

**REMOCIÓN DE CARBÓN INQUEMADO EN CENIZAS DE FONDO DE  
CALDERA MEDIANTE FLOTACIÓN POR LOTES**

**IVÁN RICARDO NAVARRO ESPINOSA**

**Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE**

**PROGRAMA DE MAGISTER EN INGENIERÍA**

**ÁREA DE ÉNFASIS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**CALI – COLOMBIA**

**JUNIO DE 2011**

**REMOCIÓN DE CARBÓN IQUEMADO EN CENIZAS DE FONDO DE  
CALDERAS MEDIANTE FLOTACIÓN POR LOTES**

**Tesis presentada como prerrequisito parcial para optar al título  
de magíster en Ingeniería Química**

**Por**

**IVÁN RICARDO NAVARRO ESPINOSA**  
**Ingeniero químico**

**Director:**

**JUAN MANUEL BARRAZA BURGOS**  
**Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ÁREA DE ÉNFASIS EN INGENIERÍA QUÍMICA**  
**CALI – COLOMBIA**

**JUNIO DE 2011**

Santiago de Cali, Junio de 2011

Esta tesis titulada "***Remoción de carbón inquemado en cenizas de fondo de caldera mediante flotación por lotes***" elaborada por el ingeniero químico Iván Ricardo Navarro Espinosa es presentada a la escuela de ingeniería química de la Universidad del Valle como requisito parcial para optar al título de magíster en Ingeniería Química.

Hemos revisado esta tesis y recomendamos su aprobación

JURADOS

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

No hay palabras que puedan describir el sentimiento de agradecimiento que tengo para ciertas personas cuya colaboración fue indispensable para el buen término de esta etapa académica de mi vida. Sin embargo es necesario reconocer por escrito todo su apoyo.

A mi madre Maria Cristina, la persona para la cual nunca habrá agradecimiento suficiente por todo su apoyo incesante en cada momento de mi vida. Cada palabra, recomendación y consejo resultan invaluable.

Al profesor Juan Manuel Barraza Burgos por tener la confianza y la paciencia necesaria para que este trabajo se culminara de manera exitosa, a pesar de todos los inconvenientes presentados a lo largo del desarrollo de esta investigación.

A la universidad del Valle y sus trabajadores, en especial a los profesores de la escuela de Ingeniería Química por permitirme formarme en esta gran institución y recibir las enseñanzas curriculares y extracurriculares de personas de gran valía.

A mis amigos, fuente inagotable de apoyo en los momentos más difíciles y motivo de orgullo y alegría.

## **RESUMEN**

En este trabajo se encontró la materia mineral de cenizas de fondo de caldera empleando un proceso de flotación por lotes. Las cenizas de fondo utilizadas son producto de la combustión de la caldera de una empresa de la región del Valle del Cauca, el cual posee un contenido de cenizas del 92%.

En el estudio se analizaron los efectos del tipo y cantidad de colector y espumante, densidad de la pulpa y velocidad de agitación sobre el rendimiento y el grado de separación de carbón inquemado y materia mineral.

En todos los experimentos desarrollados se determinó el contenido de cenizas en la corriente de fondos de la celda de flotación así como el porcentaje de rendimiento de la operación para evaluar la flotación como técnica de separación.

Los resultados mostraron que la flotación por lotes retiró en su mayoría el carbón inquemado de las cenizas de fondo, llevando a un producto de fondo con un porcentaje de cenizas del 98.5% en promedio. Las mejores condiciones de operación producen rendimientos del 75% obtenidos con concentraciones de colector (fuel oil) de 600 g/ton y de espumante (MIBC) de 1000 g/ton, una densidad de pulpa del 5% y una agitación de 1100 RPM.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                   | <b>1</b>  |
| <b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>                        | <b>3</b>  |
| <b>1.1 CENIZAS DE FONDO .....</b>                          | <b>3</b>  |
| 1.1.1 Características generales.....                       | 3         |
| 1.1.2 Usos y aplicaciones de interés industrial .....      | 4         |
| 1.1.3 Separación de cenizas de fondo.....                  | 5         |
| <b>1.2 FLOTACIÓN.....</b>                                  | <b>6</b>  |
| 1.2.1 Generalidades.....                                   | 6         |
| 1.2.2 Flotación por lotes.....                             | 7         |
| 1.2.3 Flotación continua .....                             | 8         |
| 1.2.4 Aditivos.....                                        | 9         |
| 1.2.3.1 <i>Colectores</i> .....                            | 9         |
| 1.2.3.2 <i>Espumantes</i> .....                            | 10        |
| 1.2.3.3 <i>Activadores</i> .....                           | 11        |
| 1.2.3.4 <i>Depresores</i> .....                            | 11        |
| 1.2.3.5 <i>Dispersantes</i> .....                          | 11        |
| 1.2.3.6 <i>Reguladores</i> .....                           | 11        |
| <b>1.3 CARBÓN INQUEMADO.....</b>                           | <b>12</b> |
| 1.3.1 Definición .....                                     | 12        |
| 1.3.2 Aplicaciones.....                                    | 12        |
| <b>2. EQUIPOS, MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b> | <b>14</b> |
| <b>2.1 EQUIPOS.....</b>                                    | <b>14</b> |
| 2.1.1 Celda de flotación.....                              | 14        |
| 2.1.2 Sistema de filtración .....                          | 15        |

|            |                                                                         |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.3      | Horno de secado .....                                                   | 15        |
| 2.1.4      | Mufla.....                                                              | 16        |
| <b>2.2</b> | <b>MATERIALES.....</b>                                                  | <b>17</b> |
| 2.2.1      | Cenizas de fondo.....                                                   | 17        |
| 2.2.2      | Colector .....                                                          | 17        |
| 2.2.3      | Espumante .....                                                         | 17        |
| <b>2.3</b> | <b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>                                  | <b>17</b> |
| <b>2.4</b> | <b>METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>                                    | <b>19</b> |
| 2.4.1      | Determinación de la mejor pareja Colector – Espumante.....              | 19        |
| 2.4.2      | Evaluación condiciones de operación.....                                | 20        |
| <b>3.</b>  | <b>ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>                                       | <b>22</b> |
| 3.1        | CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS DE FONDO .....                           | 23        |
| 3.2        | SELECCIÓN DE LA COMBINACIÓN COLECTOR - ESPUMANTE.....                   | 26        |
| 3.3        | EVALUACIÓN CONDICIONES DE OPERACIÓN .....                               | 28        |
| 3.3.1      | Efecto del colector .....                                               | 28        |
| 3.3.2      | Efecto del espumante .....                                              | 28        |
| 3.3.3      | Efecto del porcentaje de sólidos en la mezcla .....                     | 30        |
| 3.3.4      | Efecto de la velocidad de agitación .....                               | 31        |
| 3.3.5      | Operación bajo mejores condiciones de operación obtenidas.....          | 32        |
| 3.4        | MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO .....                                | 33        |
| <b>4.</b>  | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                              | <b>37</b> |
|            | CONCLUSIONES.....                                                       | 37        |
|            | RECOMENDACIONES .....                                                   | 38        |
|            | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                                | <b>40</b> |
|            | <b>ANEXO 1: ANÁLISIS REALIZADOS EN ESTE TRABAJO</b>                     |           |
|            | <b>ANEXO 2: PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DE COLECTORES Y ESPUMANTES</b>  |           |
|            | <b>ANEXO 3: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA FLOTACIÓN DE CENIZAS DE FONDO</b> |           |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Usos de las cenizas volantes en USA año 2008.....                     | 5  |
| <b>Figura 2:</b> Celda de Flotación .....                                              | 8  |
| <b>Figura 3:</b> Columna de Flotación .....                                            | 9  |
| <b>Figura 4:</b> Acción del colector .....                                             | 10 |
| <b>Figura 5:</b> Celda de flotación del laboratorio del GCTC .....                     | 14 |
| <b>Figura 6:</b> Sistema de filtración.....                                            | 15 |
| <b>Figura 7:</b> Horno de secado.....                                                  | 16 |
| <b>Figura 8:</b> Mufla del laboratorio .....                                           | 16 |
| <b>Figura 9:</b> Análisis granulométrico para las cenizas de fondo .....               | 23 |
| <b>Figura 10:</b> Análisis granulométrico acumulado de las cenizas de fondo .....      | 23 |
| <b>Figura 11:</b> Análisis granulométrico de las cenizas de fondo molidas .....        | 24 |
| <b>Figura 12:</b> Análisis granulométrico acumulado de las cenizas de fondo molidas .. | 24 |
| <b>Figura 12:</b> Espectro de FTIR para las cenizas de fondo.....                      | 26 |
| <b>Figura 12:</b> Espectro de FTIR para el óxido de silicio .....                      | 26 |
| <b>Figura 13:</b> Imagen de microscopía de cenizas de fondo sin procesar en celda..... | 34 |
| <b>Figura 14:</b> Imagen de microscopía de cenizas de fondo procesadas en celda.....   | 35 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Selección de parejas Colector - Espumante .....                                                 | 17 |
| Tabla 2. Condiciones de operación .....                                                                  | 21 |
| Tabla 3. Análisis Próximo de las cenizas de fondo .....                                                  | 22 |
| Tabla 4. Análisis de liberación de materia mineral.....                                                  | 25 |
| Tabla 5. Cenizas y rendimientos en función de la combinación colector - espumante .....                  | 27 |
| Tabla 6. Efecto de la concentración de colector sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda .....  | 29 |
| Tabla 7. Efecto de la concentración de espumante sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda ..... | 30 |
| Tabla 8. Efecto del porcentaje de sólidos sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda.....         | 30 |
| Tabla 9. Efecto de la velocidad de agitación sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda.....      | 32 |
| Tabla 10. Operación bajo mejores condiciones de operación obtenidas .....                                | 33 |
| Tabla 11. Composición porcentual de material presente en cenizas de fondo sin procesar en celda.....     | 34 |
| Tabla 12. Composición porcentual de material presente en cenizas de fondo tratadas con flotación .....   | 36 |

## INTRODUCCIÓN

La necesidad actual en la generación de energía requiere que los combustibles utilizados sean manejados con tecnologías ambientalmente amigables. Industrialmente, el carbón representa el combustible fósil de mayor uso en la industria de la región suroccidental Colombiana; no obstante, algunos carbones utilizados en las plantas industriales del Valle del Cauca presentan un alto contenido de cenizas, lo cual afecta su poder calorífico. Por otro lado, la legislación ambiental en nuestro país es cada día más estricta respecto a las emisiones de las calderas, las cuales deben disminuir los contaminantes tóxicos tales como los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  en el proceso de combustión. El uso de estas tecnologías disminuye la formación de dichos contaminantes, pero aumenta la cantidad de carbón que permanece como remanente en los subproductos de la combustión a dichas condiciones. Estos subproductos pueden estar presentes en forma de cenizas de fondo ó cenizas volantes, las cuales pueden poseer un alto contenido de inquemados de carbón (hasta un 45% aproximadamente (Giraldo y Quiñónez, 2002)). Estos inquemados de carbón representan una pérdida económica para la empresa.

Sin embargo, se ha observado que las cenizas de fondo poseen buena actividad puzolánica (Kurama y Kaya, 2008, Qiao et. al., 2007). Esta puzolanidad puede aprovecharse en la industria del cemento, donde ya se han desarrollado estudios para su inclusión en la producción de cemento Portland y concreto entre otros productos (Manz, 1997, Trifunovic et. al., 2010). No obstante dicha actividad puzolánica, los requerimientos de calidad de la industria del cemento exigen que dichas cenizas posean un porcentaje de carbón inquemado máximo del 3%. Dicha necesidad requiere que se realice un tratamiento que retire este material.

La técnica de flotación ha sido ampliamente utilizada en los procesos de beneficio de minerales de la industria química y minera, con especial aplicación en el beneficio de carbón (Leja, 1982). En la flotación se aprovecha la condición hidrofóbica, ya sea natural o inducida, de las partículas de carbón, las cuales se adhieren a las burbujas de aire que ascienden por el dispositivo de flotación. La espuma formada se recupera y el producto se puede utilizar para generar productos de valor agregado como carbón activado (Rubio et. al., 2007), mientras que los fondos, concentrados en ceniza, se pueden utilizar como agregado en la elaboración de productos de cemento.

Consciente de la necesidad de aprovechar al máximo los subproductos de la combustión de carbón de la industria de la región para la generación de materiales de valor agregado, en este trabajo se investigó la separación del carbón inquemado presente en las cenizas de fondo utilizando flotación por lotes usando una celda tipo Denver. Para ello se caracterizaron las cenizas de fondo generadas en una empresa de la región, se analizó su potencialidad de separación y se evaluó el efecto de variables de operación tales como tipo y concentración de colector y espumante, densidad de la pulpa alimentada y velocidad de agitación para encontrar las mejores condiciones de operabilidad a nivel de laboratorio.

## 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1 CENIZAS DE FONDO

#### 1.1.1 Características generales

La ceniza de fondo (*bottom ash* en inglés) es básicamente la materia remanente producto de la combustión de carbón que como su nombre lo indica, sale por el fondo del sistema de generación de vapor una vez finalizada la combustión. Dichas cenizas se componen básicamente de compuestos inorgánicos como la sílica ( $\text{SiO}_2$ ), Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) principalmente, así como también de compuestos de calcio, magnesio, sulfuro y carbono (Wang y Hu, 2006).

Estas cenizas se encuentran en forma de material particulado irregular, cuyos diámetros aparentes oscilan entre 1 y 150  $\mu\text{m}$ . La densidad aparente de esta ceniza varía en un rango entre 0.5 y 1.0. Su peso específico puede estar entre los 1.8 y los 2.8 dependiendo de su superficie específica.

