

**CURVAS DE LAVABILIDAD DE UN CARBON USADO EN LA EMPRESA
PRODUCTORA DE PAPELES CARVAJAL PULPA Y PAPEL S.A. A TRAVÉS DE
SEPARACIÓN GRAVIMÉTRICA**

**SANDRA PATRICIA NARANJO PRIMO
ANDRES FELIPE GUEVARA GARCIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI
2012**

**CURVAS DE LAVABILIDAD DE UN CARBON USADO EN LA EMPRESA
PRODUCTORA DE PAPELES CARVAJAL PULPA Y PAPEL S.A. A TRAVÉS DE
SEPARACIÓN GRAVIMÉTRICA**

**SANDRA PATRICIA NARANJO PRIMO
ANDRES FELIPE GUEVARA GARCIA**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Químico**

**Director: Ing. Juan Manuel Barraza Burgos, M.Sc., Ph.D
Escuela de INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI
2012**

NOTA DE APROBACION

El proyecto de tesis titulado CURVAS DE LAVABILIDAD DE UN CARBON USADO EN LA EMPRESA PRODUCTORA DE PAPELES CARVAJAL PULPA Y PAPEL S.A. A TRAVÉS DE SEPARACIÓN GRAVIMÉTRICA presentado por los estudiantes Andrés Felipe Guevara y Sandra Patricia Naranjo como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Químico, fue aprobado el 23 de abril de 2012

Nota de aceptación:

Ing. Juan Manuel Barraza B. PhD.
Director de Trabajo de Grado

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cali, Abril 23 de 2012

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a nuestro creador, que ha permitido que este proyecto se haga realidad; a nuestras familias porque su apoyo, amor y dedicación incondicional nos impulsó a seguir adelante con nuestro proyecto; A Juan Manuel Barraza, por permitirnos realizar esta investigación de la mano con su él y su conocimiento; a nuestros amores, por estar siempre con nosotros, apoyándonos; A Carlos Rafael Pinedo Jaramillo, por tener siempre las puertas abiertas y por tener la mejor disposición; A Nancy Bolaños por su ayuda incondicional y darnos animo; y, a todas las personas que formaron parte de este proyecto en alguna de sus etapas. Gracias y están en nuestros corazones.

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mis padres, por sus consejos, sus valores, su apoyo incondicional y porque siempre me impulsaron para que culminara mi carrera profesional.

A mi novia, por que ha sido una persona muy especial en mi vida, darme valor para seguir adelante y estar siempre presente sin importar las circunstancias.

A mi hermana, por estar conmigo y apoyarme siempre, la quiero mucho.

A mi sobrinito Jean Pierre, aunque todavía no puedes leer, un día vas a aprender y por eso también te dedico esta tesis, gracias por alegrarme con tus travesuras y tu inteligencia.

A Mis abuelos, por su apoyo y amor incondicional durante todas las etapas de mi vida.

A Mis abuelas, con sus sabios consejos y oraciones desde el cielo, me dieron las fuerzas necesarias para seguir adelante.

A doña Nelly, por sus oraciones perseverantes, me dieron las fuerzas y valor para seguir luchando y terminar mi carrera.

A mis amigos, con ellos descubrí el verdadero sentido de la amistad momentos maravillosos quedaran en mi memoria, ustedes ayudaron y aportaron muchas experiencias en mi vida de manera excepcional, con mucho cariño.

ANDRÉS FELIPE

A Dios por ser lo más importante en mi vida, por sostenerme con su mano poderosa, por brindarme fortaleza, voluntad, amor y compañía, por cumplir en mi sus promesas y permitirme llegar al final del camino que me ha trazado, siendo instrumento suyo para gloria y honra de su santo nombre.

A mis padres, hermana y abuela por su valioso apoyo en todo momento desde el inicio de mi carrera, por confiar y creer en mí, por su paciencia, cariño y comprensión, teniendo en todo momento una palabra de aliento, ayudándome siempre a seguir adelante hasta el cumplimiento de mis metas.

A mi esposo por su ejemplo y determinación que siempre me impulsó a seguir adelante, por todos los momentos en que con cariño me brindó su apoyo incondicional, estando a mi lado cuando el estudio y trabajo ocuparon mi tiempo y esfuerzo, alentándome siempre a proseguir con dedicación.

Quiero agradecer sinceramente a aquellas personas que compartieron sus conocimientos conmigo, para hacer posible la conclusión de mis estudios de pregrado, a mis profesores y compañeros, especialmente agradezco a mi director el Dr. Juan Manuel Barraza, por su asesoría siempre dispuesta.

A mi familia y amigos por su cariño y buenos deseos, gracias por estar ahí siempre.

A la familia de mi esposo por su apoyo y sus oraciones que fueron escuchadas.

A todos los que de alguna manera contribuyeron para el cumplimiento de este logro en mi vida.

Muchas Gracias.

SANDRA PATRICIA

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Antecedentes	3
2.2 Componentes y propiedades del carbón	3
2.3 Beneficio del carbón	6
2.4 Características generales de la separación por gravedad	7
2.4.1 Principios de la separación gravimétrica por medio denso	9
2.4.2 Factores que afectan el proceso de la separación gravimétrica	10
2.5 Curvas de lavabilidad	11
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	14
3.1 Preparación de la muestra de carbón	14
3.1.1 Cuarteo del carbón (ASTM D2234)	14
3.1.2 Trituración y molienda del carbón	15
3.1.3 Tamizado del carbón (ASTM D4749)	15
3.2 Análisis próximo del carbón	16
3.3 Definición de variables experimentales	16
3.4 Preparación del medio denso	17
3.5 Separación gravimétrica por medio denso	17
3.6 Filtración de carbón y medio denso	18
3.7 Determinación de humedad en el carbón beneficiado	18
3.8 Determinación de cenizas en el carbón beneficiado	19
4. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1 Distribución granulométrica de la muestra original	20
4.2 Rendimiento del carbón beneficiado en función de la densidad del medio y la concentración del carbón	21
4.3 Contenido de cenizas del carbón beneficiado en función a la densidad del medio y concentración del carbón	23
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	28

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.	Matriz de variables para concentración de carbón y densidad del medio empleado en las pruebas experimentales a un tamaño de partícula retenido malla 60.	16
Tabla B.1.	Concentración 10 %	38
Tabla B.2.	Concentración 15 %	38
Tabla B.3.	Concentración 20 %	39
Tabla B.4.	Pasos construcción graficas de lavabilidad	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Reducción de tamaño y liberación de la materia mineral	6
Figura 2.2.	Fuerzas ejercidas sobre una partícula sumergida en el medio denso	9
Figura 2.3.	Curva primaria de lavabilidad	12
Figura 2.4.	Curvas densimétricas	13
Figura 3.1.	Cuarteo del Carbón	15
Figura 3.2.	Densidades utilizadas en la separación gravimétrica	18
Figura 4.1.	Distribución de partícula de carbón retenido en malla	20
Figura 4.2.	Distribución de partícula de carbón acumulado retenido en malla	21
Figura 4.3.	Curvas densimétricas a las concentraciones de carbón de 10 15 y 20% p/p	22
Figura 4.4.	Curvas de lavabilidad a las concentraciones de carbón de 10%,15% y 20% p/p	24
Figura A.1.	Molino de discos	32
Figura A.2.	Molino de cuchillas	32
Figura A.3.	Juego de Tamices	33
Figura A.4.	Equipo agitador de cribas Ro-Tap	33
Figura A.5.	Densímetro digital AntonPaar, referencia DMA 35N	34
Figura A.6.	Montaje empleado para la separación gravimétrica	34
Figura A.7.	Separación gravimétrica por medio denso	35
Figura A.8.	Fases generadas en la separación gravimétrica	35
Figura A.9.	Sistema de filtración	36
Figura A.10.	Mufla Terrígeno D8	36

Figura A.11.	Desecador	37
Figura C.1.	Curva densimétrica a concentración de carbón 10%	40
Figura C.2.	Curva densimétrica a concentración de carbón 15%	40
Figura C.3.	Curva densimétrica a concentración de carbón 20%	41
Figura C.4.	Curva de lavabilidad a concentración de carbón 10%	41
Figura C.5.	Curva de lavabilidad a concentración de carbón 15%	42
Figura C.6.	Curva de lavabilidad concentración de carbón 20%	42

RESUMEN

En el presente trabajo se aplicó como metodología experimental en el beneficio de carbón, la separación gravimétrica por medio denso, permitiendo construir curvas de lavabilidad requeridas para establecer las mejores condiciones de operación que entreguen como resultado altos rendimientos de fracciones másicas de carbón beneficiado con menor cantidad de cenizas.

En la metodología experimental se consideraron como componentes fundamentales la densidad del medio y concentración de carbón, evaluando el efecto de estas variables sobre el rendimiento y la calidad del flotado.

El proceso de separación gravimétrica se llevó a cabo a diferentes densidades y concentraciones, empleando una muestra de carbón a un tamaño fijo de partícula, el cual fue seleccionado acorde a los resultados obtenidos en la distribución granulométrica de la muestra original.

El contenido inicial de cenizas en el carbón alimentado fue de 32% p/p, luego del proceso de beneficio mediante separación gravimétrica por medio denso se obtuvo una reducción en este porcentaje para cada una de las concentraciones trabajadas. Los porcentajes de ceniza de los carbones beneficiados obtenidos estuvieron en el rango de 5 a 7% p/p, para las tres concentraciones de pulpa de 10, 15 y 20% p/p con un rendimiento alrededor del 80% p/p y una densidad específica de separación de aproximadamente 1.38. Esto significa que se encontraron reducciones en los porcentajes de cenizas entre el 78.2 y 84.4 %.

