone una estrategia experimental con el procesamiento mecánico del mineral y técnicas electroquímicas a realizar en una celda de electrólisis que permita tener información sobre la separación de impurezas del mineral (principalmente óxidos de fierro), dicha estrategia está basada en estudios voltamperométricos y cronopotenciométricos con un electrodo de trabajo de plata y contra electrodo DSA (Capítulo 2).

El procesamiento mecánico del caolín de mina fue realizado por medio de trituración primaria y secundaria y cribado con la finalidad de que las propiedades reológicas permitan tener una buena respuesta a las técnicas electroquímicas. La realización de los estudios voltamperométricos y cronopotenciométricos sistemáticamente con un electrodo de trabajo de plata y contra electrodo DSA, con el fin de conocer las condiciones energéticas necesarias para llevar a cabo la separación de impurezas del



caolín proveniente del municipio de Agua Blanca. Así mismo, se llevan a cabo los estudios de macroelectrólisis con un arreglo de dos electrodos a potencial de celda controlado para la separación de óxidos de fierro del caolín que proporcionen el intervalo de potencial donde existe la máxima separación (Capítulo 3).

Finalmente se presentan las conclusiones generales obtenidas a partir de los estudios realizados y los resultados experimentales.



Capítulo 1.

ANTECEDENTES

En el mundo es posible encontrar una gran variedad de materiales proporcionados por la naturaleza, el hombre en su curiosidad, ha aplicado su ingenio y ha encontrado infinidad de usos para éstos materiales.

El caolín desde que fue hallado ha despertado la curiosidad de miles, pero es en épocas recientes donde se ha potencializado su uso y su estudio, en éste capítulo se presentan numerosos datos que ayudarán a comprender por qué éste mineral es muy importante en nuestra vida cotidiana y las formas en que este ha sido estudiado.

1.1 ¿QUÉ ES EL CAOLÍN?

El caolín es una arcilla, un mineral terroso que tiene diversas propiedades las cuales lo hacen un mineral usado desde la antigüedad para la fabricación de utensilios y recipientes cerámicos y actualmente para múltiples aplicaciones en diversas industrias. Es un silicato de aluminio hidratado producto de la descomposición de rocas feldespáticas. El término caolín generalmente se refiere a aquellas arcillas en donde predomina el mineral caolinita.

El caolín en su estado más puro, es una arcilla blanca de múltiples propiedades, tiene una brillantez que la hizo muy apreciada desde épocas muy lejanas, por ejemplo, en la antigua China hace casi 4000 años, ya se fabricaba porcelana hecha a base de caolín, precisamente de este país es que proviene su nombre; Caolín se deriva de la palabra china “Kao-Ling” que significa “alta montaña”, era el nombre del sitio donde se encontró por primera vez el mineral.

Durante largo tiempo se ha fabricado porcelana a base de caolín, siendo por muchos años el secreto de la porcelana china cuya característica principal era su blancura, en



la actualidad se ha estudiado y aprovechado más ampliamente éste mineral debido a que se han estudiado exhaustivamente las diversas propiedades que posee.

En la industria contemporánea el caolín es usado en la elaboración de diversos productos, principalmente por su brillo, blancura, capacidad de adherencia a las superficies y facilidad de dispersión en agua.

TIPOS DE CAOLÍN.

Los minerales de base caolinita son los siguientes:

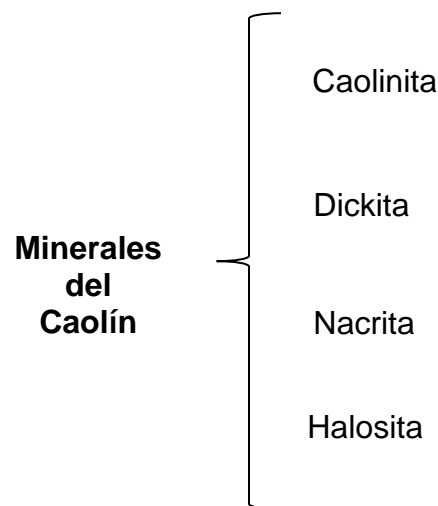


Figura 1. Tipos de caolín.

Las diferencias entre los diferentes minerales de caolín son la manera en que las capas unidad se apilan unas sobre otras, la caolinita tiene forma de plaquetas hexagonales su apilamiento se refiere al posicionamiento de unas plaquetas de caolín sobre otras, lo cual puede observarse en la figura 7 que se presenta más adelante.



La caolinita es por mucho el mineral de caolín más común. La dickita, nacrita y halosita son relativamente raros en comparación, estos últimos tres minerales se forman comúnmente por la alteración hidrotermal, aunque hay casos en que se forman también en los depósitos sedimentarios y residuales, pero aun así es muy raro encontrarlos.

La estructura cristalina de éstos minerales de base caolinita, está formada por una hoja de una sola capa tetraédrica (figura 2) y una hoja octaédrica única (figura 3).

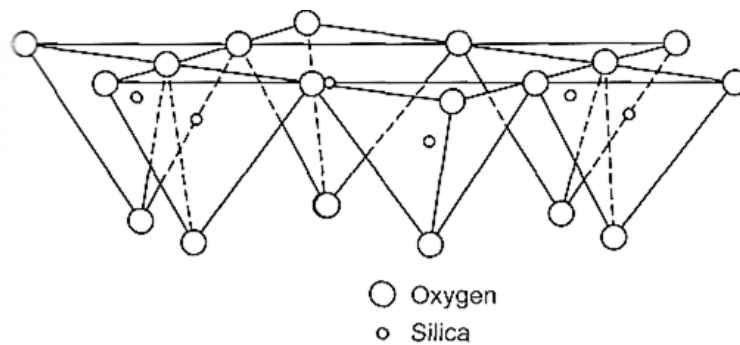


Figura 2. Diagrama esquemático de una hoja tetraédrica. Murray (2008).

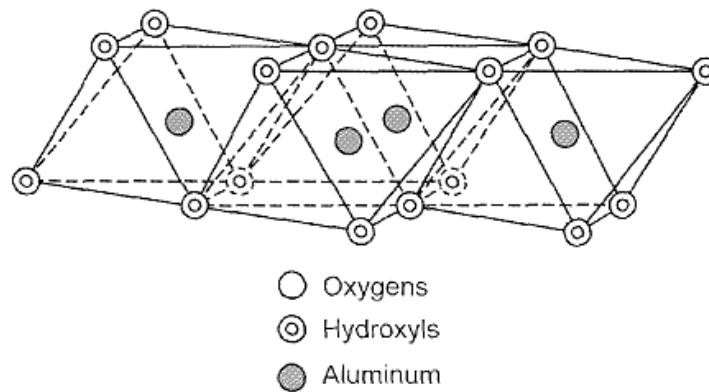


Figura3. Diagrama esquemático de una hoja octaédrica. Murray (2008).

Estas dos hojas se combinan para formar una unidad con un espesor de 7.13 Å, en la que las puntas de los tetraedros de sílice están unidos con la hoja octaédrica. Todos

los oxígenos apicales de tetraedros de sílice apuntan en la misma dirección así que estos átomos de oxígeno y/o hidroxilos, son compartidos por los silicios en la hoja tetraédrica y el aluminio en la hoja octaédrica (figura 4). La fórmula estructural de caolinita es $2H_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ y la composición química teórica es **SiO₂, 46.54%; Al₂O₃, 39.50%; y H₂O, 1.96%.**

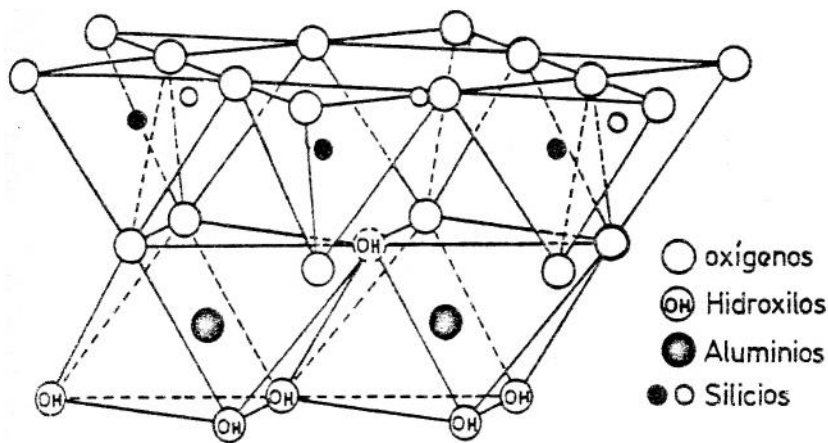


Figura 4. Estructura cristalina de la caolinita. (Brindley, 1958)

Sólo dos tercios de las posiciones octaédricas están ocupados por un átomo de aluminio. Los átomos de aluminio están rodeados por cuatro átomos de oxígeno y ocho hidroxilos. La distribución de carga en la capa de caolinita se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Distribución de cargas en la capa de la caolinita (Murray, 2008).

Elemento	Carga	
$6O^{2-}$	12^-	
$4Si^{4+}$	16^+	
$4O^{2-}$	10^-	Ésta es la capa compartida por las hojas tetraédrica y octaédrica
$4Al^{3+}$	12^+	
$6(OH)^-$	6^-	



Las cargas en la estructura de la caolinita están balanceadas. Los minerales del grupo del caolín (caolinita, dickita, nacrita y halosita), consisten en los llamados de capa 1:1 de hojas tetraédrica y octaédrica combinadas, que son continuas en la dirección de los ejes a y b y están apiladas una sobre la otra en la dirección del eje c (Figura 5), donde a , b y c son los parámetros de la celda de la estructura cristalina de la caolinita.

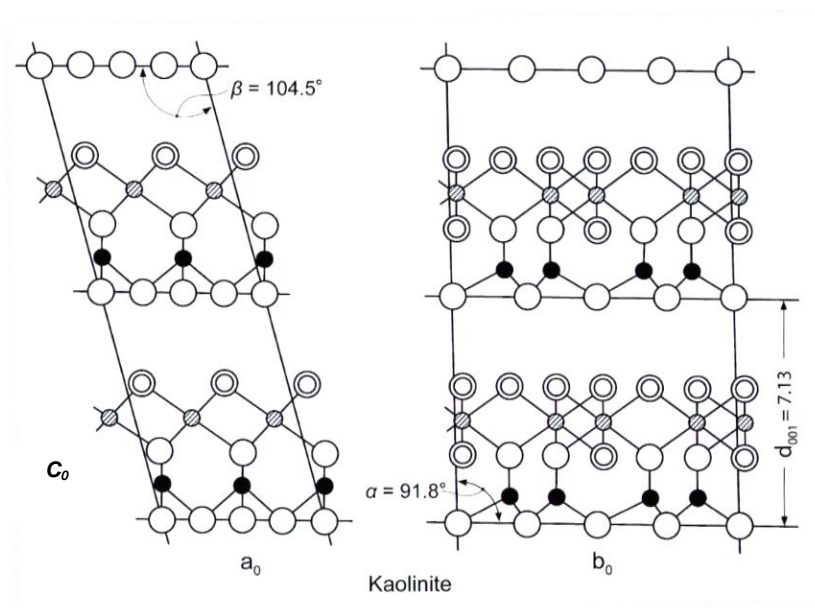


Figura 5. Vista frontal y lateral de la estructura cristalina de la caolinita con sus parámetros de red (Murray 2008)

En la dickita, la celda unidad se compone de dos capas de unidad y en nacrita, seis capas unidad. Halloysita ocurre en dos formas: una hidratada, en el cual hay una capa de moléculas de agua entre las capas, y una deshidratada, la forma hidratada tiene un espaciado de 10 \AA y la forma deshidratada 7.2 \AA . La halosita tiene forma de tubos alargados (Figura 6) Considerando que la forma de caolinita es pseudo placas hexagonales y pilas (Figura 7).

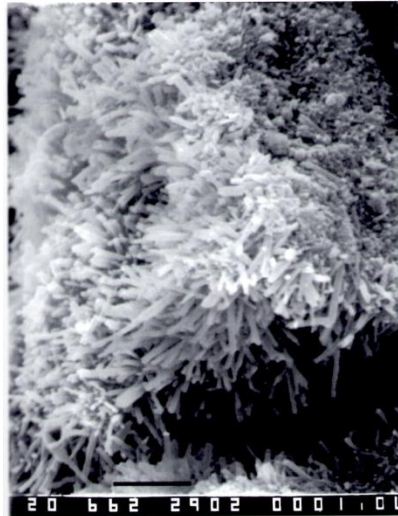


Figura 6. Micrografía de la halosita vista con un microscopio Electrónico de Barrido. (Allo, 2004)

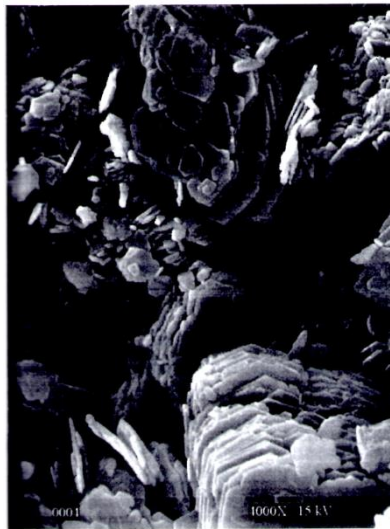


Figura 7. Micrografía de la caolinita vista con un microscopio electrónico de barrido. (Ibidem)

Ésta composición del caolín, así como su estructura cristalina, es lo que le da al caolín las propiedades que lo hacen ser un material versátil y usable a nivel industrial, sus propiedades se mencionan a continuación.



1.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL CAOLÍN

La estructura cristalina del caolín descrita en la sección anterior, se clasifica como una arcilla de capa de 1:1. Tanto la capa octaédrica de sílice y la tetraédrica de alúmina tienen pocas sustitución de otros elementos, si es que ninguna. Por lo tanto, la carga de la capa de caolinita es mínima.

En la mayoría las aplicaciones industriales, el brillo y el color son muy importantes. El brillo y la blancura son dos propiedades diferentes. El brillo es una medida de la reflectividad porcentuales a 457 nm en comparación con el óxido de magnesio ahumado, que se asigna 100% de brillo. Blancura o color se mide en el espectro que es visible para el ojo, que es esencialmente 400 a 700 nm. La blancura ideal para el caolín es un color azul-blanco en vez de crema-blanco. Sin embargo, la mayoría de los caolines son de color crema-blanco y esto se conoce como el factor amarillo.

Debido a la sustitución limitada en la red cristalina de caolinita, la capacidad de intercambio de base y capacidad de absorción son bajos en comparación con otros minerales como esmectitas y sepiolita-paligorskita. Normalmente, la capacidad de intercambio de base de caolinitas son en el rango de 1-5 meq / 100g. La caolinita exhibe baja absorción y las propiedades de adsorción, están directamente relacionadas con la baja carga superficial en la partícula.

La morfología de las partículas de caolinita, como se observa en la figura 7, se presenta en forma de placas de pseudo-hexagonales bien definidas, así como algunos depósitos llamados “libros” o “flóculos” que son relativamente gruesos, o bien, en forma de pilas y algunos cristales largos en forma vermicular.

A pesar de ello, el caolín presenta buenas propiedades de reología, que son las características de flujo a altas concentraciones de contenido de sólidos en medios líquidos. Hay varios factores que afectan la reología, tales como el tamaño de partícula, su forma, la distribución del tamaño, la presencia de impurezas, el contenido de sales, iones, etc. La reología es un parámetro importante al procesar el caolín industrialmente, una buena reología representa que es fácil transportarlo en forma de pulpa.



Otra de las propiedades beneficiosas de la caolinita es que es suave y por lo tanto no es abrasiva. La dureza en la escala de Mohs es de aproximadamente 1.5. Esta propiedad muy importante para las aplicaciones industriales debido a que el caolín es muy suave con casi todas las materias con las cuales entran en contacto, por lo tanto, el desgaste de los equipos y maquinaria con los que se trabaja el mineral es baja.

Relativamente el caolín puro es refractario su punto fusión es de alrededor de 1850 °C. En la mayoría de los casos, los caolines son plásticos, lo que hace al caolín una muy importante materia prima para la fabricación de cerámica.

Otras propiedades físicas y químicas importantes son que el caolín es químicamente inerte en un rango relativamente amplio de pH (4-9), tiene una conductividad térmica y eléctrica baja, es hidrofílico por lo que se dispersa fácilmente en agua, y puede ser tratado térmicamente o calcinado para producir productos que son excelentes rellenos y extensores. Otra de sus propiedades es la higroscopia que presenta, lo que significa que el caolín es un mineral capaz de atraer el agua (ya sea en forma de vapor o de líquido), del medio dónde se encuentran, por lo que el caolín puede ser usado como medio absorbente o desecante.

El resumen de las propiedades físicas y químicas del caolín se muestran en la tabla 2.



Tabla 2. Resumen de las propiedades físicas y químicas más importantes del caolín, así como algunas constantes físicas representativas (Allo, 2004)

Color	Blanco o casi blanco
Químicamente inerte	Sobre rango de pH(4-9)
Tamaño de partícula	fino
Textura	Suave y no abrasivo
Estructura	Laminar con la dimensión de la superficie de la placa relativamente larga comparado con su grosor
Comportamiento en agua	Hidrofílico y fácilmente dispersable.
Otras características	Por su forma, tiene buena cobertura y poder de cobertura cuando se usa como pigmento o para aumentar el recubrimiento Alta adherencia a las superficies Es Higroscópico, Plástico, refractario Baja conductividad eléctrica y térmica Una baja carga en la capa de su estructura Baja área superficial Algunos caolines tienen una baja viscosidad y fácil flujo al 70% de sólidos
Densidad específica	2.62
Índice de refracción	1.57
Dureza (en la escala de Mohs)	1.5 – 2.0
Temperatura de fusión	1850 °C
Número Einlehner de abrasión	4 – 10
Brillo en seco a 457 nm	75 – 93 %



1.3 APLICACIONES INDUSTRIALES DEL CAOLÍN

El caolín tiene una variada aplicación dentro de las industrias que a continuación se mencionan junto con la forma en que se usa para cada una de ellas específicamente.

1.3.1 Papel

Una de las más importantes aplicaciones de caolín es como recubrimiento y relleno en el papel. Como relleno, el caolín se mezcla con las fibras de la pasta de celulosa y como recubrimiento, el caolín se mezcla con agua, adhesivos, varios aditivos y otros recubrimientos. El recubrimiento hace que las hojas de papel sean suaves, más brillantes, más opacas, y lo más importante, mejora la capacidad de impresión. El papel que no tiene ésta cubierta está formado por fibras de celulosa entrelazadas en una configuración aleatoria y abierta. El papel sin recubrimiento no cumple con los estrictos requisitos de impresión de alta calidad y en particular la impresión multicolor. El tamaño y la forma laminar fina de las partículas de la caolinita son ideales para proporcionar una superficie lisa, densa, con porosidad uniforme. Esto le da al papel una receptividad de la tinta más uniforme.