La producción de las cenizas de fondo ha aumentado en los últimos años debido principalmente a las regulaciones ambientales en lo concerniente a la generación de contaminantes tóxicos como los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , leyes que obligan a la implementación de sistemas de combustión que operen a temperaturas inferiores y con inyección de aire para reducir el grado de oxidación de los compuestos de nitrógeno y azufre.

Desde el punto de vista de la generación de vapor en calderas, las cenizas de fondo son un subproducto de desecho e indeseado, sin embargo, bajo la perspectiva de la utilización de fuentes de carbón, estas cenizas se

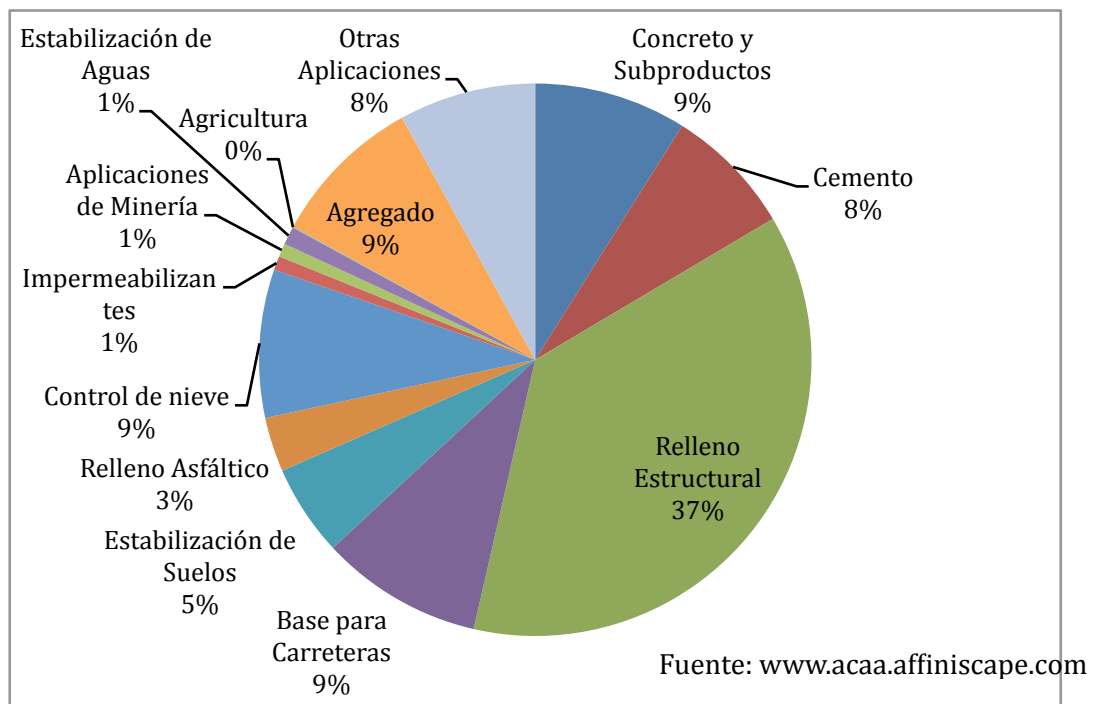
convierten en una fuente atractiva para diversos procesos distintos a los de generación de energía.

### **1.1.2 Usos y aplicaciones de interés industrial**

Las cenizas de fondo dependiendo de donde provengan, pueden poseer un comportamiento puzolánico apreciable, por esta razón su uso en la industria del cemento y concreto es alto, ya sea como sustituto u aditivo. Las cenizas de fondo han hallado aplicabilidad en la producción de:

- Cemento: Las cenizas de fondo se utilizan como materia prima en la producción de este material.
- Concreto: En la industria de los productos de concreto las cenizas de fondo que posean comportamiento puzolánico, juegan un papel importante como sustituto de algunos componentes.
- Relleno Estructural.
- Materia prima en la construcción de Carreteras.
- Estabilización de suelos.
- Relleno Asfáltico.
- Control de hielo y nieve en épocas de invierno.
- Impermeabilizante en techos y terrazas.
- Aplicaciones varias de minería.
- Estabilización de aguas y su posterior solidificación.
- Agricultura: el pH de las cenizas permite neutralizar suelos ácidos, además de retener la humedad.
- Agregado en varios procesos.

Según la Asociación Americana de Cenizas de Carbón (ACAA, por sus siglas en ingles), en el 2008 de los 18.500.000 de toneladas de cenizas producidas en Estados Unidos, el 43.82% se utilizó en los procesos anteriormente descritos. Dichos usos con sus porcentajes se presentan en la figura 1.



**Figura 1:** Usos de las cenizas volantes en USA año 2008

Puede observarse claramente que la mayor parte de estas cenizas de fondo se utilizan en la industria del cemento. Estas aplicaciones presentadas para el caso americano, fácilmente pueden ser extrapoladas a nivel mundial.

### 1.1.3 Separación de cenizas de fondo

Los componentes de las cenizas de fondo pueden separarse a partir de métodos físicos o químicos. Los procesos de recuperación más utilizados actualmente son:

- Lixiviación: los lodos de cenizas, en relaciones de líquido a sólido de 10:1, los cuales se someten a condiciones acidas (pH cercanos a 1) permiten una recuperación de metales, que se encuentran en forma de sulfatos insolubles al final de la operación. (Paul, Sandström y Paul, 2004).

- Separación triboelectrostática: las cenizas previamente se cargan eléctricamente e inyectan a una cámara, en la cual una diferencia de potencial permite que los iones se dirijan a uno u otro electrodo dependiendo de su carga. (Gray et. al. 2002).
- Aglomeración ultrasónica: la ceniza previamente mezclada con un solvente adecuado se somete a ondas de ultrasonido, las cuales permiten la aglomeración de las sustancias de interés (Gray et. al. 2002).
- Flotación espumante: en general es uno de los procesos más implementados para la separación de los componentes de las cenizas (Niewiadomski et. al., 1999; Gray et. al., 2002; Huang, Takaoka y Takeda, 2003a, 2003b, 2003c; Rubio et. al., 2007). La descripción de esta operación se muestra con mayor detalle a continuación.

## **1.2 FLOTACIÓN**

### **1.2.1 Generalidades**

La técnica de flotación ha adquirido una especial atención desde 1980 para la separación de productos de la industria minera (Finch y Dobby, 1990). La flotación es un proceso de separación basado en la química de superficie de partículas sólidas. Algunas superficies sólidas son hidrofílicas, es decir, el agua se adhiere a esta superficie formando una capa húmeda o mojada. Sin embargo, otras partículas no presentan esta propiedad, es decir son hidrofóbicas. Estas últimas partículas usualmente presentan una fuerte atracción por la interfase gaseosa, es decir, son aerofílicas, permitiendo que el aire desplace el agua de la superficie sólida. En la flotación con espuma, las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire formadas, mientras que las partículas hidrofílicas permanecen en el líquido. La diferencia de densidad entre las burbujas de aire y el agua permite que las

partículas hidrofóbicas permanezcan en la superficie de la suspensión y puedan ser separadas por medios mecánicos fácilmente.

La flotación se emplea generalmente en la separación de sólidos de densidades y tamaños similares, especialmente para tamaños de partícula menores a  $250\mu\text{m}$ , los cuales son muy pequeños para utilizar la separación por gravedad. No obstante partículas inferiores a  $35\mu\text{m}$  son muy pequeñas para inducir una hidrofobicidad.

La flotación se ha utilizado desde mediados del siglo XIX en la industria minera. En la actualidad, con esta técnica se beneficia casi la totalidad de metales como cobre, zinc, níquel, plata, molibdeno, manganeso, cromo, cobalto, tungsteno y titanio. En la industria carbonífera se ha utilizado en la desulfurización y la separación de partículas finas de carbono. Otros campos de aplicación de la flotación han sido la purificación de agua, eliminación de tintas, y procesamiento de químicos, plásticos y alimentos entre otros.

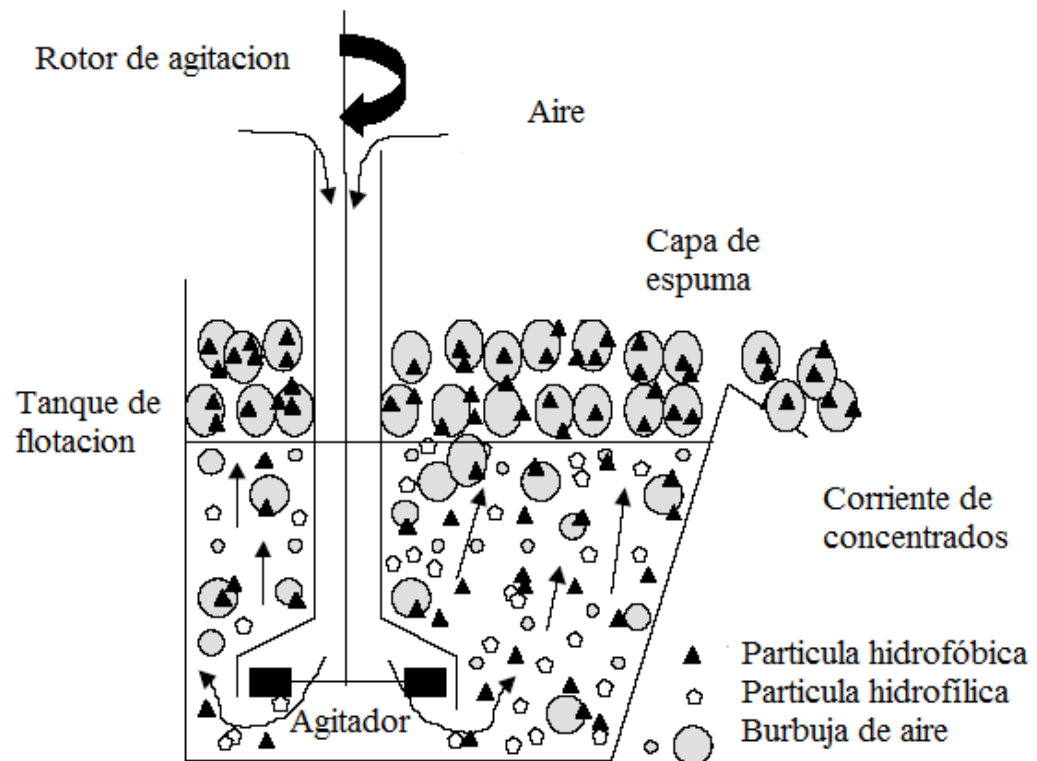
La flotación puede hacerse en operación por lotes o continua, dependiendo de la cantidad o necesidades de tratamiento.

### **1.2.2 Flotación por lotes**

La flotación por lotes se utiliza principalmente a nivel de laboratorio, aunque se dispone de equipos industriales de volúmenes mayores de  $200\text{ m}^3$ . El esquema de operación de estos equipos se presenta en la figura 2.

El equipo se compone de un tanque ó celda de flotación donde se encuentra la suspensión. La mezcla se agita continuamente para promover una mezcla homogénea. Aire se inyecta desde la parte inferior del tanque, formando burbujas, a las cuales se le adhieren las partículas hidrofóbicas, la diferencia de densidad entre las burbujas y la suspensión favorecen la formación de una capa de espuma en la parte superior de la celda (Corriente de concentrado), mientras las partículas hidrofílicas se mantienen en la solución, las cuales se decantan y forman los residuos (corriente de fondos).

Típicamente es la corriente de concentrado la que contiene los componentes deseados.



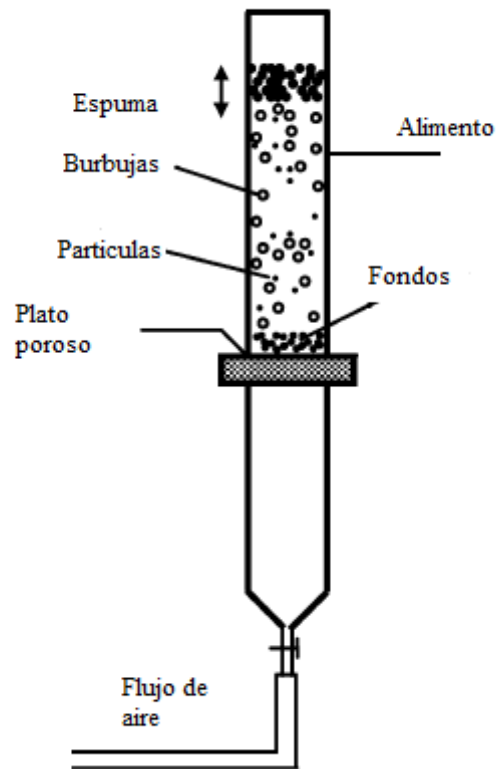
**Figura 2:** Celda de Flotación

### 1.2.3 Flotación continua

La flotación continua es el proceso de mayor aplicación debido a su operación (Matis, Kilos y Kydros, 1993; Huang et. al., 2003a, 2003b, 2003c; Barraza y Piñeres, 2005). El principio de operación es similar a la flotación por lotes y un diagrama esquemático de esta operación se observa en la figura 3.

En la columna, la solución con partículas suspendidas se alimenta continuamente en algún punto de la parte superior del equipo, aire se hace burbujear por la parte interior del mismo y se hace pasar por un plato poroso con el fin de distribuir de manera uniforme las burbujas a través de toda el área transversal de la columna. El contacto a contracorriente

permite la adhesión de las partículas hidrofóbicas a las burbujas, las cuales ascienden y se ubican en la parte superior de la columna donde se depositan en un recipiente donde pueden ser retirarse de manera mecánica.