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos y las reservas geológicas de carbón medidas en el país son aproximadamente de 6648 millones de toneladas (MT), éstas se encuentran distribuidas en las tres grandes cordilleras (Oriental, Central y Occidental). El 90% de los recursos y reservas geológicas medidas se localizan en la Costa Atlántica y los carbones con propiedades coquizables aptos para usos metalúrgicos, se encuentran en la parte central y oriental del país. En estas zonas se encuentran también carbones especiales, tales como semiantracitas y antracitas para usos industriales. ^[1]

Algunas de las reservas de carbón en Colombia presentan un bajo contenido de cenizas y azufre, lo cual las califica como de alta calidad. En este caso el carbón como sale de la mina, cumple las especificaciones del proveedor, solo necesita triturarse y tamizarse para entregar el producto especificado. ^[2]

Cuando los contenidos de ceniza y azufre son altos, disminuye la calidad del carbón, haciéndolo poco rentable. Es importante considerar que el carbón con elevado porcentaje de cenizas atenta contra los activos de una organización. En términos generales, la abrasión sobre los recipientes a presión (en estos casos las calderas) disminuye su vida útil; también se debe "lidiar" con tubos rotos y mantenimientos largos y costosos de las calderas por la abrasión. De otra parte, carbones con elevados porcentaje de azufre deteriora la calidad del aire y son causantes de la lluvia ácida (producción de H_2SO_4). Sin embargo la calidad de los carbones puede mejorarse mediante un proceso de lavado, también conocido como beneficio del carbón, método que permite reducir el contenido de cenizas y azufre total, mejorando la homogeneidad, calidad y aumentando el rendimiento del carbón, ^[3] los procesos de lavado son importantes porque ataca los anteriores problemas en la fuente.

Existen procesos físicos y químicos para el beneficio de carbón. Entre los procesos físicos implementados, se encuentra la separación gravimétrica, la cual se lleva a cabo

usando un medio denso con tamaños medios de partícula, donde se aprovecha la fuerza gravitatoria o la fuerza centrífuga.^[4]

En las calderas de Carvajal Pulpa y Papel se han adelantado trabajos para reducir el consumo de combustibles fósiles, evaluando e identificando mezclas adecuadas de carbón que garanticen una mayor eficiencia y disminuyan las emisiones atmosféricas.^[5] Sin embargo, existe un marcado interés en usar carbones de la región sur-occidental colombiana, algunos de los cuales desafortunadamente presentan altos contenidos de ceniza.

Con el fin de implementar un proceso de lavado de carbones por procesos de separación gravimétrica (hidrociclones, jigs, mesas vibratorias o espirales) a nivel industrial en esta compañía, es necesario conocer previamente el comportamiento de los carbones a nivel de laboratorio usando separación gravimétrica fraccionada, lo cual se obtiene con las curvas de lavado que relacionan rendimientos y contenido de cenizas de los carbones beneficiados en función de las densidades de separación.

El objetivo de este estudio fue obtener curvas de lavabilidad de un carbón usado en la empresa productora de papeles Carvajal Pulpa y Papel S.A. a través de separación gravimétrica donde se varió la densidad del medio de separación y la concentración del carbón en la pulpa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El proceso separación en medio denso (SMD), también conocido como separación gravimétrica, consiste en el beneficio o lavado del carbón para producir un carbón bajo en cenizas a partir de un carbón alimento con alto contenido en cenizas.

El proceso de separación gravimétrica tiene la capacidad para hacer separaciones a cualquier densidad deseada, con alto grado de eficiencia aún en presencia de altos porcentajes de material de densidad próxima.

Una cantidad de muestra de carbón pesada previamente se introduce gradualmente en un líquido denso a la menor densidad. Las fracciones flotantes se separan de las fracciones que se hunden. El procedimiento se repite y se extiende sobre el rango de densidad deseado. El peso y ceniza se determina en cada fracción obtenida a las diferentes densidades. ^[6]

Un estudio a nivel de laboratorio referente a la remoción de cenizas de carbón del manto K60, proveniente de la mina del Cerrejón se llevó a cabo para evaluar el efecto del tamaño de partícula, densidad del medio y concentración de carbón, como parámetros en un proceso de beneficio por flotado-hundido. Este estudio encontró un porcentaje de rendimiento global acumulado del 80%, disminución en el porcentaje promedio de cenizas a 3%, para un carbón con un contenido inicial de cenizas de 22%. ^[7]

2.2 Componentes y propiedades del carbón

El carbón es un combustible orgánico no homogéneo, originado principalmente a partir de restos de materia vegetal en descomposición; compuesto químicamente por materia mineral y materia orgánica. La materia orgánica se transforma durante el proceso de carbonificación con el incremento de la temperatura; el grado de transformación es lo que se conoce como rango y va desde turba hasta antracita. ^[8]

La materia mineral contiene muchos tipos de especies químicas, tales como carbonatos, sulfuros, óxidos, cloruros entre otros. Estas especies minerales varían de un carbón a otro, por lo que es necesario determinar sus proporciones en el carbón. ^[9]

El carbón tiene grandes variaciones en sus propiedades físicas, las cuales influyen en la facilidad de su manejo. Al examinar un trozo de carbón se observa una masa heterogénea; algunas fajas de aspecto mate y otras brillantes, separadas a la vez por venas de estéril.

Los principales componentes del carbón son:

- Vitreno: parte negra, brillante y quebradiza del carbón.
- Clareno: negro y brillante, pero en menor cantidad que el vitreno.
- Dureno: componente mate, gris oscuro, duro y resistente.
- Fuseno: parte negra, blanda y polvorosa que tiende a romperse. ^[10]

Algunos de los parámetros que se tienen en consideración en la clasificación del carbón son:

- Humedad

La humedad, aumenta el peso muerto del carbón, consume calor de la parte combustible y debilita su estructura física, consta de humedad inherente y libre. La humedad inherente es la retenida en los poros del carbón, la cual es una función del rango o categoría del carbón. La humedad libre, o externa, es la existente en la superficie del carbón y en los intersticios entre las partículas.

El contenido de humedad residual es la humedad que pierde un carbón seco al aire cuando se le somete a una temperatura de 105 °C. Esta humedad depende de las condiciones atmosféricas del laboratorio (temperatura, presión, humedad relativa).

El conocimiento de la humedad se requiere en la evaluación y control de los procesos industriales, en el manejo, molienda y pulverización de carbones. ^[11]

- Contenido de Cenizas

Las cenizas son el residuo sólido tras una combustión completa de toda la materia orgánica y de la oxidación de toda la materia mineral presente en el carbón. No es nunca igual al contenido en sustancias minerales del combustible antes de la combustión, pues estas modifican sus formas de combinación. ^[12]

La ceniza es la materia inerte del carbón, cuyo exceso rebaja el poder calorífico y disminuye su valor. Es posible clasificar las impurezas en constituyentes y separables, las constituyentes son aquellas íntimamente mezcladas con el carbón, que pueden considerarse parte de su composición, y las separables como aquellas impurezas que pueden eliminarse mecánicamente. ^[11]

Las cenizas definen la calidad del carbón en la combustión al determinar el contenido en materia incombustible presente. A mayor contenido de cenizas, menor poder calorífico presentará el carbón y mayores serán los costos de manipulación y tratamiento, así como los posibles problemas de erosión en los equipos de transporte y combustión. ^[12]

- Materia Volátil

La materia volátil es el desprendimiento gaseoso de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento. A medida que el carbón se calienta, se desprenden productos gaseosos y líquidos. Existe un desprendimiento bajo a temperaturas bajas, pero aumenta a partir de los 550°C. Los constituyentes gaseosos son principalmente hidrógeno, hidrocarburos (benceno, tolueno, naftaleno) vapores de alquitranes, dióxido y monóxido de carbono, sulfuros de hidrógeno, amoníaco y agua químicamente combinados, todas estas sustancias se forman por la descomposición volátil del carbón. La materia volátil disminuye a medida que aumenta el rango del carbón. ^[11]

Este factor afecta la combustibilidad del carbón. La finura requerida aumenta conforme se reduce el contenido de volátiles. Los carbones con bajo contenido de volátiles se inflaman con menos facilidad, necesitan más tiempo para la combustión. ^[12]

- Poder calorífico

También se conoce como energía específica o energía térmica. Representa la cantidad de calor que se libera en combustión completa por cada unidad de material quemado. El poder calorífico es una propiedad con grandes variantes entre los carbones. Este parámetro está íntimamente ligado con la cantidad de humedad y de cenizas, así como de la composición de la materia orgánica. ^[13]

2.3 Beneficio del carbón

Por beneficio de carbones se entiende el uso de una o más operaciones de separación enfocadas a mejorar sus características desde el punto de vista del poder calórico, contenido de cenizas y azufre; es decir se busca concentrar el contenido de materia orgánica por reducción del contenido de materia mineral.

El beneficio de carbones usando separaciones gravimétricas se logra a través de la diferencia de densidad que existe entre la materia mineral y la materia orgánica del carbón. Las densidades relativas de la materia orgánica y la materia mineral están en los rangos de 0.90 a 1.70 y 2.0 a 5.0 respectivamente.