Las propiedades ópticas de los revestimientos son el brillo y la opacidad (poder de recubrimiento). El brillo aumenta con la disminución del tamaño de partícula. La opacidad es controlada por difusión de la luz.

1.3.2 Pinturas.

La pintura es un mercado significativo para el caolín, aunque es considerablemente menor que el mercado para el revestimiento de papel. Alrededor de 600,000 toneladas anuales en todo el mundo se utilizan como pigmentos para aumentar el volumen de las pinturas. El principal uso es como extensor de los pigmentos en pinturas de látex a



base de agua. También se utiliza en las pinturas para cubiertas industriales a base de aceites.

El caolín calcinado y delaminado se utiliza ampliamente en pinturas para interiores a base de agua. Estas pinturas tienen un volumen, de moderado a alto, en las concentraciones de pigmentos que van desde 50% al 70%. Para pinturas con semi-brillo y alto brillo a base de agua, se utilizan caolines con tamaño de partícula fino con concentraciones de menos del 50% de volumen en pigmento. La distribución del tamaño de partícula de estos caolines es de aproximadamente el 98% inferior a 2 μm . El caolín contribuye a la suspensión, la viscosidad, y la nivelación de las pinturas.

El pigmento más utilizado en la pintura es el dióxido de titanio, por lo que el caolín calcinado se utiliza para extenderlo uniformemente tanto como sea posible con el fin de reducir los costos.

Los caolines delaminados, debido a su alta relación de aspecto y placas relativamente delgadas, dan una superficie lisa a las películas de pintura un mayor brillo. Mediante la combinación adecuada del caolín como extensor y pigmentos, la formulación de la pintura puede ser adaptada a necesidades concretas.

1.3.3 Cerámicos

Los productos cerámicos incluyen vajillas, sanitarios, azulejos, porcelana eléctrica, cerámica y refractarios, entre otros. El caolín y las arcillas refractarias son utilizados como el ingrediente principal en muchos de éstos productos. En general el término cerámica se refiere a la manufactura de productos con materiales provenientes de la tierra mediante la aplicación de altas temperaturas.

A través del tiempo, con el desarrollo de la ciencia moderna, el arte de la cerámica se ha convertido en una profesión propia de la ingeniería. Las arcillas de base caolinita son uno de los materiales más importantes que se usan en aplicaciones cerámicas porque sus propiedades químicas y físicas hacen que el procesamiento se fácil y el acabado sea de gran calidad.



Las propiedades más importantes que dan las arcillas de base caolinita a las cerámicas son la plasticidad, la resistencia en verde, la resistencia en seco, la resistencia después de la cocción, su color, la propiedad refractaria, la facilidad de moldeado de sanitarios, la baja absorción de agua, y la contracción controlada.

La contracción es una importante propiedad porque los artículos de cerámica se exponen a éste efecto en dos puntos diferentes en la secuencia de manufactura. Durante el secado, el artículo se reducirá en cantidades variables en función de su composición y el porcentaje de agua presente. Durante la cocción, el artículo de cerámica se contraerá, por lo tanto, es importante poder medir la contracción en ambos puntos del proceso, generalmente ésta contracción es medida como contracción lineal y contracción volumétrica. En el cuerpo sin cocer, la plasticidad en húmedo y la contracción generalmente disminuyen a medida que aumenta el tamaño de partícula. En el cuerpo ya horneado, la contracción y la absorción de agua generalmente disminuyen, mientras que el módulo de ruptura y la blancura del material por lo general aumentan a medida que aumenta el tamaño partícula.

Las arcillas refractarias, que son más finas en el tamaño de partículas que la mayoría de caolines, tienen una mayor resistencia en verde.

1.3.4 Caucho

El caolín es usado en el caucho debido a que lo refuerza y endurece, además que tiene un costo relativamente bajo en comparación con otros pigmentos y rellenos. En productos de caucho que son de color negro, el pigmento predilecto es el carbón negro, pero en la manufactura de caucho de color, se utiliza el caolín. Las arcillas de caolín son usadas en productos de caucho de color diferente al negro, en donde la resistencia al desgaste es importante. Algunos ejemplos de ello es los tacones y suelas de los zapatos, neumáticos automotrices, cintas transportadoras, cubiertas y los neumáticos de color de las bicicletas, entre otros.



Las arcillas de caolín ayudan a dar rigidez a los compuestos de caucho no curado que son importantes para la fabricación de tubos de goma, tubos metálicos, anillos de tarro y artículos extruidos para evitar el pandeo o colapso durante la fabricación. La arcilla de caolín también se utiliza para eliminar problemas mecánicos de moldeo de productos de goma dura en artículos para el hogar, juguetes y novedades. Otras aplicaciones de caolín como endurecedor del caucho es en los guantes, adhesivos, cámaras de aire de butilo, caucho de recuperación, y los compuestos de neopreno.

El caolín delaminado se utiliza como relleno en la pared lateral de los neumáticos de cara blanca porque actúa como una barrera para el escape de aire. Además, hay superficies especiales en las que se utilizan caolines modificados para obtener una mejor dispersión de la goma y un refuerzo mejorado.

1.3.5 Plásticos

El caolín es usado como relleno en los plásticos ya que ayuda a producir un acabado de superficie lisa, reduce el agrietamiento y la contracción durante el curado, mejora la estabilidad térmica, contribuye a dar una alta resistencia al impacto, mejora la resistencia a la acción química y a la intemperie, además que ayuda a controlar las propiedades de flujo cuando el plástico está líquido. Como relleno de carga se agrega en el plástico entre un 15% y 60% de caolín.

El uso más importante del caolín en los plásticos se encuentra en la fabricación del policloruro de vinilo (PVC) que se usa como recubrimientos de cables, alambres, y también para la fabricación de tuberías. El caolín calcinado y con superficie modificada, se utilizan para mejorar la resistencia eléctrica al menor costo. La resistencia eléctrica del PVC es mejorada por los rellenos que son hidrofóbicos. La calcinación de caolín a unos 1000 °C reduce su energía superficial, lo que provoca el desarrollo de la hidrofobia en el mineral.

En general, las partículas finas del caolín mejoran las propiedades físicas en los polímeros, éstas incrementan considerablemente la resistencia al impacto de los plásticos.



1.3.6 Tinta

El pigmento principal inorgánico utilizado en la fabricación de tinta es el caolín. Este es un uso pequeño pero importante para este mineral. Las formulaciones de tinta son similares a las del revestimiento de papel, la pintura para vehículos y composición de pigmentos base. Los usos más importantes del caolín en las tintas, son la mejora de la resistencia y como extensor tanto de tintas de colores como en pigmentos blancos. Para preservar el brillo de las películas de tinta, el extensor de caolín no debe ser tan grueso en el tamaño de las partículas ya que éstas pueden sobresalir por encima de la superficie. El tamaño de partícula del caolín como extensor debe ser entre 0.2 y 0.5 μm para mayor efectividad. La forma de las plaquetas de la caolinita reduce la permeabilidad de la película, lo que ayuda a dar resistencia sobre la superficie.

El caolín extiende los colorantes en la tinta, agudiza la formación de puntos dando tixotropía y mejorándola resistencia. Los caolines calcinados son usados en tintas de base aceite, por su propiedad hidrofóbica.

1.3.7 Catalizadores

El principal uso de caolín en este aspecto, se encuentra en la catálisis de sustratos en el craqueo del petróleo. Debido a que muchos catalizadores se utilizan a altas temperaturas y presiones, el carácter refractario del caolín lo hace apropiado para estas condiciones. La pureza del caolín es fundamental para el proceso del craqueo de petróleo por lo que se requiere un caolín procesado con bajo nivel de hierro, titanio y alcalinos.

Caolín y halosita se utilizan para hacer de craqueo catalítico, como catalizador en la polimerización, formación del enlace peptídico, y otros. La superficie seca de la caolinita es muy ácida y se utiliza para promover la polimerización del estireno, la deshidratación de alcoholes, la hidrólisis de ésteres, y de isomerización de alquenos.



1.3.8 Fibra De Vidrio

El caolín es un componente principal usado en la producción de fibra de vidrio. La fibra de vidrio tiene un gran número de aplicaciones, incluyendo el aislamiento, refuerzo de plásticos, hilados textiles, fabricación de sustratos de tarjetas para circuitos electrónicos, tela y tejas para techos. Los materiales de los componentes básicos utilizados para hacer fibra de vidrio son de sílice, caolín y caliza, junto con pequeñas cantidades de ácido bórico, carbonato de sodio y sulfato de sodio. El caolín debe cumplir con estrictas especificaciones químicas para ésta aplicación.

1.3.9 Cemento Portland

El cemento es elaborado mediante el mezclado de materiales que contienen cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Esta mezcla se sinteriza y después es pulverizada al momento en el que se agrega un retardante. El caolín es una fuente ideal de alúmina y sílice y también hace que el cemento sea más blanco. Desde hace relativamente poco tiempo, productos de metacaolín se utilizan como aditivo de cementos donde se necesita de alta resistencia. La alúmina y sílice amorfa reactiva en el metacaolín reacciona con el exceso de calcio para producir aluminio y silicato de calcio, lo que aumenta la resistencia del cemento.

1.3.10 Alumbre

En el proceso para fabricar alumbre, el caolín hidratado se calienta entre 650 y 700 °C, para formar metacaolín. El metacaolín se hace reaccionar con ácido sulfúrico para producir alumbre cuya fórmula es $Al_2 \cdot (SO_4)_3 \cdot H_2O$. En un grado mucho menor, caolín se hace reaccionar con el ácido fosfórico para producir fosfato de aluminio.



1.3.11 Fabricación de discos abrasivos

Las arcillas de caolín plásticas y refractarias se utilizan para unir los abrasivos utilizados durante la elaboración de éstos productos. El caolín y el abrasivo son mezclados, formados, secados y cocidos durante el proceso de fabricación. La contracción de cocción debe ser baja con el fin de prevenir grietas que provoquen la ruptura del disco.

1.3.12 Adhesivos y Selladores.

Los adhesivos y selladores tienen un gran número de usos en la industria y el hogar. El rango de contenido de caolín para las formulaciones de adhesivos es de entre 10% y 70%. El caolín se incorpora en algunas formulaciones para mejorar la adherencia, tiempo de secado, y aumentar la viscosidad. En la calcinación del caolín se eliminan los hidroxilos en la superficie provocando que tenga una baja absorción de humedad, esto proporciona un rendimiento excelente para la fabricación de selladores. La forma laminar del caolín y su color blanco es muy importante en algunos adhesivos y selladores.

1.3.13 Productos cosméticos

Los productos cosméticos sirven al mercado de los lujos y los productos tienen un alto valor agregado. Los talcos para bebés y para el cuerpo, fabricados con caolín y envasados atractivamente, pueden venderse por más de un centenar de veces su costo. Los talcos que se componen de un polvo con un aditivo de olor, han sido asociados históricamente con minerales fibrosos asbestiformes, pero en la actualidad los caolines delaminados han sustituido una gran parte de estos minerales. El caolín esterilizado y delaminado puede componer hasta el 75% de una formulación de talco para el cuerpo. El caolín tiene la capacidad de cubrir y además tiene buena adhesión a la piel. La otra gran aplicación de caolín en los cosméticos se encuentra en mascarillas, máscaras y polvos con pigmentos de color. Un uso reciente de caolín es en la



formulación de acondicionadores para el cabello, éste agrega cuerpo al cabello fino y hace que aumente su volumen aparente.

1.3.14 Lápices de colores y gises

El caolín de tamaño de partícula fino a menudo se utiliza para endurecer lápices de colores y hacerlos más duros a la flexión. Además, el caolín ayuda a dispersar los tintes u otros colorantes orgánicos que se utilizan. El caolín por su forma laminar promueve la creación una capa delgada del lápiz de color sobre la superficie lisa de papel o cualquier otro material. El caolín se utiliza también en gises por su suavidad, plasticidad, su capacidad de adherencia, y su capacidad para dar volumen.

1.3.15 Fertilizantes

El caolín se agrega a los fertilizantes químicos como diluyente para ofrecer una concentración óptima en la relación entre el compuesto activo y el vehículo de aplicación. También se utiliza como material para la granulación de partículas de nitrato de amonio, un componente importante en muchos abonos. Las partículas de nitrato de amonio cuando absorben humedad se vuelven pegajosas. Una fina capa de caolín hace que el nitrato de amonio se vuelva gránulos que pueden fluir libremente sin pegarse.

1.3.16 Absorción de fluoruro.

La caolinita tiene afinidad con el fluoruro con el que reacciona y tal vez reemplaza los hidroxilos en su estructura. Si el agua potable contiene niveles altos de fluoruro la caolinita se utiliza para eliminar o reducir el contenido de fluoruro por absorción. Una nueva aplicación potencial es en los depuradores para reducir las emisiones de flúor en algunas plantas de fabricación de cerámicos y arcillas.



1.3.17 Aditivos Alimentarios

El caolín no es tóxico ni nocivo, contiene pocos iones metálicos. Está aprobado para su uso interno en alimentos y la administración de medicamentos. Se utiliza en un número limitado de alimentos como aditivo. Por ejemplo, ayuda a endurecer pasteles fríos. En los recubrimientos de chocolate evita su rápido derretimiento, también como agente para el polvo de azúcar para mejorar su adherencia a las donas y otros bocadillos, y para ciertos productos alimenticios líquidos emulsionantes.

1.3.18 Fundición

Las arcillas plásticas de base caolinita son ampliamente utilizados para unir arenas de moldeo cuando se requiere un refractariedad relativamente alta, sobre todo cuando un metal fundido se vacía a altas temperaturas. En algunos casos donde se requiere de muy alta temperatura en las fundiciones de metal, el caolín es calcinado a una temperatura de 1300 °C para formar mullita que se utiliza en lugar de arena de sílice.

1.3.19 Protección de Frutas y Vegetales

Una aplicación relativamente nueva de caolín se encuentra en los recubrimientos en spray para las manzanas, aceitunas, tomates y otras frutas y verduras, esto con el fin de protegerlas de daños causados por el sol y rayos ultravioleta a medida que maduran. La lluvia puede lavar el recubrimiento, lo que exige que la fruta o verdura sea roseada de nuevo. Los insecticidas se pueden añadir al recubrimiento para proteger las frutas y vegetales de los insectos.

1.3.20 Insecticidas y plaguicidas

El caolín con un tamaño de partículas muy fino se utiliza como vehículo para insecticidas y pesticidas. En la mayoría de los casos, el contenido de humedad debe ser inferior al 1%. La superficie de la arcilla debe ser compatible químicamente con los



ingredientes activos para evitar el deterioro del producto químico. También se utiliza como diluyente. El caolín es tratado con plaguicidas seleccionados y/o insecticidas y se pulveriza para crear lodo para los árboles frutales y otros productos de jardín. Muchos pesticidas se encuentran en forma concentrada, que puede tener un efecto dañino en las plantas y debe ser diluido para su aplicación efectiva y económica.

1.3.21 Medicamentos y productos farmacéuticos

En ésta aplicación se utiliza como una gente de absorción para los trastornos gastrointestinales, en forma de vehículo (como pastillas o cápsulas), como agente de suspensión, en cataplasmas y para absorber líquidos en las operaciones quirúrgicas. Como agente de absorción en padecimientos estomacales, las arcillas absorben las toxinas y bacterias dañinas además de formar una capa protectora calmante de la inflamación en la membrana mucosa del tracto digestivo. Los caolines utilizados en medicamentos y productos farmacéuticos deben estar libres de metales tóxicos; deben ser esterilizados para eliminar los microorganismos patógenos. El caolín es usado como un agente de suspensión de pectinas, por ejemplo, en el Kaopectate un producto muy conocido.

1.3.22 Yeso

Caolines se utilizan en yeso como colorante blanco, para dispersar y mejorar la uniformidad de la escayola, para aumentar el porcentaje de sólidos y reducir el contenido de agua y mejorar la plasticidad y fluidez.

1.3.23 Compuestos para pulido

El caolín calcinado ultra fino se utiliza en muchos compuestos para pulido. El tamaño de partícula debe ser de 100% inferior a $3\mu\text{m}$ y el 90% más fina que $2\mu\text{m}$. El caolín calcinado tiene una dureza de entre 6 y 7 en la escala Mohs y se utiliza en la fabricación de pasta de dientes, ceras de automóviles, ceras para pulir plata y oro (que son metales blandos y requieren una acción de pulido suave). El caolín calcinado debe



estar libre de partículas gruesas que son más abrasivas, éstas pueden rayar o ranurar el material. La mayoría de los pulidores para automóviles contienen partículas finas de caolín calcinado como agente principal.

1.3.24 Impermeabilizantes y cubiertas granulares

El caolín calcinado en forma granular se extiende sobre la superficie del papel de asfalto para cubrir techos. El caolín calcinado es de color blanco por lo que también es un buen reflector de los rayos solares; es duro, resistente e insoluble, por lo que tiene las propiedades necesarias para la impermeabilización. Los gránulos pueden tener diferente tamaño para hacer productos de tamaño grueso o medio.

1.3.25 Jabones y detergentes

Se utilizan en jabones como reemplazo parcial para los componentes de los ácidos grasos por su acción emulsionante, su afinidad con las partículas de carbono, y su efecto detergente natural. Su estabilidad química ayuda para diluir el jabón y para dispersar los componentes de los ácidos grasos sin afectar su efectividad.

1.3.26 Curtido de cuero

Los caolines se utilizan en el curtido de cuero para aclarar su color, darles suavidad y además alisar su superficie. Es necesario que las partículas sean finas a fin de que penetren fácilmente en el cuero y rellenen los poros.

1.3.27 Recubrimiento de varillas para soldadura.

El caolín y en especial el metacaolín, tienen una constante dieléctrica alta y se utilizan para el recubrimiento de varillas de soldadura. La capa que forman mantiene el movimiento de corriente eléctrica en la punta de la varilla de soldadura, por lo que se derretirá favoreciendo la fusión del metal y el acabado de la unión.



1.4 LOS YACIMIENTOS DE CAOLÍN

El caolín se forma por acción hidrotermal a partir de rocas feldespáticas, éstas son expuestas a condiciones específicas que producen en las rocas la llamada caolinización.