**Figura 3:** Columna de Flotación

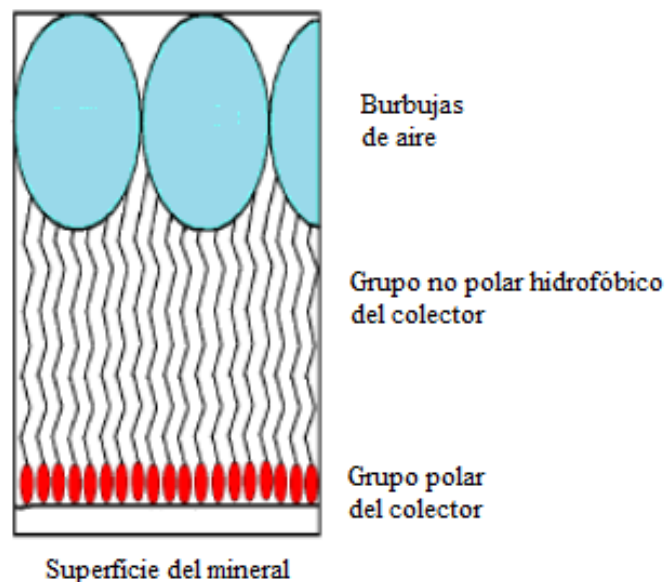
#### **1.2.4 Aditivos**

Para aumentar el rendimiento de la flotación, a la solución alimentada se le adicionan ciertos agentes externos inertes los cuales aumentan de manera selectiva la adhesión de partículas hidrofóbicas, ayudan a formar espuma y estabilizan las condiciones de operación. Dichos aditivos son:

##### **1.2.3.1 Colectores**

Estas sustancias permiten invocar una hidrofobicidad selectiva en la suspensión a tratar. Son típicamente compuestos orgánicos heteropolares, es decir que contienen grupos químicos polares y no polares. En la mayoría

de los casos, el grupo no polar es un radical de hidrocarburo cíclico o de cadena larga, que presenta comportamiento hidrofóbico. El colector debe ser capaz de unirse al sólido por medio de su parte polar, la cual es generalmente un grupo iónico denominado solidofílico. Este grupo al ponerse en contacto con un sitio activo de la superficie del mineral permite su enlazamiento, ya sea por quimisorción o por enlace químico. La parte no polar del colector permite entonces provocar un comportamiento hidrofóbico en el mineral permitiendo que se pueda unir fácilmente a las burbujas ascendentes. La acción del colector puede entenderse de mejor manera en la figura 4.



**Figura 4:** Acción del colector

#### **1.2.3.2 Espumantes**

Los espumantes son otro de los componentes necesarios para una buena flotación. Una vez la partícula de interés está bajo comportamiento hidrofóbico, ésta debe ser capaz de unirse con las burbujas de aire. Aunque es posible que en el inicio las partículas sólidas se unan a las burbujas en un sistema agitado bajo aireación, estas burbujas son inestables y en su ascenso pueden romperse al colisionar con otras burbujas o con las paredes del tanque o columna, además de que es posible que el tamaño de las

burbujas no sea el adecuado para llevar las partículas sólidas hacia la superficie del líquido. Por estas razones se hace necesario adicionar sustancias que promuevan la formación de burbujas estables bajo aireación. Al igual que los colectores, los espumantes poseen una parte polar y otra no polar. La parte no polar hidrofóbica permite que el espumante se oriente hacia la fase gaseosa. Las paredes de las burbujas se fortalecen por la reacción entre el grupo fuertemente polar y el dipolo del agua en la interfase gas-líquido, incrementando la tensión superficial de la burbuja y aumentando su estabilidad.

#### **1.2.3.3 Activadores**

Aumentan la eficiencia de los colectores al formar una superficie del sólido que incrementa la interacción con el colector, el cual por si solo resultaría ineficiente.

#### **1.2.3.4 Depresores**

Forman una cubierta polar sobre algunas superficies para enriquecer su hidrofilicidad cuando no se desea que el colector interactúe con ellas.

#### **1.2.3.5 Dispersantes**

Actúan de manera que se rompan aglomerados de partículas y faciliten la interacción con el colector de mejor manera.

#### **1.2.3.6 Reguladores**

Son utilizados comúnmente para controlar el pH, dado que usualmente la hidrofobicidad del sistema puede afectarse en un determinado intervalo de acidez. Además, puede que algunos espumantes necesiten un determinado valor de pH para mejorar la estabilidad de las burbujas.

## **1.3 CARBÓN INQUEMADO**

### **1.3.1 Definición**

El carbón inquemado es uno de los componentes presentes en las cenizas que se producen tras los procesos de combustión de carbón para la generación de vapor (Huang et. al., 2003a; Rubio et. al., 2007).

La presencia de este carbón en las cenizas de fondo se ha aumentado en años recientes debido a la implementación de sistemas de combustión que operan a temperaturas bajas para evitar la formación de óxidos de nitrógeno y azufre tóxicos ( $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ ). Este carbón se convierte en una pérdida económica apreciable. En 1999 en Europa, de los 55 millones de toneladas de productos de la combustión producidos en las plantas de generación de vapor, el contenido de carbón inquemado fue del 2 al 5%, de esta manera se perdieron entre 1.1 y 2.7 millones de toneladas de carbón (Bartoňova et. al., 2007).

La cantidad de carbón remanente en las cenizas tras la combustión se puede determinar mediante la denominada pérdida en ignición (LOI, por sus siglas en ingles). El uso de estas cenizas en determinadas aplicaciones depende del LOI que posean las cenizas (Por ejemplo, la industria del cemento Portland, exige que las cenizas utilizadas tengan un valor de LOI inferior al 6% según la norma ASTM C618 (Maroto-Valer et. al., 2001)). Las cenizas de fondo obtenidas en plantas poseen un valor de LOI en el rango entre 10-20% (Niewiadomski et. al., 1999; Gray et. al., 2002; Huang et. al., 2003a; Rubio et. al., 2007). Para el caso de la región del Valle del Cauca los sistemas de combustión producen valores de LOI hasta del 45% en cenizas provenientes de carbones no pulverizados (Giraldo y Quiñónez, 2002).

### **1.3.2 Aplicaciones**

Dado que el carbón inquemado presenta una gran área superficial activa debido a que se ha desvolatilizado parcialmente, puede representar una

materia prima para la producción de carbón activado que se usa en el campo ambiental para la eliminación de contaminantes como óxidos de nitrógeno, sulfuros, complejos de mercurio y compuestos orgánicos gaseosos por adsorción (Wang y Wu, 2006). Para utilizar este carbón inquemado, es necesario separarlo de las cenizas de fondo en donde se encuentra. La técnica más utilizada para ello es la flotación (Giraldo y Quiñonez, 2002; Huang et. al., 2003a; Rubio et. al., 2007). Luego de esta primera etapa de separación, el carbón obtenido se activa por métodos físicos y/o químicos. Por su parte las cenizas resultantes son de interés para la industria del cemento, dependiendo del nivel de LOI que posea luego de aplicar la flotación.

## **2. EQUIPOS, MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Los equipos, materiales y procedimientos de los experimentos desarrollados en esta investigación se presentan a continuación.

### **2.1 EQUIPOS**

#### **2.1.1 Celda de flotación**

El equipo de flotación utilizado fue una celda tipo Denver fabricada por METSO la cual tiene la capacidad de operar con celdas de varios volúmenes de trabajo. La figura 5 muestra una fotografía del equipo presente en el laboratorio del grupo de Ciencia y Tecnología del Carbón.



**Figura 5:** Celda de flotación del laboratorio del GCTC

La celda de flotación utilizada consta de un recipiente en acero inoxidable de 1 litro de capacidad para colocar la pulpa a flotar. La celda dispone de un sistema de agitación mecánica que puede regular su velocidad por medio de un tornillo ubicado en la parte superior trasera de la celda. Cabe mencionar que el agitador dispone de partes intercambiables para modificar la forma de agitación de la mezcla. El aire ingresa a la celda por la parte inferior del agitador. El aire entra por succión del sistema, sin embargo, se puede instalar una línea de suministro por medio de un compresor. La entrada de aire puede regularse con una llave, pero para los experimentos llevados a cabo no se determinó el caudal de flujo y la llave se dejó a apertura máxima.

### **2.1.2 Sistema de filtración**

Para la filtración de flotados y fondos se utilizó un sistema de filtración empleando vacío. El sistema se puede observar en la figura 6 y básicamente se compone de una bomba de vacío conectada a un erlenmeyer. El lodo a filtrar se ubica en el embudo Büchner, donde queda la torta una vez se aplica el vacío.



**Figura 6:** Sistema de filtración

### **2.1.3 Horno de secado**

La determinación de humedad de las muestras de fondos y flotados obtenidos en la celda se hizo siguiendo la norma ASTM D-3173-03,

empleando un horno E&Q como se ve en la figura 7. El equipo maneja un rango de temperatura entre 30-300 °C y dispone de panel de control de fácil manipulación.



**Figura 7:** Horno de secado

#### **2.1.4 Mufla**

Para determinar el porcentaje de cenizas se utilizó la mufla del laboratorio. El equipo dispone de un sistema para programar varios ciclos de calentamiento. La determinación de cenizas se hizo siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D-3174-04. La figura 8 muestra una imagen de la mufla del laboratorio.



**Figura 8:** Mufla del laboratorio

## **2.2 MATERIALES**

### **2.2.1 Cenizas de fondo**

Para el estudio desarrollado se contó con 2 muestras de cenizas de fondo provenientes de la caldera de parrilla móvil de la empresa Argos S.A. Las muestras difieren en el tiempo de recolección. Para este estudio se mezclaron ambas muestras para homogenizar la muestra.

### **2.2.2 Colector**

Se evaluaron 2 colectores distintos en este estudio, kerosene y fuel oil. En el Anexo 1 se encuentra una tabla de propiedades fisico-químicas para estas sustancias. Estos compuestos son de naturaleza comercial.

### **2.2.3 Espumante**

Al igual que en el caso del colector, en este estudio se utilizaron 2 tipos de espumantes, Aerofroth 65 y MIBC. Estos reactivos se disponen en grado reactivo y sus propiedades se encuentran en el Anexo 1.

## **2.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Con el propósito de tener una uniformidad en las determinaciones experimentales se estableció un protocolo experimental que pueda seguirse de manera clara y sencilla. En el anexo 2 se encuentra un diagrama de flujo de dicho protocolo establecido.

De manera detallada dicho procedimiento Experimental fue:

- Acondicionamiento de la muestra: Una vez determinadas las condiciones de operación del ensayo experimental, la cantidad requerida de muestra se mezcla con 750 ml de agua para permitir una primera humectación de la misma. Esta humectación se hace fuera de la celda durante un tiempo no menor a 30 minutos. Pasado este tiempo, la muestra se añade a la celda de flotación, se añade la cantidad faltante de agua para completar el valor requerido de porcentaje de pulpa y sin permitir el flujo de aire se inicia el mezclado con una velocidad de agitación de 1100 RPM para homogenizar la muestra.
- Adición del Colector: Pasada la primera homogenización, la cantidad requerida de espumante es adicionada a la celda por medio de una jeringa, Asegurándose de que la punta de la aguja de la jeringa esté en contacto con la muestra. Se debe permitir un tiempo de homogenización de al menos 3 minutos.
- Adición del Espumante: Luego del tiempo de espera, se añade la cantidad requerida de Espumante de una forma similar a la manera en que se adicionó el colector. De nuevo se permite una homogenización de la muestra de 3 minutos.
- Flotación de la muestra: Tras añadir colector y espumante, y luego de permitir una correcta homogenización, se ajusta la velocidad de agitación al valor deseado y se abre la llave que permite el paso de aire. La espuma formada se retira de la celda con la ayuda de una paleta y se va recogiendo en un recipiente. Durante este tiempo pequeñas cantidades de agua son adicionadas para lavar las paredes de la celda. La recolección de la espuma formada se hace por un tiempo de al menos 5 minutos, tiempo más que suficiente para permitir la flotación de toda la materia orgánica. Luego de los 5 minutos, se apaga el motor del agitador, y el fondo se recoge en otro recipiente. La celda debe lavarse muy bien para impedir que material presente pueda interferir en el siguiente ensayo.

- Filtrado de los productos de flotación: los flotados y fondos se filtran para eliminar la mayor cantidad de agua posible. Para ello se utiliza un sistema de flotación al vacío mencionado en el punto 2.1.2. Las tortas obtenidas se dejan secar libremente durante un tiempo no menor a 48 horas. Pasado este tiempo se pesan ambos productos.
- Determinación de cenizas y humedad: Finalmente, a los flotados y los fondos se les realiza un análisis de humedad y cenizas siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D-3173-03 para la determinación de Humedad y la norma ASTM D-3174-04 para determinar el contenido de cenizas.

## **2.4 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

El desarrollo experimental de este trabajo de investigación se dividió en 2 etapas.

### **2.4.1 Determinación de la mejor pareja Colector – Espumante**

En esta primera fase se evaluó la pareja colector – Espumante que produjo la mejor separación de materia mineral con el mejor rendimiento. Es importante notar que en esta investigación el producto de interés lo representa el fondo de la flotación.

Dado que se tienen dos colectores (fuel oil y kerosene) y dos espumantes (MIBC y Aerofroth 65), se realizaron ensayos experimentales con cada pareja resultante, las cuales se presentan en la tabla 1. Los espumantes y colectores estudiados han sido utilizados de manera favorable en otras investigaciones (Piñeres, 2008) para el beneficio de carbón y por tal razón se seleccionaron.

La variable de respuesta para seleccionar la pareja Colector – Espumante más favorable fue el contenido de cenizas en los fondos y el rendimiento de fondos, definido como:

$$R_F = \frac{m_F}{m_0} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

$R_F$  = Rendimiento de fondos.

$m_F$  = Masa de los fondos.

$m_0$  = Masa Alimentada.