Previo a cualquier operación de separación se deben ejecutar operaciones de trituración y molienda las que además de producir la granulometría adecuada para un proceso de combustión específico, donde las partículas más pequeñas tienen mayor área superficial y por supuesto mejor combustión además de este se libera la materia mineral atrapada dentro de la matriz orgánica del carbón acentuando así la diferencia de densidades. La reducción de tamaño y la consecuente liberación de materia mineral se esquematizan en la figura 2.1. ^[12]



Figura 2.1. Reducción de tamaño y liberación de la materia mineral. ^[12]

Los procesos de beneficio del carbón se realizan con el propósito de mejorar su homogeneidad, reducir los costos de transporte, mejorar la eficiencia en su utilización, producir menos cenizas y reducir las emisiones de óxidos de azufre. [3]

El beneficio del carbón es el método más sencillo y económico para el control de emisiones en diferentes procesos, por cuanto se pueden reducir las cenizas en porcentajes superiores al 3% y el azufre pirítico alrededor del 40%, en consecuencia, mejora el poder calorífico del carbón a unos costos razonablemente ventajosos optimizando su eficiencia térmica. [14]

Para llevar a cabo el beneficio del carbón son necesarias dos operaciones básicas: molienda y lavado. Durante la etapa de molienda la materia mineral presente en el carbón se libera, mientras que en el lavado esta materia mineral se separa de la materia orgánica. [15]

Existen algunos métodos físicos y químicos que se usan para el beneficio del carbón, entre los métodos químicos se tiene el lavado con ácidos para su desmineralización y entre los métodos físicos se tiene la separación gravimétrica, fluidización, flotación y separación electrostática. [3]

Los métodos físicos más utilizados para beneficiar los carbones son la separación con medio denso y la separación por flotación. La separación con medio denso se basa en el aprovechamiento de la diferencia de gravedades específicas entre la materia mineral y la orgánica, la separación por flotación se basa fundamentalmente en la diferencia de propiedades superficiales (tensión superficial); este método aplica a partículas finas de carbón, en ambos casos se busca reducir el contenido de azufre y cenizas en el carbón, favoreciendo su calidad. [15]

2.4 Características generales de la separación por gravedad

Los métodos de separación por gravedad se usan para tratar una gran variedad de materiales, que varían desde los sulfuros metálicos pesados como la galena hasta el carbón. La separación gravimétrica se emplea para separar partículas de minerales de diferente peso específico debido a sus diferencias de movimiento en respuesta a las

acciones que ejercen sobre ellas, simultáneamente la fuerza de gravedad, el empuje y la resistencia debida a los efectos viscosos del líquido. ^[16]

Los métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías:

- Separación Gravimétrica por medio denso

Basado en un procedimiento convencional de limpieza del carbón, las partículas se sumergen en un baño que contiene un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas floten (sólido de densidad menor) y otras se hundan (sólido densidad mayor). Los fluidos de densidad intermedia usados son: líquidos orgánicos, solución de sales en agua, suspensiones de sólidos de granulometría fina en agua. ^[13]

Una ventaja de este método de separación es que puede emplearse a cualquier densidad deseada, con alto grado de eficiencia, aún en presencia de altos porcentajes de material de densidad próxima. La densidad de separación puede cambiarse a voluntad y con cierta rapidez. La eficiencia de la separación disminuye a menor tamaño de partícula, debido a la lenta velocidad de asentamiento de estas, también llega a ser ineficiente cuando las fuerzas atractivas entre las partículas llegan a ser mayores que las diferencias en las fuerzas de gravedad ejercidas sobre las partículas. ^[17]

- Separación por corrientes verticales

Esta separación se basa en el aprovechamiento de las diferencias entre las velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas. A pesar que en estos métodos también están presentes las fuerzas de separación de corrientes longitudinales, los efectos causados por corrientes verticales les confieren características propias.

- Separación en corrientes superficiales de agua o clasificación en lamina delgada

Las corrientes longitudinales aplicadas a partículas en sedimentación producen al movimiento de caída un movimiento longitudinal. Durante la sedimentación, las partículas trazan trayectorias diferentes de acuerdo con el tiempo a que quedan expuestas a las corrientes longitudinales.

Las partículas mayores y de mayor peso específico tienen mayor velocidad de caída, y sedimentan en primer lugar, próximo al punto de la alimentación. Las partículas menores y más livianas sufren mayor acción de transporte longitudinal, y son

depositadas más lejos. Otras partículas son depositadas de acuerdo con sus velocidades de caída, que dependen de sus tamaños y pesos específicos. ^[16]

2.4.1 Principios de la separación gravimétrica por medio denso

Para una partícula de carbón de masa m , volumen v , densidad d , la cual se sumerge en un medio de densidad D , tal como se muestra en la figura 2.2. La fuerza de sedimentación, S que actúan sobre este proceso son:

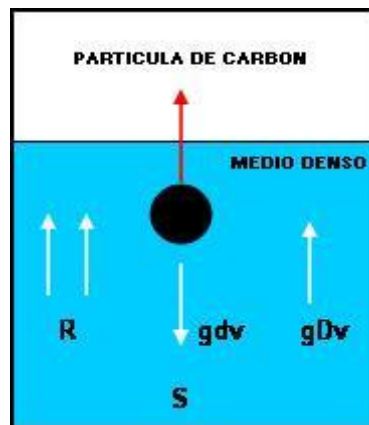


Figura 2.2 Fuerzas ejercidas sobre una partícula sumergida en el medio denso.

- Gravitacional, fuerza debido a la masa de la partícula de carbón. " $mg=dvg$ "
- El empuje, es la fuerza que ejerce el líquido sobre la partícula debido al peso del mismo. " Dvg "
- La resistencia, fuerza debido a los efectos viscosos del líquido. " R ". ^[18]

Luego, la velocidad de sedimentación, S , de acuerdo a un balance de fuerzas es:

$$S \approx gdv - gDv - R$$

$$S \approx dvg - Dvg - R$$

$$S \approx gv(d - D) - R$$

Organizando términos se tiene la siguiente ecuación:

$$S \approx v(d - D)g - R \quad \textbf{ecuación 1}$$

De acuerdo a la ecuación 1 cuando la partícula de carbón es más pesada que el medio, es decir que $(d - D) > 0$, esta se hundirá, en cambio si la partícula es más liviana $(d - D) < 0$, esta flotará. ^[19]

2.4.2 Factores que afectan el proceso de la separación gravimétrica

Los principales factores que afectan la separación gravimétrica son el medio denso, el tamaño de partícula y la densidad relativa.

- Medio Denso

Un medio denso se caracteriza por ser económico, fácilmente recuperable y removible de los productos de separación, químicamente inerte, de baja viscosidad, no tóxico, fácilmente diluible, con una estabilidad que pueda mantenerse en el intervalo de densidad requerida. ^[20] En este estudio, el medio denso empleado para la separación gravimétrica del carbón, lo representa una suspensión de nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ en agua.

El nitrato de calcio, también llamado Norgessalpeter (salitre noruego) es un compuesto inorgánico color blanco, formado por nitrógeno, oxígeno y calcio, absorbe la humedad del aire. Se utiliza como componente de fertilizantes, en aguas residuales como acondicionamiento previo para la prevención de emisión de olores y como sal de almacenamiento térmico. ^[21]

El medio de separación empleado provee las condiciones requeridas para la fase experimental de beneficio del carbón por separación gravimétrica, favoreciendo las condiciones para llevar a cabo la obtención de datos confiables en el laboratorio.

- **Tamaño de partícula**

El movimiento de una partícula dentro de un fluido, depende no solamente de su densidad relativa, sino también de su tamaño. Así las partículas grandes serán más afectadas que las pequeñas, debido a que partículas muy pequeñas son afectadas por fuerza de atracción de Van der Waals y repulsión (electrostáticas); es decir que partículas grandes implicarían mayor frecuencia de choques y disminución de la velocidad de sedimentación.

Cuanta más pequeña sean las partículas, más fuertes son, con relación a la gravedad, las fuerzas hidráulicas y de viscosidad, por lo cual el rendimiento de la separación por gravedad decrece bruscamente en los intervalos de tamaño fino. ^[10]

La eficiencia de los procesos de separación gravimétrica aumenta con el tamaño de las partículas. Las partículas pequeñas en las cuales su movimiento es dominado principalmente por la fricción superficial, responden relativamente mal a los métodos de separación gravimétrica, es necesario un estricto control del tamaño de la alimentación en la separación para reducir el efecto del tamaño y hacer que el movimiento relativo de las partículas dependa de la densidad de estas. ^[18]

- **Densidad Relativa**

Es una comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de otra que se toma como referencia, es adimensional, ya que queda definida como el cociente de dos densidades. ^[10]

2.5 Curvas de Lavabilidad

Los análisis de lavabilidad conllevan unos parámetros que se pueden traducir en una serie de curvas. ^[22] Estas curvas correlacionan una de las propiedades del carbón, con la cantidad de beneficiados y fondos producidos a una densidad relativa determinada, permitiendo conocer las características principales de una buena operación de la planta, tales como: densidad de lavado, rendimiento o recuperación del carbón y

calidad de los productos lavados (% cenizas). Existen varias curvas de lavabilidad: curva de las cenizas elementales, curva del carbón lavado (o de cenizas acumuladas) y curva densimétrica o de gravedad específica. ^[20]

Curva del carbón lavado (o de cenizas acumuladas): Esta curva indica la relación entre el rendimiento acumulado de carbón lavado y el contenido de cenizas acumuladas presentes en dicho carbón. Un esquema de esta curva se presenta en la figura 2.3. Se observa que existe incremento del rendimiento a medida que se incrementa el porcentaje de ceniza.

