

Perspectivas del beneficio y aplicación del mineral de Diatomitas en el departamento de Boyacá

SARA M. BARROSO P. *
GIOVANNA SUAREZ**
EFRAÍN GARCÍA RUSSI***

-
- * Ingeniera en Metalurgia - Joven Investigadora, 2008
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y sus Tecnologías de Fabricación - NewMAT
correo: saritabarroso2006@hotmail.com
- ** Ingeniera en Metalurgia - Integrante Grupo de Investigación NewMAT
correo: alexa_suarez@yahoo.com
- *** Ingeniero Metalurgico - Coordinador Grupo de Investigación NewMAT - Tutor
correo: egarciarussi@hotmail.com

Resumen

El objetivo principal de este proyecto es beneficiar por vía seca el mineral de diatomitas provenientes del municipio de Chivatá que potencialmente pueden ser empleadas en la Industria de cerveza, vinos, licores azucarados, aceites combustibles y en procesos de descontaminación de aguas residuales. El desarrollo experimental programado constó de una etapa de exploración geológica, una caracterización física, química y mineralógica al mineral en bruto mediante análisis de petrografía, difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), microscopía electrónica de barrido (MEB). Seguida por una etapa de procesamiento por vía seca mediante ensayos de molienda y clasificación tanto en tamices como en neumociclones. Finalmente, se realizaron pruebas de calcinación sobre los productos obtenidos del beneficio. Caracterización del mineral beneficiado mediante técnicas de DRX, FRX, MEB y permeabilidad. Los resultados de estudio, indican que el procesamiento por vía seca es muy complejo debido a que las diatomeas adquieren rápidamente humedad, afectando particularmente la clasificación por tamices; este aspecto se convierte entonces en un parámetro de control determinante en la eficiencia de la separación. De acuerdo con esto, el principal enfoque de beneficio se realiza con miras hacia la industria de materiales filtrantes, soportado en el hecho de que además de ser la mayor aplicación, a nivel nacional las empresas que usan tierras diatomáceas en sus procesos, importan dicho mineral.

INTRODUCCIÓN

Las diatomitas¹ se definen como depósitos de grano fino de aspecto semejante al de la Creta. Formado por la acumulación en el fondo del mar de los caparazones silíceos de las diatomitas, conocidas también con el nombre de *Tierra de Diatomeas* o *Tierra de infusorios*. Las diatomitas pueden ser de origen marino, lacustre o fluvial y se conocen hoy en día un número muy variado de especies según su morfología y características físicas. Estos yacimientos suelen estar asociados con otras especies minerales como arcillas, cuarzo, minerales de hierro y de componentes alcalinotérreos, que modifican su comportamiento y sus usos. Las materias primas utilizadas por el hombre para su transformación adquieren mayores valores por la necesidad de incorporarles un mayor valor agregado mediante su beneficio a fin de adecuarlas a las necesidades y requerimientos del Sector Industrial.

Actualmente, las diatomitas son beneficiadas por vía seca y húmeda^{2,3,4,5} y se comercializa en una gran variedad de “*grades*” los cuales se logran gracias al procesamiento de las mismas. La selección del tipo de procesamiento depende en gran medida de la calidad del producto final, referida ésta última al tipo, contenido de impurezas y propiedades específicas según sea su aplicación final.

Las diatomitas tienen múltiples usos⁶, los principales son: como elemento filtrante para purificación de cerveza, vino, licores azucarados, zumos y aceites comestibles; como absorbente, soporte de pesticidas y catalizadores, lechos de animales, etc; como carga en pinturas, plásticos, caucho, papel, pasta y moldes dentales, etc.; como aporte de sílice para el cemento portland, elaboración de silicatos sintéticos y productos aislantes o ignífugos, y como abrasivo suave para pasta de dientes, pulido de la plata, etc. El modelo del consumo en EEUU, principal país demandante con 497.000 tn 2006, fue el siguiente (figura 1): filtros, 60%; absorbentes, 18%; cargas,

¹ DANA, J.D. Manual de Mineralogía. 4ª Edición. Editorial Reorté, p. 589. 2001.

² ALVES FRANCA S., ADAO BENVINDO D. (2002). Beneficiamento de Diatomita da Bahía. CETEM.

³ VOLTAIRE A, REY P. BENEFICIATION OF DIATOMITE DEPOSIT IN BASUD, CAMARINES NORTE. Philippine Society of Mining Engineers. Meeting the challenges and Heeding the call Towards the Revitalization of the Industry. November 18, 2005.

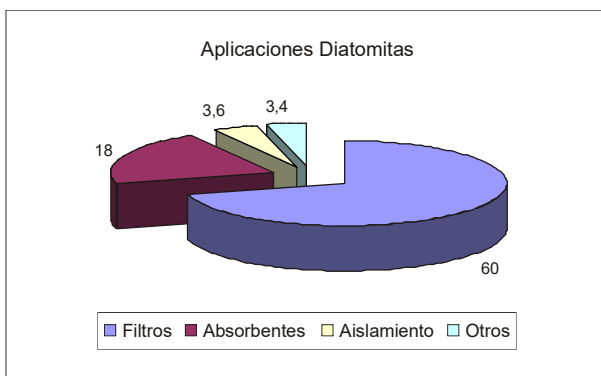
⁴ RAMOS, V., EGUEZ, H., LADINES, L., CARRIÓN, PAÚL. Perspectivas de la explotación y aplicación de tierra de diatomeas en la Península de Santa Elena.