Debido al constante movimiento volcánico y de las placas tectónicas, algunas rocas feldespáticas son expuestas fortuitamente a condiciones de gran presión y temperaturas entre los 200 y 300 °C en zonas de alta precipitación pluvial propiciando la formación de caolín a lo largo de millones de años.

Debido a esto, el caolín se forma solo en zonas que han poseído constantemente las condiciones mencionadas, siendo un producto escaso presente solamente en algunos yacimientos alrededor del mundo, en la siguiente sección se mencionan los países con los yacimientos que más producen.

1.4.1 LOS YACIMIENTOS DE CAOLÍN MÁS IMPORTANTES EN EL MUNDO

Hay muchos yacimientos de arcillas en todo el mundo de donde se extraen y procesan para su uso industrial. A continuación se mencionan los yacimientos de caolín más estudiados a nivel mundial y que tienen volúmenes de producción considerables.

1.4.1.1 Estados Unidos.

Los caolines de Georgia y Carolina del Sur han sido utilizados desde el año 1750. El tonelaje total extraído hasta la fecha de esta zona es de más de 500,000,000 de toneladas. Esta región es una de las más extensas en el mundo. En éste lugar las arcillas están depositadas en lagunas o lentes, además de lagos y estanques en un sistema deltaico muy amplio que abarca un área de unos 30-50 km de ancho y 150 km de largo que se extiende desde Macon, Georgia, hasta Aiken, Carolina del Sur. Las camas caolín tienen un rango de 2 a 12m de espesor.



Actualmente el caolín es la arcilla predominante en la zona; es una arcilla con más del 90% de contenido de caolinita. Otros minerales que son comúnmente encontrados en el yacimiento incluyen el cuarzo, muscovita, biotita, feldespatos parcialmente alterados, y esmectita junto con pequeñas cantidades de halosita, magnetita, ilmenita, rutilo, anatasa, circón, turmalina, y algunos otros minerales pesados. La producción anual actual es de aproximadamente 7,400,000 toneladas según las estimaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos.

1.4.1.2 Inglaterra.

El yacimiento más grande y de más alta calidad de los depósitos caolín en el mundo, se encuentran en Cornwall y Devon en el suroeste de Inglaterra. Estos caolines fueron descubiertos en año de 1746. Se estima que la producción total desde su descubrimiento ha sido de unos 170,000,000 toneladas. La caolinita se deriva de una etapa magmática o hidrotermal de descomposición del feldespato en el granito. El contenido de caolinita en el granito alterado oscila entre 10% y 20%. Diversos estudios han demostrado que el uranio es la principal fuente de calor radiogénico lo que ha dado al lugar a un sistema de circulación hidrotermal que es un proceso que aún está activo para la formación de caolinita. Debido al bajo contenido de hierro en la matriz granito a partir del cual se forma el caolín (el granito es un tipo de roca feldespática), la caolinita extraída es muy blanca. La producción anual actual de la zona es de alrededor de 2,000,000 de toneladas.

1.4.1.3 Brasil.

La región amazónica en el norte de Brasil tiene dos áreas en las cuales los caolines sedimentarios son extraídos y procesados principalmente para su uso para la industria del papel. El principal yacimiento fue descubierto en 1970 y se encuentra en el río Jari, un afluente del Amazonas; el alcance de este depósito es de 12 km de longitud y 5 km de ancho y es de hasta 40 m de profundidad.



La producción anual actual de este caolín de Jari es de aproximadamente 850,000 toneladas.

En Brasil existen otros yacimientos los cuales tienen una menor producción.

1.4.1.4 República Checa.

Los yacimientos de caolín en la República Checa son principalmente depósitos residuales que se formaron por procesos de meteorización de granito en la región de Karlovy Vary. Además, un arco carbonífero en el área de Podborany que ha sido caolinizada por meteorización residual. El mayor depósito está situado entre Podborany y Krasny Dvur y contiene 100 millones de toneladas en reservas. El grosor medio de este depósito es de 30 m.

El informe anual de producción de caolines de la República Checa se estima en 750,000 toneladas.

1.4.1.5 Indonesia.

El caolín de éste país es extraído en la isla de Bangka Belitung, situada en el norte de Yakarta en el Mar de Java. La mayor parte del mineral está en esa zona. Los caolines que hay ahí son de origen residual y alterado desde granitos también. Los cambios mineralógicos y químicos en el granito alterado desde la superficie muestran que el granito es de reciente formación y tiene un alto contenido de feldespatos que se alteran en caolinita y halosita. El caolín que se extrae está compuesto por caolinita vermicular, junto con halosita.

Este caolín residual tiene un bajo contenido de hierro y de titanio, por lo que tiene un brillo relativamente alto. El caolín es usado localmente como materia prima cerámica y es enviado a Japón, Filipinas y Taiwán, donde se utiliza como un relleno en papel. Se estima que la producción anual actual de 500,000 toneladas.



1.4.1.6 China.

Hay muchos yacimientos de caolín en China, el mayor de ellos es un depósito hidrotermal en Suzhou que está situado al suroeste de Shanghai, en la provincia de Jiangsu. El caolín es alterado a partir de rocas volcánicas. Los depósitos de Suzhou son muy complejos debido a las diversas matrices de las estructuras geológicas, la lixiviación hidrotermal y las aguas subterráneas. En promedio las zonas caolinizadas tienen 20 m de espesor y se compone principalmente de caolinita, halosita, y cuarzo junto con pequeñas cantidades de esmectita, sericita, alunita, y pirita. El caolín Suzhou se utiliza como un material cerámico y de relleno en papel, goma y una porción en la pintura. Otros caolines primarios en China se utilizan a nivel local principalmente como materia prima cerámica.

El único depósito sedimentario en China se encuentra cerca de Maoming en el oeste de la provincia de Guandong. Este caolín es en realidad arenas caoliníticas. La Oficina de Geología y Recursos Minerales de Guandong calcula que las reservas estimadas de arenas caoliníticas son más de 200 millones de toneladas. El espesor de los lentes de arenas caoliníticas se encuentra entre el rango de 20 a 45 m y se extienden horizontalmente por unos 50 km. El contenido mineral de estos cuerpos es de un 75 a 80% en cristales de cuarzo y caolinita de 20 a 25%. Este caolín ya tratado se utiliza como materia prima cerámica y revestimiento para el papel. Se estima la producción anual de caolín en China es de 2,000,000 de toneladas.

1.4.1.7 Otros Países.

Existen además otros países que producen una gran cantidad de caolín. Es el caso de Alemania que tiene una gran producción, sin embargo, el caolín que reporta tiene su origen en otros países. El caolín es importado, purificado y posteriormente exportado a un mayor precio, este país cuenta con alta tecnología y diversas plantas de purificación, pero no con grandes yacimientos.



En Italia, Turquía, España, Grecia y México se tienen una considerable producción, pero el caolín en estos países no ha sido estudiado ampliamente como el de Estados Unidos o Inglaterra.

1.4.2 LOS YACIMIENTOS DE CAOLÍN EN MÉXICO.

Los principales yacimientos de caolín mexicanos se mencionan a continuación junto con algunos datos de interés sobre su ubicación, formación y usos.

Los mayores estados productores de caolín en México son: Michoacán, Guanajuato, Veracruz, Hidalgo y Chihuahua, han llegado a producir el 99.36% del total nacional, aun que existen yacimientos en otros estados con menor producción.

En los depósitos de Guanajuato existe más variedad de calidades con diferente composición y cantidad de impurezas, debido esto los caolines de esta entidad se canalizan a las industrias del cemento, cerámica, papel, pintura, hule, agroquímicos, talco, tabiques refractarios y forraje.

El caolín en los estados de Puebla y Zacatecas es de origen hidrotermal, presenta variación en el color debido a la presencia de impurezas de cuarzo, mica y óxidos de fierro principalmente. Es utilizado primordialmente para la fabricación de cementos, porcelanas, azulejos, refractarios, adhesivos y cerámicos. El caolín de Puebla se caracteriza por ser sillico-arenoso.

En la región de Jiménez, al sur de Chihuahua, se ha localizado caolín primario, el cual contiene otro tipo de minerales como sílice. Su aplicación es en las industrias del cemento y la cerámica. Se encuentra en forma de estratos entre areniscas y lutitas.

En el estado de Jalisco, en el municipio de Etzatlán, se ha detectado caolín originado debido a la influencia de hidrotermalismo controlado por un fracturamiento que afectó a las tobas riolíticas, alterando y transformando a los feldespatos en minerales arcillosos a medida que la alteración se hizo intensa. La forma en que se presenta el caolín es



irregular y en pequeños afloramientos o lentes. Este caolín se puede clasificar como silicoso y su aplicación es para las industrias del cemento y la cerámica.

En el municipio de Zinapécuaro, Mich., el yacimiento de caolín detectado se considera como hidrotermal de temperaturas moderadas (entre 200 y 300°C), originado a causa de la alteración de las riolitas por corrientes geotermales que fluyen por diversas fracturas de las mismas. En este caolín se observa un alto contenido de sílice, así como también la presencia de óxidos de fierro, feldspatos potásicos y material arcilloso, entre otros. Podría tener aplicación en las industrias cerámica, refractaria y de pintura.

En los yacimientos de Huayacocotla, Veracruz, y de Agua Blanca, Hidalgo, es posible encontrar lentes de material de buena calidad pero en extensiones muy pequeñas, esta región, en su mayoría tiene yacimientos con alto contenido de sílice, por lo que no todo el material es susceptible de beneficiarse y cumplir con los requerimientos exigidos a los caolines de importación. La región se extiende entre Veracruz e Hidalgo.

1.4.3 EL YACIMIENTO DE AGUA BLANCA, HIDALGO.

Los antecedentes del municipio Agua Blanca en materia de minería se remontan al año de 1883. A partir de entonces han sido numerosos los trabajos desarrollados en esa materia, desembocando en una explotación de hace aproximadamente cinco décadas. Entre estos estudios se encuentran los realizados por la Comisión de Fomento Minero, El Fideicomiso de Minerales No Metálicos y el Consejo de Recursos Minerales en tiempos recientes, los que son muy completos y de carácter evaluativo.

En este municipio a la par que el de Huayacocotla, reviste gran importancia por la presencia de los grandes volúmenes de caolín en la región que se emplean en la industria de la transformación y fabricación de diversos productos.

Se identificaron minerales representados principalmente por arcillas de caolín y montmorilloníticas. Los depósitos de caolín fueron reconocidos principalmente al



noroeste y oeste del municipio, en la vecina comunidad Potrero de Monroy (Mpio. Huayacocotla, Ver.) y hacia el ejido Rosa de Castilla (Mpio. Agua Blanca, Hgo.).

En base a su composición química el mineral es de tipo: silicoso, silicoso alunítico y plástico, de color blanco a crema con tonos rojizos.

La clasificación utilizada generalmente en la región se basa en la coloración, es decir, el caolín blanco es considerado de primera, el crema de segunda y el manchado o con tonos rojizos de tercera.



Tabla 3. Principales minas de caolín en la región de Agua Blanca (FIFOMI, 2004)

Clave	Nombre	Substancia	Roca Encajonante	Alteración	Origen
AG - 1	Las Envidias	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 2	La Nevada	Caolín silicoso	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 3	La Joya	Caolín plástico	Toba riolítica	caolinización	Hidrotermal
AG - 4	La Nueva	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 5	Ayacahuite	Caolín silicoso	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 6	Los Gavilanes	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 7	La Niña	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 8	La Lomita	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 9	La Mohonera	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 10	El Bordo	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 11	El Encanto	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 14	Los Jilgueros	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 15	La Mina	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 16	El Capulín	Caolín plástico/silicoso	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 17	El Lindero	Caolín plástico/silicoso	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal
AG - 19	Puerto Lobo	Caolín silicoso/plástico	Toba riolítica	Silicificación, caolinización	Hidrotermal

En la Tabla 3 se muestran las minas que existen en esa región.



1.4.4 LA EXPLOTACIÓN ACTUAL DEL YACIMIENTO EN AGUA BLANCA

La explotación del mineral se realiza en obras a cielo abierto y en forma subterránea a través de socavones irregulares siguiendo los cuerpos de mejor calidad, lo que obviamente se traduce en una operación selectiva y riesgosa en algunos casos, tal como se observa en la figura 8.



Figura8. Ejemplo de la explotación selectiva del caolín.

Aunado a lo anterior, la explotación se realiza de forma rústica a pico y pala, transportándolo con carretillas hasta las tolvas improvisadas donde son cargados camiones de 10 toneladas de capacidad. Bajo estas circunstancias la producción diaria es de 20 a 30 toneladas en época de secas.



En algunas ocasiones si las condiciones de explotación lo permiten, ésta se realiza con retroexcavadoras rentadas. En menor escala y en bancos particulares la explotación es más tecnificada, a través de banqueo con retroexcavadora y/o cargadores frontales como es el caso de la mina la Lomita (mina AG-8 mencionada en la tabla 3).

En términos generales y en base a las observaciones realizadas en la localidad de Potrero de Monroy (minas AG-1 a 11 y AG-19 mencionadas en la Tabla 3) se tienen cuerpos de caolín plástico de 1ª y 2ª, el cual varía de forma heterogénea presentándose también caolín silicoso, 1ª y 2ª. Estos caolines son aptos para su empleo como carga y cubierta para papel, cemento, cerámica, pinturas, fertilizantes y hule entre otros.

1.5 EL MERCADO DE CAOLÍN.

A nivel mundial, México no es un productor importante, esto debido a la falta de logística en la explotación, la falta de tecnología y a que el caolín de nuestros yacimientos es heterogéneos y tiene importantes cantidades de impurezas a diferencia de otros países en que el caolín es más puro de forma natural, y que además es tratado para purificarlo aumentando su valor. En México se cuentan con importantes yacimientos, pero la falta de tratamiento para beneficio, hacen que la producción sea intermitente, y de baja calidad. En la tabla 4 se muestran los países con mayor producción a nivel mundial en 2008.



Tabla 4. Producción de caolín por país en miles de toneladas (Departamento de Estadística Minera, 2009).

	2007	2008
Estados Unidos	7,110	6,750
Alemania	3,800	3,850
República Checa	3,800	3,800
China	3,270	2,781
Brasil	2,500	2,490
Inglaterra	1,800	1,750
Italia	584	580
Turquía	580	580
España	450	450
México	87	85
Grecia	60	60
Otros	8,850	8,630

La industria del papel consume aproximadamente el 50% de la producción mundial de caolín y muchos de los desarrollos han sido en este sector papelerero. De las toneladas de mineral usadas en la industria papelerera, 75% es para el revestimiento de papel y 25% para relleno.

En los últimos 25 años, las formas de uso del caolín han cambiado significativamente. En los años 1980's, se enfatizaba en el tamaño de las partículas como una función de longitud y grosor; en los 1990's, la forma tomó la mayor importancia, con una función importante en los diferentes roles de relleno y revestimiento; sin embargo, desde el 2000, se enfatiza en los aspectos que pueden incrementar la opacidad.

Actualmente, las grandes compañías caolineras se están moviendo en busca de la caracterización de mineral con propiedades como viscosidad y brillo, porque la forma y dimensión de las partículas ahora se pueden ver y medir con mayor facilidad y relacionarlas a su aplicación funcional.

Con base a las cifras del Anuario Estadístico del Servicio Geológico Mexicano, la producción nacional de caolín en 2006 fue de 962 mil toneladas, con una tasa creciente



de 10.4% anual hasta ese año, sin embargo en 2007 y 2008 la producción disminuyó considerablemente, esto se atribuye a que el caolín no es explotado sistemáticamente.

El estado de Hidalgo en los años 2005 y 2006 produjo 5 veces más en relación a lo registrado en 2004 cuando produjo 72 mil toneladas, en 2006 esta cifra alcanzó 385 mil toneladas convirtiéndose en el primer productor nacional del mineral de ese año; de igual forma Zacatecas pasó de 59 mil en 2004 a 217 mil toneladas en el 2006, destacando como segundo productor nacional; por el contrario, el estado de Veracruz fue desplazado del 1ro al 3er lugar con un monto de 210 mil toneladas en el 2006. Debido al heterogéneo comportamiento de los yacimientos del caolín mexicano, de la presencia de diversas calidades en un mismo lote y en lentes pequeños, la vocación de mineral en México es muy diversa. Su principal mercado en orden de importancia es como sigue: la industria del cemento, pintura, papel y algunas cerámicas.

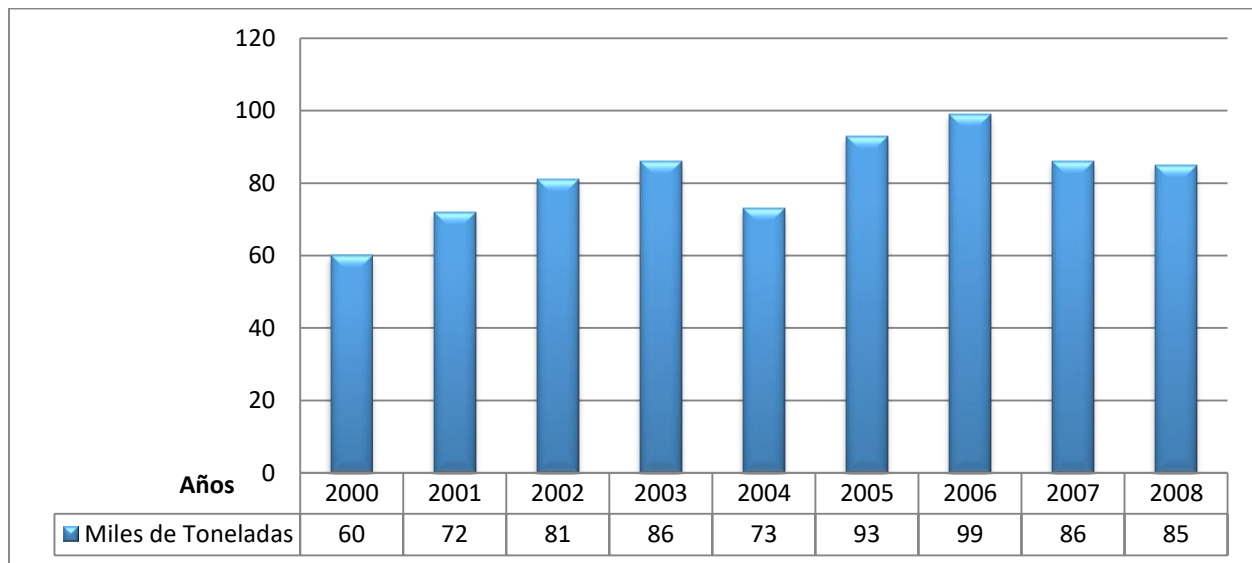


Figura 9. Producción de caolín en México 2000-2008 en miles de toneladas.