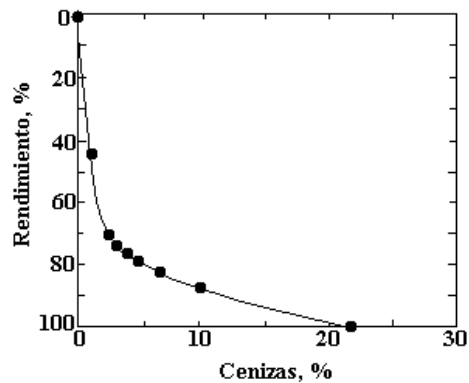


Figura 2.3. Curva Primaria de Lavabilidad. ^[18]

Curva de las densidades: En esta curva se obtiene el porcentaje acumulado del carbón flotado (lavado) en función de la densidad relativa de separación. En la abscisa de la gráfica se encuentran las densidades y en la ordenada los pesos acumulados del carbón flotado ^[20]. Las curvas de densidad, también pueden indicar si las partículas del carbón a beneficiar están perfectamente liberadas (separación ideal), presentan la misma composición (separación imposible) o presentan una composición variable (limpieza fácil), tal como se muestra en la Figura 2.4. ^[6]

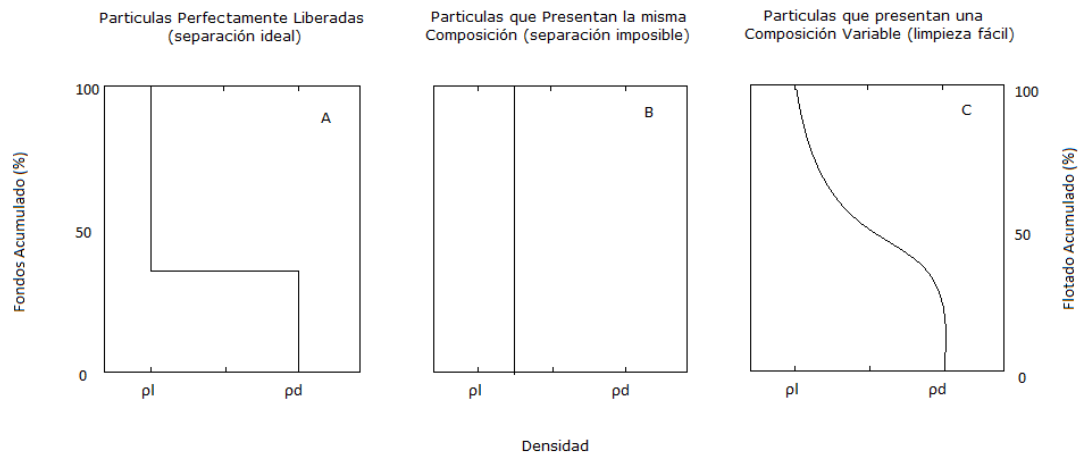


Figura 2.4. Curvas Densimétricas. ^[23]

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Preparación de la muestra de carbón

La preparación del carbón es un requisito previo al beneficio del mismo. Para esto, se llevó a cabo un proceso de molienda, cuarteo de la muestra y posteriormente la granulometría del carbón original.

3.1.1 Cuarteo del carbón (ASTM D2234)

El cuarteo del carbón es la etapa fundamental previa a las prácticas experimentales, que permite obtener una muestra representativa identificada con las características comunes del lote. El objeto de recolectar una muestra de carbón, es obtener una porción que sirva para la determinación de la calidad del carbón del cual se toma. Normalmente el carbón consiste de partículas de varias formas y tamaños, las cuales pueden tener diferentes propiedades. Con el fin de que la muestra sea representativa del carbón, se debe colectar teniendo en cuenta los principios dados por la técnica de cuarteo, previa a la preparación de las muestras para el análisis.

En este proceso de cuarteo, se extiende la masa total de carbón a partir del cual se toma la muestra. Una condición esencial del cuarteo es que carbón total que se va a muestrear debe exponerse de modo que todas las partes sean igualmente accesibles y tengan la misma oportunidad de incluirse en la muestra. Posteriormente este carbón se divide en cuatro partes iguales, se toman las muestras de puntos opuestos y se guardan, las restantes muestras se mezclan, se repite el cuarteo anterior hasta obtener aproximadamente 20 Kg de muestra requerida, posteriormente se lleva a cabo la granulometría del carbón original. Un esquema fotográfico del procedimiento de cuarteo se presenta en la figura 3.1.

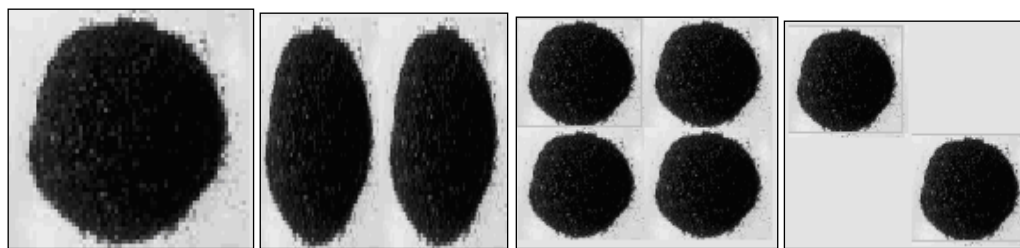


Figura 3.1. Cuarteo del carbón.

3.1.2 Trituración y molienda del carbón

Esta etapa previa de la preparación de la muestra de carbón, favorece no solo la granulometría, sino también la separación de materia mineral. Esta etapa se realiza con el fin de liberar la materia mineral de la materia orgánica. Para ello se usaron los molinos de discos (Figura A.1.) y de cuchillas (Figura A.2.).

3.1.3 Tamizado del carbón (ASTM D4749)

Se tomaron 6.5 Kg de los 20 Kg de muestra de carbón proveniente del cuarteo y se realizó un análisis granulométrico por tamices de la serie TAYLOR (Figura A.3.). Se montó la batería de tamices en un equipo Ro-Tap agitador de cribas (Figura A.4.) donde se agitó por un periodo aproximado de 20 minutos. Luego se pesó la masa retenida en cada tamiz, obteniendo de esta manera la distribución de tamaño de partícula. ^[24]

El Ro-Tap reproduce el movimiento circular y de golpeteo que se da en el cribado a mano. Usado conjuntamente con el juego de cribas se asegura un análisis uniforme y consistente de partículas.

Los tamices empleados para la obtención del tamaño de partícula nominal fueron: 10 (2.00 mm), 16 (1.19 mm), 20 (0.840 mm), 30 (0.590 mm), 40 (0.420 mm), 50 (0.297 mm), 60 (0.250 mm), 70 (0.219 mm), 100 (0.149 mm).

3.2 Análisis próximo del carbón

El análisis próximo permite en poco tiempo y con métodos simples obtener una caracterización sobre las propiedades importantes del carbón que se pueden utilizar para establecer el rango de carbones, mostrar la relación de constituyentes combustibles/incombustibles, evaluar características puntuales para su beneficio y en general para obtener conclusiones sobre su comportamiento en procesos tecnológicos.

3.3 Definición de variables experimentales

Tres ensayos experimentales se realizaron usando un tamaño de partícula constante, retenido malla 60 (0.250 mm). Las concentraciones de carbón empleadas en cada una de los ensayos fueron 10, 15 y 20% p/p correspondientes a las cantidades de carbón de 56, 90 y 128 gramos respectivamente. Las concentraciones de carbón se basaron en anteriores estudios de beneficio de carbón por medio denso. ^[7] Para obtener las concentraciones de carbón requeridas se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ carbón} = \frac{\text{Kg de carbón}}{\text{Kg de carbón} + (\text{Kg de agua} + \text{Medio denso})} = \frac{\text{Concentración de carbón}}{\text{de carbón}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Las densidades empleadas en cada una de los ensayos fueron: 1.25, 1.28, 1.30, 1.35 y 1.38. Al tamaño de partícula fijo y con las concentraciones y densidades usadas se estableció la matriz experimental mostrada en la Tabla 3.1.

p (Densidad) - C (Concentración) - F (Fondos)							
c \ p	p1	p2	p3	p4	p5	p6	F
C1	C1 p1	C1 p2	C1 p3	C1 p4	C1 p5	C1 p6	C1F1
C2	C2 p1	C2 p2	C2 p3	C2 p4	C2 p5	C2 p6	C2F2
C3	C3 p1	C3 p2	C3 p3	C3 p4	C3 p5	C3 p6	C3F3

Tabla 3.1. Matriz de variables para concentración de carbón y densidad del medio empleado en las pruebas experimentales a un tamaño de partícula retenido malla 60.

3.4 Preparación del medio denso

El medio denso empleado para la separación gravimétrica del carbón consiste en una suspensión de nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ en agua. Se trabajaron las densidades específicas 1.25, 1.28, 1.30, 1.35 y 1.38. Se observó que a densidades mayores a 1.35 no ocurría separación. En todos los ensayos se utilizó un volumen de 0.5 L de medio de separación.

Para la medición de la densidad del medio denso, se utilizó un densímetro digital AntonPaar, referencia DMA 35N (Figura A.5.). Este equipo permite una Medida digital de la densidad de líquidos desde 0 hasta 1.999 g/cm^3 con una resolución de 0.0001 g/cm^3 en un rango de temperatura de 0 a 40 °C. La cantidad de muestra necesaria es de 2 ml, el equipo es de fácil manipulación, toma de muestra y limpieza. ^[21]

3.5 Separación gravimétrica por medio denso

La separación gravimétrica por medio denso se llevó a cabo empleando un soporte metálico con ganchos formando una sola pieza (figura A.6.). Los ganchos sostenían las bolsas plásticas de dimensiones 1 metro de largo por 0.1 metro de diámetro, en las cuales se adicionó el carbón y el medio denso requerido según la densidad y concentración de carbón a emplear (figura A.7.).

Inicialmente la muestra de carbón a beneficiar se agregó en la primera bolsa, donde se tenía una suspensión de 0.5 L de medio denso con una densidad de 1.25; luego de un tiempo determinado, entre 3 y 5 horas, podía observarse claramente la separación de las tres fases, fondo, flotado y medio denso (figura A.8.).

Posteriormente la fase superior o de carbón beneficiado fue separada mediante un proceso de filtración y agregada a una segunda bolsa que contenía el medio de separación con una densidad entre 1.25 y 1.28.

Este procedimiento se repitió hasta tener una separación de fases cuyos fondos no presentaron fracciones másicas significativas, esto se logró a una densidad en el medio de separación entre 1.35 y 1.38, tal como puede observarse en la figura 3.2.