⁵ SANJA M.

⁶ RAMOS, V., EGUEZ, H., LADINES, L., CARRIÓN, PAÚL. Perspectivas de la explotación y aplicación de tierra de diatomeas en la Península de Santa Elena.

15%; aislamiento, 3,6%; otros (cemento, etc), 3,4%, siendo la industria de los filtros la principal aplicación de las diatomitas⁷. De acuerdo con esto, el principal enfoque de beneficio se realizó con miras hacia la industria de materiales filtrantes, soportado en el hecho de que además de ser la mayor aplicación, a nivel nacional las empresas que usan tierras diatomáceas en sus procesos, importan dicho mineral. Para cada aplicación, los requerimientos en cuanto a propiedades físico-químicas pueden variar permitiendo manejar diferentes técnicas de beneficio.

Figura 1. Distribución de las principales aplicaciones de las Diatomitas.



Fuente: los autores

1. TEORÍA DEL PROCESAMIENTO

1.1 Generalidades. La concentración de minerales, es la operación por medio de la cual se eleva el tenor o concentración (en porcentaje) de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación sólido-sólido produciéndose así la segregación de dos o más especies mineralógicas y generando una corriente enriquecida en un mineral de interés. Para ello, se pueden implementar dos métodos de separación^{8, 9}, así:

⁷ www.igme.es/internet/recursosminerales/panoramaminero/minerales/diaromita03.htm#2-1

⁸ BUSTAMANTE RUA O., GAVIRIAA., RESTREPO BAENA O. Notas de clase de la Asignatura: Concentración de Minerales. Instituto De Minerales CIMEX. Facultad de Minas. Universidad Nacional de oclombia – Sede Medellín

⁹ WILLS B., MUNN T. Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Séptima edición. Octubre de 2006.

- a. Métodos que emplean diferentes propiedades físicas o volumétricas de las sustancias minerales.

El grupo de tecnologías que asocia a estos métodos se caracteriza por ser fuertemente dependiente del tamaño de partícula y las propiedades diferenciales que generan la separación pueden ser:

- Diferencia de velocidad de sedimentación, a través de la diferencia de densidad de los sólidos (Concentración Gravimétrica).
- Diferencias de movimiento en un campo magnético de intensidad variable, a través de la diferencia de la susceptibilidad magnética de los minerales (Concentración Magnética).
- Quedarse adherido o saltar de una placa metálica, por diferencias en la conductividad eléctrica cuando las partículas están dentro de un campo eléctrico (Concentración Eléctrica).

- b. Métodos que usan propiedades físico-químicas de superficie, tales como:

- La adsorción o no de agua en la superficie del sólido, por lo tanto los que adsorban agua se humectarán (hidrofílicos) y otros que no se humectan (hidrofóbicos). Los que no adsorben agua (por ejemplo azufre, talco, grafito y molibdenita), serán rechazados por el medio acuoso y si se les coloca cerca de una burbuja de aire saldrían embebidos en ésta y flotarían. Lo anterior implica algunas otras condiciones que se detallaran más adelante.
- Adsorción selectiva de un tensoactivo de tal manera que se produzca una aglomeración selectiva de un mineral o varios minerales y mantener dispersos a los demás minerales acompañantes, lo cual es muy útil cuando se procesan minerales de tamaños de grano ultrafinos (entre 10.0 y 1.0 μm) y coloidales ($< 1.0 \mu\text{m}$). En cada uno de los casos, si el tensoactivo es un polímero se conoce el proceso como floculación selectiva y si es un ión formando un complejo inorgánico se conoce como coagulación selectiva. La Tabla 1 muestra los diferentes métodos de concentración que suelen utilizarse industrialmente y la propiedad diferencial que utiliza cada uno de ellos; lo mismo que los nombres de los aparatos más empleados.

Tabla 1. Diferentes Métodos de Concentración de Minerales y Algunos Equipos Empleados

Nombre del Método	Propiedades que emplea para separar	Principales aparatos
Concentración Gravitacional	Diferencia de velocidad de sedimentación de los minerales	Sedimentador, Hidrociclón, Jig, Canalón Canaletas, Mesa Vibratoria, Espiral, Conos de Separación Centrifugas, entre otros
Concentración Magnética	Susceptibilidad magnética (atracción o no frente a un Magneto u imán)	Separador magnético de tambor, rodillos magnéticos, separador magnético tipo "carrusel", etc.
Concentración eléctrica	Conductividad eléctrica	Separador eléctrico de alta intensidad
Flotación espumante	Hidrofobicidad y/o hidrofiliidad del mineral (mojamiento o no)	Celdas de flotación y columnas de flotación
Floculación selectiva	Adsorción específica de un polímero y formación de flóculo	Sedimentador
Coagulación selectiva	Adsorción específica de iones inorgánicos y formación de un coágulo	Sedimentador

1.2 Beneficio aplicado minerales diatomáceos

La diversidad en las tecnologías de procesamiento de minerales son el resultado directo de la diversidad de los mismos (materia prima) y de la variedad de aplicaciones comerciales (mercado).