En la figura 9 se muestra la producción nacional de caolín desde 2000 hasta 2008, se puede observar que la producción no es constante y ha disminuido en 2007 y 2008.



1.5.1 Balanza comercial mexicana del caolín

En la tabla 5 se muestra la balanza comercial del caolín de 2004 a 2008, las cifras hablan por sí solas.

Tabla 5. Balanza comercial de Caolín 2004-2008(Departamento de Estadística Minera, 2009).

Concepto	2004	2005	2006	2007	2008
Exportaciones	\$207,027.00	\$282,924.00	\$261,948.00	\$228,561.00	\$539,096.00
Importaciones	\$45,616,923.00	\$52,135,829.00	\$57,922,826.00	\$65,481,580.00	\$64,468,866.00
Balanza Comercial	-\$45,409,896.00	-\$51,852,905.00	-\$57,660,878.00	-\$65,253,019.00	-\$63,929,770.00

1.6 TÉCNICAS ACTUALES DE TRATAMIENTO DEL CAOLÍN

Exploración, extracción y procesamiento.

Una vez que un depósito de arcilla se ha descubierto, debería elaborarse un programa de perforación para vislumbrar el área de extensión, el grosor y el tipo de mineral, el espesor y la calidad de la arcilla. Ambos ejercicios básicos, la exploración y el barrenado, se utilizan en el desarrollo minero. En remotas áreas forestales como en las de Brasil, en las primeras etapas de exploración, cavaron a mano pozos que fueron utilizadas para evaluar el caolín. Estos pozos de prueba fueron de alrededor de 1 m de diámetro y hasta 30 m de profundidad. La razón de que los pozos de prueba se utilizaron fue debido a la dificultad en conseguir taladros especiales montados en camiones en la zona. Una vez que el depósito fue descubierto, entonces el área fue despejada de manera que se pudieran explotar.

Para la mayoría de los depósitos de arcilla, se utiliza un patrón de cuadrícula para determinar el tamaño y la calidad del depósito. La distancia entre los agujeros de taladro en la cuadrícula se basa en varios factores como la topografía, la geología, extensión lateral y la uniformidad, y algunas consideraciones de la capa freática. Por ejemplo, la perforación y el programa de pruebas son muy diferentes si el depósito es



de arcilla sedimentaria o residual de un depósito que es hidrotermal o es estructuralmente formado por fallas, pliegues, y camas inclinadas.

Los programas de perforación alrededor del mundo capas relativamente planas como las situadas en Georgia y Brasil, en donde se perfora por lo menos 25 barrenos por 40 hectáreas, sin embargo en la región de Agua Blanca, Hidalgo, esto se hace difícil debido al terreno montañoso. El propósito de un programa de perforación de caolín es aprovechar al máximo el mineral existente, sin dejar zonas que generen situaciones peligrosas o que hagan que parte del caolín sea inaprovechable; éste, también se utiliza para evaluar los problemas potenciales de aguas subterráneas si el nivel freático es alto. En depósitos de caolín o bentonita de origen hidrotermal, la ubicación de los pozos de perforación está basada en la topografía y la forma y el tamaño de la zona de alteración. En México la falta de programas de explotación del mineral de caolín, causa que los mineros vayan a ciegas, excavando en zonas que no contienen importantes cantidades de mineral o desaprovechando zonas con importante contenido del mismo; la falta de exploración previa causa que la producción de caolín sea variable año con año.

Procesamiento del mineral.

Una vez que el plan de la mina se ha determinado y después de la perforación se ha completado, el terreno es despejado y la eliminación de la montera comienza. Los métodos de la minería a cielo abierto se utilizan en los yacimientos de caolín más importantes del mundo. Una variedad de métodos de extracción son utilizados, los cuales incluyen gran variedad de maquinarias y herramientas tales como: maquinaria hidráulica, palas que cargan directamente en camiones; sistemas de carga automática, grandes dragas que volcado. La sobrecarga se vierte en paneles y posteriormente se carga en las bandas transportadoras. Este último método se utiliza a veces en Europa.

Después de la sobrecarga es removida, el caolín es extraído utilizando casi los mismos métodos que se utilizan para eliminar la sobrecarga. Sin embargo, la extracción debe hacerse con mucho más cuidado para asegurar la calidad y el fin de recuperar la arcilla



mineral de mayor calidad, tanto como sea posible. La práctica habitual consiste en una mina de caolín de calidad específica y la transportación a una reserva, que sea de una calidad similar. Varios lotes se construyen en función del brillo, el color, la viscosidad, y la arenilla presente porcentualmente.

Una vez que el caolín es una reserva en particular, el beneficio en húmedo se inicia. El caolín de una reserva graduada es remolcado a un agitador donde se mezcla con agua y un pequeño porcentaje de un producto químico como dispersante. El porcentaje de sólidos para la agitación varían desde 40% a 60%. El caolín de una sola reserva puede ser mezclado y caolín de reservas múltiples pueden ser mezclados y dispersados para lograr una calidad en particular. Un dispersante es necesario para mantener las partículas separadas unas de otras porque de otra manera, éstas tienden a formar pequeños grupos llamados flóculos.

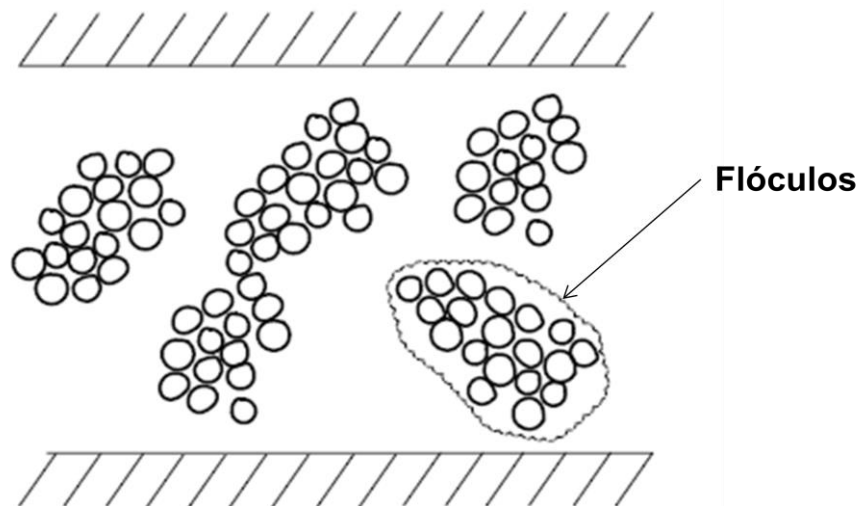


Figura 10. Diagrama de las acumulaciones de caolín en grupos llamadas flóculos.

Debido a las cargas positivas y negativas, las partículas de caolinita son atraídas entre sí y forman grandes agrupaciones o flóculos (figura 10). La adición de un dispersante soluble que ioniza para producir los cationes que se atraen a las cargas negativas de la partícula de arcilla de manera que cada plaqueta tiene una carga similar y por lo tanto



se repelen entre sí manteniéndose separadas en el medio. Los dispersantes químicos más comúnmente utilizados son el silicato de sodio, Hexam-etafosfato de sodio, pirofosfato tetrasódico y poliacrilato de sodio. La cantidad de dispersante añadido es muy pequeño, del orden de 4.12 Kg por tonelada de caolín, que es entre el 0.2-0.6% en función del peso seco del caolín.

Una vez que el caolín es mezclado y dispersado, el siguiente paso en el proceso es quitar la arena. El grano presente en el caolín es generalmente compuesto por arenas de cuarzo, mica, y un conjunto de minerales pesados. Un método común para la eliminación de arenilla es pasar la pasta a través de tamices o cribas. Los hidrociclones se utilizan a veces en vez de cajas de arrastre, sobre todo si el porcentaje de grano es superior a un 15%. Los hidro-separadores también se utilizan para eliminar la arenilla.

Después de desarenar, la pulpa se bombea a tanques, que cuando se llenan y se verifica su calidad, se bombea a través de una tubería a los tanques de la terminal en la planta de procesamiento. Los depósitos también se utilizan para mezclar caolines para satisfacer las especificaciones de viscosidad y brillo.

El siguiente paso en el proceso húmedo consiste en clasificar el caolín en fracciones gruesa y fina. Esto se logra mediante centrifugadoras continuo tipo de cuenco, hidro-separadores o hidro-ciclones. Después de fraccionamiento a un tamaño de partícula particular, la fracción fina y la fracción gruesa del caolín se bombean a tanques de almacenamiento. La fracción gruesa puede ser delaminada o se filtra y se seca para producir arcillas de relleno. La fracción fina se puede pasar a través de un separador magnético de alta intensidad que elimina el hierro y titanio. Otros procesos utilizados para extraer el hierro que contienen, por lo general anatasa, son floculación y flotación selectiva. La pulpa de fracción fina se puede pasar por uno de los procesos anteriores antes de ir a la floculación y a un proceso de lixiviación o puede ir directamente a lixiviación en función del brillo de la calificación que debe producirse. La floculación y lixiviación se utilizan para acidificar la pulpa a un pH entre 2.5 y 3, lo que reduce algunos de los compuestos de hierro que tiñen de color beige al caolín. La alúmina se utiliza a veces en combinación con ácido sulfúrico para dar una floculación de menor tamaño. En esencia, un fuerte agente reductor es el hidrosulfito de sodio, éste se



añade a la mezcla para reducir el hierro férrico a hierro ferroso, que luego se combina con sulfato radical para formar un sulfato de hierro soluble, FeSO_4 . El sulfato de hierro se quita en la etapa de filtración, que es el siguiente paso en el proceso. El control de calidad determina la cantidad de ácido, el alumbre, y hidrosulfatos que se necesita para dar el mejor resultado de brillo.

Después de la floculación y el proceso de lixiviación, la pulpa se bombea a varios filtros para eliminar el agua y el sulfato de hierro soluble. Comúnmente, el porcentaje de sólidos después de la floculación y la lixiviación es de alrededor de 25%, se utilizan filtros de vacío rotatorio o plancha y placa de presión, para deshidratar el caolín, el aumento de porcentaje de sólidos es de a 60-65% después de la filtración. La torta o cake obtenida del filtro puede ser extruida y se seca para hacer lo que se denomina un producto ácido de caolín.

La fracción gruesa de las centrifugadoras se utiliza ya sea para hacer arcillas gruesas de relleno o como materia prima para producir caolines delaminados. Estas se agitan vigorosamente para intentar “cortar” los granos gruesos en placas finas, esta agitación vigorosa causa que el caolín entre en colisión entre el medio y las aspas para producir un plato delaminado grueso con una alta relación de aspecto.

El proceso de separación magnética implica el uso de potentes imanes con intensidades de campo que van de 2 a 6 Teslas. La pulpa de caolín es bombeada a través de alta compresión por una tela fina de acero inoxidable, que al ser activado, separa los minerales magnéticos y permite que la caolinita no magnética pase a través de la matriz. Los minerales magnéticos que se extraen predominantemente son hematita y anatasa enriquecidos con hierro, que son de color amarillento, junto con algunos otros como ilmenita, magnetita y biotita. El proceso de separación magnética fue descrito por Iannicelli (1976) que fue uno de los primeros en abogar por el uso de la separación magnética con el fin de blanquear las arcillas de caolín. El desarrollo de la separación magnética de alta intensidad en húmedo para su uso en la industria del beneficio del caolín, ha dado lugar a un enorme incremento en el aprovechamiento de las reservas de caolín que pueden utilizarse comercialmente ya que hasta ahora es el principal medio de blanqueo de caolín.



El proceso de flotación de espuma es utilizado para extraer el hierro anatasa oscura, el proceso flotación se ha mejorado y que ahora se ha convertido en un método estándar en el procesamiento, principalmente en Georgia, para hacer productos de alto brillo con 90% o más. El proceso consiste en la extracción selectiva de materiales, los cuales son cubiertos con un reactivo que hace que se adhieran a las burbujas de aire se esparcen por la pulpa. La espuma de burbujas de aire que contiene la anatasa manchada sube a la superficie de la celda de flotación y después se desecha.

Otro proceso especial que se utiliza para producir productos de valor agregado es la calcinación, que se introdujo en la década de 1950. La caolinita se procesa para eliminar las impurezas. El caolín es fino de color gris secado en espray, pulverizado, y luego se calcina en un horno rotatorio y se calienta hasta un máximo de 1300 ° C. La temperatura más alta de 1300 °C se utiliza para producir gránulos para la fabricación de formas refractarias y ladrillos. El metacaolín es una mezcla amorfa de alúmina y sílice que se utiliza en varias aplicaciones.

Procesos especiales se utilizan para modificar las propiedades superficiales de caolinita a fin de mejorar la funcionalidad y la dispersión del producto. La superficie hidrófila de la caolinita puede ser tratada químicamente para que sean hidrofóbicas u organofílicas. Estos caolines de superficie modificada pueden ser utilizados como pigmento funcional y/o extensor en los sistemas donde el caolín natural no se puede utilizar.

Todo este procedimiento puede ser resumido en la Figura 11 donde se muestra un esquema del proceso de procesamiento del mineral que se sigue en diferentes yacimientos a nivel mundial.

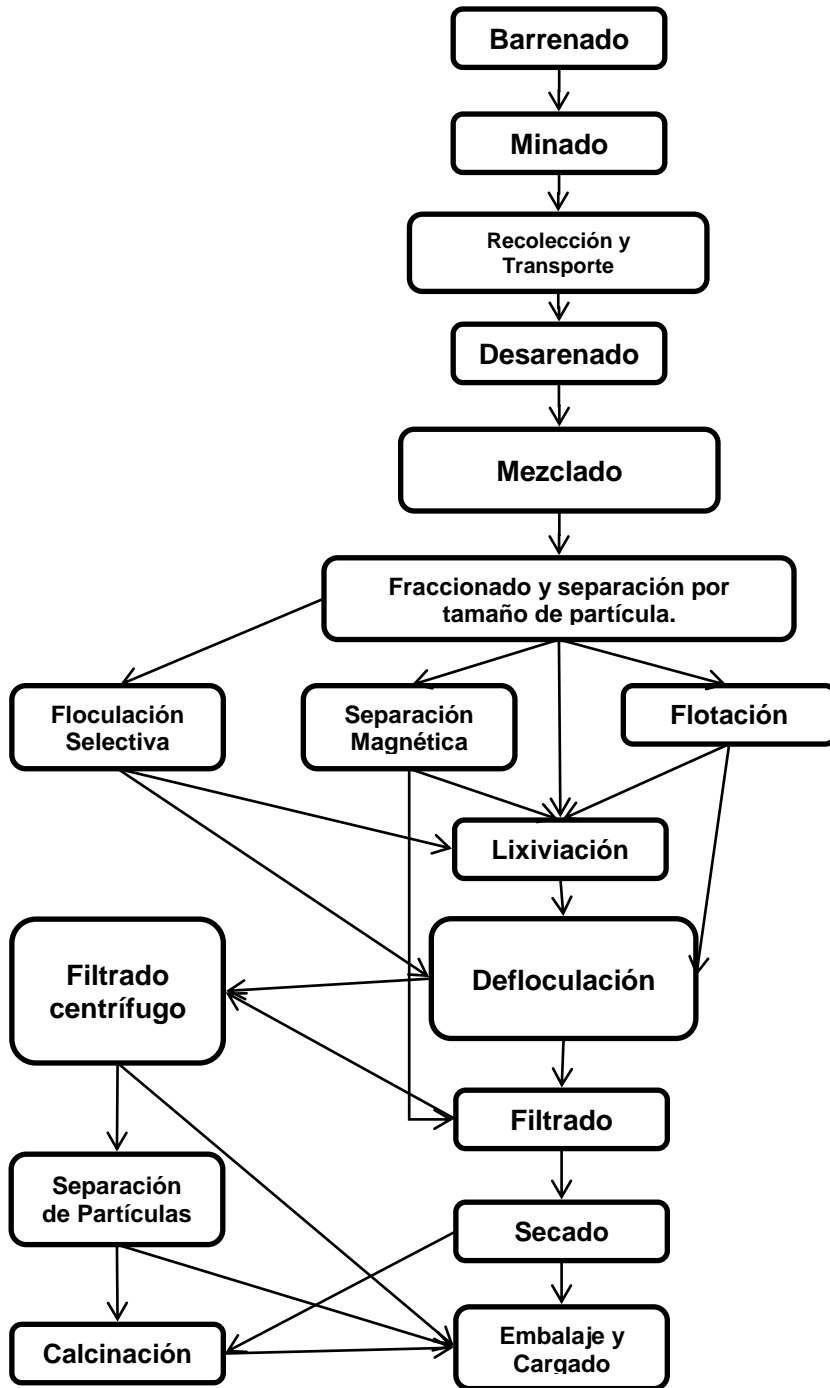




Figura 11. Diagrama del procedimiento actual de purificación de caolín más usado en los yacimientos más importantes del mundo. (Murray, 2008)

Cabe mencionar que en nuestro país solo se hace un procesamiento muy rudimentario que consiste en el barrenado, minado, recolección, transporte y la trituración de caolín, en la mayoría de los yacimientos mexicanos, la calidad del caolín se basa en su coloración.

1.7 TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN SOBRE MÉTODOS DE PURIFICACIÓN PARA EL CAOLÍN.

E.A. Sultanovich y otros (1993) estudiaron la extracción de óxidos de fierro y titanio presentes en el caolín mediante el uso de separadores magnéticos de alta intensidad, esto debido a que los óxidos mencionados presentan un débil magnetismo, por lo que el campo magnético generado debe ser de un orden 1Tesla.

N.J. Saikia y otros (2003), estudiaron que los contenidos de óxidos titano-férreos presentes en el caolín alteran las propiedades tecnológicas del mineral, y que estos óxidos pueden ser reducidos mediante el tratamiento del mineral con el uso de ácidos en el proceso de lixiviación, sin embargo, el caolín resultante, tiene que ser tratado nuevamente para quitar los óxidos reducidos si se quiere tener un grado más de pureza, de no ser así el caolín resultante solo puede ser usado en la industria cerámica.

A. B. Luz y A. Middea. (2004) estudiaron la floculación selectiva de los óxidos presentes en el caolín en donde encontraron que para hacer una floculación efectiva deben agregar hasta 5 agentes químicos, entre dispersantes, reguladores de pH y floculantes, en un proceso dónde hay diferentes combinaciones, si bien logran un 80% en la extracción de óxidos de fierro, y titanio, el proceso es complicado.