**Tabla 1.** Selección de parejas Colector - Espumante

|          |          | Espumante       |                      |
|----------|----------|-----------------|----------------------|
|          |          | MIBC            | Aerofroth 65         |
| Colector | Kerosene | Kerosene - MIBC | Kerosene – Aerofroth |
|          | Fuel Oil | Fuel Oil - MIBC | Fuel Oil - Aerofroth |

Las condiciones de operación utilizadas en esta etapa se seleccionaron de acuerdo a condiciones establecidas en trabajos de flotación aplicada a la separación de cenizas de fondo (Sahbaz et. al, 2008; Demir et. al., 2008 Uçurum, 2009). Dichas condiciones fueron:

Concentración de Colector: 3000 g/Ton

Concentración de Espumante: 1000 g/Ton

Densidad de pulpa: 10%

Velocidad de agitación: 1500 RPM

#### 2.4.2 Evaluación condiciones de operación

Una vez seleccionada la pareja Colector – Espumante, se analizaron diversas variables de operación y su efecto en la operación. Dichas variables fueron: concentración de colector, concentración de espumante, densidad de la pulpa y velocidad de agitación. Esas variables se seleccionaron por

considerarse críticas en la operación de la flotación (Sahbaz et. al., 2008; Uçurum, 2009).

Cabe resaltar que cada variable de operación fue analizada por separado, donde se evaluaron 5 valores de operación, el valor utilizado en la selección de colector y espumante, 2 valores por encima de dicho valor y 2 valores por debajo. Para las condiciones de operación que no estaban bajo evaluación se tomaron los valores centrales utilizados en la selección del colector y el espumante. Esta selección de valores de operación se hizo de acuerdo a lo observado en trabajos sobre el tema (Sahbaz et. al, 2008). En la tabla 2 se presentan las condiciones de operación utilizadas en este trabajo

**Tabla 2.** Condiciones de operación

| Variable de Operación                 | Valor |      |             |      |      |
|---------------------------------------|-------|------|-------------|------|------|
| Concentración de Colector<br>(g/Ton)  | 1000  | 2000 | <b>3000</b> | 4000 | 5000 |
| Concentración de Espumante<br>(g/Ton) | 600   | 800  | <b>1000</b> | 1200 | 1400 |
| Densidad de Pulpa<br>(%)              | 5     | 7,5  | <b>10</b>   | 12,5 | 15   |
| Velocidad de Agitación<br>(RPM)       | 1100  | 1300 | <b>1500</b> | 1700 | 1900 |

### 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

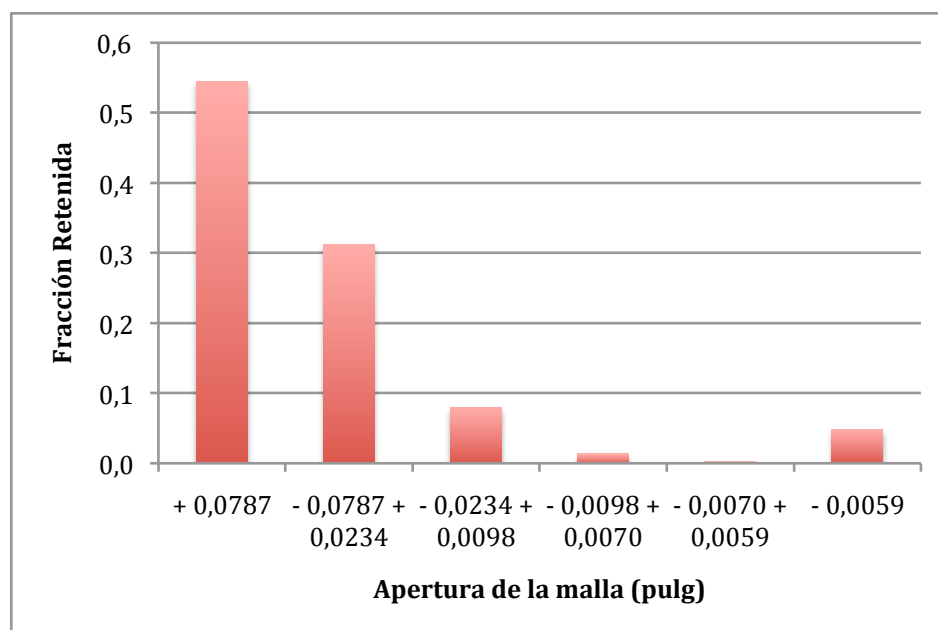
#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS DE FONDO

En la tabla 3 se presenta el análisis próximo de las cenizas de fondo. Cabe mencionar que el poder calorífico de la muestra no se determinó dada la alta concentración de ceniza y baja concentración de materia orgánica representada por el carbón fijo y materia volátil.

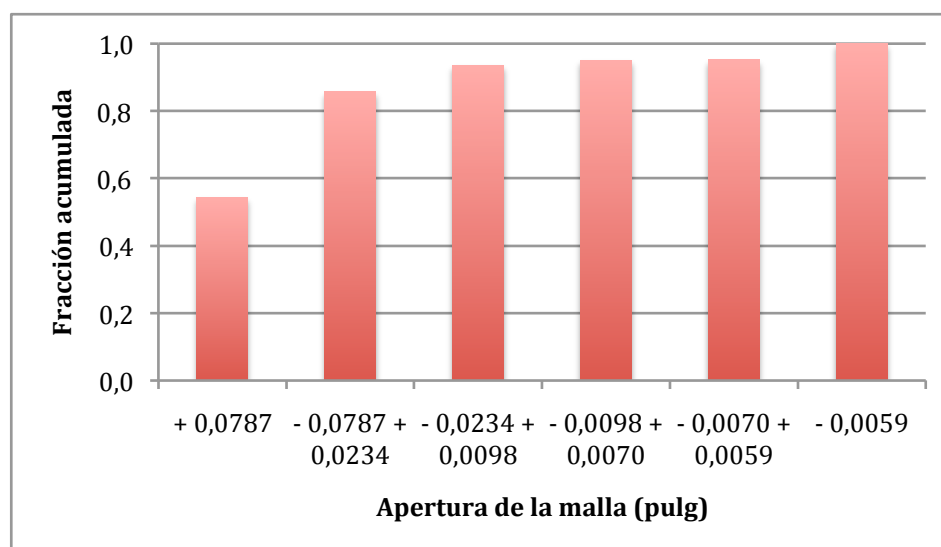
**Tabla 3.** Análisis Próximo de las cenizas de fondo

| <b>Análisis</b>         | <b>Seco al aire</b> | <b>Base seca</b> |
|-------------------------|---------------------|------------------|
| Humedad (% p/p)         | 0.55                |                  |
| Materia Volátil (% p/p) | 2.86                | 2.88             |
| Cenizas (% p/p)         | 91.80               | 92.31            |
| Carbón Fijo (% p/p)     | 4.79                | 4.82             |
| Azufre (% p/p)          | 0.29                | 0.29             |

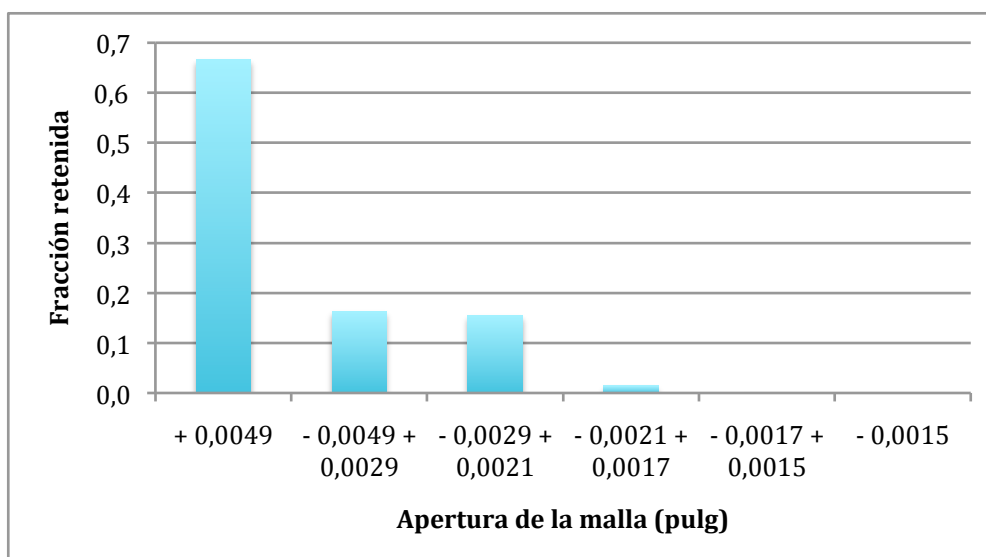
En las figuras 9 y 10 se muestra el análisis granulométrico retenido y acumulado de las cenizas de fondo antes de la molienda. Se observa que las cenizas de fondo son en más del 60% un material particulado grueso con un tamaño superior a la décima de pulgada (retenido en la malla 10). En las figuras 11 y 12 se presenta la distribución de tamaño de partícula para el material una vez molido donde se observa que el 98% tiene un tamaño no menor a 0,0021 pulgadas (retenido en la malla 270).



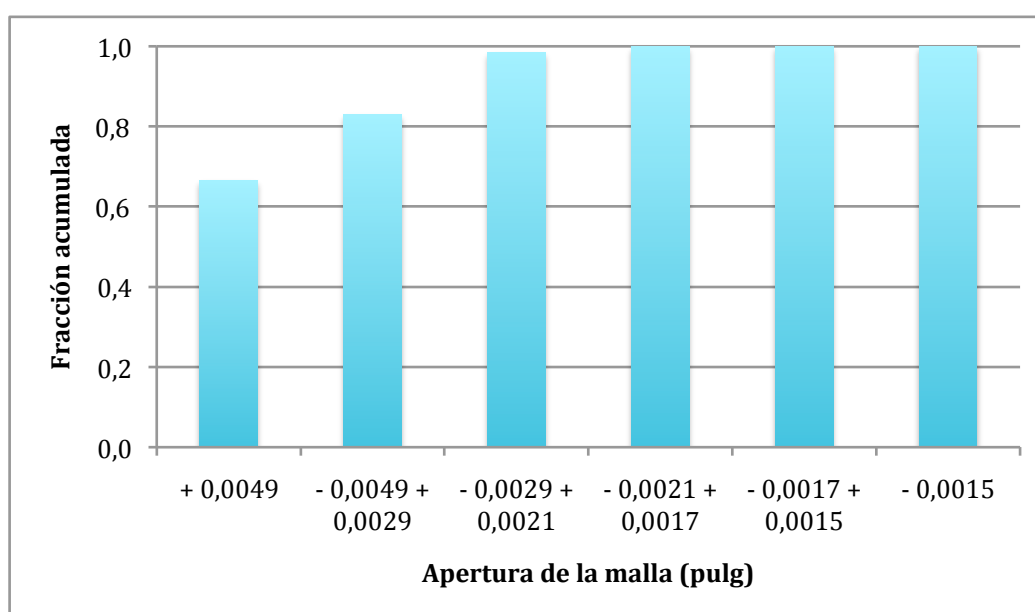
**Figura 9:** Análisis granulométrico para las cenizas de fondo



**Figura 10:** Análisis granulométrico acumulado de las cenizas de fondo



**Figura 11:** Análisis granulométrico de las cenizas de fondo molidas



**Figura 12:** Análisis granulométrico acumulado de las cenizas de fondo molidas

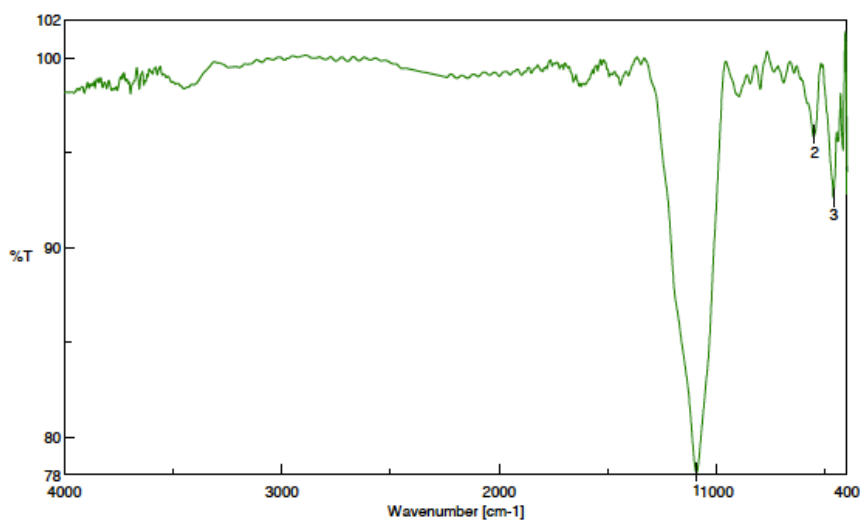
En la tabla 4 se presenta el estudio de liberación de materia mineral para las cenizas molidas. La fracción más alta corresponde al retenido en la malla 125 que tiene un tamaño de partícula de 0,0049 pulgadas, para este punto el porcentaje de cenizas resulta ser el máximo observado en el estudio, en

adelante, Se observa que el porcentaje de cenizas disminuye a medida que disminuye el tamaño de partícula, situación contrario a lo que se espera puesto que la disminución del tamaño de partícula facilita la sedimentación de la materia mineral.