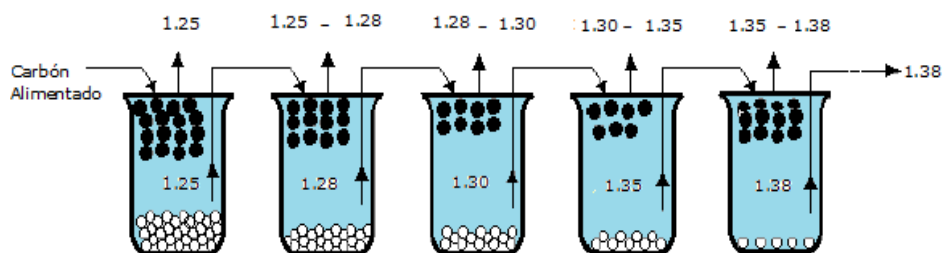


Figura 3.2. Densidades utilizadas en la separación gravimétrica.

3.6 Filtración de carbón y medio denso

La separación de carbón del medio denso se realizó en un sistema de filtración, compuesto por un embudo buchner, una bomba de vacío, un erlenmeyer con salida lateral y papel filtro de tamaño de poro no menor a 38 μm (figura A.9.). Luego, el carbón beneficiado (tope) y los fondos se lavaron, se secaron a temperatura ambiente (24 horas) y se pesaron. De esta muestra pesada se obtuvo una muestra representativa para determinar su humedad inherente y su contenido de ceniza.

3.7 Determinación de humedad en el carbón beneficiado

La determinación de la humedad se realizó siguiendo la Norma ASTM D3173. Para esto se colocaron los crisoles de porcelana en la estufa a 105 $^{\circ}\text{C}$. Luego se pasaron al desecador (Figura A.11.) durante media hora. Se pesan los crisoles vacíos y se les agrega aproximadamente 1 gramo de muestra. Posteriormente se colocaron los crisoles con la muestra en la estufa a 105 $^{\circ}\text{C}$ durante una hora y se luego se retiran los crisoles y se colocan en un desecador hasta que estén a temperatura ambiente. Finalmente, se pesaron nuevamente los crisoles y por diferencia de peso se obtiene el peso perdido por la muestra. ^[25] La humedad residual se encuentra con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad Residual} = \frac{\text{Peso perdido por la muestra}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

3.8 Determinación de cenizas en el carbón beneficiado

Las cenizas de las fracciones flotadas se realizaron siguiendo la norma ASTM D3174. Esto se llevó a cabo inicialmente secando los crisoles de porcelana durante una hora en la estufa a la temperatura de 105°C. Luego los crisoles se colocan en un desecador para que se enfríen y no adquieran humedad. Posteriormente se pesan los crisoles vacíos y se anotan los pesos. Se introduce aproximadamente un gramo de muestra en el crisol dentro de la balanza y se anota el valor del peso agregado. Luego, se introducen los crisoles en la mufla (Figura A.10.), previamente limpia. Se programa el horno y se espera a que alcance una temperatura de 120°C. Posteriormente, cada 20 minutos la temperatura se incrementa aproximadamente en 100°C, de tal forma que al cabo de una hora, la mufla alcance una temperatura de 500°C. En la siguiente hora se mantiene un aumento gradual de la temperatura hasta llegar a 750°C, temperatura que debe permanecer constante durante dos horas. Se retiran los crisoles de la mufla y se pasan al desecador donde se dejan enfriar durante media hora. Finalmente, se pesan nuevamente los crisoles y por diferencia se obtiene el peso de las cenizas. ^[26]

El porcentaje de las cenizas se encuentra aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Peso de las cenizas}}{\text{Peso de la muestra}} * 100 \quad \text{Ecuación 3.}$$

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Distribución granulométrica de la muestra original

En la Figura 4.1. Se presentan los resultados de la masa retenida en función del tamaño de partícula. El mayor porcentaje de retenidos correspondió a la malla N° 60 (0.250 mm) con un valor de 26.28%, mientras que el menor valor de porcentaje de retenido corresponde a la malla 100 (0.149 mm) con un valor de 4.69 %. Se observa también que alrededor del 29% de la muestra retenida corresponde a las mallas 10 y 16.

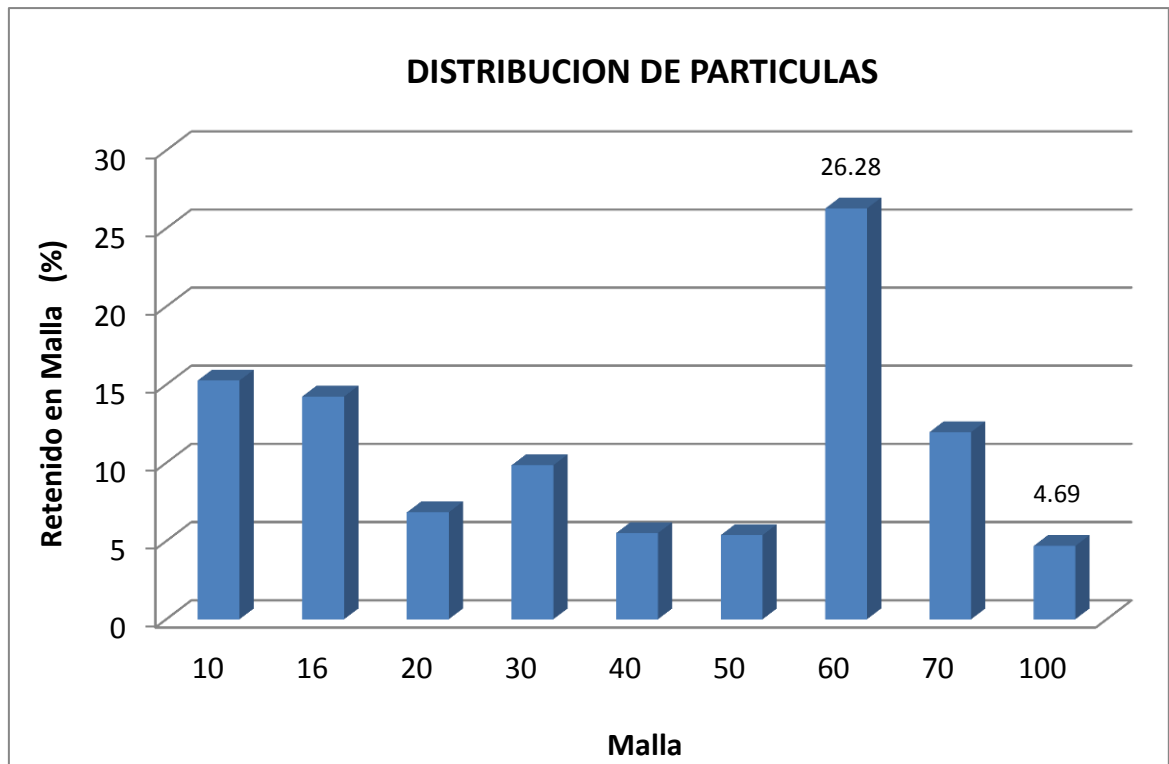


Figura 4.1. Distribución de partícula del carbón retenido en malla.

En la gráfica de distribución de partículas de carbón acumulado retenido en malla (Figura 4.2.), el tamiz N°60 fue el más cercano al 80%, con un valor de 83.35%, lo cual identifica el tamaño promedio de partícula en la muestra de carbón utilizada; por ello el tamaño de partícula definido por este tamiz se empleó para las pruebas experimentales de separación gravimétrica por medio denso; es decir, el tamaño usado en todas las pruebas experimentales fue 83.35 % retenido malla 60.