Claudio Cameselle y colaboradores (2007) encontraron que la aplicación de potencial eléctrico en un tratamiento de electroremediación puede blanquear el caolín además de minimizar la cantidad de reactivos utilizados en el tratamiento común de purificación.



Estos resultados revelan que los procesos electroquímicos pueden ser una alternativa para abordar la problemática de purificación del caolín contaminado; sin embargo este estudio también indican que se requiere un alto consumo energético en el proceso al crear frentes con bajo pH y que además se requieren agentes químicos complejos para los electrodos.

P. Raghavan y otros (2008), encontraron que la flotación es más efectiva cuando se dispersa previamente el mineral con carbonatos y con una agitación de alta intensidad a diferentes tiempos, y que ésta agitación juega un rol importante al momento de la flotación, y que para lograr una purificación aceptable se deben realizar varias iteraciones del proceso.

Ante los estudios ya realizados se considera que el proceso de purificación de caolín es complejo y que en las diferentes técnicas se requieren de diferentes agentes químicos. Aunque las técnicas de purificación de lixiviación, floculación, separación magnética y flotación ya están probadas, requieren de una mayor inversión en equipos y mantenimiento, en comparación con las técnicas electroquímicas. El uso de las técnicas electroquímicas no ha sido muy estudiado, y los pocos resultados que hay en este campo, revelan que las técnicas electroquímicas pueden ser una alternativa viable, siempre y cuando se encuentren las condiciones necesarias para que éstas sean efectivas.

Por esta razón en el presente trabajo se realiza una investigación más sistemática del proceso electroquímico de macro-electrólisis en una celda que permita conocer las condiciones energéticas dónde se lleva a cabo separación de óxidos de fierro principalmente, ayudando a la purificación del caolín.



Capítulo 2.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Después de una revisión bibliográfica exhaustiva, se obtuvo la información pertinente para desarrollar una estrategia experimental que nos permita cumplir con los objetivos establecidos, teniendo pleno conocimiento la estructura cristalina y propiedades del caolín, la forma en que se utiliza para la fabricación de diversos productos, y algunos estudios que se han realizado.

2.1 ESTRATEGIA EXPERIMENTAL

1. Procesamiento mecánico primario y secundario del caolín extraído de mina a fin de obtener partículas nanométricas.
2. Estudio del tamaño de las partículas de pulpa de caolín por medio de difracción láser a fin de determinar si se ha obtenido de forma mayoritaria partículas finas que tengan una mejor respuesta a las técnicas electroquímicas.
3. Caracterización del mineral de entrada que se tratará electroquímicamente por medio de análisis químico con plasma acoplado.
4. Estudio de micro electrólisis utilizando la técnica de voltamperometría sobre un electrodo de trabajo de plata en dos diferentes configuraciones de celdas, horizontal y vertical, con la finalidad de encontrar las condiciones energéticas sobre las que puede existir separación de los óxidos de fierro presentes en el caolín.
5. Estudio de microelectrólisis utilizando la técnica cronopotenciométrica sobre un arreglo de 2 electrodos con la finalidad en encontrar de forma acotada el intervalo de potencial en el cual se lleva a cabo la separación de óxidos del caolín en dos configuraciones, vertical y horizontal.
6. Estudio de Macroelectrólisis con la finalidad de extraer los óxidos de hierro presentes en el caolín.
7. Caracterización del mineral de salida.
8. Análisis de los resultados obtenidos

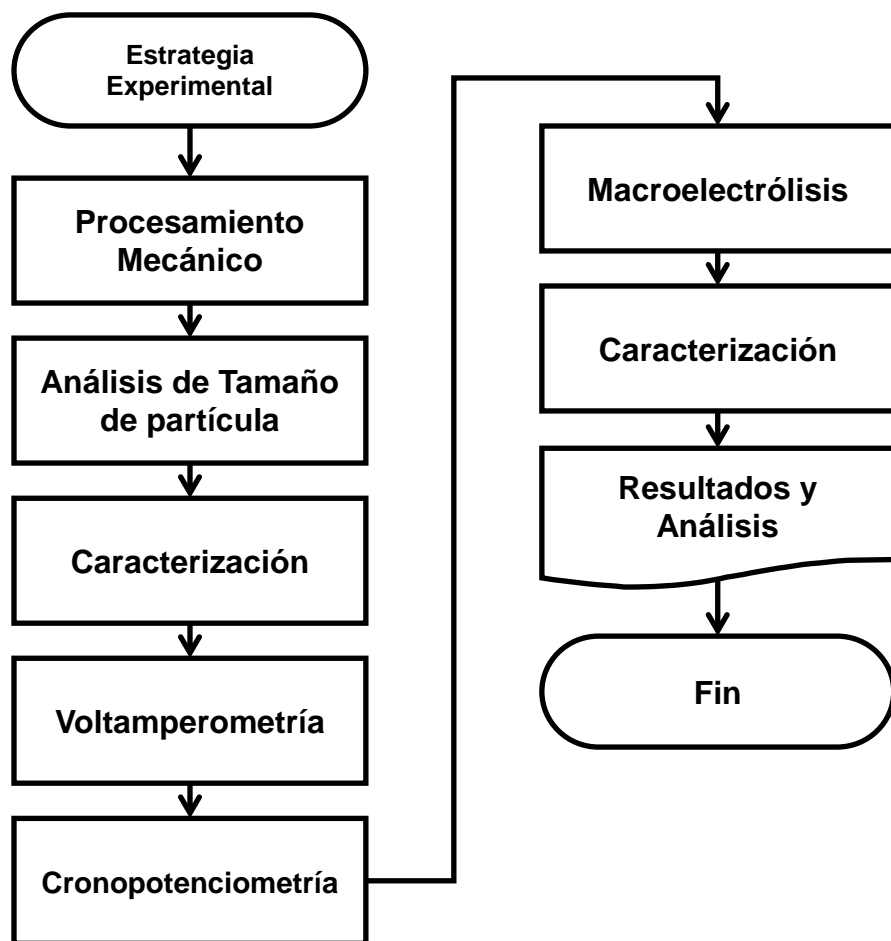


Figura 12. Diagrama de flujo de la estrategia experimental

2.2 EXPERIMENTACIÓN



El caolín de mina fue muestreado y triturado, posteriormente fue cribado con diferentes tamices, hasta obtener partículas micrométricas con un tamaño de $37\mu\text{m}$ las cuales fueron tratadas a fin de que tuvieran una buena respuesta electroquímica, éste procedimiento no se menciona detalladamente, ya que las condiciones en las cuales el caolín tiene respuesta electroquímica, pueden ser sujeto de patente, ésta es la razón de que los estudios ya realizados sobre el caolín tratado con técnicas electroquímicas, aun no tengan resultados importantes hasta ahora.

El estudio del tamaño de las partículas en pulpa de caolín que tiene buena respuesta electroquímica fue por medio de difracción láser se realizó con un equipo Malvern Instruments, en el cual se colocó una muestra de las partículas micrométricas en solución y que después de la técnica de análisis, arrojó los resultados sobre los tamaños de partícula presentes en la muestra, mismos que se graficaron para un mejor análisis.

La caracterización tanto del mineral de entrada, como del mineral después de la macroelectrólisis, se caracterizó por medio de análisis químico con plasma acoplado, para el cual se prepararon las muestras tal como se menciona en el anexo 1, las muestras ya preparadas fueron llevadas al laboratorio de análisis químico del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales en dónde el personal entregó las muestras ya analizadas junto con los datos resultantes del análisis.

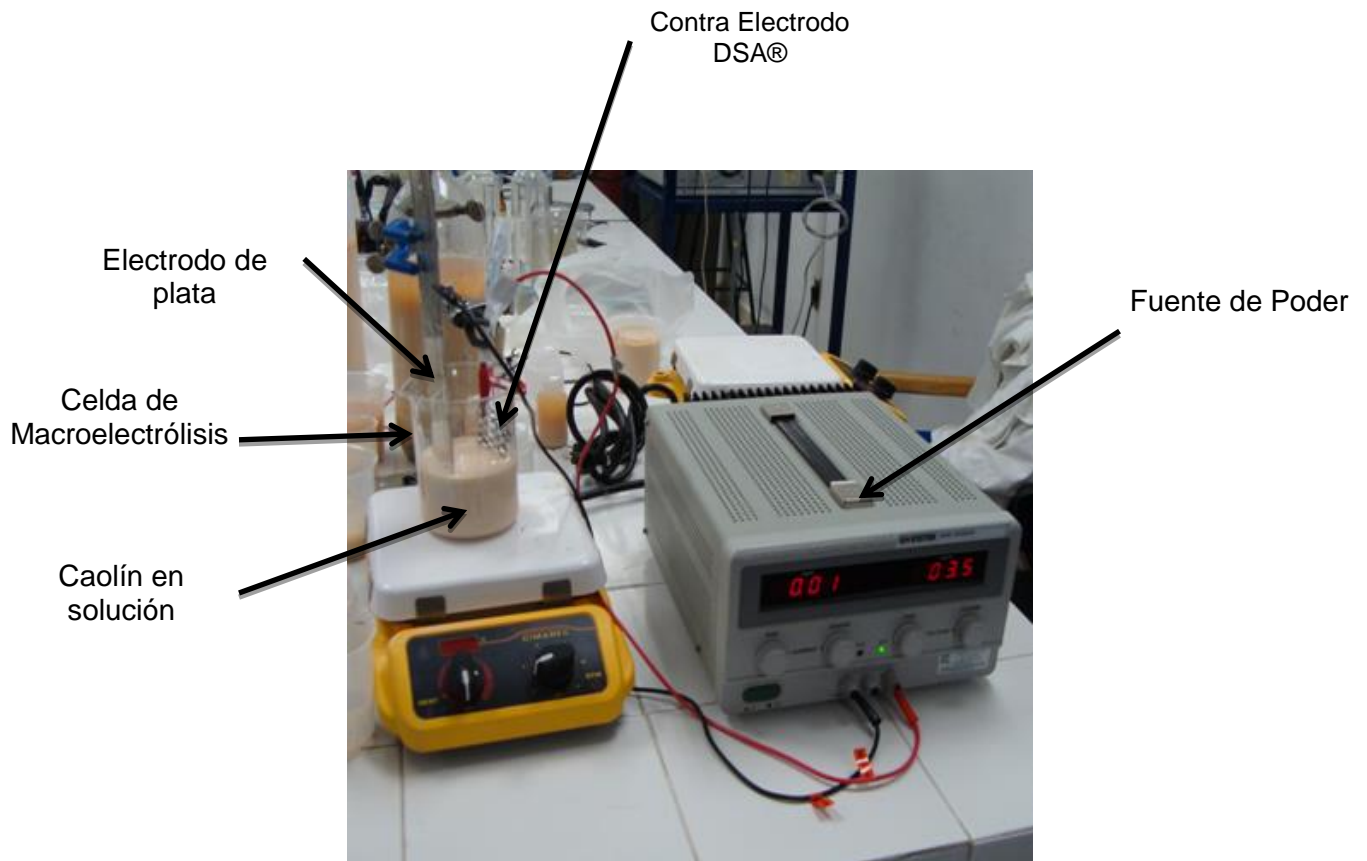
Estudio de microelectrólisis utilizando la técnica de voltamperometría utilizando un arreglo típico de tres electrodos, con un electrodo de trabajo de plata, un contra electrodo DSA® y un electrodo de referencia Calomel. Se utilizó 250ml de solución de caolín al 11% de sólidos en la celda.

Estudio de microelectrólisis utilizando la técnica cronopotenciométrica sobre un arreglo de 2 electrodos realizado con un electrodo de plata y un DSA® sobre 250ml de solución de caolín al 11% de sólidos. En la configuración vertical se utilizó el electrodo de plata en la parte superior de la celda.

Los estudios de Macroelectrólisis se realizaron en una celda cuya configuración se muestra en la figura 13, sobre 250ml de solución de caolín al 11% de sólidos con los



electrodos de plata y DSA® alimentando la celda una fuente de poder Gw- Instek, durante un tiempo 24 horas, después de las cuales se dejó reposar la solución durante 24 horas más, después de esto los óxidos de fierro quedaron suspendidos en solución, misma que se retiró con una pipeta. Para corroborar que la información sobre el potencial obtenido en los estudios voltamperométricos y cronopotenciométricos, se realizaron 5 pruebas con diferentes potenciales, ésta estrategia dará validez a dichos



estudios mediante el análisis de los resultados.

Figura 13. Celda de Macroelectrólisis de caolín con configuración horizontal.



Capítulo 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después del planteamiento de la estrategia experimental se realizaron estudios de caracterización, los cuales arrojaron información útil para las pruebas electroquímicas correspondientes, posteriormente se realizó la macroelectrólisis con diferentes potenciales cercanos al punto encontrado en la cronopotenciometría. Finalmente se realizó un análisis cuantitativo y análisis químico del caolín después del proceso. Éstos resultados se muestran detalladamente en las secciones siguientes.

3.1 EXPERIMENTACIÓN PRELIMINAR

Cabe mencionar que antes de la obtención de resultados significativos se realizaron muchas pruebas preliminares, estas pruebas incluyen procedimientos como la separación gravimétrica y flotación, sin embargo, en base a la observación del comportamiento del mineral, y al estudio bibliográfico, se determinó que estos procedimientos no eran lo suficientemente efectivos para quitar los óxidos de fierro del caolín. Es por ello que, también de forma preliminar, se comenzó a experimentar con técnicas electroquímicas, la cuales en un principio no eran muy prometedoras, pero gracias estas pruebas preliminares, se obtuvo información sobre dos parámetros fundamentales para la respuesta electroquímica del caolín, uno de ellos fue el tipo de electrodos a utilizar y el otro se mantiene reservado por considerarse un procedimiento que puede ser objeto de patente.

3.2 ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

El tamaño de partícula es un parámetro importante para los estudios que se realizaron, éste nos da información de la cantidad de material en la solución agrupada en flóculos (que son detectados como partículas grandes), y la cantidad de mineral que se encuentra disociado de estas agrupaciones, o sea, disperso (detectado como partículas



pequeñas). Cuando se tiene menor tamaño de partícula, mayor es la efectividad de la macroelectrólisis, debido a que un mayor porcentaje de mineral será expuesto directamente en el proceso, si esto ocurre, quiere decir que el caolín está disperso en la solución.

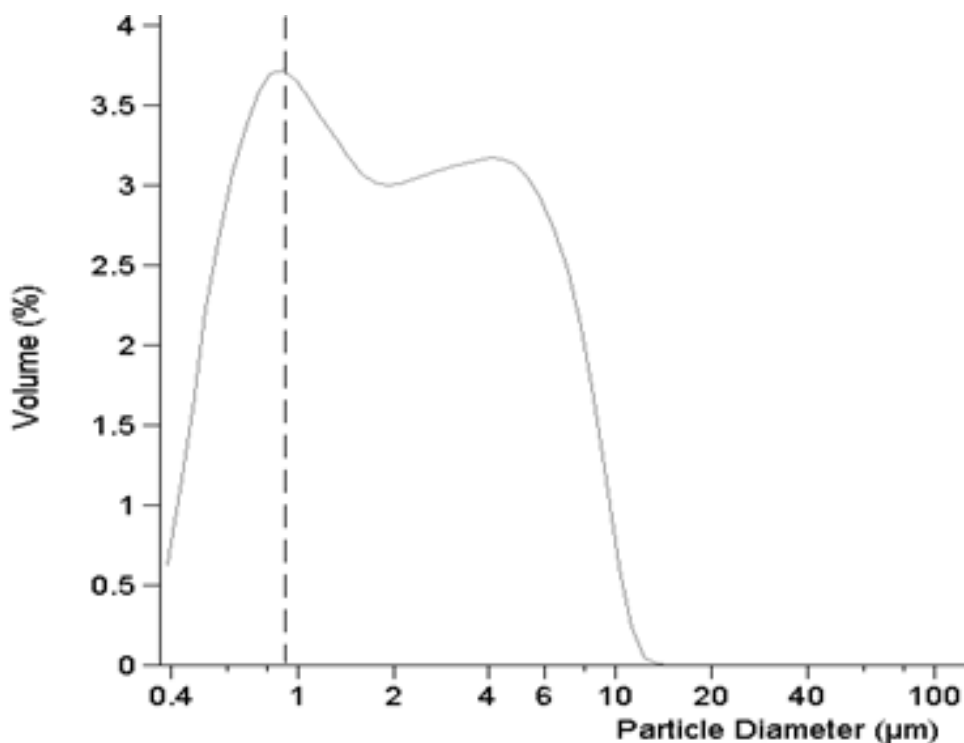


Figura 14. Distribución del tamaño de partícula en la muestra analizada de la solución de caolín.

En la figura 14 se muestran los resultados arrojados del análisis de tamaño de partícula por difracción de rayo láser, la gráfica nos muestra dos poblaciones mayoritarias, una con un tamaño menor a $1\mu\text{m}$ que ocupa el mayor porcentaje del volumen, éste resultado puede ser atribuido a que el caolín fue efectivamente dispersado presente en la solución, lo que quiere decir que efectivamente el caolín puede ser expuesto a tratamiento electroquímico asegurando que la mayor cantidad de caolín presente, recibirá el tratamiento directamente. La segunda población mayoritaria corresponde a partículas con un tamaño de $6\mu\text{m}$, estas partículas corresponden a agrupaciones de caolín, las cuales son atribuidas al tratamiento previo al que es sometida la muestra para su análisis.



Con la finalidad de conocer la composición química del mineral que se tratará, se realizaron los análisis químicos a fin de caracterizar el mineral

3.2.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL DE ENTRADA

Los resultados de los análisis químicos por plasma acoplado (ICP) se muestran a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Caracterización del mineral de entrada.

MINERAL ORIGINAL ANTES DEL PROCESO

Compuesto	Contenido (%)
Fe₂O₃	0.67102636
TiO₂	0.67857089
Al₂O₃	23.02116613
SiO₂	17.81908946

La caracterización del mineral de entrada es un aspecto importante, gracias a este estudio se tiene una referencia confiable sobre la composición de la muestra antes de la realización del proceso, y posteriormente contra estos resultados, se compara la caracterización del mineral de salida, los porcentajes mostrados en la tabla 6 corresponden al contenido de los diferentes óxidos, el porcentaje restante corresponde a otros elementos y compuestos contenidos en la muestra que no se analizaron específicamente.