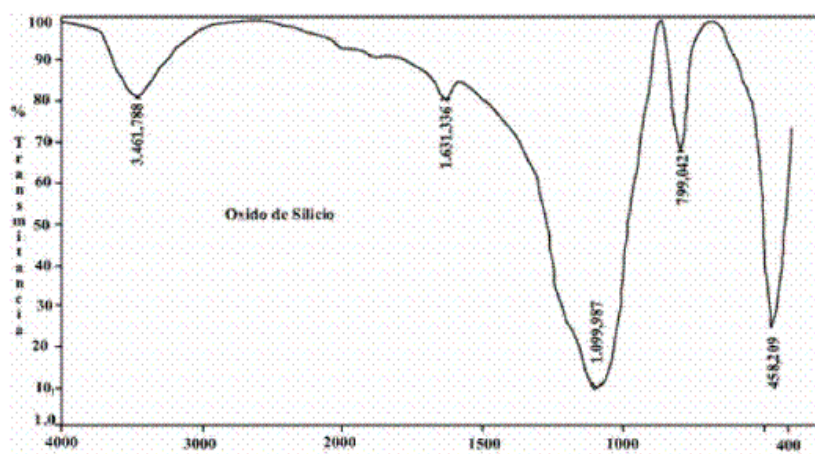
**Tabla 4.** Análisis de liberación de materia mineral

| <b>Muestra retenida en la malla</b> | <b>Fracción retenida</b> | <b>Cenizas (% p/p)</b> | <b>Humedad (% p/p)</b> | <b>Cenizas en base seca (% p/p)</b> |
|-------------------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 125                                 | 0,666                    | 97,14                  | 0,09                   | 97,23                               |
| 200                                 | 0,163                    | 93,89                  | 0,23                   | 94,10                               |
| 270                                 | 0,155                    | 91,83                  | 0,32                   | 92,12                               |
| 325                                 | 0,015                    | 92,27                  | 0,40                   | 92,63                               |

También a las cenizas de fondo se les realizó un análisis de espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier para observar la composición de grupos funcionales orgánicos e inorgánicos de la muestra. El espectro obtenido se presenta en la figura 13. Para propósitos comparativos, en la figura 14 se presenta el espectro de una muestra de óxido de silicio, el cual es uno de los compuestos que favorece el carácter de puzolanicidad de un material. Los picos observados a una longitud de onda de 450 y 1100  $\text{cm}^{-1}$  permiten deducir que las cenizas con las que se van a realizar los ensayos de flotación poseen dicho óxido y por lo tanto se presume que podrían poseer alguna capacidad puzolánica.



**Figura 13:** Espectro de FTIR para las cenizas de fondo



**Figura 14:** Espectro de FTIR para el óxido de silicio

### 3.2 SELECCIÓN DE LA COMBINACIÓN COLECTOR - ESPUMANTE

En la tabla 5 se presentan los resultados de porcentaje de las cenizas de fondo en la celda y el rendimiento promedio de fondos para cada una de las combinaciones colector – espumante estudiadas. Las condiciones de operación fueron:

Concentración de Colector: 3000 g/Ton

Concentración de Espumante: 1000 g/Ton

Densidad de pulpa: 10%

Velocidad de agitación: 1500 RPM

**Tabla 5.** Cenizas y rendimientos en función de la combinación colector - espumante

| <b>Colector - Espumante</b> | <b>Cenizas en fondos</b> | <b>Rendimiento fondos</b> |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|
|                             | <b>(%, p/p)</b>          | <b>(%, p/p)</b>           |
| Kerosene – Aerofroth        | 98.8                     | 59.1                      |
| Fuel oil – Aerofroth        | 98.8                     | 58.2                      |
| Kerosene – MIBC             | 98.7                     | 65.0                      |
| Fuel oil - MIBC             | 98.8                     | 63.5                      |

Puede notarse claramente que las cenizas separadas en los fondos de la celda en todos los casos han llegado a valores del orden del 98%. Un valor elevado para el contenido de cenizas el cual al mismo tiempo resulta deseado según el requerimiento necesario para utilizar las cenizas como materia prima en la producción de cemento

Mientras el porcentaje de cenizas mantiene un valor similar en todos los casos estudiados, el rendimiento presenta una variación apreciable para cada combinación estudiada. Se encuentra que el MIBC, combinado con los dos colectores, presenta mayores rendimientos en la celda de flotación en comparación con el Aerofroth 65. Por su parte, observando el desempeño del colector se encuentra que el kerosene produjo un mejor comportamiento en términos de rendimiento que el fuel oil, aunque la diferencia no fue tan apreciable como en el caso del espumante. Por esta razón para los ensayos posteriores se utilizó como colector y espumante el fuel oil y el MIBC respectivamente.

### **3.3 EVALUACIÓN CONDICIONES DE OPERACIÓN**

#### **3.3.1 Efecto del colector**

En la flotación de carbones, el colector es el reactivo que aumenta la hidrofobicidad del mismo, es decir, su capacidad de no formar asociación con el agua, al suministrar al sistema puntos de contacto que permitan a las moléculas adherirse con mayor fuerza.

Por otro lado, la ceniza de fondo representa un producto de la combustión que se encuentra altamente oxidado, y por lo tanto la condición hidrofóbica es relativamente baja. Por este motivo, una mayor cantidad de colector agregado podría producir mayor cantidad de flotados, disminuyendo la cantidad de fondo, lo cual afecta negativamente su rendimiento. En la tabla 6 se observan los resultados obtenidos para las diferentes concentraciones de colector utilizadas. Las restantes condiciones de operación fueron 1000g/Ton de Aerofroth 65, 1300RPM y 10% de pulpa alimentada.

Tal como se observa en la Tabla 6, un aumento de la concentración de colector produce un incremento en el porcentaje de cenizas de fondo de la celda, lo cual está acorde con lo esperado, debido a que un aumento de la cantidad de colector, aumenta la hidrofobicidad del material a flotar y se retira mayor cantidad de inquemados. No obstante, a medida que la cantidad de colector incrementa, el rendimiento de la corriente de fondo de la celda decrece, llegando a valores del 56.4% p/p, tal como se esperaba teóricamente.

#### **3.3.2 Efecto del espumante**

La función del espumante en la flotación consiste en modificar la tensión superficial del líquido, permitiendo que las burbujas que se forman sean de menor tamaño y de mayor estabilidad, lo cual favorece la adhesión de las partículas hidrofóbicas.

**Tabla 6.** Efecto de la concentración de colector sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda

| <b>Dosis Colector</b><br><b>(g/ton)</b> | <b>Cenizas</b><br><b>(%, p/p)</b> | <b>Rendimiento fondos</b><br><b>(%, p/p)</b> |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|
| 1000                                    | 98.1                              | 65.1                                         |
| 2000                                    | 98.4                              | 65.4                                         |
| 3000                                    | 98.7                              | 62.8                                         |
| 4000                                    | 98.7                              | 58.7                                         |
| 5000                                    | 98.7                              | 56.4                                         |

Teóricamente un aumento en la dosis de espumante permite una mejor separación de la materia orgánica y un enriquecimiento en el contenido de cenizas de los fondos de la celda, afectando los rendimientos de fondo al permitir que las partículas de materia mineral se adhieran a las burbujas. En la tabla 7 se presentan los resultados de ceniza y rendimiento de fondo obtenidos experimentalmente para los diferentes valores de concentración de espumante analizados, mientras que la concentración de colector se mantuvo a 3000g/ton, con una densidad de pulpa del 10% y 1300 RPM en el agitador. Se puede observar que no hay una tendencia de los rendimientos de fondo que pueda confirmar lo predicho en la teoría.

Se observa en la tabla 7 que el contenido de cenizas de fondos de la celda sigue siendo superior al 98% y permanece casi constante a todas las condiciones de operación. El rendimiento por otro lado varía entre 62.5% y 65.7%, sin mostrar un comportamiento definido con el incremento en la concentración de espumante. Por lo tanto, se puede establecer que el rendimiento de la operación no es sensible a la cantidad de espumante que haya presente.

**Tabla 7.** Efecto de la concentración de espumante sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda

| <b>Dosis Espumante<br/>(g/ton)</b> | <b>Cenizas<br/>(%, p/p)</b> | <b>Rendimiento fondos<br/>(%, p/p)</b> |
|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| 600                                | 98.7                        | 65.6                                   |
| 800                                | 98.6                        | 62.8                                   |
| 1000                               | 98.7                        | 65.7                                   |
| 1200                               | 98.5                        | 65.0                                   |
| 1400                               | 98.5                        | 62.5                                   |

### 3.3.3 Efecto del porcentaje de sólidos en la mezcla

El contenido de sólidos puede llegar a representar un factor crítico en una flotación. Al aumentarse el porcentaje de sólidos el contenido de cenizas y el rendimiento se afectan debido a que tanto el colector como el espumante perderían poder de acción ya que habría una mayor cantidad de material particulado sobre el cual operar.

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos para diferentes concentraciones de sólidos en la mezcla. Las concentraciones de colector y espumante fueron 3000 g/ton y 1000 g/ton respectivamente y la velocidad de agitación fue de 1300 RPM.

**Tabla 8.** Efecto del porcentaje de sólidos sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda

| <b>Sólidos en la mezcla<br/>(%, p/p)</b> | <b>Cenizas<br/>(%, p/p)</b> | <b>Rendimiento fondos<br/>(%, p/p)</b> |
|------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| 5.0                                      | 98.5                        | 63.8                                   |
| 7.5                                      | 98.5                        | 62.7                                   |
| 10.0                                     | 98.6                        | 62.7                                   |
| 12.5                                     | 98.5                        | 59.5                                   |
| 15.0                                     | 98.6                        | 56.4                                   |

Tal como se observa en la tabla 8, al igual en lo ocurrido con los efectos anteriores, las cenizas de fondo de la celda alcanzan un valor prácticamente estabilizado en 98.5% mostrando que la concentración de sólidos utilizada no afectó la separación de materia mineral oxidada. Sin embargo, el rendimiento de fondos de la celda presentan disminución a medida que aumenta la concentración de sólidos. Esto significa, que a mayores cantidades de contenido de sólidos, existe mayor flotación de materia orgánica y posiblemente de materia mineral que adquiere un comportamiento hidrofóbico, afectando directamente el rendimiento de la operación. Este comportamiento está de acuerdo con los resultados de (Sahbaz, et. al. 2008.), quienes mostraron que los rendimientos de los fondos decrecen con el incremento del contenido de sólidos.

#### **3.3.4 Efecto de la velocidad de agitación**

La agitación es uno de los factores más interesantes en la flotación en celda. Una buena agitación permite que la mezcla a separar posea buen grado de homogeneidad. Por otro lado, permitirá que haya un contacto apropiado entre las burbujas formadas y las partículas hidrofóbicas, favoreciendo la selectividad y por lo tanto, el rendimiento de flotados durante la operación. Sin embargo, una velocidad de agitación muy elevada puede tener un efecto negativo en la operación al ocasionar que las burbujas formadas se rompan o disminuyan su tamaño y por lo tanto impidan una buena adhesión.

En la tabla 9 se presentan los resultados de cenizas y rendimiento de fondos de la celda al variar la velocidad de agitación. La concentración de colector fue de 3000g/ton, la concentración de espumante fue 1000 g/ton y el porcentaje de sólidos fue del 10%. para esta variable. Al igual que en todas las variables analizadas anteriormente, se nota que el contenido de cenizas de los fondos de la celda, para todas las RPM utilizadas, fueron superiores al 98% p/p. No obstante, es claro observar que esta variable es la que presenta mayor diferencia en cuanto a los rendimientos obtenidos. De un

56.3% a 1900 RPM se llegó a un 71.8% de rendimiento trabajando a 1100 RPM mostrando que entre menor sea la velocidad de agitación se obtendrán mejores rendimientos al no favorecer la flotación de materia mineral de interés. Probablemente, haber usado mayor RPM ocasionó mayor arrastre (*entrainment*) de materia mineral oxidada hacia el flotado y por ende menor rendimiento de la corriente de fondo.

**Tabla 9.** Efecto de la velocidad de agitación sobre cenizas y rendimiento de fondos de la celda

| <b>Velocidad Agitación</b> | <b>Cenizas</b>  | <b>Rendimiento fondos</b> |
|----------------------------|-----------------|---------------------------|
| <b>(RPM)</b>               | <b>(%, p/p)</b> | <b>(% p/p)</b>            |
| 1100                       | 98.4            | 71.8                      |
| 1300                       | 98.6            | 65.7                      |
| 1500                       | 98.7            | 62.8                      |
| 1700                       | 98.6            | 58.3                      |
| 1900                       | 98.7            | 56.3                      |

### 3.3.5 Operación bajo mejores condiciones de operación obtenidas

Una vez analizadas cada una de las anteriores variables de operación, se seleccionaron las condiciones de operación bajo las cuales se obtuvo el mejor desempeño y se realizaron 3 ensayos para evaluar el comportamiento obtenido. Las condiciones de operación fueron:

- Colector: 1000 g/ton.
- Espumante: 600 g/ton.
- Porcentaje de sólidos: 5%
- Velocidad de agitación: 1100 RPM

Puede observarse que dichas condiciones corresponden a los valores mínimos estudiados para cada variable de operación. Para el caso de la

cantidad de colector, el porcentaje de sólidos y de la velocidad de agitación la selección de estos valores se debe a que al analizar cada variable se encontró que los mejores rendimientos se obtuvieron con los valores de operación más bajos.

En el caso de la cantidad de espumante el valor de 600 g/ton se seleccionó porque sería un valor de interés económico si se llevara la operación a escala de planta piloto o industrial.

Una vez fijadas dichas condiciones, los resultados de la flotación se presentan en la tabla 10.