La evolución en las tecnologías de procesamiento ha sido impulsada por el esfuerzo de hacer que el recurso mineral cumpla las propiedades físicas demandadas por los mercados, de ésta forma se desarrollan tecnologías de proceso para satisfacer requerimientos más exigentes por parte de los clientes, generando finalmente productos minerales de mayor valor agregado.

Cuando se habla de procesamiento, se hace referencia a dos tipos: en seco y en húmedo¹⁰. La selección del tipo de procesamiento y de la técnica de beneficio depende de las características propias de las impurezas a separar. Muchas aplicaciones de beneficio requieren incluso de sinergia de procesos a través del uso paralelo de procesamiento en seco durante las etapas iniciales, finalizando con técnicas de refinamiento a través de técnicas de procesamiento en húmedo.

1.2.1 Beneficio por vía seca. Es sencillo y consiste principalmente en: secar, triturar, moler y clasificar el mineral¹¹, en algunos casos, se usan procesos adicionales de refinamiento tales como separación gravimétrica, magnética o electrostática en seco. Un diagrama típico de procesamiento por vía seca aplicado a diatomitas se muestra en la figura 2. En este tratamiento, el material se clasifica por tamaños utilizando clasificadores de aire (ciclones – flotación por aire) y se entrega a un tamaño – M325 (44 mm), permitiendo remover solamente las impurezas que están por encima de ésta fracción.

Actualmente las diatomitas se procesan a través de esta vía obteniendo resultados satisfactorios para determinadas aplicaciones, sin embargo, el material que se beneficia de ésta manera es de menor calidad^{12, 13} pues no permite garantizar (controlar) las condiciones de liberación de impurezas de tamaño fino, a menos que se trabajen procesos especiales de molienda de alta energía (atricción)¹⁴, que garanticen dicha separación encareciendo notablemente el proceso. En el caso particular de las diatomitas, debido a las condiciones sedimentarias de sus yacimientos, las impurezas tales como arcillas, cuarzo y óxidos de hierro se encuentran en la fracción menor a 45 mm por lo que se requiere romper los agregados que se forman entre estas especies para obtener separaciones eficientes.

¹⁰ MURRAY, Haydn. Industrial Clays Case Study. En: www.iied.org/mmsd/mmsd_pdfs/064_murray.pdf. International Institute for environment and development. 2002.

¹¹ PRUETT, Robert J. "Process changes and their impact on kaolin resources". Sandersville, Georgia.

¹² PEREZ S, Hector; BOCANEGRAA, Folkenberg. Purificación de los caolines de Oiba mediante tratamiento físico – químico. Tesis de Gradúen Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Fisicoquímicas. Bucaramanga. 1999.

¹³ Clay Processing. www.epa.gov/ttn/chieff/ap42/ch11/final/c11s25.pdf

¹⁴ REED, J. Ceramic processing, second edition, Wiley Inter Science, 1995,p. 315.

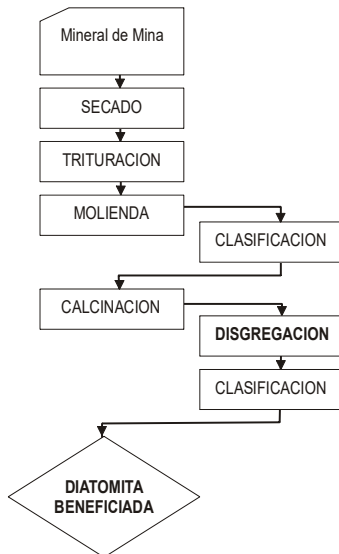


Figura 2. Etapas típicas de procesamiento en seco aplicado a Diatomitas.

1.2.2 Calcínación de minerales diatomáceos. La calcínación se refiere a calentar un mineral o un producto intermedio con el objeto de descomponerlo (por ejemplo, calentar un carbonato para eliminar el CO_2 y formar un óxido) o eliminar el agua después de la deshidratación. La calcínación también se refiere a calentar una mezcla de productos químicos (por ejemplo óxidos o carbonatos) donde, en alguna descomposición pueden ocurrir reacciones, y las reacciones químicas entre sólidos pueden llevar a la formación de fases cerámicas de interés.

Los objetivos de la calcínación suelen ser:

- Eliminar el agua, presente como humedad absorbida, “agua de cristalización” o “agua de constitución” (como en la conversión del hidróxido férrico en óxido férrico).
- Eliminar el dióxido de carbono (como en la calcínación de la piedra caliza en cal en un horno de cal), el dióxido de azufre u otro compuesto orgánico volátil.
- Para oxidar (calcínación oxidante) una parte o toda la sustancia (usado

comúnmente para convertir menas sulfurosas a óxidos en el primer paso de recuperación de metales como el zinc, el plomo y el cobre).