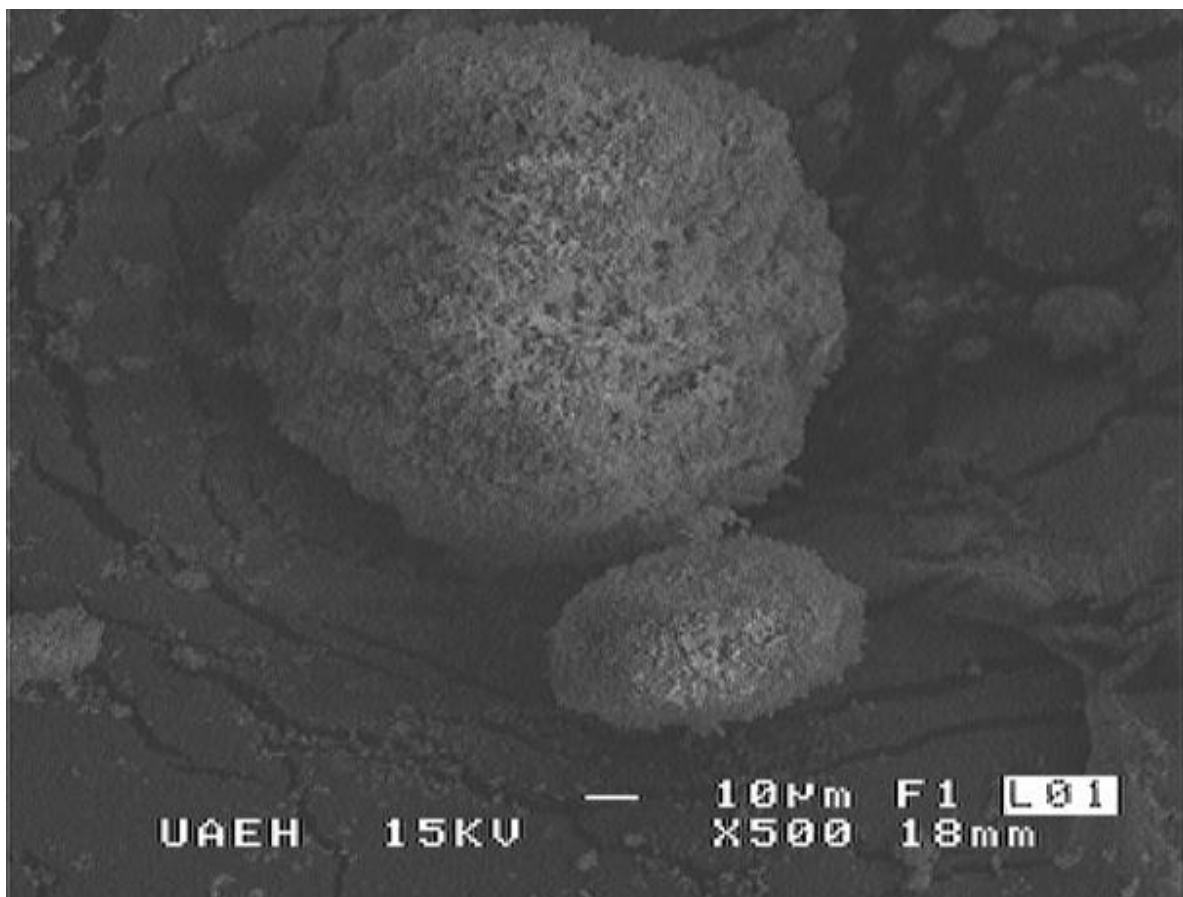


Figura 15. Microscopía de la muestra de caolín con el microscopio electrónico de barrido (MEB) antes del proceso electroquímico.

La figura 15 se observa la microscopía de una muestra de caolín con el (MEB) en la que existen acumulaciones de caolín con un tamaño mayor a $10\ \mu\text{m}$, esto es atribuido a que las cargas que posee el mineral, interactúan entre sí creando dichas acumulaciones. Ésta microscopía fue realizada antes de la dispersión lo cual demuestra que es necesaria la dispersión para que la mayor cantidad del mineral esté directamente involucrado en el proceso electroquímico.

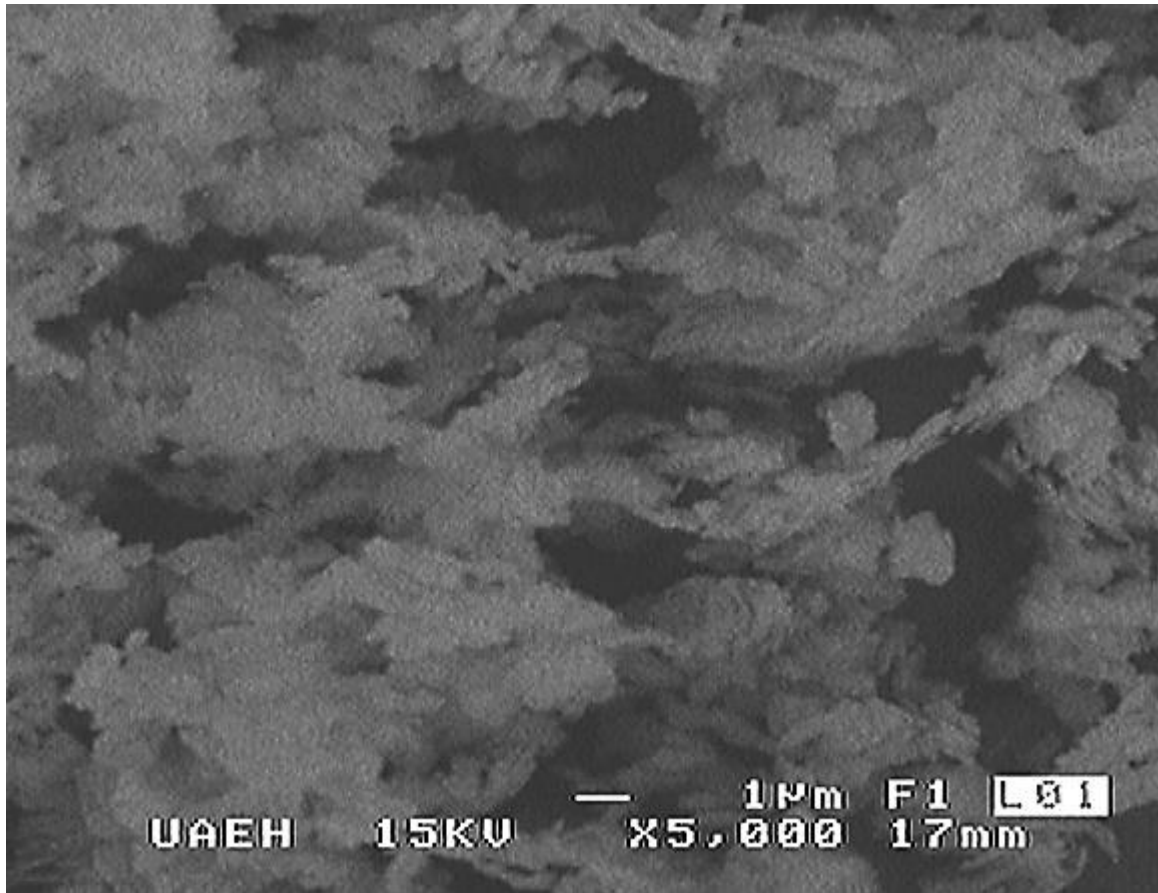


Figura 16. Microscopía (MEB) a 5000 aumentos.

En la figura 16 se observa la misma muestra que la de la figura 15, pero con mayor número de aumentos, en ella, se alcanza a observar el apilamiento de placas lo cual es característico de la caolinita.

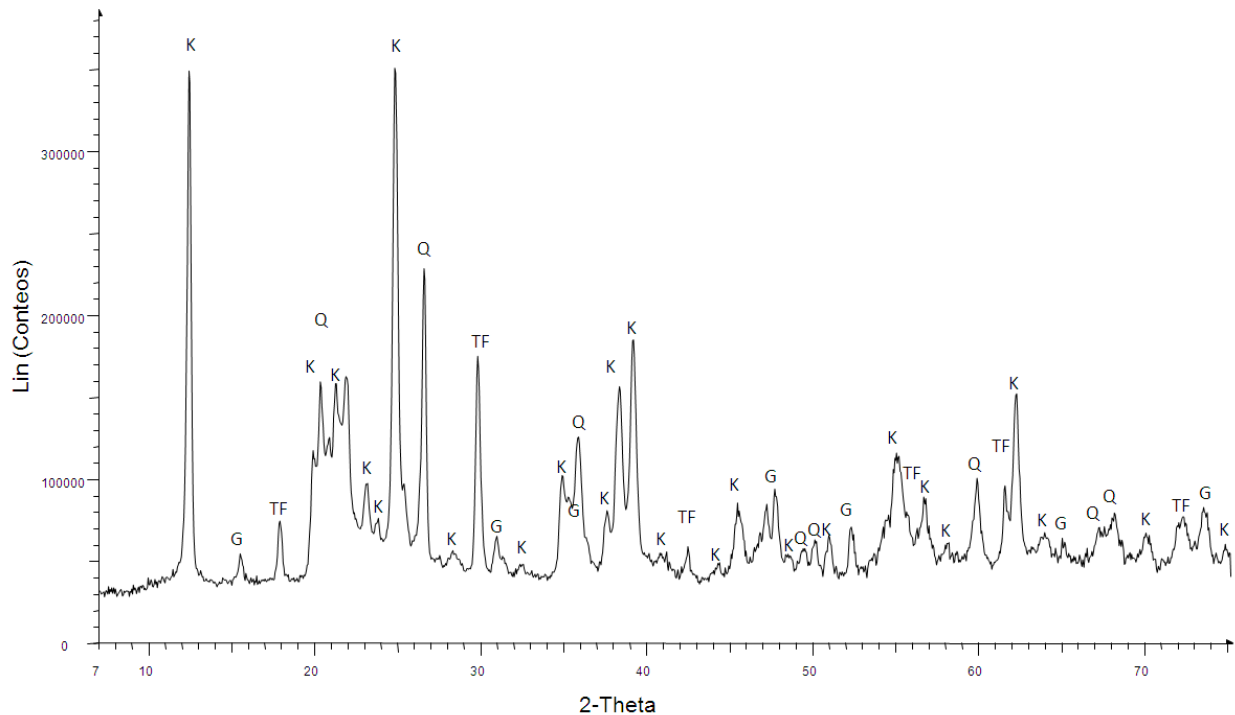


Figura 17. Difractograma del caolín de mina.

En la figura 17 se muestra el difractograma del caolín traído de mina, en dónde: los picos denotados por la letra K, indican la presencia de la caolinita pura. La letra Q indica la presencia de cuarzo. Las letras TF indican la presencia de los óxidos Titano-férreos que son parte de las impurezas.

Es importante mencionar que se tiene la presencia de señales de cuarzo que no está asociado al caolín, esto significa que el cuarzo se puede considerar una impureza más y se puede separar fácilmente.

Una vez teniendo una referencia confiable se procede a realizar a la muestra los estudios de microelectrólisis.



3.3 ESTUDIO DE MICROELECTRÓLISIS

3.3.1 ESTUDIO VOLTAMPEROMÉTRICO

Las curvas voltamperométricas aportan una primera información acerca de los procesos de oxidación y reducción, los cuales tienen lugar en la interface (electrodo-solución), y éstas permiten conocer, tanto la reversibilidad, como las etapas donde se llevan a cabo dichos procesos.

Ante lo expuesto en el párrafo anterior, se hace necesario realizar un estudio voltamperométrico en una celda horizontal y vertical para determinar las condiciones energéticas donde se lleva a cabo la reducción de hierro presente en el caolín más convenientemente. El estudio de voltamperométrico se realizó utilizando un electrodo de trabajo de plata, como contra electrodo un DSA® y un electrodo de referencia de Calomel (ESC).

Celda horizontal

En la figura 18 se muestra la respuesta voltamperométrica de la solución del caolín a una velocidad de barrido de 20 mv/s cuando se inicia el barrido en dirección catódica en una celda horizontal.

En la figura 18 se observa 2 procesos de reducción uno en el intervalo de 0.280 a -0.780 V vs SCE y otro en el intervalo de -0.780 a -1.6 V vs SCE . El primer proceso es atribuido a la reducción de la especie de hierro presentes en el caolín y el segundo a la reducción del medio. Al invertir en barrido de potencial se observa 1 proceso de oxidación que inicia en -0.167 V , atribuido a la oxidación de los productos reducidos del caolín en el barrido directo, el espacio encerrado en el círculo rojo es atribuido a que durante la voltamperometría, las especies o el medio sufrieron un cambio de óxido-reducción que no es reversible.

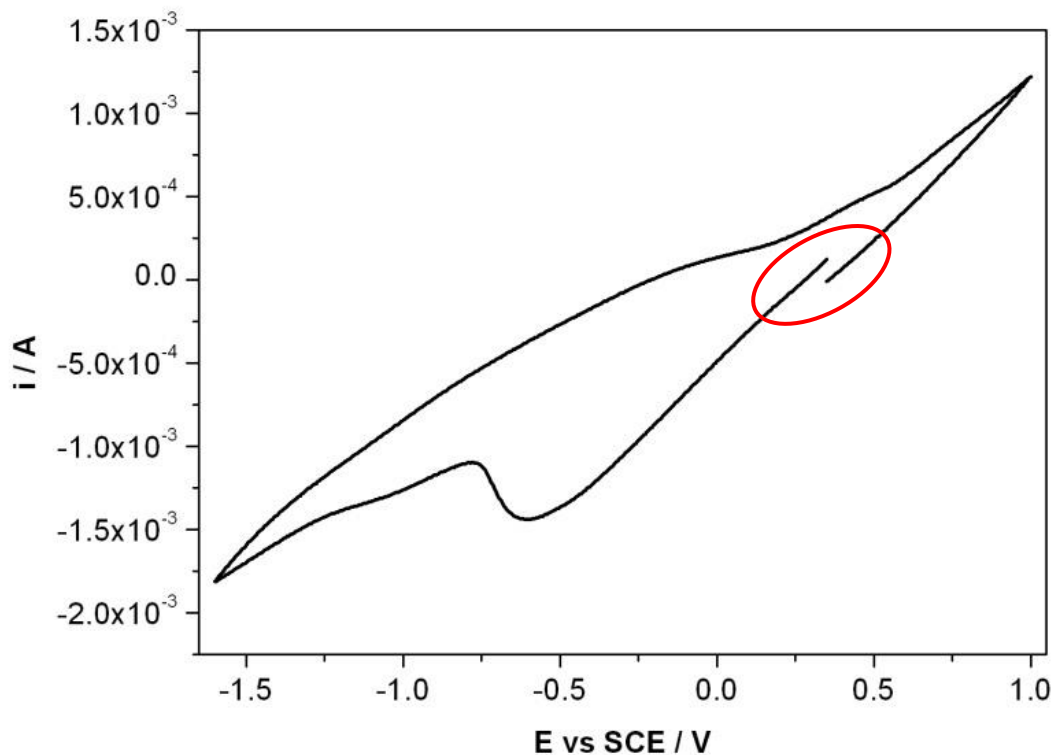


Figura 18. Voltamperograma obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminados con óxidos de hierro Proveniente del municipio de Agua Blanca a un velocidad de barrido = 20 mV/s.en una celda horizontal.

Los resultados indican que se puede llevar a cabo la reducción del hierro presente en el caolín en el intervalo de potencial de 0.28 a -0.780 V y en un intervalo de corriente de 0 a -1.46×10^{-3} A.

Celda Vertical

En la figura 19 se muestra la respuesta voltamperométrica de la solución del caolín a una velocidad de barrido de 20 mv /s cuando se inicia el barrido en dirección catódica en una celda vertical.



Al igual que en la celda horizontal se aprecia en la respuesta voltamperométrica de la celda vertical (figura 19) 2 procesos de reducción uno en el intervalo de 0.15 a -0.671 V vs SCE y otro en el intervalo de -0.671 a -1.21 V vs SCE. Los cuales son también atribuidos a la reducción de la especie de hierro presentes en el caolín y a la reducción del medio. Al invertir en barrido de potencial se presenta 1 proceso de oxidación que inicia en -0.210 V, debido a la oxidación de los productos reducidos del caolín en el barrido directo, el comportamiento señalado dentro de un círculo rojo es atribuido a la oxidación de una especie directamente sobre el electrodo de referencia caolomel (SCE).

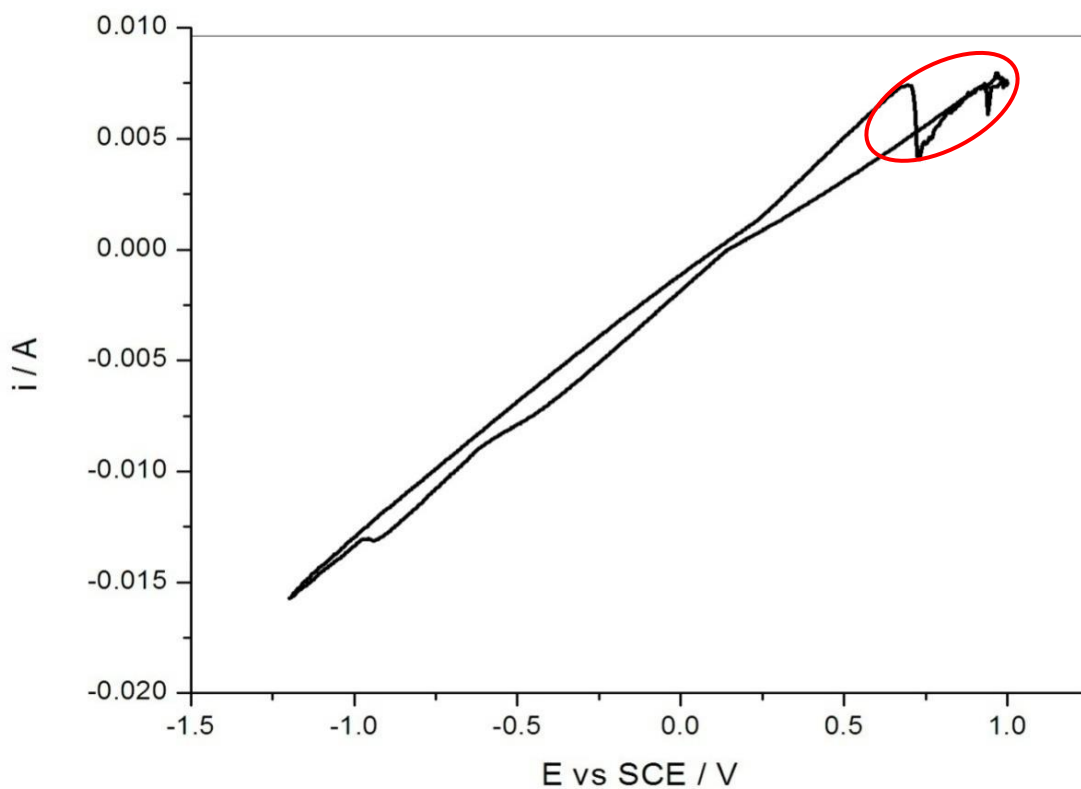


Figura 19. Voltamperograma obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminados con óxidos de hierro proveniente del municipio de Agua Blanca a un velocidad de barrido = 20 mV/s en una celda vertical.