**Tabla 10.** Operación bajo mejores condiciones de operación obtenidas

| <b>Ensayo</b> | <b>Cenizas<br/>(%, p/p)</b> | <b>Rendimiento fondos<br/>(%, p/p)</b> |
|---------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| 1             | 98.3                        | 76.72                                  |
| 2             | 98.2                        | 75.89                                  |
| 3             | 98.1                        | 75.08                                  |

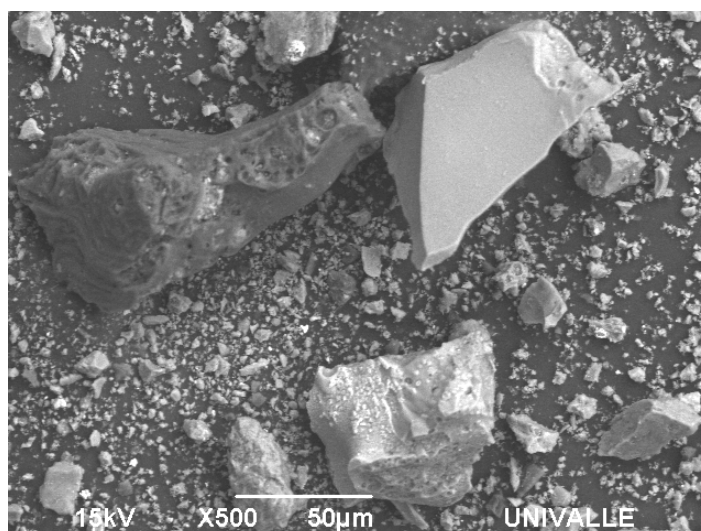
Puede observarse que bajo estas condiciones de operación se obtuvo una concentración de cenizas en el fondo de la celda del 98.2%, la cual cumple con el valor deseado para aplicarse en el proceso de manufactura del cemento. Los rendimientos por su parte fueron los mejores obtenidos en todo el estudio alcanzando un promedio del 75.9%, situación que refuerza y le da validez a la selección de las condiciones de operación.

### 3.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Las Muestras de cenizas de fondo sin procesar (alimento) y procesadas en la celda de flotación se sometieron a un análisis de microscopía electrónica de barrido (MEB) con el propósito de evaluar su composición antes y luego de

la operación de flotación. Las imágenes obtenidas se muestran en las figuras 15 y 16.

La figura 15 muestra una imagen de las cenizas de fondo sin tratar. Puede notarse claramente 3 fragmentos de gran tamaño y otros de tamaño medio y pequeño. Los fragmentos grandes se analizaron para determinar su composición la cual se presenta en la tabla 11. Cualitativamente se puede observar que el fragmento de la parte superior izquierda (fragmento 3) de la imagen posee un color oscuro diferente al de las demás partículas. El análisis de composición realizado así lo demuestra ya que se encuentra que dicho material posee un porcentaje de carbono superior al 76% mientras que el contenido de oxígeno no pasa del 19%.



**Figura 15:** Imagen de microscopía de cenizas de fondo sin procesar en celda

**Tabla 11.** Composición porcentual de material presente en cenizas de fondo sin procesar en celda

| Elemento | Composición (% p/p) |               |                |
|----------|---------------------|---------------|----------------|
|          | Fragmento 1*        | Fragmento 2** | Fragmento 3*** |
| C        | 13.17               | 17.70         | 76.60          |
| O        | 57.10               | 53.40         | 18.16          |
| Al       | 9.56                | 6.54          | 1.54           |
| Si       | 13.71               | 16.96         | 2.39           |

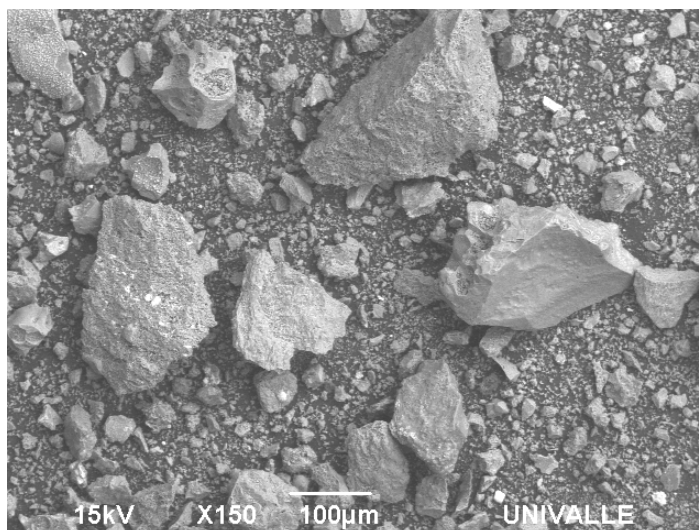
|    |      |      |      |
|----|------|------|------|
| S  | 0    | 0    | 0.88 |
| Zn | 0    | 0    | 0.44 |
| Na | 0.80 | 0.28 | 0    |
| Mg | 0    | 0.40 | 0    |
| K  | 0.47 | 0.96 | 0    |
| Fe | 4.48 | 3.75 | 0    |
| Ca | 0.21 | 0    | 0    |
| Ti | 0.49 | 0    | 0    |

(\*) Fragmento correspondiente a la partícula de la parte inferior de la figura 13.

(\*\*) Fragmento correspondiente a la partícula de la parte superior derecha de la figura 13.

(\*\*\*) Fragmento correspondiente a la partícula de la parte sup. izquierda de la figura 13.

Los otros fragmentos a su vez muestran un alto contenido de oxígeno, silicio y aluminio, demostrando así la presencia de aluminosilicatos en las cenizas de fondo por lo cual se puede concluir que estas partículas poseen puzolanicidad de interés.



**Figura 16:** Imagen de microscopía de cenizas de fondo procesadas en celda

La figura 16 presenta una imagen de las cenizas de fondo procesadas en la celda de flotación, específicamente de los fondos de flotación, al operar a las condiciones de operación mínimas cuyos resultados fueron presentados en el numeral 3.3.5.

Puede observarse de una manera similar que hay presencia de material de diferentes tamaños pero contrario a lo observado en las cenizas de fondo sin tratar, no se observa que haya material orgánico apreciable. Esto puede indicar que la flotación efectivamente eliminó la mayoría de carbón inquemado presente en la muestra original.

En la tabla 12 se presenta el análisis de composición efectuado a 3 distintas partículas de la figura 16. Dicho análisis muestra que en los 3 fragmentos analizados, los principales compuestos presentes son oxígeno, silicio y aluminio, además de carbono y hierro en menor medida. Esto muestra nuevamente que las partículas que permanecen luego de la flotación poseen características puzolánicas que pueden ser de interés en la industria cementera.

**Tabla 12.** Composición porcentual de material presente en cenizas de fondo tratadas con flotación

| Elemento | Composición (% Peso) |               |                |
|----------|----------------------|---------------|----------------|
|          | Fragmento 1*         | Fragmento 2** | Fragmento 3*** |
| C        | 8.62                 | 7.34          | 15.23          |
| O        | 39.75                | 52.90         | 51.71          |
| Na       | 0.37                 | 0.49          | 0.32           |
| Al       | 17.62                | 14.90         | 7.14           |
| Si       | 20.41                | 21.32         | 21.31          |
| S        | 0.91                 | 0             | 0              |
| K        | 1.30                 | 0.40          | 1.03           |
| Ca       | 0.76                 | 0             | 0              |
| Ti       | 1.08                 | 0.45          | 0              |
| Fe       | 9.16                 | 0.36          | 3.26           |

(\*) Fragmento correspondiente a la partícula de la parte central izquierda de la figura 14.

(\*\*) Fragmento correspondiente a la partícula de la parte superior centro de la figura 14.

(\*\*\*) Fragmento correspondiente a la partícula de la parte inferior centro de la figura 14.

Los informes de las imágenes estudiadas con microscopía electrónica de barrido se presentan en el anexo 1.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **CONCLUSIONES**

En este trabajo de investigación se ha utilizado la flotación por lotes para eliminar la mayor cantidad posible de carbón inquemado y cualquier otra materia orgánica presente en cenizas de fondo provenientes de un sistema de combustión de la región del Valle del Cauca.

De acuerdo al estudio de caracterización se observó que las cenizas analizadas poseen óxido de silicio en su composición, compuesto que le confiere al material un atractivo poder puzolánico para que las cenizas puedan utilizarse en la industria del cemento como materia prima para su elaboración.

Se encontró que el contenido de cenizas que inicialmente era del 92.31% ha sido llevado a un 98% evaluado en el fondo de la celda de flotación. Este resultado resulta de bastante interés dado que la industria del cemento exige que las cenizas que se utilicen como materia prima deben tener un porcentaje de cenizas superior al 97% para garantizar un producto de óptima calidad.

El estudio del desempeño de la flotación con distintos colectores y espumantes permite determinar que para una buena flotación de materia orgánica con un buen rendimiento de separación en los fondos se debe utilizar el kerosene como colector y el Metil Isobutil Carbinol como espumante. Estos compuestos se utilizan en la flotación de materiales carbonáceos con éxito y en este estudio tuvieron un buen comportamiento.

El análisis del efecto de diversas variables de operación permite concluir que parámetros como dosis de colector, velocidad de agitación y porcentaje de sólidos en la mezcla alimentada afectan de manera inversa el rendimiento, es decir, entre

menor sea su presencia en la operación, se van a obtener los mejores rendimientos con respecto al producto de fondo.

Con respecto a la cantidad de espumante no se pudo determinar un efecto claro asociado al rendimiento de la flotación. Posiblemente sea necesario un estudio más a fondo al respecto para poder determinar cuál sea el efecto verdadero de esta variable de operación en el rendimiento.

Se encontró que realizando una flotación con los valores mínimos establecidos para las variables de operación analizadas el producto de fondos de la flotación contiene un 98.2% de cenizas y el rendimiento de la separación alcanza un porcentaje del 75.9% el cual fue el valor máximo obtenido en todo el estudio. Este dato resulta importante a la hora de estudiar la flotación de cenizas de fondo a nivel de planta piloto.

Fotografías obtenidas mediante microscopía SEM demuestran que el producto de fondos obtenido en la flotación no posee material orgánico presente en el producto original, de esta manera puede concluirse que la técnica de flotación por lotes es efectiva para eliminar el carbón inquemado que pueda estar presente en las cenizas de fondo de caldera.

## **RECOMENDACIONES**

Los resultados de este trabajo de investigación abren una puerta para que se desarrolle una serie de estudios posteriores que permitan complementar y avanzar más en la implementación de la flotación como operación de separación para las cenizas de fondo de caldera que puedan utilizarse como materia prima en la industria del cemento. Entre las recomendaciones de mayor importancia se tienen:

- Dado que varias plantas papeleras de la región utilizan mezclas de carbón con bagazo de caña y que las cenizas de fondo que producen pueden superar las 1000 toneladas al mes, resulta importante estudiar cual será el desempeño de la flotación en celda sobre este tipo de material que debe

poseer una morfología y composición diferente al material estudiado en esta investigación.

- Es de importancia comprender mejor el fenómeno de la flotación de las cenizas de fondo desde el punto de vista cinético. Por lo tanto se hace necesario que se realice un estudio que permita profundizar en este tema.
- Ya se ha encontrado que la flotación por lotes resulta atractiva para la separación del carbón inquemado en las cenizas de fondo de caldera. No obstante el presente de la técnica de flotación a nivel industrial se lleva a cabo en equipos de operación continua los cuales disminuyen los tiempos de operación y por lo tanto tienen un efecto económico. Por este motivo es de interés desarrollar nuevos estudios que estudien el comportamiento bajo condiciones de operación continua.
- En el presente estudio se encontró que la cantidad de espumante adicionado no tuvo un efecto claro sobre el rendimiento de la operación. Sin embargo la acción del espumante en la flotación resulta crítica en los estudios de flotación. Por ello es recomendable que se realice un estudio que permita determinar cual es el verdadero efecto que puede tener la cantidad de espumante adicionada.
- Este estudio se concentró en el análisis de cada variable de operación vista por separado, pero no se analizó el efecto que puedan tener las distintas interacciones que puedan tener dichas variables sobre la operación y el rendimiento de la misma. Por ello se sugiere que se realice un análisis estadístico que permita aclarar el posible efecto de dichas interacciones.

## BIBLIOGRAFÍA

**Barraza J., Piñeres J.** (2005). A pilot-scale flotation column to produce beneficiated coal fractions having high concentration of vitrinite maceral. *Fuel*, 84, 1879-1883.

**Bartoňova L., Klika Z., Spears D. A.,** (2007). Characterization of unburned carbon from ash after bituminous coal and lignite combustion in CFBs. *Fuel*, 86 455-463

**Demir U., Yamik A., Kelebek S., Oteyaka B., Sahbaz O.** (2008). Characterization and column flotation of bottom ashes from Tuncbilek power plant. *Fuel*, 87, 666-672.

**Finch J., Dobby G.,** (1990). *Flotation column*, Pergamon Press, Oxford.

**Giraldo E., Quiñonez I.** (2002). Inquemados de carbón en cenizas volantes como materia prima para producir carbón activado. Tesis de pregrado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle.

**Gray M. L., Champagne K., Soong Y., Killmeyer R., Maroto-Valer M., Andrésen J., Ciocco M., Zandhuis P.** (2002) Physical cleaning of high carbon fly ash. *Fuel Processing Technology*, V 76, pp 11-21.

**Huang Y., Takaoka M., Takeda N.,** (2003a). Removal of unburned carbon from municipal solid waste fly ash by column flotation. *Waste Management*, 23, 307-313.

**Huang Y., Takaoka M., Takeda N., Oshita K.,** (2003b). Polychlorinated biphenyls removal from weathered municipal solid waste incineration fly ash by collector-assisted column flotation. *Journal of hazardous materials B*, 100, 259-270.

**Huang Y., Takaoka M., Takeda N.,** (2003c) Chlorobenzenes removal from municipal solid waste incineration fly ash by surfactant-assisted column flotation. *Chemosphere*, 52, 735-743.

**Kurama H., Kaya M.** (2008) Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture. *Construction and Building Materials*. 22, 1922-1928.