- Para reducir (calcinación reductora) metales a partir de sus menas (fundición).

Las reacciones de calcinación pueden incluir disociación térmica, incluyendo la destilación destructiva de los compuestos orgánicos (es decir, calentar un material rico en carbono en ausencia de aire u oxígeno, para producir sólidos, líquidos y gases). Ejemplos de otras reacciones de calcinación son la concentración de alúmina calentando bauxita, cambios de estado polimórficos como la conversión de anatasio en rutilo, y las recristalizaciones térmicas como la desvitrificación del cristal. Se suelen someter a procesos de calcinación materiales como los fosfatos, la alúmina, el carbonato de manganeso, el coque de petróleo y la magnesita marina.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la figura 3. Se presenta la metodología general del proceso.

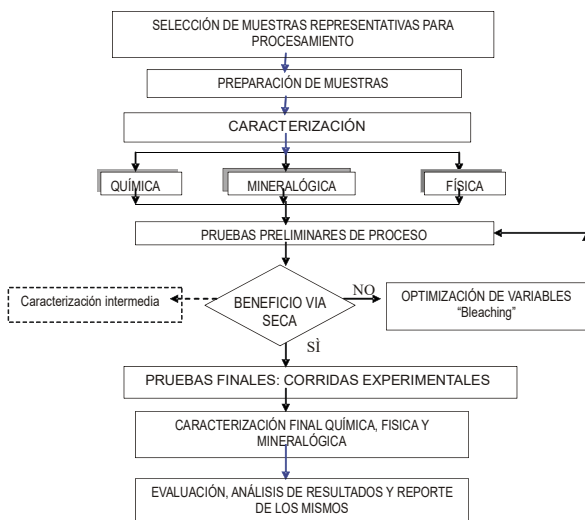


Figura 3. Metodología general del proceso
Fuente. los autores

2.1 Beneficio por vía seca del mineral diatomáceo

El intervalo de tamaño donde los ciclones neumáticos (en aire) son efectivos, comprenden un rango de 50 mm a aproximadamente 170 mm. De acuerdo con las características propias del mineral de estudio, el tamaño de las frústulas va desde 5 hasta un máximo de 168 mm, con tendencia hacia los 5 mm, lo cual limita la eficiencia de la separación por ésta vía. Sin embargo, con el fin de evaluar el comportamiento del mineral, se desarrollaron pruebas de clasificación tanto en tamices como en neumociclones. Las pruebas de neumociclón se desarrollaron empleando un sistema que consta de dos (2) neumociclones (figura 4), para hacer separaciones en dos intervalos de tamaño diferentes, es decir, lo que sale por una de las corrientes del neumociclón 1, se somete a una segunda separación en el segundo.

El sistema consta de:

- Una serie de boquillas por las cuales se garantiza la separación de material por distribución granulométrica, bajo la acción de una corriente de aire.
- Una tolva de alimentación, que desemboca en un sinfín que arrastra el material hacia un tubo el cual esta conectado por uno de los lados por un motor impulsador de aire, por otro lado una entrada de aire natural y el tubo de entrada de material al ciclón y por ultimo al ciclón principal del equipo. Una puerta la cual limita la entrada de material hacia este.
- Dos salidas, una por donde desemboca el material pesado y la otra por donde sale el material liviano hacia otro ciclón de separación que tiene las mismas características pero con una separación un poco mas selectiva, el cual también tiene dos salidas, una que desemboca en la parte inferior del ciclón y la otra que sale por la parte superior, que se va para unas boquillas también de separación por tamaño, en las cuales sale lo mas fino del material en proceso.

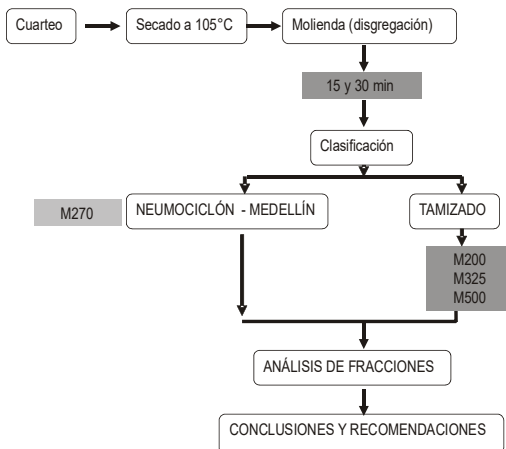


Figura 4. Procedimiento general de beneficio en seco.

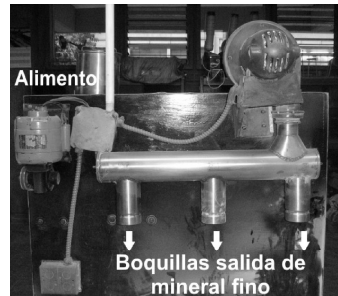
Fuente: los autores

La cantidad de material que se utilizó por cada ensayo fue de 200 g de mineral diatomáceo, el cual se preparó con anterioridad mediante molienda en un molino de bolas durante 15 min a 40 rpm, luego se clasificó por malla 270.