Los resultados indican que se puede llevar a cabo la reducción del hierro presente en el caolín en el intervalo de potencial de 0.15 a -0.671 V y en un intervalo de corriente de 0 a -8.83×10^{-3} A.

Al comparar las respuestas en corriente de ambos arreglos se aprecia que el arreglo vertical presenta una mayor corriente, lo cual podría indicar que en esta configuración se tiene una mayor reducción del Fe presente en el caolín o también una mayor reducción del medio.

Con el propósito de conocer el potencial de celda que se debe utilizar en un arreglo de 2 electrodos en ambas configuraciones, se realiza un estudio cronopotenciométrico en la celda horizontal y vertical.

3.3.2 ESTUDIO CRONOPOTENCIOMÉTRICO

La cronopotenciometría es una técnica galvanostática, en la que se hace pasar una corriente constante a través del electrodo de trabajo y se registra el cambio del potencial con respecto al tiempo. En este estudio cada cambio de pendiente representa una diferente condición energética de reducción u oxidación de una especie electroactiva en la superficie, dependiendo de si es una corriente catódica o anódica la que se impone al electrodo.

Celda Horizontal

La figura 20 muestra el transitorio cronopotenciométricos de la reducción del caolín cuando se impone un corriente de -1.46×10^{-3} A al electrodo de Ag en una celda horizontal.

En la figura 20 se observa una disminución considerable del potencial de celda hasta -4.16 V vs SCE en el intervalo de tiempo de 0 a 30 s. A tiempos mayores de 30 s se presenta un potencial constante para el resto del tiempo de electrolisis. Este



comportamiento indica que se está reduciendo una sola especie y que esta no se agota en la solución; en este caso la especie atribuida al óxido de hierro.

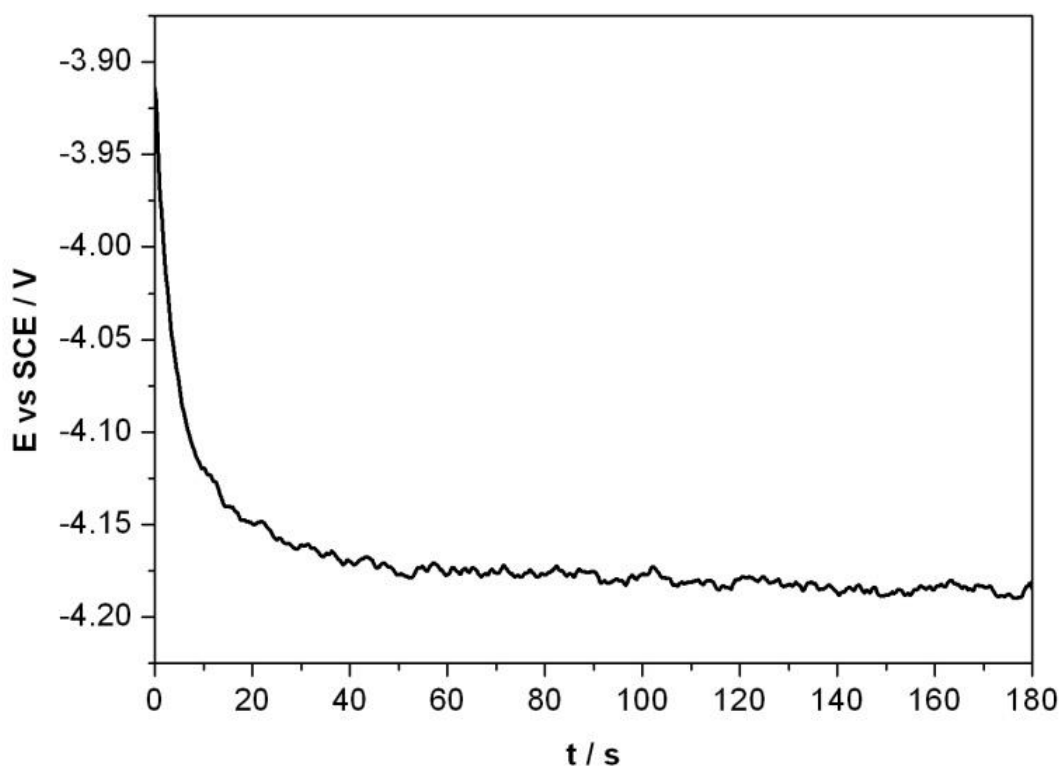


Figura 20. Transitorio cronopotenciométrico obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminada con óxidos de hierro proveniente del municipio de Agua Blanca cuando se impone una corriente de -1.46×10^{-3} A en una celda horizontal.

Celda Vertical

La figura 21 muestra el transitorio cronopotenciométricos de la reducción del caolín cuando se impone un corriente de -8.83×10^{-3} A al electrodo de Ag en una celda vertical.

En la figura 21 se presenta un disminución considerable del potencial de celda hasta -3.6 V vs SCE en el intervalo de tiempo de 0 a 40 s. A tiempos mayores de 30 s se



presenta una disminución gradual para el resto el tiempo de electrolisis. Este comportamiento indica que se está reduciendo la especie atribuida al óxido de hierro.

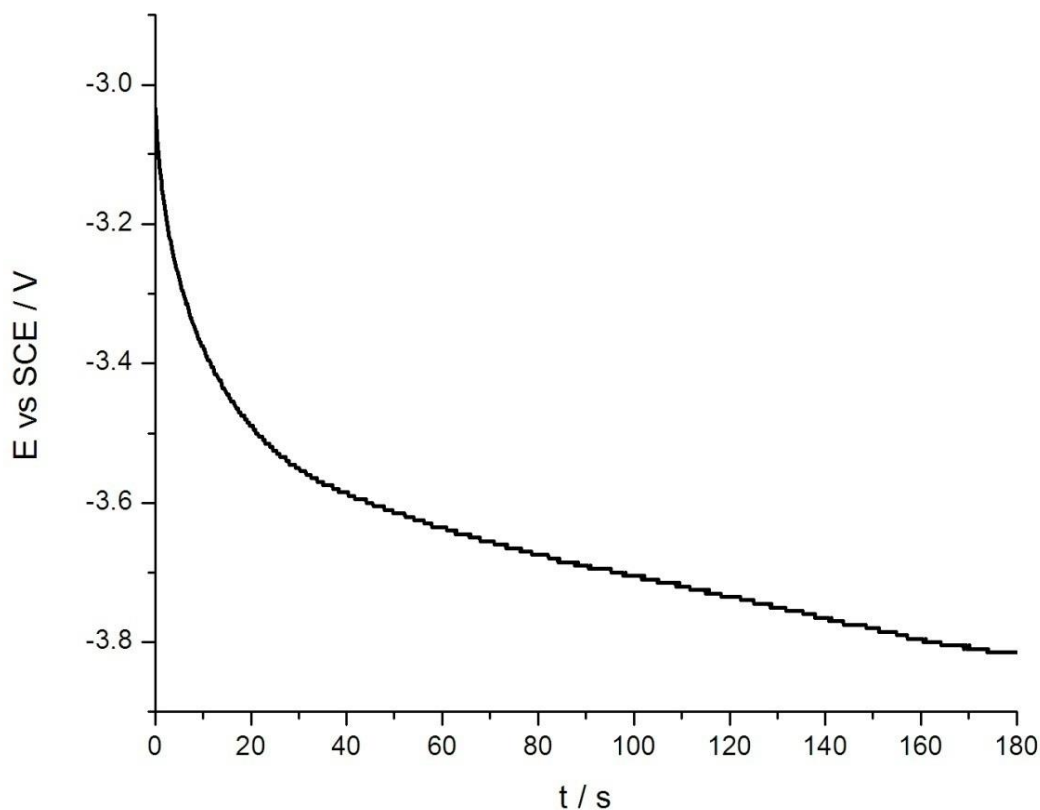


Figura 21. Transitorio cronopotenciométrico obtenido sobre una superficie de Ag en una solución de caolín contaminada con óxidos de hierro proveniente del municipio de Agua Blanca cuando se impone una corriente de -1.46×10^{-3} A en una celda Vertical.

Al comparar el potencial de celda de ambos arreglos se observa que la reducción de la especie de hierro en la celda vertical requiere de menor energía para iniciar este proceso. La reducción de hierro inicia en el potencial de celda de -0.36 V en la celda vertical mientras que en la celda horizontal se presenta en -0.39 V. Sin embargo, el que en la celda vertical no se presente una meseta constante puede indicar que además de hierro se está llevando a cabo la reducción del medio simultáneamente, es por ello que



se elige la celda horizontal para realiza el proceso de macroelectrólisis del caolín con el fin de obtener una mayor transformación de la especie reducida de hierro presente en el mineral.

3.4 ESTUDIO DE MACROELECTRÓLISIS.

Los estudios de macroelectrólisis se refieren a la relación que existe entre el área superficial del electrodo y la concentración de las especies electroactivas presentes en la solución electrolítica; donde la relación de área del electrodo/concentración de la especie electroactiva es grande. Esta relación grande da origen a que las perturbaciones en la interface cambien la concentración de la solución de tal manera que se tiene una disminución considerable de la especie electroactiva, para este caso es la disminución del hierro presente en el caolín.

Es importante mencionar que a nivel industrial es más fácil imponer un potencial de celda (potencial entre el ánodo y el cátodo) o una corriente, que un potencial a un electrodo (potencial medido con respecto a un electrodo de referencia), debido al costo de la inversión de un sistema de control de potencial y a lo de delicado que es operar este sistema.

Celda horizontal

La figura 22 muestra la modificación del caolín después de imponer un potencial de celda de 4.1V durante 24 horas en la celda horizontal, dejándola reposar por 24 horas más.

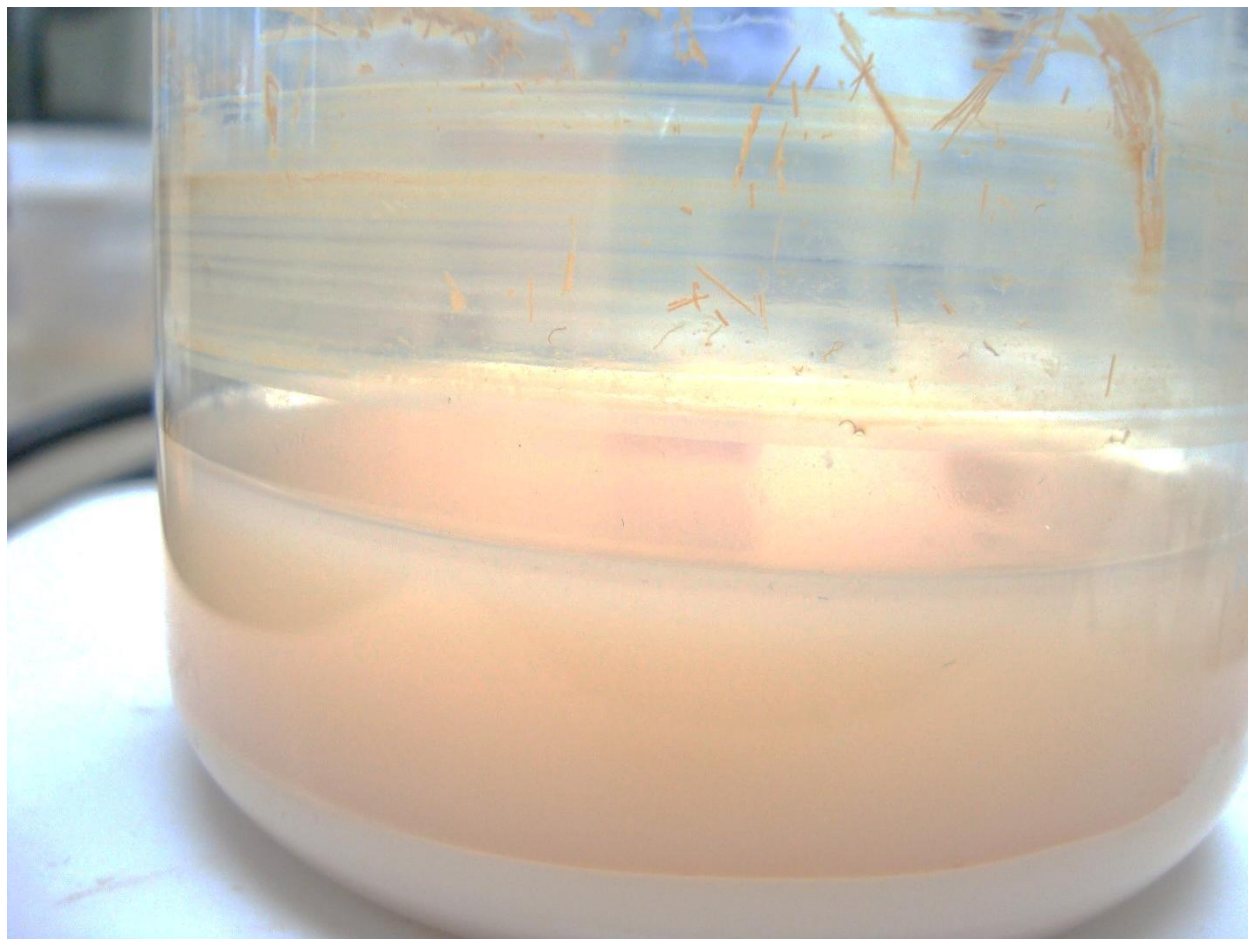


Figura 22. Una muestra de Caolín después de haber sido sometida a un proceso electroquímico de macroelectrólisis

En la figura 22 se aprecia que en la base de la celda Caolín con una coloración blanquecina y en la solución una coloración roja. Este comportamiento puede ser atribuido a la liberación de hierro del caolín, lo cual conlleva a que al existir esta separación. El caolín que ha quedado en la base, es más puro que al inicio del proceso. Éste comportamiento se repitió en la macroelectrólisis realizada a diferentes potenciales, a saber, 3.5, 3.7, 3.9, 4.1 (que es el potencial arrojado por los estudios como óptimo), y 4.3V.

Con el fin de corroborar estos resultados se realiza una comparación cualitativa, de coloración, entre el caolín de entrada y el de salida.



Figura 23. Imagen comparativa entre el caolín antes del proceso (izquierda) y después del proceso (derecha).

En la figura 23 se muestran dos porciones de caolín seco, una corresponde al caolín antes de ser expuesto al tratamiento electroquímico y la otra después, se observa que existió un cambio de coloración, el caolín antes de ser sometido al proceso tiene una coloración beige mientras que el caolín resultado del proceso tiene una coloración crema.

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL DE SALIDA

En la tabla 7 se muestran los resultados de los análisis del análisis químico con Plasma acoplado (ICP) realizados a las muestras de caolín sometidas a macro-electrólisis cuando se impone un potencial de celda en el intervalo de 3.5 a 4.1 V en una celda horizontal.



Tabla 7. Resultados de los análisis realizados a las muestras de caolín sometidas a macro-electrólisis, con respecto al óxido de fierro, cuando se impone un potencial de celda en el intervalo de 3.5 a 4.3 V.

POTENCIAL APLICADO (V)	CONTENIDO DE Fe ANALIZADO (%)	PORCENTAJE CON RESPECTO A LA ORIGINAL (%)
0	0.683393070	0.0000
3.5	0.624093264	8.6773
3.7	0.602876281	11.7819
3.9	0.595358566	12.8820
4.1	0.565601278	17.2363
4.3	0.579729730	15.1689

En la tabla 7 se observa que conforme se incrementa el potencial de celda se tiene un incremento en la cantidad de óxidos de fierro removidos de la muestra de caolín, éstas cifras son significativas, ya que como se puede observar en la figura 23, un ligero cambio en los contenidos de óxido de fierro, representa un enorme cambio en la coloración del mineral.

Así mismo se observa que conforme se incrementa el potencial de celda se disminuye la cantidad de óxidos de fierro presente en la muestra, hasta determinado punto, desde el cual el proceso ya no se lleva a cabo con la misma efectividad.

Esto se representa gráficamente en la figura 24.

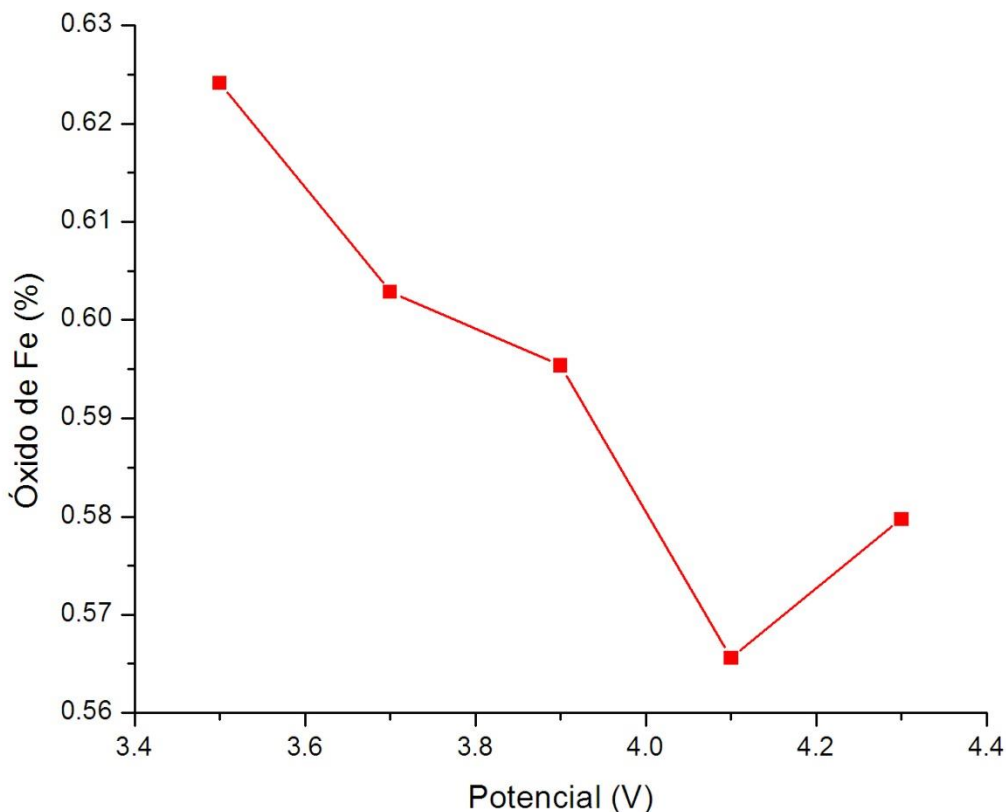


Figura 24. Gráfica del contenido de Óxidos de fierro con respecto a los diferentes potenciales aplicados a la celda.