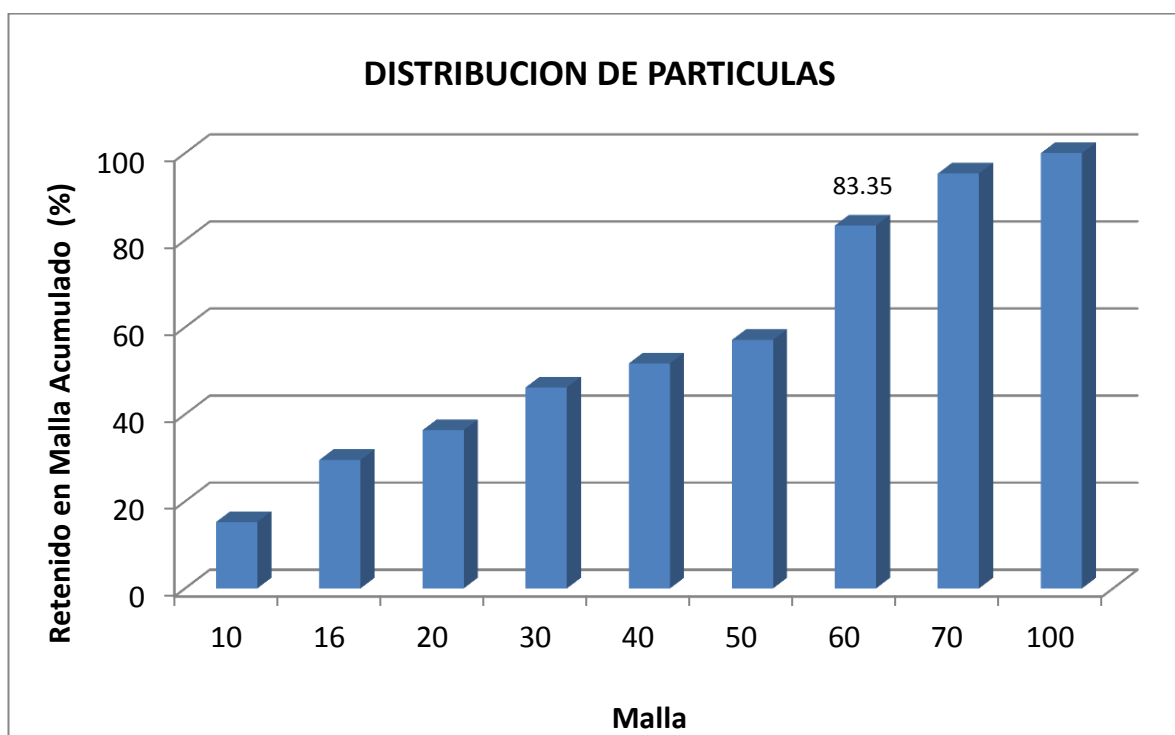
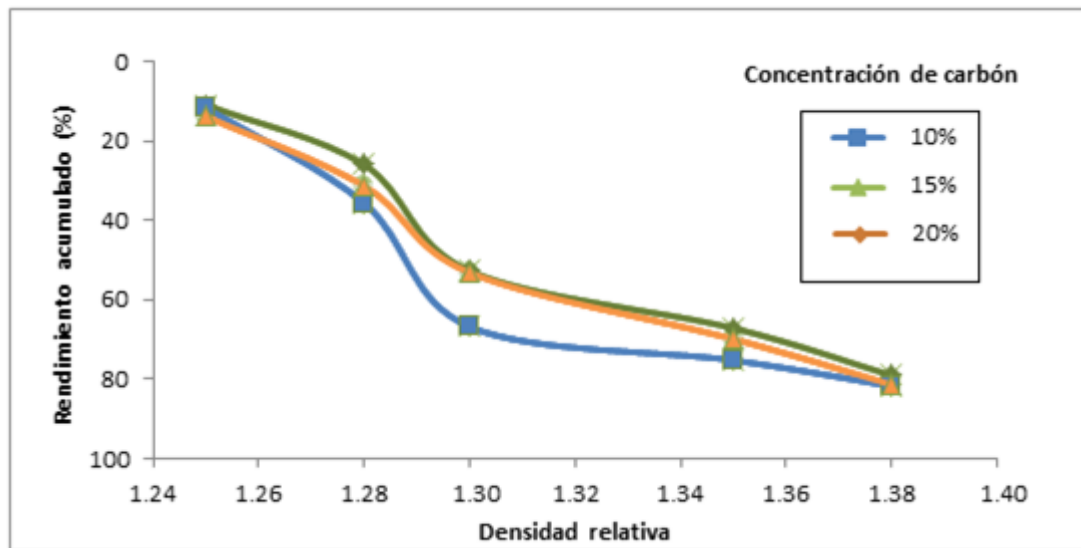


Figura 4.2 Distribución de partículas de carbón acumulado retenido en malla.

4.2 Rendimiento del carbón beneficiado en función de la densidad del medio y la concentración del carbón

Se estudió el efecto que tiene la concentración de carbón en la pulpa y la densidad del medio sobre el rendimiento acumulado de carbón beneficiado obtenido. Los resultados de densidad, concentración de carbón y rendimientos de carbones beneficiados se presentan en las tablas B.1., B.2. y B.3. del Apéndice B. La tabla B.4., muestra los

pasos de construcción de las curvas de lavabilidad. En el Apéndice C (Figuras C.1., C.2. y C.3) se presentan las curvas en forma separada para cada concentración de carbón. Utilizando estos datos se construyeron tres curvas densimétricas las cuales se presentan en la Figura 4.3. Este formato de curvas usualmente se presenta en los estudios de lavado de carbones. ^[6,23]



Grafica 4.3. Curvas densimétricas a las concentraciones de carbón de 10%, 15% y 20% p/p.

Es de anotar que el rango de densidad específica usados en este trabajo [1.25 – 1.38] es relativamente bajo en comparación con los usados en otros trabajos de estudio de lavado de carbones. ^[6, 19,23]

En la Figura 4.3., las curvas obtenidas presentan un comportamiento similar, en donde a cualquier concentración de carbón, el rendimiento del carbón beneficiado se incrementa a medida que la densidad del medio aumenta. El rendimiento acumulado obtenido en el rango de densidades 1.30 a 1.38 no fue significativo, menos de 14.90% para una concentración de carbón de 10% y de 26.22 y 28.21% para las concentraciones de carbón de 15 y 20% respectivamente, esto en comparación con los valores obtenidos de rendimiento 55.16% para una concentración de 10% y 41.84 y

39.33% para las concentraciones de 15 y 20% respectivamente, en el rango de densidad de 1.25 a 1.30.

Para las tres concentraciones usadas, en general, se observó que a la densidad específica de 1.38 el porcentaje acumulado de carbones beneficiados fue cercano al 80% p/p. Estos resultados son interesantes desde el punto de vista de la producción de carbones beneficiados, ya que muestran que usando alta concentración de carbón (20%), la separación produce alta cantidad de masa de flotados a una densidad específica relativamente baja de 1.38. La masa de carbón beneficiado fue de 19.58 g para una concentración de 10%, 16.81 g y 40.14 g para las concentraciones de 15 y 20% respectivamente.

Analizando los rendimientos de flotado en el rango intermedio de densidades de separación (1.30 a 1.35), se observa que en general, los menores rendimientos se obtuvieron usando el 10% p/p de concentración de carbón. Sin embargo, no se observan muchas diferencias en el rendimiento de flotados usando las concentraciones de carbón del 15 y 20%.

El comportamiento de las tres curvas de lavabilidad mostradas en la Figura 4.3, en trabajos a mayor escala, permite seleccionar la densidad de separación de acuerdo al rendimiento de carbón beneficiado requerido y a la concentración de carbón establecida. Esta densidad de separación a escoger también depende del contenido de ceniza deseado, tal como se presenta a continuación.

4.3 Contenido de cenizas del carbón beneficiado en función de la densidad del medio y concentración del carbón

Las curvas de lavabilidad determinan el porcentaje de ceniza del carbón cuando se especifica el rendimiento del carbón beneficiado a obtener. Los resultados de contenido de ceniza acumulada, concentración de carbón en la pulpa y rendimientos de carbones beneficiados se presentan en las tablas B1, B2 y B3 del Apéndice B. En el Apéndice C se presentan las curvas en forma separada para cada concentración de carbón (Figuras C.4., C.5. y C.6.). La Figura 4.4., muestra los rendimientos acumulados de carbón

beneficiado en función de la densidad del medio de separación y de la concentración de carbón en el medio.

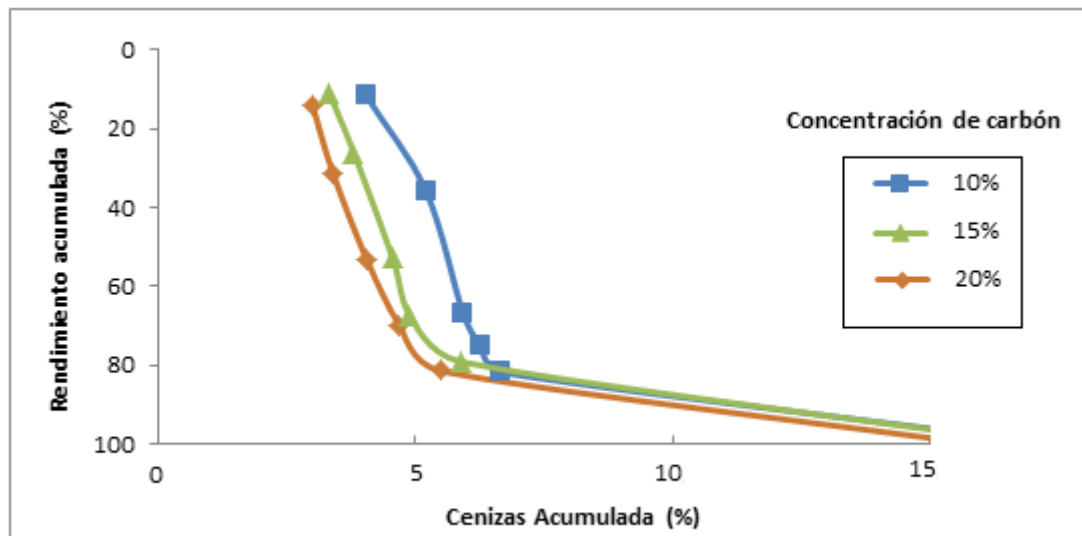


Figura 4.4. Curvas de lavabilidad a las concentraciones de carbón de 10%,15% y 20% p/p

Tal como se observa en la Figura 4.4., las 3 curvas presentan un comportamiento similar, en el cual el rendimiento acumulado se incrementa con el aumento del contenido de cenizas. En otras palabras, el carbón beneficiado que presenta alto rendimiento presenta mayor porcentaje de ceniza.

En general, se observa que a un rendimiento de aproximadamente 80% p/p, los niveles de ceniza encontrados, para las tres concentraciones de carbón, están en el rango de 5 a 7 %. Para este rendimiento del 80% p/p el menor porcentaje de ceniza fue de 5.5 % para la concentración de carbón de 20% p/p, mientras que el porcentaje mayor de ceniza fue de 6.5 % correspondiente a la concentración de carbón del 10% p/p.

Estos resultados muestran que este carbón presenta una reducción de ceniza desde 32% en el carbón alimentado hasta niveles de ceniza de 5 a 7% en el carbón beneficiado teniendo un rendimiento alrededor del 80% p/p.

Por otro lado, analizando el efecto de la concentración de carbón en la pulpa, se observa en la Figura 4.4. que en el rango de rendimientos del 20 al 80%, con la mayor concentración de pulpa (20%) se obtienen los menores porcentajes de ceniza acumulado. Este resultado es importante desde el punto de vista de la producción y de la calidad del carbón beneficiado obtenido, ya que a esta alta concentración de carbón (20%), tal como se mostró anteriormente en la Figura 4.3., se obtuvo un alto rendimiento del 80%.