1. Inspección rigurosa del equipo, el cual se desarmó y purgó para evitar contaminación del mismo.
2. Se colocaron en todas las salidas de material botellas y bolsas perforadas para la retención del material en estas (figura 5). Luego se procedió a alimentar la tolva con una cantidad de 200 g de mineral.
3. Antes de encender el equipo se procedió a calibrar unas entradas de aire que salían de los ciclones, las cuales controlan el movimiento dentro del ciclón, es decir, se garantizó con esto la presión de aire suficiente para generar el remolino que debe tener en su interior el ciclón en el momento del paso del material. La calibración fue netamente visual.



(a) Parte frontal



(b) Parte de atrás

Figura 5. Sistema de separación en seco.

Fuente: los autores

2.2 Ensayos de calcinación

Los estudios de calcinación de diatomitas se basaron en tres variables fundamentales sobre la calidad del producto final: temperatura, tiempo de residencia y cantidad de fundente, privilegiando la temperatura y la cantidad de fundente, por considerar que el tiempo de residencia puede dejarse constante.

Los ensayos de calcinación se realizaron en una mufla eléctrica sobre muestras de 2gr de diatomita beneficiada y en bruto, que se colocaron en crisoles refractarios, variando las temperaturas y adición de fundente, con un gradiente de temperatura de 5°C/minuto. Las temperaturas ensayadas fueron de 850°C, 950°C y 1050°C, bajo las condiciones de operación que se indican en la tabla 2. La investigación de estas variables operacionales, temperatura, tiempo de residencia y adición de fundente, tienen por objetivo el conocimiento y evaluación de sus efectos, en conjunto a las propiedades de la diatomita calcinada: porosidad, tasa de filtración, diámetro medio de partículas.

Los resultados de los ensayos fueron avalados por evaluación petrográfica, permeabilidad, porosidad, blancura del producto y verificación de superficie específica. En la figura 6 se aprecia el equipo eléctrico empleado en el proceso de calcinación.

Tabla 2. Variables del Proceso de Calcinación a las diatomitas

Condiciones de los ensayos de calcinación en mufla			
Temperatura	850°C	950°C	1050°C
	2	2	2
Adición de fundente	4	4	4
	8	8	8

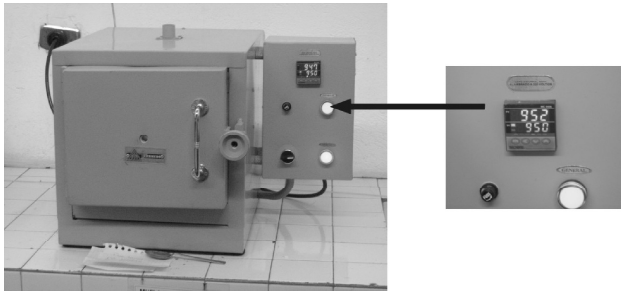


Figura 6. Mufla empleada para calcinación.
Fuente: Laboratorios Escuela de Metalurgia – UPTC.

3. EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS DIATOMITAS SEGÚN LA “*TECHNICAL DATA SHEETS*”

A nivel mundial, el primer productor (y consumidor) de diatomita es Estados Unidos, con el 57.2% de la oferta total de 2009. A continuación se presentan algunas especificaciones reportadas por la “*technical data sheets*”, donde se detallan las características fisicoquímicas de las tierras diatomáceas empleadas en varias aplicaciones, resaltando la comercializada bajo la marca *Celatom® DE Filter Aids* para filtros, que relaciona varios grados cada uno de los cuales presentan diferentes propiedades físico - químicas, principalmente en los valores de permeabilidad, indicando la influencia de la técnica de beneficio. Analizando otras especificaciones técnicas, se observa claramente la diferencia notable entre el mineral en bruto y el beneficiado evaluando lo siguiente:

- El contenido de SiO_2 es superior al 89%, valor que debe corresponder más al aportado por las diatomeas que por el cuarzo libre y el que hace parte de las especies arcillosas. Los contenidos de hierro son menores al 2%, valor que no es tan exigente comparado con porcentajes menores al 1% que normalmente se solicita en otros minerales como las arcillas.
- La variación en los valores de PPI indican además de la eliminación de materia orgánica, la baja presencia de minerales arcillosos después de beneficiar. No hay que olvidar que sobre los 400°C los minerales arcillosos reportan cambios estructurales por la pérdida de agua estructural, manifestándose a través de la pérdida de peso.
- El valor de pH confirma la influencia del proceso de beneficio donde se adicionan reactivos que lo modifican. Respecto al beneficio, se observa que es indispensable aplicar procesos de calcinación con y sin fundente para mejorar el ASE. Los retenidos en las malla 140 y 325 son bastante exigentes y sólo pueden darse si se realiza un proceso de beneficio.