En la Figura 24 se observa claramente como al aumentar el potencial hay una tendencia a la disminución del contenido de óxidos de fierro, hasta un punto máximo, éste punto es 4.1 V que es el punto calculado en el cronopotenciograma de la celda horizontal, lo que corrobora que son los óxidos de caolín la especie que se asume que se reduce. Una vez que se sobre pasa este punto, a 4.3 V, se presume que comienza a reducirse también el medio, ocasionando disminución en la reducción de los óxidos de fierro.

Por otra parte, al analizar los resultados del análisis químico con respecto de los óxidos de titanio de la tabla 8 observamos que ocurre algo muy distinto en comparación con lo que ocurre con los óxidos de fierro.



Tabla 8. Resultados de los análisis realizados a las muestras de caolín sometidas a macro-electrólisis, con respecto al óxido de titanio, cuando se impone un potencial de celda en el intervalo de 3.5 a 4.3 V.

POTENCIAL APLICADO (V)	CONTENIDO DE ÓXIDO DE TITANIO ANALIZADO (%)
0	0.69330605
3.5	0.73712296
3.7	0.72870035
3.9	0.70356235
4.1	0.70163333
4.3	0.72374189

Aparentemente hay un aumento de los óxidos de titanio en las muestras analizadas seguido de una disminución a medida que aumenta el potencial.

Sin embargo, no se considera que exista una variación significativa en el contenido por lo que se puede decir que éstos no se afectan significativamente durante el proceso electroquímico. Este resultado es también de gran importancia, ya que la presencia de óxidos de titanio y fierro siempre es en una cantidad similar, por lo que podemos decir que éste proceso electroquímico actúa únicamente sobre los óxidos de fierro, lo cual lo hace un proceso selectivo, esto puede dar pie a que se estudie posteriormente un método para separar únicamente los óxidos de titanio. La separación selectiva puede representar un beneficio más, debido a que el titanio tiene un alto valor comercial y estos óxidos pueden ser tratados por separado para obtener titanio metálico.



3.6 PROPUESTA DE MEJORA AL PROCESO PARA LA PURIFICACIÓN DE CAOLÍN

Los resultados antes mencionados en ésta investigación traen consigo un importante beneficio al proceso para ayudar a la purificación, la mayoría de los procesos aplicados al caolín para aumentar su blancura, no son tan efectivos como el aquí expuesto, ya que éste actúa directamente sobre los óxidos de fierro presentes en el caolín que son los responsables de su coloración, como se mencionó anteriormente, el color es un aspecto importante para el valor del caolín, al menos en los yacimientos mexicanos, una forma de clasificar la calidad del caolín es mediante la coloración. Cabe resaltar que en la experimentación realizada, se expone el caolín una sola vez al proceso electroquímico, logrando hasta un 17.2% de remoción sobre el contenido inicial de óxidos de fierro, al hacer el procedimiento de forma iterativa, se puede aumentar este porcentaje de remoción.

El perfeccionamiento en la aplicación de éstas técnicas electroquímicas en el caolín optimizará el proceso de purificación ya establecido mediante la sustitución de maquinarias e insumos tales como, separadores magnéticos de alta intensidad, hidrociclones, agitadores de más de 20 000 rpm, dispersantes, ácidos para la lixiviación de los óxidos, complejos para la regulación del pH, agentes para el post-tratamiento del mineral, entre otros secundarios, que hacen que la inversión para el proceso de purificación sea mayor. Los requerimientos necesarios para el procesamiento mecánico del mineral para el método actual y el propuesto son exactamente los mismos, cambiando a partir del fraccionado del mineral según el tamaño de partícula.

Sin embargo, a partir de este punto se pueden sustituir las técnicas de floculación, lixiviación, separación magnética de alta intensidad y flotación por las técnicas electroquímicas. El presente estudio demuestra que es posible esta mejora. Cabe hacer mención que los equipos electroquímicos son de bajo consumo energético en comparación con las maquinarias antes mencionados, ya que estos no tienen motores y trabajan con bajas potencias, lo cual representaría también una optimización en el gasto energético.



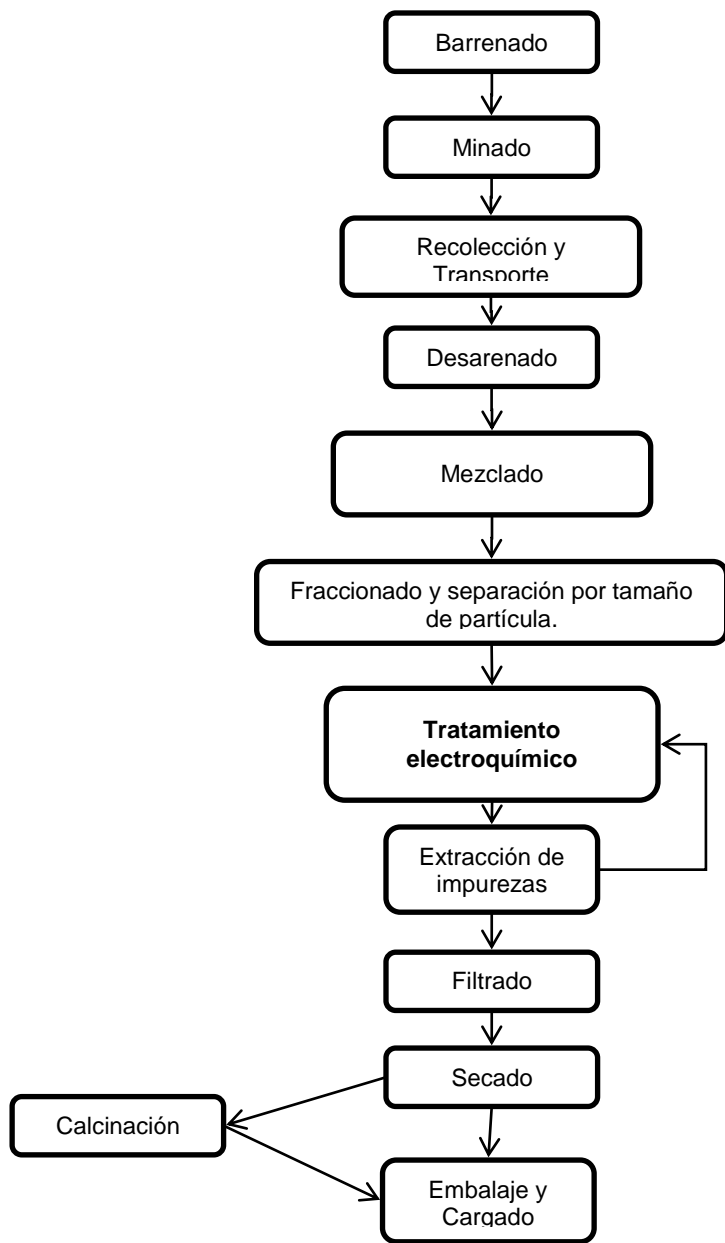




Figura 25. Diagrama del método propuesto para el tratamiento en la purificación de caolín.

Finalmente la figura 25 muestra la propuesta de mejora para el procedimiento de purificación de caolín utilizando las técnicas electroquímicas.

CONCLUSIONES

El tamaño de partícula es un aspecto importante para tratar el caolín mediante técnicas electroquímicas, la forma en que se realice el procesamiento mecánico del mineral tiene influencia en este aspecto.

Los estudios electroquímicos mostraron que la solución de caolín tiene una buena respuesta a los procesos de reducción de los óxidos de hierro. El intervalo de potencial donde se reduce la especie de hierro es de 3.5 a 4.3 V.

Los análisis químicos realizados después de la macroelectrólisis, indican que las técnicas electroquímicas son una alternativa viable para purificar el caolín debido a que conforme se incrementa el potencial se incrementa la cantidad de hierro removido hasta cierto límite, además de que es fácil imponer potenciales bajos en celdas de electrólisis a nivel industrial demostrando que también es viable tecnológicamente.

Los resultados obtenidos son de gran importancia, para la industrial del procesamiento del mineral, indican que es posible blanquear el caolín sin el uso de tecnologías costosas.

En el método propuesto para el tratamiento del caolín, se ha prescindido de la separación magnética de alta intensidad, la flotación, y sobre todo la lixiviación, que son los métodos más usados actualmente para blanquear el caolín. El prescindir de los métodos mencionados equivale a un ahorro significativo en cuestión de inversión económica, ya que no se requiere del uso de maquinaria costosa ni de agentes químicos complejos.



El logro de este hecho científico, representa un avance tecnológico que de perfeccionarse hará posible un proyecto de inversión para la explotación sistemática y óptima del caolín hidalguense y que además, para algunas empresas caolineras mexicanas ya existentes, sea posible invertir en tecnología de purificación de caolín que en verdad agregue valor al producto, haciendo frente al rezago tecnológico y beneficiando la economía de nuestro país.

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un procedimiento que no ha sido estudiado a profundidad y del cual no se ha publicado ningún artículo científico u otro trabajo de investigación que reporte datos sobre un método de purificación similar al expuesto en el presente, es por ello que parte de este trabajo, es objeto de patente y de estudios futuros, dando aun más relevancia a los resultados obtenidos.



BIBLIOGRAFÍA

1. A. B. Luz y A. Middea. (2004). Purification of kaolin by selective flocculation. Center for Mineral Technology-CETEM, RJ, Brasil.
2. Allo, W. y Murray H. (2004). Mineralogy, Chemistry and Potential Applications of White Clays. Appl. Clay Sci.
3. Brindley, G. W. y colaboradores (1958). Further Consideration of the Crystal Structure of Kaolinite. Mineral Mag.
4. Cameselle, Claudio y colaboradores (2007) Electrokinetic Bleaching of Kaolin Clay. 6th Symposium on Electrokinetic Remediation, Vigo España.
5. Departamento de Estadística Minera (2009). Anuario Estadístico de la Minería Mexicana Ampliada 2008. Servicio Geológico Mexicano.
6. Dirección General de Promoción Minera (2007). Perfil de Mercado de Caolín. Coordinación General de Minería.
7. FIFOMI (2004). Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio de Agua Blanca, Hgo. CRM.
8. Flores Segura, J. C., Legorreta García, F., y colaboradores (2010). Macroelectrólisis para la purificación de Caolín. XIX International Conference on Extractive Metallurgy, Saltillo Coahuila. Cinvestav.
9. Flores, J. C., Reyes, V. E. y Legorreta, F. (2009). Purificación de Caolín por Electrólisis. 3er Encuentro del Cuerpo Académico de Materiales AACTyM, UAEH.
10. Freedonia Group (2009). World Kaolin. Industry study with forecast for 2013 & 2018. Freedonia Group Forecasts.
11. Iannicelli, J. (1976). Development of high extraction magnetic filtration by the kaolin industry of Georgia. Aquafine Corporation, Brunswick, Georgia
12. Murray, Haydn H (2008). Applied Clay Mineralogy. Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. Elsevier.

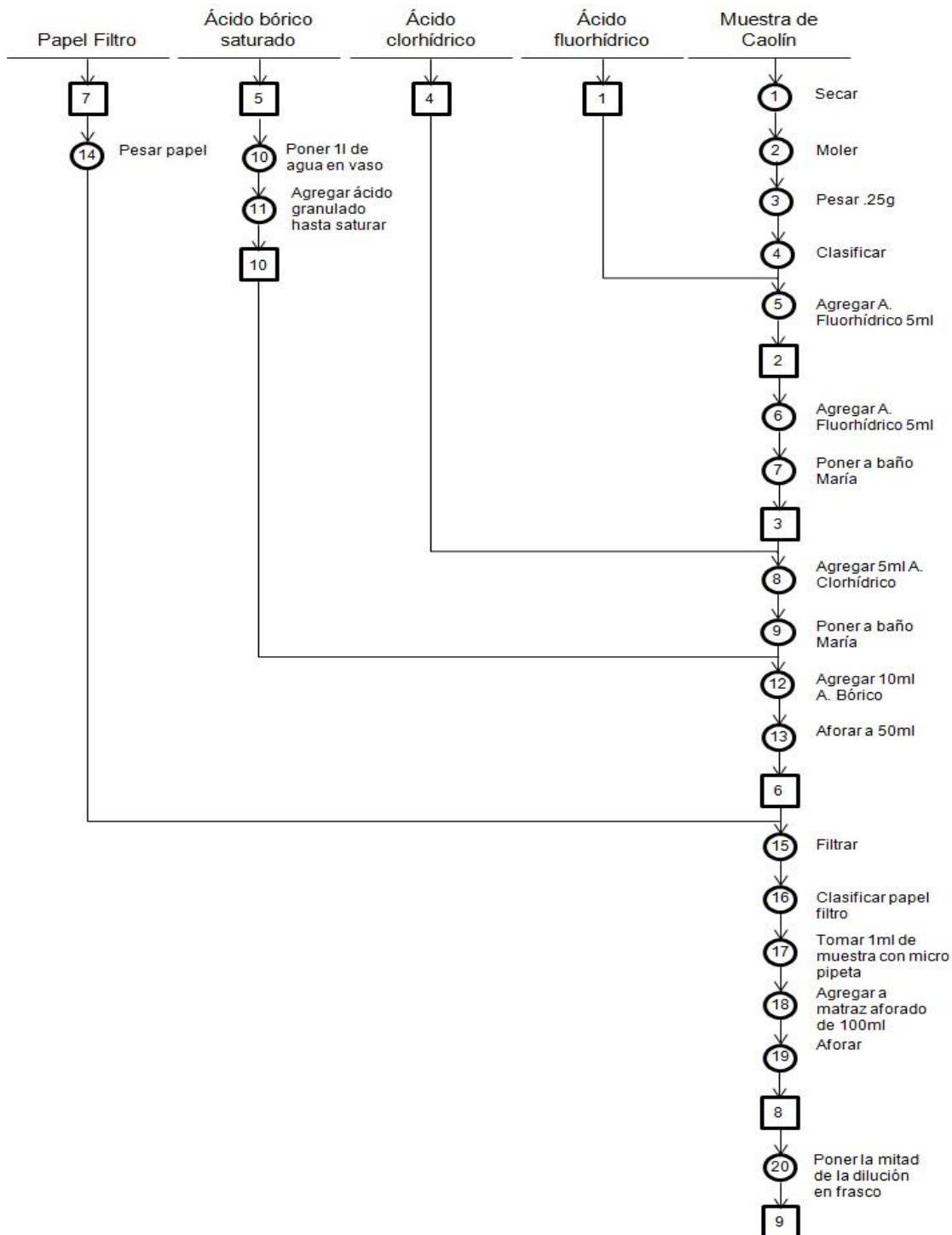


13. Raghavan P. y colaboradores (2008). Additional investigations on the separation of titaniferous impurities from kaolin by high shear pretreatment and froth flotation. *Applied Clay Science*.
14. Reyes Cruz, V. E. (1998). Estudio Preliminar para Establecer las condiciones de Operación de un Reactor Tridimensional, para Recuperar oro y plata de Disoluciones Provenientes de la Lixiviación de Minerales con Cianuro. Tesis de Maestría UNAM.
15. Saikia, N.J. y colaboradores (2003), Characterization, beneficiation and utilization of a kaolinite clay from Assam, India. *Applied Clay Science*.
16. Sultanovich, E.A. y colaboradores (1993). Kaolin Beneficiation in a High-Gradient Magnetic Separator with a Ball Matrix. Mining Institute, Dnepropetrovsk, Ukraine.



ANEXO 1

PROCEDIMIENTO DE PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE CAOLÍN PARA ANÁLISIS QUÍMICO.





GLOSARIO.

Arcillas montmorilloníticas: Arcillas provenientes de la descomposición de granitos, feldespatos y otras rocas.

Calor radiogénico: Calor causado por efecto de algún material radioactivo.

Camas de Caolín: Extensión de terreno de forma plana donde se halla una capa de caolín.

Caolinización: Proceso mediante el cual las rocas feldespáticas se descomponen dando origen a la arcilla de caolín

Capa freática: Es la primer capa de agua subterránea que se encuentra al realizar una perforación

DSA: dimensionally stable anodes. Anodos Dimensionables estables.

E vs SCE: Energía en un electrodo Calomel Saturado dada en V

Escala de Mohs: La escala de Mohs es una relación de diez materiales ordenados en función de su dureza, de menor a mayor. Se utiliza como referencia de la dureza de una sustancia.

Escaloya: Es un yeso de alta calidad y grano muy fino, con pureza mayor del 90% en mineral aljez.

Estratos: capas en que se presentan divididos los sedimentos, las rocas sedimentarias y las rocas metamórficas que derivan de ellas, cuando esas capas se deben al proceso de sedimentación

Feldespatos: son un grupo de minerales tectosilicatos constituyentes fundamentalmente de las rocas ígneas.

Forma Vermicular: Que se parece a los gusanos o tiene alguna característica propia de ellos.



Granito: es una roca ígnea plutónica constituida esencialmente por cuarzo, feldespato y mica.

Isomerización: proceso químico mediante el cual una molécula es transformada en otra que posee los mismos átomos pero dispuestos de forma distinta

Lentes de Caolín: Extensión con presencia de caolín forma circular o pseudo circular. También son llamadas lagunas, estanques o lagos dependiendo de su tamaño.

Metacaolín: Caolín parcialmente calcinado

Mullita: o porcelanita, es un silicato de alúmina, normalmente obtenido a partir de arcilla, o caolín

Pectinas: son una mezcla de polímeros ácidos y neutros muy ramificados

Resistencia en verde: Resistencia que tiene una arena o arcilla cuando se encuentra en su contenido cierta cantidad de agua.

Sobrecarga: Materia orgánica sin interés de estudio o beneficio existente sobre una capa de mineral.

Tixotropía: es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos y pseudo-plásticos que muestran un cambio dependiente del tiempo en su viscosidad