**Leja J.** (1982). *Surface chemistry of froth flotation*. Plenum Press, New York.

**Manz O. E.** (1997). Worldwide production of coal ash and utilization in concrete and other products. *Fuel* 76 (8), 691-696.

**Maroto-Valer** M. M., Taulbee D. N., Hower J. C. (2001). Characterization of differing forms of unburned carbon present in fly ash separated by density gradient centrifugation. *Fuel*, 80, 795-800.

**Matis** K.A., Gallios G. P., Kydros K. A. (1993). Separation of fines by flotation techniques. *Separation Technology*, 3, 76-90.

**Niewiadomski** M., Hupka J., Bokotko R., Miller J. (1999). Recovery of coke fines from fly ash by air sparged hydrocyclone flotation. *Fuel*, 78, 161-168

**Paul** M., Sandström Å., Paul J. (2004). Prospects for cleaning ash in the acidic effluent from bioleaching of sulfidic concentrates. *Journal of hazardous materials*, 106B, 39-54.

**Piñeres** J.L. (2008). Fenómenos superficiales y cinéticos en la concentración del grupo maceral vitrinita en fracciones beneficiadas de carbones Colombianos obtenidos por flotación burbujeante. Tesis Doctoral, Universidad del Valle.

**Qiao** X.C., Tyrer M, Poon C.S., Cheeseman C.R. (2007). Novel cementitious materials produced from incinerator bottom ash. *Resources Conservation & Recycling*, 52, 496-510.

**Rubio** B., Izquierdo M. T., Mayoral M. C., Bona M. T., Andres J. M. (2007). Unburnt carbon from coal fly ashes as a precursor of activated carbon for nitric oxide removal. *Journal of hazardous materials*, 143, 561-566.

**Sahbaz** O., Öteyaka B., Kelebek S., Uçar A., Demir U. (2008). Separation of unburned carbonaceous matter in bottom ash using Jameson cell. *Separation and Purification Technology*, 62, 103-109.

**Trifunovic** P. D., Marinkovic S. R., Tokalic R. D., Matijasevic S. D. (2010). The effect of the content of unburned carbon in bottom ash on its applicability for road construction. *Thermochimica Acta*, 498, 1-6.

**Uçurum** M. (2009). Influences of Jameson flotation operation variables on the kinetics and recovery of unburned carbon. *Powder Technology*, 191, 240-246.

**Wang** S., Wu H. (2006) Environmental-benign utilization of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of hazardous materials B*, 136, 482-501.

## **ANEXO 1: ANÁLISIS REALIZADOS EN ESTE TRABAJO**

FORMATO 13-5  
ENTREGA DE RESULTADOS  
ANÁLISIS PROXIMO Y ELEMENTAL

Informe No: 069-10 Cliente: PROYECTO CERREJON UNIVALLE  
Fecha (d-m-a): 11/03/2010 Tipo Muestra: Carbón  
Identificación: Muestra Bottom Ash CEMAR Feb 01/2010

Humedad Superficial (%) :

Humedad Residual (%) : 0.55

Humedad Total (%) : 0.55

## Elemental

| Análisis      | Norma ASTM | Seco al Aire | Seco |
|---------------|------------|--------------|------|
| Humedad (%)   | D 5142     |              |      |
| Cenizas (%)   | D 5142     |              |      |
| Carbono (%)   | D 5373     |              |      |
| Hidrogeno (%) | D 5373     |              |      |
| Nitrogeno (%) | D 5373     |              |      |
| Azufre (%)    | D 4239     |              |      |
| Oxigeno (%)   | D 5373     |              |      |

## Próximo

| Análisis                  | Norma ASTM | Seco al Aire | Seco  |
|---------------------------|------------|--------------|-------|
| Humedad (%)               | D 5142     | 0.55         |       |
| Materia Volátil (%)       | D 5142     | 2.86         | 2.88  |
| Cenizas (%)               | D 5142     | 91.80        | 92.31 |
| Carbon Fijo (%)           | D 3172     | 4.79         | 4.82  |
| Poder Calorífico (BTU/Lb) | D 5865     | NR           |       |
| Azufre (%)                | D 4239     | 0.29         | 0.29  |

| Análisis                        | Norma | Reporte |
|---------------------------------|-------|---------|
| Índice de Hinchamiento (Unidad) | D 720 |         |

## Observaciones:

El muestreo fue realizado por el cliente y la muestra fue preparada conforme a la norma ASTM D 2013

NR significa que el equipo no reporta valor alguno debido al alto contenido de ceniza que no permite la detección del poder calorífico.

  
M. Sc. Jaime José Acuña P.  
Jefe de Laboratorio

El Laboratorio se responsabiliza exclusivamente por los resultados obtenidos, con las muestras sometidas a ensayo.

  
Ing. Francisco J. Velasco S.  
Profesional de Laboratorio

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente -EIDENAR

Universidad del Valle

Ciudad Universitaria Meléndez - Apartado Aéreo 25360

Telefax: (92) 3396097 - 3212153 - 3212159

email: eidenar@mafalda.univalle.edu.co

Cali - Colombia

Spectrum processing :

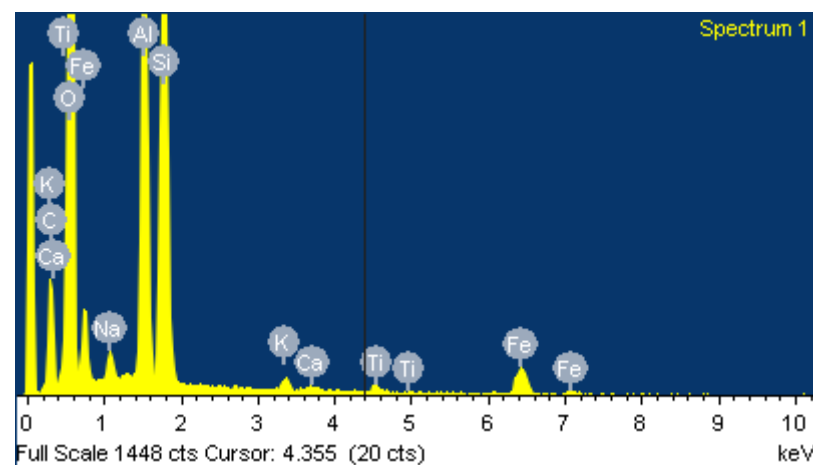
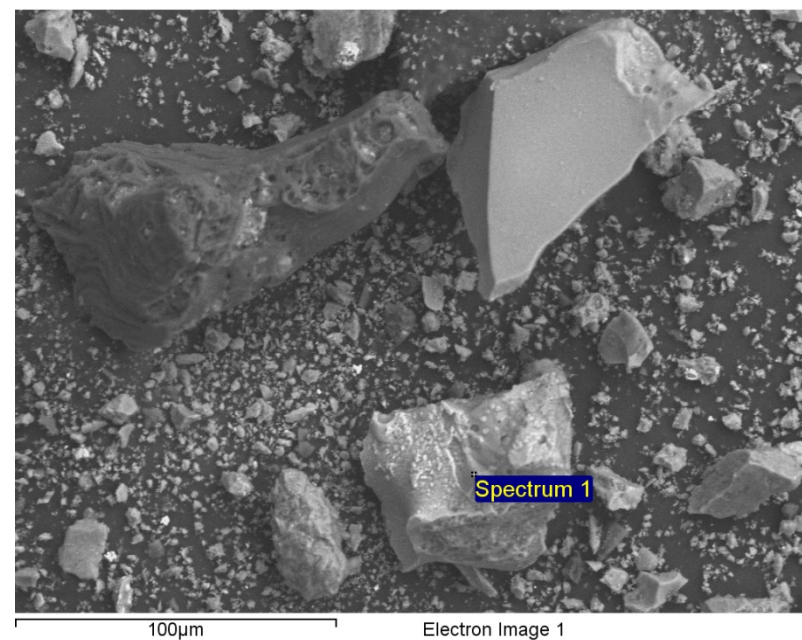
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 13.17   | 19.41   |
| O K     | 57.10   | 63.16   |
| Na K    | 0.80    | 0.62    |
| Al K    | 9.56    | 6.27    |
| Si K    | 13.71   | 8.64    |
| K K     | 0.47    | 0.21    |
| Ca K    | 0.21    | 0.09    |
| Ti K    | 0.49    | 0.18    |
| Fe K    | 4.48    | 1.42    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: CENIZA SIN BENEFICIO



Spectrum processing :

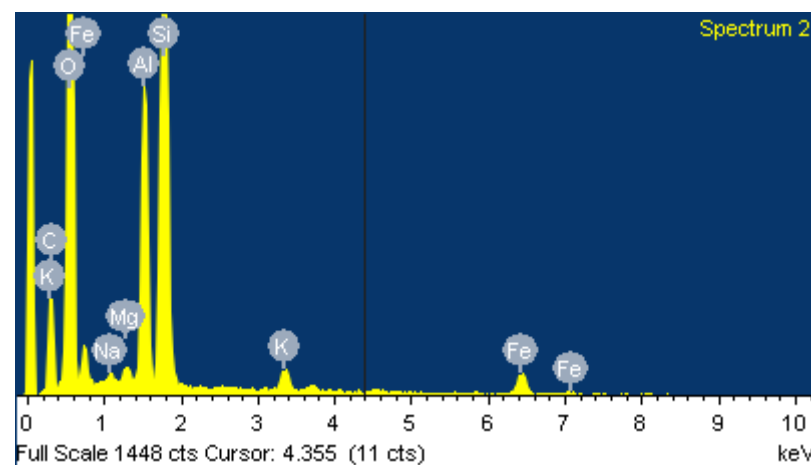
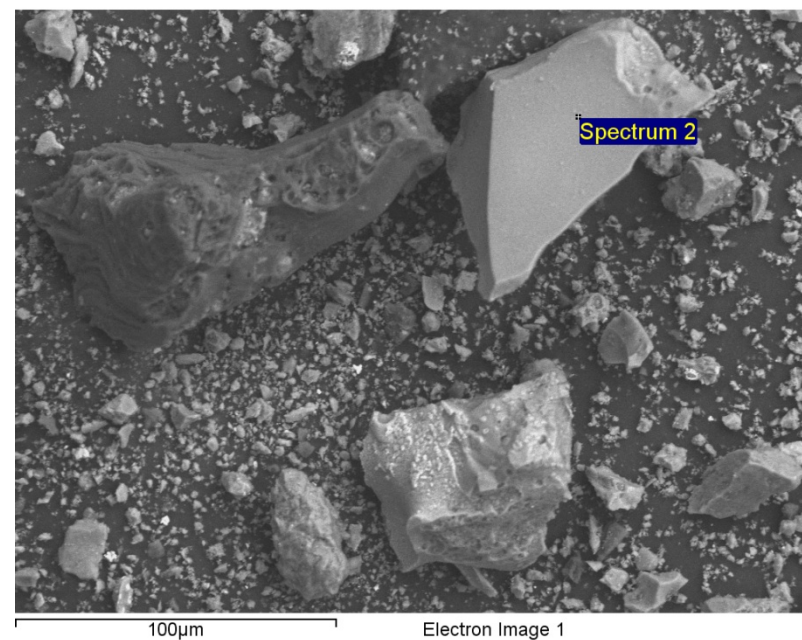
Peak possibly omitted : 4.510 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 6

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 17.70   | 25.51   |
| O K     | 53.40   | 57.76   |
| Na K    | 0.28    | 0.21    |
| Mg K    | 0.40    | 0.29    |
| Al K    | 6.54    | 4.20    |
| Si K    | 16.96   | 10.45   |
| K K     | 0.96    | 0.43    |
| Fe K    | 3.75    | 1.16    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: CENIZA SIN BENEFICIO



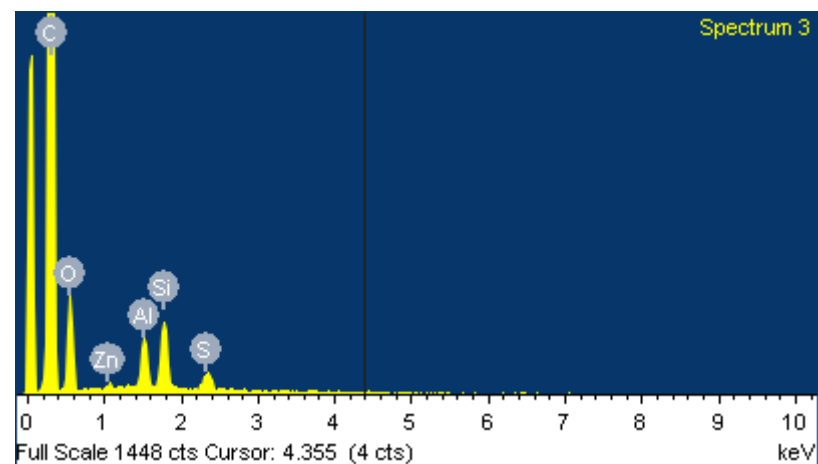
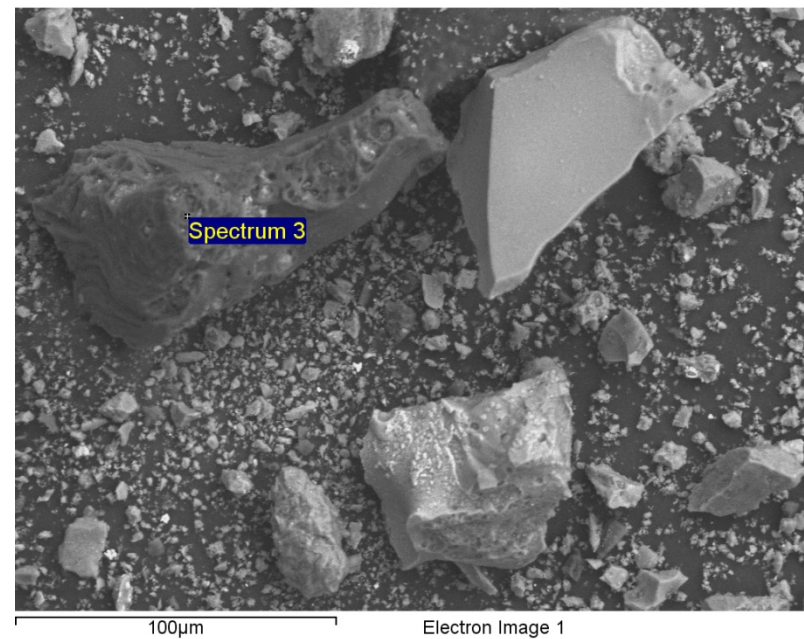
Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 76.60   | 82.95   |
| O K     | 18.16   | 14.77   |
| Al K    | 1.54    | 0.74    |
| Si K    | 2.39    | 1.11    |
| S K     | 0.88    | 0.36    |
| Zn L    | 0.44    | 0.09    |
| Totals  | 100.00  |         |