3.1 Caracterización Mineralógica. La figura 7, muestra las especies mineralógicas presentes en el mineral de estudio.

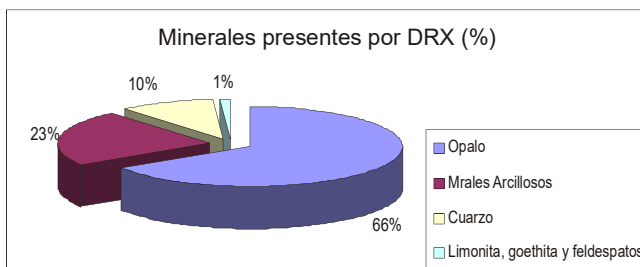


Figura 7. DRX del mineral de Siachoque en bruto.
Fuente: los autores

De acuerdo con esto y con los resultados obtenidos por análisis petrográfico (figura 9) el mineral esta compuesto en orden de abundancia por las siguientes especies:

- Ópalo: compuesto de las frústulas de diatomeas, observándose que es la *Aulocoseira granulata* (figura 10), la especie diatomácea dominante. Hay que resaltar que el mineral en forma proporcional contiene del total de las diatomeas, el 60 % en estado fragmentado, mostrando que de hecho el mineral ya entra fraccionado al proceso.
- Minerales arcillosos: principalmente *illita* y *caolinita*.

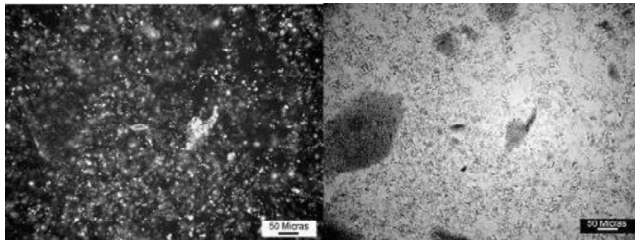


Figura 8. Fotos petrográficas correspondientes al sedimento obtenido después del proceso de beneficio
Fuente: Grupo de Investigación en Geología - UPTC.

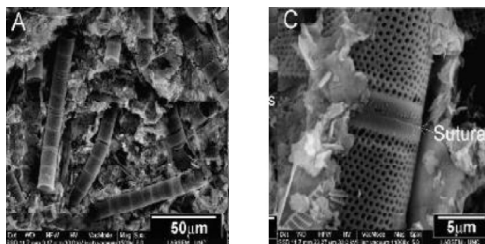


Figura 9. SEM de las especies presentes en el mineral proveniente de Chivatá
Fuente: Grupo de investigación Ingeniería Geológica-UPTC.

3.2 Caracterización Química. Los resultados de la FRX se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Composición química de las Diatomitas en Bruto.

	DA1-TOT	DA1-8	DP1-2	DP1-4	DP1-8	DA2-TOT	DA2-CAL	DA2-TAM
SiO ₂	66,223	65,771	76,582	70,208	76,021	76,232	78,581	77,181
Al ₂ O ₃	19,961	16,458	17,983	19,308	16,508	15,056	12,549	14,309
K ₂ O	2,965	1,607	1,827	2,741	2,312	1,501	1,134	1,481
Fe ₂ O ₃	2,197	2,281	3,316	3,415	1,868	1,481	1,224	1,397
TiO ₂	0,702	0,503	0,660	0,716	0,887	0,346	0,251	0,344
MgO	0,422	0,334	0,325	0,464	0,346	0,276	0,157	0,252
Na ₂ O	0,279	0,316	0,325	0,227	0,326	0,261	6,620	-
P ₂ O ₅	0,049	0,080	0,073	0,098	0,049	0,040	0,025	0,026
CaO	-	0,174	0,191	0,111	0,142	0,227	0,200	0,206
S	0,011	0,168	0,058	0,069	0,028	0,033	0,044	0,028

Fuente: los autores

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Beneficio por vía seca

Este procesamiento siempre fue muy complejo debido a que las diatomeas adquieren rápidamente humedad, afectando particularmente la clasificación por tamices, lo que dificultó el proceso; este aspecto se convierte entonces en un parámetro de control determinante en la eficiencia de la separación.

4.1.1 Identificación mineralógica. Se desarrolló el estudio petrográfico a las muestras obtenidas tanto por clasificación por tamizado como por neumociclón. Los resultados obtenidos, referida a la clasificación por tamizado se observa lo siguiente:

La clasificación inicial se hizo usando las mallas Tyler 100, 270, 325 y 500 pero se hizo énfasis solo en la fracción – M 325 y - M500. Se presentaron problemas de taponamientos y formación de aglomerados de material, impidiendo la clasificación.

- Sólo logró una ligera concentración de diatomeas en la fracción – M 500 como se indica mediante los índices metalúrgicos

- Se observa la clara presencia de los minerales arcillosos a través de aglomerados
- La molienda genera daño notable a las frústulas.

La figura 10 muestra el comportamiento de las especies mineralógicas luego de realizar la clasificación por tamizado y neumociclón. Estos gráficos muestran en forma clara que no se presenta un cambio significativo frente al material sin beneficiar, solamente una ligera variación en la presencia de los minerales arcillosos.