Las curvas de lavabilidad presentadas en las Figuras 4.3. y 4.4., son curvas que suministran la información básica tanto para diseñar equipos de separación gravimétrica como para evaluar el comportamiento de esos equipos. A nivel industrial los equipos de separación son hidrociclones, jigs, mesas vibratorias entre otros. Para el caso de diseño de un equipo se estipula el rendimiento a obtener, y a través de ambas gráficas se obtiene la densidad a usar en el equipo de separación y el porcentaje de ceniza. Ahora, para el caso de la evaluación de un comportamiento se estipula la densidad de separación que se está usando en el equipo y se comparan el rendimiento y el porcentaje de ceniza obtenido en el equipo con los obtenidos en las Gráficas 4.3 y 4.4.

En este proyecto se emplearon densidades específicas en el rango de 1.25 a 1.38, comparando con anteriores estudios de curvas de lavabilidad^[6, 19,23], cuyos rangos de densidades específicas son relativamente altos respecto a los nuestros 1.30 a 1.60^[6, 19,23], los resultados de rendimiento acumulado del carbón fueron mayores para nuestro estudio, alrededor de 80% p/p y bajos porcentajes de cenizas acumulado en el rango de 5 a 7 % p/p.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Las conclusiones obtenidas de este estudio son las siguientes:

- Se encontró que usando tres concentraciones de carbón en la pulpa, el rendimiento acumulado de flotados se incrementó con la densidad de separación. El mayor rendimiento acumulado fue de aproximadamente 80% a la densidad específica de separación de 1.38.
- Los porcentajes de ceniza acumulada se incrementaron a medida que el rendimiento acumulado aumentó.
- Resultados promisorios mostraron que a una densidad específica de 1.38 se obtuvo un rendimiento acumulado de aproximadamente 80% con un contenido de ceniza acumulada entre el 5 y 7 %.
- Ocurrió una reducción en el contenido de ceniza desde 32% en el alimento hasta 5-6 % en las corrientes flotadas con rendimiento aproximado del 80%.
- Usando la mayor concentración de carbón de 20%, se obtuvo un rendimiento cercano al 80% con porcentaje de ceniza del 5.4%.
- El estudio mostró que para el carbón usado, el rango de densidad específica fue entre 1.25 a 1.38, en comparación con el rango usado en otros estudios de lavabilidad de carbones.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda en futuros beneficios de carbón por separación con medio denso para este carbón, realizar las prácticas experimentales empleando menores y mayores tamaños de partícula que el definido por el tamiz 60.
- Esto con el fin de analizar el comportamiento sobre el rendimiento másico para efecto de remoción de cenizas según diversos tamaños de partícula.
- Utilizar otros reactivos como medio denso, uno de ellos es el cloruro de zinc (ZnCl_2) con la finalidad de evaluar su efectividad comparada al nitrato de calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ según el rango de densidades y el carbón beneficiado recuperado.
- Realizar análisis de minerales y petrográfico en las muestras beneficiadas, para complementar el estudio del análisis próximo sobre las características y comportamiento del carbón en un proceso de separación gravimétrica por medio denso para el carbón utilizado en las pruebas.
- Realizar un estudio de factibilidad técnico-económico sobre la base de los mejores resultados que se obtuvieron para las prácticas experimentales, respecto a la fracción másica del carbón beneficiado y la disminución del contenido de cenizas respecto a la muestra inicial del carbón.
- Evaluar procesos de recuperación del medio de separación, y secado del carbón, los cuales indudablemente aumentan los costos del proceso de beneficio.
- Emplear los datos obtenidos en este estudio, para la implementación a nivel industrial de un hidrociclón de capacidad 4 ton/h existente en el laboratorio de ingeniería química de la Universidad del Valle.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GRISALES PONCE, Diana Milena y TEJADA LOZANO, Elber Fernando. (2000). Beneficio de carbones mediante la utilización de una columna de flotación en régimen continuo. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería Química. 60 p.
- [2] ROJAS GONZÁLEZ, Andrés Felipe. (2001). Reactividad en la combustión de carbones beneficiados. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería Química. 104 p.
- [3] ROJAS, Andrés Felipe y BARRAZA, Juan Manuel (2008). Beneficio de los carbones guachinte (Cauca) y golondrinas usando un circuito ciclónico en dos etapas de separación. (Santiago de Cali), Dyna, 75, 156, pp.165-176.
- [4] PIÑERES MENDOZA, Jorge Luis. (2003). Separación de grupos macérales en fracciones beneficiadas de carbón obtenidas por flotación burbujeante. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Química). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería Química. 59 p.
- [5] Carvajal Pulpa y Papel Planta II Informe de sostenibilidad. (2011). [online]. http://www.propal.com.co/templates/propal/documentos/informe_sostenibilidad.pdf.
- [6] LASKOWSKI, J. S. (2001). Coal Flotation and Fine Coal Utilization. Amsterdam: Elsevier.
- [7] ESCOBAR, Juan Felipe y ORTIGOZA, Julieth. (2011). Efecto del tamaño de partícula, densidad del medio y concentración del carbón del cerrejón en un proceso de beneficio usando separación flotado – hundido. (Santiago de Cali), Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Química. Universidad del Valle.

[8] STACH, E., [et al.](1982). Stach 's textbook of coal petrology, 3 Ed, GebruderBorntraeger, Stuttgart. 335 p.

[9] GÓMEZ ROJAS, Olga patricia. (2006). Separación de los grupos macéales del carbón el uso de flotación en columna. (Medellín). Trabajo de grado (Magister en Ingeniería área de Materiales y Procesos). Universidad Nacional de Colombia. Facultad Minas. 85 p.

[10] Research group Minerals. Components and properties of coal [online]. http://grupomineralex.com/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid.

[11] BRAVO SANDOVAL, Liz Carime y RENGIFO COLLAZOS, Anna Jennifer. (1997). Beneficio de un carbón del Cauca mediante flotación. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería Química. 34 p.

[12] BARRAZA, Juan Manuel y ETAYO Julio. (2009). Correlaciones matemáticas para la obtención de rendimiento de producción, remoción de cenizas y partición de agua usando un hidrociclón "solo agua". Dyna, Año 76, Nro. 157, 181-193 p.

[13] ROUSAKI, Katerina y COUCH. (2000) Gordon. Advanced clean coal technologies and low value coals. Inglaterra.

[14] FORERO, Alvaro y DIAZ Sandra. (2008). Caracterización y beneficio de un mineral de magnetita para lavado de carbones en medios densos. Vol 6, N°4, p.19. [online].http://www.uac.edu.co/images/stories/publicaciones/revistas_cientificas/prospectiva/volumen-6-no-1/3-caracterizacion-v6-1.pdf.

[15] DELGADO COSME, José Julián. (2004). Efecto del pH sobre el proceso de beneficio de un carbón del sur-occidente colombiano mediante flotación espumante. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería Química. 59 p.

[16] PAVEZ. Oswaldo. (2006). Concentración de minerales. Chile, Atacama. [online]. <http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Pavez/APUNTES%20%20DE%20CONCENTRACION%20C3%93N%20DE%20MINERALES%20II.pdf>.

[17] JARAMILLO, Paola. (2006). Utilización de las técnicas termogravimétricas (TGA y DTGA) para optimizar la combustión de mezclas de carbón consumidas en la caldera de potencia de Propal S.A Planta II. (Santiago de Cali), Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Química. Universidad del Valle. Colombia.

[18] VANEGAS CHAMORRO, Marley Cecilia. (1998). Licuefacción de fracciones beneficiadas de carbón obtenidas por separación gravimétrica. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Química). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería Química. 85 p.

[19] CAICEDO REALPE, María del Rosario. (2000). Beneficio de carbones de la región suroccidental Colombiana remoción de cenizas y azufre mediante separación hidrociclonica. (Santiago de Cali), Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería Química). Universidad del Valle. Facultad de ingeniería Química. 69 p.

[20] BAEZ RODRIGUEZ, Ignacio. Manual de beneficio de carbones y coquización [online]. URL: [ftp://soporte.uson.mx/PUBLICO/07_SOCIOLOGIA.ADM.PUBLICA/Nueva%20carpeta/INTERESANTE/Manual%20de%20beneficio%20de%20carbones .pdf](ftp://soporte.uson.mx/PUBLICO/07_SOCIOLOGIA.ADM.PUBLICA/Nueva%20carpeta/INTERESANTE/Manual%20de%20beneficio%20de%20carbones.pdf)>

[21] Información técnica de equipos y suministros para laboratorios [online]. http://www.vidrafoc.com/index.php?main_page=product_info&products_id=4395.

[22] DIAZ CHAVES, Alvaro. (1993). Evaluación de procesos de beneficio para carbones sector golondrinas del municipio de Cali. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Vol 5, Nº1.

[23] HOFFMANN SAMPAIO, Carlos y MARQUES TAVARES, Luis Marcelo. (2005). Beneficiamiento Gravimétrico. UFRGS. 66 p.

[24] American Society of Testing Materials. Standard Test Method for Performing the Sieve Analysis of Coal and Designating Coal Size. Philadelphia: 1987 (ASTM D4749).

[25] American Society of Testing Materials. Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. Philadelphia: 1987 (ASTM D3173).

[26] American Society of Testing Materials. Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke. Philadelphia: 1989 (ASTM D3174).