Comment: CENIZA SIN BENEFICIO

Spectrum processing :

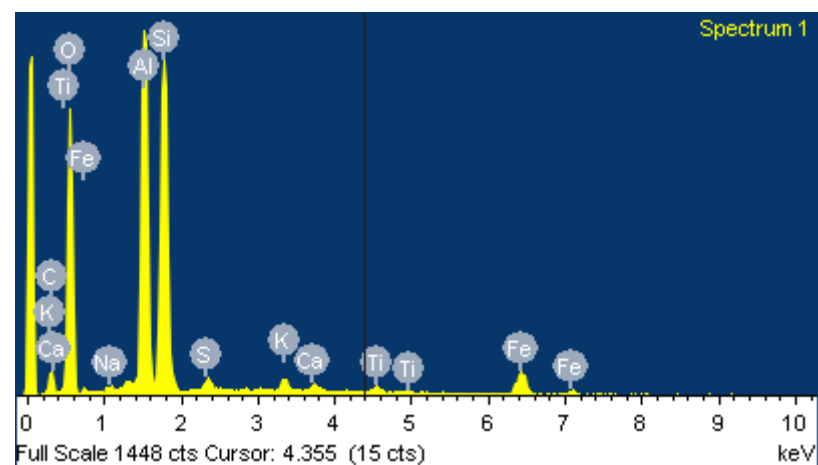
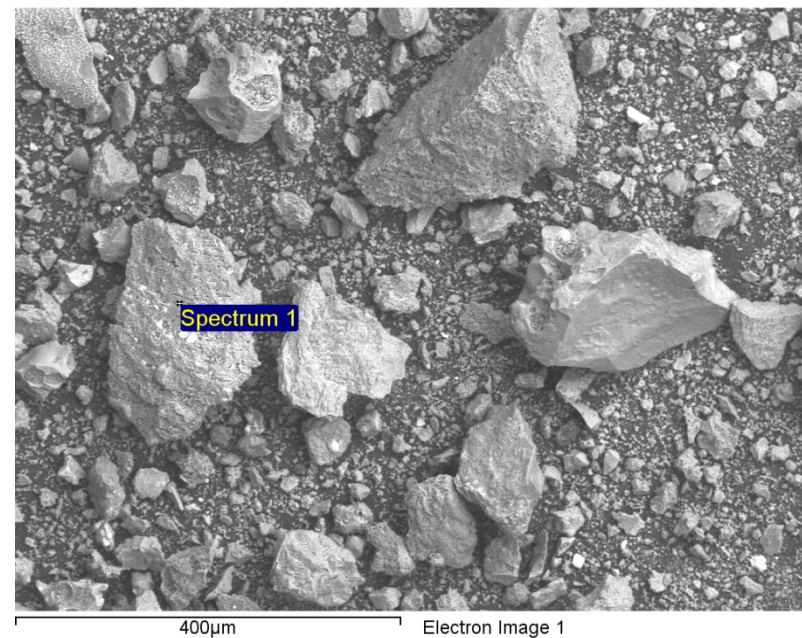
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 8.62    | 14.76   |
| O K     | 39.75   | 51.06   |
| Na K    | 0.37    | 0.33    |
| Al K    | 17.62   | 13.42   |
| Si K    | 20.41   | 14.93   |
| S K     | 0.91    | 0.58    |
| K K     | 1.30    | 0.68    |
| Ca K    | 0.76    | 0.39    |
| Ti K    | 1.08    | 0.46    |
| Fe K    | 9.19    | 3.38    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: CENIZA BENEFICIADA



Spectrum processing :

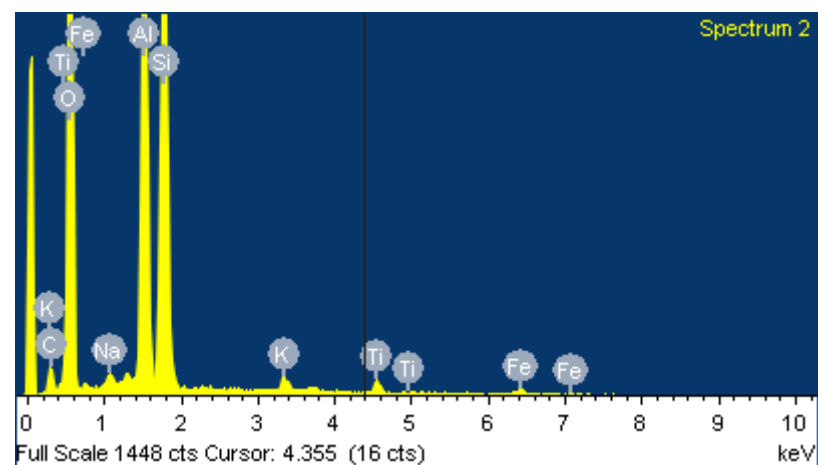
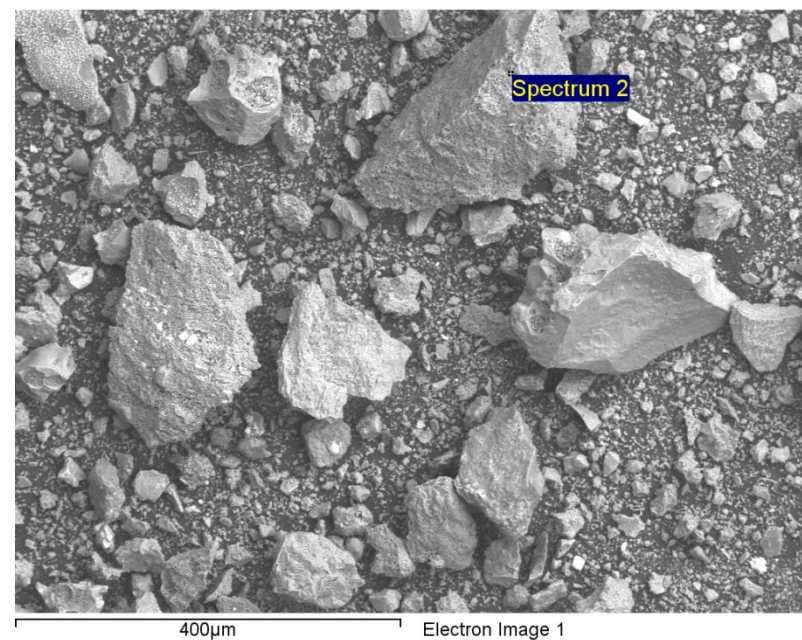
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 4

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 7.34    | 11.49   |
| O K     | 52.90   | 62.21   |
| Na K    | 0.49    | 0.40    |
| Al K    | 14.90   | 10.39   |
| Si K    | 21.32   | 14.28   |
| K K     | 0.84    | 0.40    |
| Ti K    | 1.14    | 0.45    |
| Fe K    | 1.07    | 0.36    |
| Totals  | 100.00  |         |

Comment: CENIZA BENEFICIADA



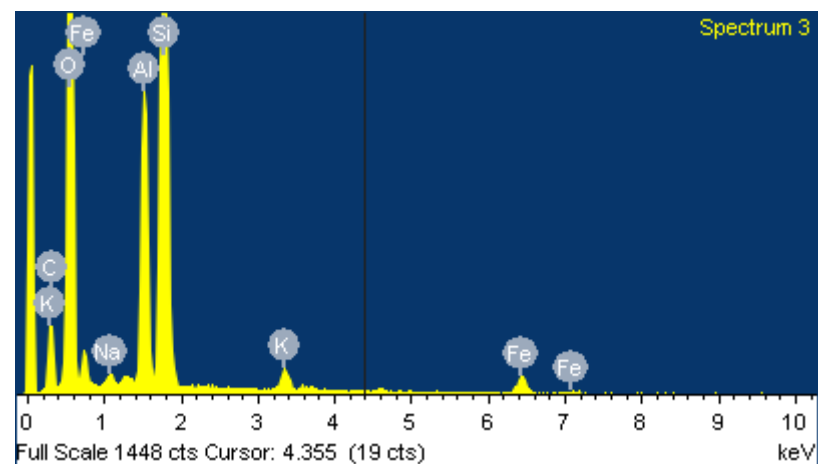
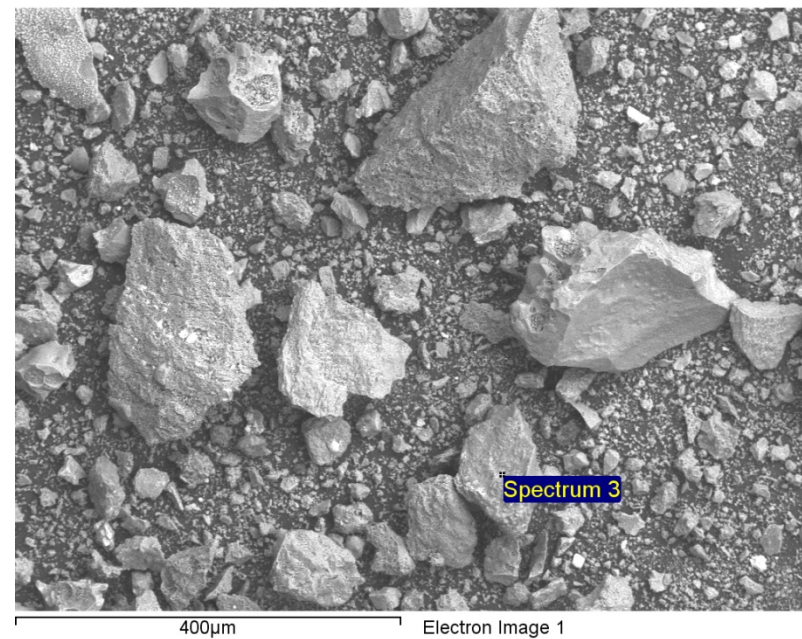
Spectrum processing :

No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)

Number of iterations = 5

| Element | Weight% | Atomic% |
|---------|---------|---------|
| C K     | 15.23   | 22.56   |
| O K     | 51.71   | 57.49   |
| Na K    | 0.32    | 0.25    |
| Al K    | 7.14    | 4.70    |
| Si K    | 21.31   | 13.49   |
| K K     | 1.03    | 0.47    |
| Fe K    | 3.26    | 1.04    |
| Totals  | 100.00  |         |



Comment: CENIZA BENEFICIADA

## **ANEXO 2: PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS DE COLECTORES Y ESPUMANTES**

### ***Kerosene***

Mezcla de hidrocarburos parafínicos, olefínicos, cicloparafínicos y aromáticos con número de átomos de carbono en el rango C<sub>10</sub> – C<sub>14</sub>. Líquido transparente con olor característico parafínico aromático, incoloro a ligeramente amarillo.

|                              |                     |
|------------------------------|---------------------|
| Fórmula molecular:           | No aplica           |
| Peso Específico:             | 0,78 – 0,83 (15 °C) |
| Punto de ebullición:         | 150 – 280 °C        |
| Punto de inflamación:        | 28 °C               |
| Temperatura de autoignición: | 210 °C              |

### ***Fuel oil***

Mezcla de hidrocarburos pesados del carbono principalmente aromáticos policíclicos y aromáticos ordinarios. Líquido parduzco de olor característico

|                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| Fórmula molecular:           | No aplica        |
| Peso Específico:             | 0,9 – 1,1 (20°C) |
| Punto de ebullición:         | 180 – 250 °C     |
| Punto de inflamación:        | 65 °C            |
| Temperatura de autoignición: | 400 °C           |

### ***MIBC***

Metil, Isobutil carbinol ó metil, amil alcohol. Hexil alcohol, líquido incoloro de punto de ebullición medio y olor característico, de baja solubilidad en agua y miscible con varios solventes comunes.

|                              |                                  |
|------------------------------|----------------------------------|
| Fórmula molecular:           | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O |
| Peso Específico:             | 0,81 (20°C)                      |
| Punto de ebullición:         | 132 °C                           |
| Punto de inflamación:        | 40,5 °C                          |
| Temperatura de autoignición: | 305 °C                           |

### ***Aerofroth 65***

Mezcla de poliglicoles, espumante soluble en agua que se utiliza en la flotación de minerales metálicos y no metálicos. Líquido marrón rojizo soluble en agua.

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| Fórmula molecular:           | No aplica  |
| Peso Específico:             | 1,01(20°C) |
| Punto de ebullición:         | 133 °C     |
| Punto de inflamación:        | 93 °C      |
| Temperatura de autoignición: | 300 °C     |

**ANEXO 3: DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA FLOTACIÓN DE CENIZAS  
DE FONDO**

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA FLOTACIÓN DE CENIZAS DE FONDO EN LA CELDA DENVER