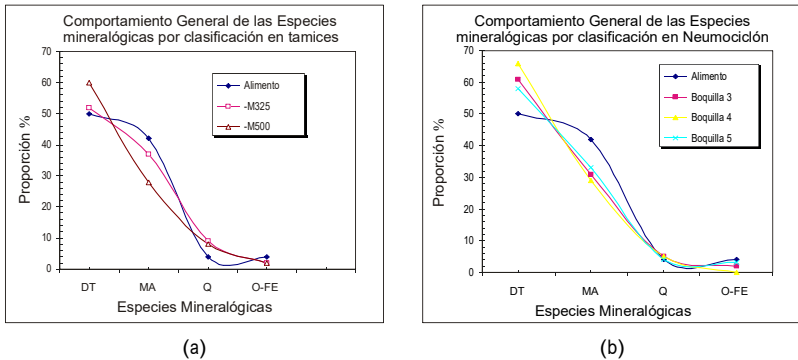


Figura 10. Comportamiento del mineral: a) Clasificado por tamizado; b) clasificado por neumociclón

Fuente: los autores

4.1.2 Balance de masa y evaluación a través de índices metalúrgicos. El análisis de los índices relacionado en éste informe, se hace sobre las corrientes que presentaron la mayor concentración de especies diatomáceas.

La tabla 4 muestra los resultados promedio obtenidos para las corrientes tanto por tamizado como por neumociclón. Como se observa en la petrografía, para cada caso, solamente una fracción logró una concentración relativamente significativa de diatomeas y será sólo sobre éstas que se realizará el análisis de los índices metalúrgicos. La tabla 6 muestra los datos para cada cálculo de índice metalúrgico en diatomitas.

Tabla 4. Balance de masa promedio para cada una de las corrientes de salida del neumociclón

CORRIENTE	Tamizado	Neumociclón
	%	%
A	100	100
t _a	50	50
C	4	1.6
t _c	60	66

Fuente: los autores

Tabla 5. Datos procesamiento en seco para cálculo de los índices

TAMIZADO						
	-M 500 %					%Total
	4					100
PRUEBAS	SALIDA 1	SALIDA 2	SALIDA 3	SALIDA 4	SALIDA 5	%Total
	%	%	%	%	%	
Promedio Pruebas	81.6	13.3	2.3	1.2	1.6	100

Fuente: los autores

La tabla 5 es muy elocuente en cuanto a que no se logran resultados favorables para el beneficio en seco, pudiendo concluir que el procesamiento bajo las condiciones evaluadas, si bien es cierto se logra algún enriquecimiento de la fracción diatomácea, no logró ni rendimientos aceptables ni recuperaciones significativas, no sólo por el alcance mismo de la técnica, el cual se había evaluado desde el comienzo y no era el apropiado, sino también por las características propias del yacimiento (especies mineralógicas), el cual requiere un tratamiento especial de separación que no tiene que ver con técnicas gravimétricas. Se confirma entonces que para éste mineral particularmente, debido a sus características de tamaño, forma y estado de las especies diatomáceas predominantes comparadas con los minerales arcillosos, no resulta apropiado, lo cual proyecta el beneficio por técnicas de separación centrífuga.

4.1.3 Evaluación mineralógica de diatomita calcinada

Realizados los ensayos de calcinación en mufla, se pudo concluir que las mejores condiciones de operación se obtienen a una temperatura de 950°C y 8% de fundente, bajo éstas condiciones se observa que el tamaño de partícula aumenta con la temperatura, lo que indica que esta variable es fundamental en la fusión y aglomeración de las partículas finas de diatomita, especialmente cuando se ha adicionado fundente que reduce la temperatura de fusión de la sílice. Además petrográficamente se observa una concentración de 66% de diatomitas. A una misma temperatura y bajo condiciones de operación de 4% fundente, se reporta una concentración de 64% diatomitas y un valor más bajo de 63% sin adición de fundente. Con éstos resultados, se verifica que no se necesita de una temperatura superior a 1000°C, manteniendo constante el tiempo de residencia en 30 min, intervalo en el cual ocurre la calcinación total de material.

4.1.4 Evaluación de propiedades físicas

Con el objeto de conocer las propiedades petrofísicas de la diatomita calcinada a utilizar principalmente como elemento filtrante en procesos químicos, se realizó análisis de los parámetros petrofísicos básicos como permeabilidad y porosidad a las muestras calcinadas y en estado natural. Los resultados indican que la diatomita calcinada presenta un promedio de porosidad de 49.5% y un promedio de permeabilidad de 3.9 md, mientras que las muestras en estado natural presentan un promedio de porosidad de 35% y una permeabilidad de 0.984 md. Teniendo en cuenta los anteriores resultados, se observa que la muestra calcinada presenta mayor permeabilidad que la muestra natural. Como el sistema de aplicación de la diatomita de estudio es un medio húmedo, se recomienda estimar la permeabilidad al líquido y complementar estudios previos.

Por otro lado, otra propiedad física muy importante objeto de estudio es la blancura del producto obtenido de la calcinación, propiedad que no sufrió cambios importantes debido a los altos contenidos de hierro, como se aprecia en la figura 11 formación de áreas coloreadas en el mineral, después de haber sido sometido al proceso de calcinación, valores muy superiores a los que se presentan en diatomitas de otras latitudes.



Figura 11. Formación de áreas coloreadas en el mineral beneficiado.
Fuente: los autores

Es importante señalar que a medida que aumenta la temperatura de calcinación, el tamaño de las partículas crece y el área superficial específica disminuye, proceso que se viabiliza gracias a la presencia del carbonato de sodio que actúa como fundente.

Mediante la calcinación, parte de la estructura terciaria de la frústula diatomácea se funde, disminuyendo de este modo la superficie específica del mineral procesado. El promedio de la distribución granulométrica de la materia prima, aumenta considerablemente por sinterización de fragmentos y escoriación de contaminantes arcillosos. Con este proceso se logra aumentar las velocidades de flujo en aplicaciones como ayuda filtrante, controlar la capacidad absorbente de las tierras y aumentar la blancura.

Adicionalmente, se puede afirmar que en forma generalizada en un medio ambiente salobre va a existir una población de diatomeas de especies grandes, lo cual entregaría una materia prima de calidad apta para elaborar ayudas filtrantes rápidas. En un medio ambiente de aguas finas, claras y dulces se desarrollarían preferentemente especies de dimensiones menores, aptas para elaborar ayudas filtrantes de gran brillantez pero con razones de flujo menores. En éste último caso la distribución granulométrica puede aumentarse cuando las especificaciones del producto final así lo requieran mediante una calcinación adecuada de la materia prima.

De lo anteriormente expuesto, se desprende que la evaluación cabal de un yacimiento de diatomitas comprende no solo su ubicación y el conocimiento de la distribución de sus contaminantes sino que además, es necesario un acucioso estudio micropaleontológico. De esta forma, se pueden catalogar los distintos yacimientos con la mayor eficiencia posible, según su aplicabilidad tecnológica.

5. CONCLUSIONES

- El 39% de permeabilidad obtenidos en la diatomita calcinada, indican que se logró eliminar materia orgánica asociada al mineral de estudio, ya que ésta se encuentra obstruyendo los poros de las diatomeas y como consecuencia afecta la capacidad filtrante del material.
- Un cambio favorable de las propiedades químicas de la diatomita, es la eliminación nociva de hierro y calcio, enfocada principalmente como elemento filtrante. El calcio contenido en la caliza CaCO_3 se elimina por la transformación en cal CaO . Este polvo fino, se segrega a las bolsas filtro en la clasificación neumática final. Por otra parte, el hierro no se elimina, pero la calcinación produce la oxidación del óxido ferroso a óxido férrico que es más estable y no se disuelve durante la etapa de aplicación como medio filtrante.
- Analizando los resultados obtenidos por DRX y correlacionándolos con la FRX, se asume que el aporte de aluminio expresado como Al_2O_3 , corresponde a la presencia de minerales arcillosos, por lo tanto si se compara con otros yacimientos del mundo, necesariamente éste requiere de un procesamiento diferente a la vía seca para garantizar la separación y posterior concentración de la fracción diatomácea.
- Dentro de la evaluación de las posibles aplicaciones, teniendo en cuenta el nivel de concentración máximo de las especies diatomáceas (64%), si bien es cierto se logran cambios en las suspensiones filtradas, éste yacimiento es el más apropiado para éste tipo de aplicación.

AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Sandra Rocío Manosalva. Directora del Grupo de Investigación en Geología. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

BIBLIOGRAFÍA

INGEOMINAS (1999). Proyecto Inventario Minero Nacional. Departamento de Boyacá. Industrial Minerals and Rocks. Indiana Geological Survey. Published by: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Littleton, Colorado. 1994.

SANHUEZA V, KELM U y CID R. J. (2003). Chem. Tech. and Biotech., 78, 485

SANHUEZA V, KELM U y CID R et al., (2004). J. Chem. Tech. and Biotech., 79, 686.

SANHUEZA V, KELM U y CID R et al., (2006). J. Chem. Tech. and Biotech., 81, 14.

Standar test methods for chemical análisis of ceramic whiteware clays. Annual book of ASTM standar. Vol 15.02.

MANOSALVA, Sandra. Caracterización mineralógica de arcillas y su aplicación en el beneficio. 2004, 178p. Tesis de grado (Maestría en Geología). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Bogotá.

UPME (2005). Unidad de planeación minero energética. Ministerio de Minas y Energía.
WALDEMAR, L. (1983). Mineral Deposits, New York, Ed. Mc Graww Hill. 260 p.
www.ingeminas.gov.co - (2006) Catastro minerales de Colombia.
www.legiscomex.com - (2005). Importaciones de diatomitas.
Frederic L, Kadey Jr. Industrial Mineral and Rock (1983).