ANEXOS

APÉNDICE A. EQUIPOS UTILIZADO



Figura A.1. Molino de discos



Figura A.2. Molino de cuchillas



Figura A.3. Juego de Tamices



Figura A.4. Equipo agitador de cribas Ro-Tap



Figura A.5. Densímetro digital AntonPaar, referencia DMA 35N



Figura A.6. Montaje empleado para la separación gravimétrica

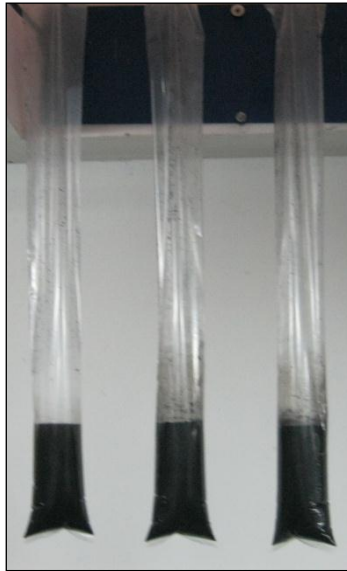


Figura A.7. Separación gravimétrica por medio denso

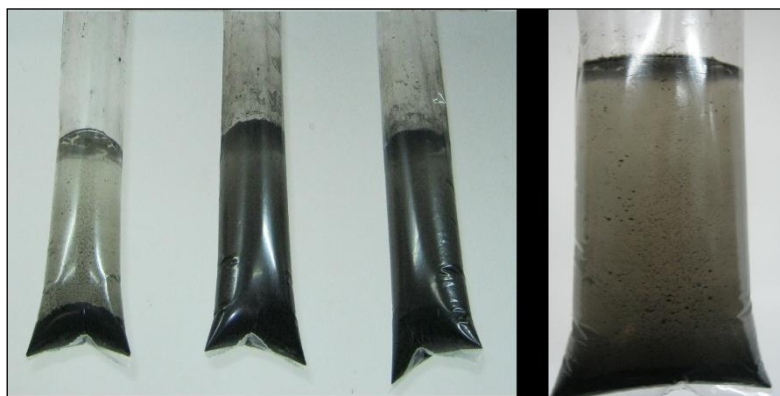


Figura A.8. Fases generadas en la separación gravimétrica



Figura A.9. Sistema de filtración



Figura A.10. Mufla Terrígeno D8



Figura A.11. Desecador

APÉNDICE B.CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE LAVABILIDAD

1	2	3	4	5	6	7	8
3 X 2							
Densidad Relativa	Fracciones				Flotado acumulado		
	Masa (%)	Contenido de cenizas (%)	Unidades de cenizas	Unidades de cenizas acum.	Masa acum. (%)	Contenido de cenizas acum. (%)	Unidades de cenizas acum.
A	B	C	D	E	F	G	H
					0		
1,25	11,6	4,04	0,47	0,47	11,64	4,04	11,99
1,28	24,1	5,76	1,39	1,86	35,69	5,20	11,52
1,30	31,1	6,75	2,10	3,95	66,80	5,92	10,13
1,35	8,4	8,96	0,76	4,71	75,23	6,26	8,03
1,38	6,5	11,23	0,73	5,44	81,70	6,65	7,28
	18,3	65,49	11,99	17,42	100,00	17,42	6,55
	100,00		17,42				

Tabla B.1. Datos para construcción de curvas de lavabilidad concentración 10 %

Densidad Relativa	Masa (%)	Contenido de cenizas (%)	Unidades de cenizas	Unidades de cenizas acum.	Masa acum. (%)	Contenido de cenizas acum. (%)	Unidades de cenizas acum.
A	B	C	D	E	F	G	H
					0		
1,25	10,9	3,32	0,36	0,36	10,94	3,318	12,44
1,28	15,1	4,14	0,62	0,99	25,99	3,793	12,07
1,30	26,8	5,28	1,42	2,40	52,78	4,550	11,45
1,35	14,4	6,11	0,88	3,28	67,14	4,884	10,04
1,38	11,9	11,43	1,36	4,63	79,00	5,867	9,16
	21,0	59,21	12,44	17,07	100,00	17,071	7,80
	100,00		17,07				

Tabla B.2. Datos para construcción de curvas de lavabilidad concentración 15 %

1	2	3	4	5	6	7	8
Densidad Relativa	Fracciones				Flotado acumulado		
	Masa (%)	Contenido de cenizas (%)	Unidades de cenizas	Unidades de cenizas acum.	Masa acum. (%)	Contenido de cenizas acum. (%)	Unidades de cenizas acum.
A	B	C	D	E	F	G	H
					0		
1,25	13,8	2,99	0,41	0,41	13,81	2,99	11,46
1,28	17,6	3,71	0,65	1,06	31,37	3,39	11,05
1,30	21,8	4,99	1,09	2,15	53,14	4,05	10,40
1,35	16,7	6,74	1,13	3,28	69,88	4,69	9,31
1,38	11,5	10,24	1,17	4,45	81,35	5,47	8,19
	18,7	61,45	11,46	15,92	100,00	15,92	7,01
	100,00		15,92				

Tabla B.3 Datos para construcción de curvas de lavabilidad concentración 20 %

Columna	Descripción
1	Densidad específica del medio de separación.
2	Rendimiento de flotados obtenidos con cada densidad del medio respecto a la masa inicial.
3	Concentración de ceniza de cada fracción flotante obtenida con cada densidad.
4	Relación entre la ceniza obtenida en cada fracción y la masa inicial (columna 3 x columna 4).
5	Acumulado de cenizas de cada fracción.
6	Rendimiento acumulado de flotados obtenidos en cada densidad.
7	Concentración de ceniza acumulada (columna 6 / columna 7).
8	Unidades de cenizas acumuladas.
Las curvas de lavabilidad de carbones se construyen con los valores de las columnas 1 (Densidad específica), 6 (Rendimientos acumulados de flotados) y 7 (Concentración de cenizas acumulado). Las gráficas se muestran en el apéndice c.	

Tabla B.4. Pasos construcción graficas de lavabilidad

APÉNDICE C. GRÁFICAS DE CURVAS DE LAVABILIDAD

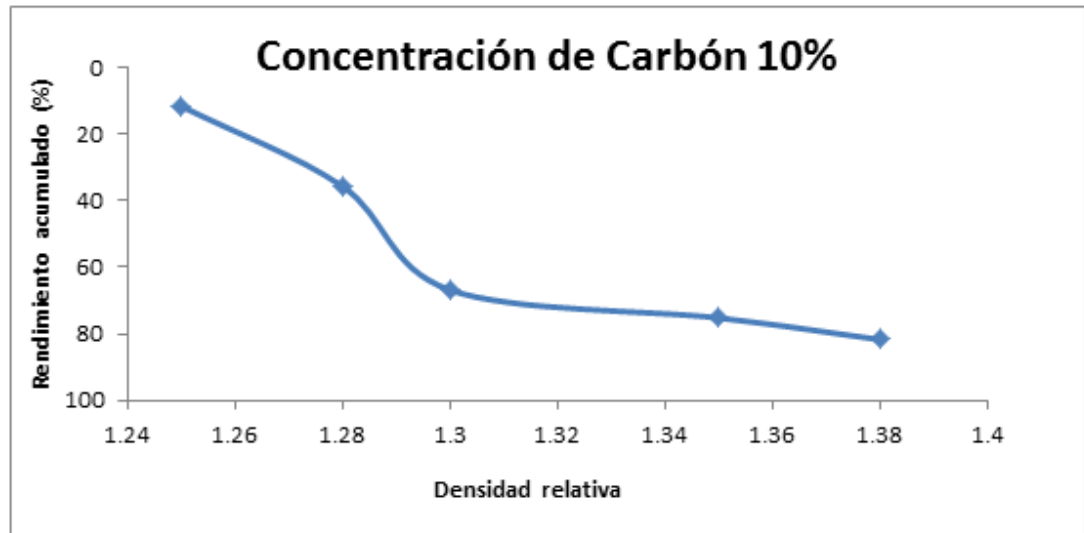
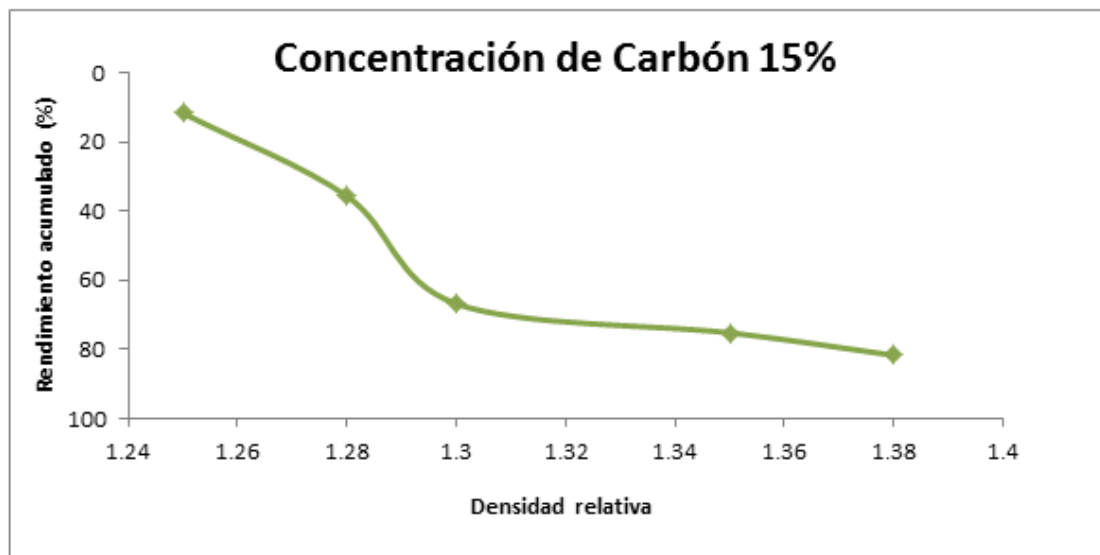
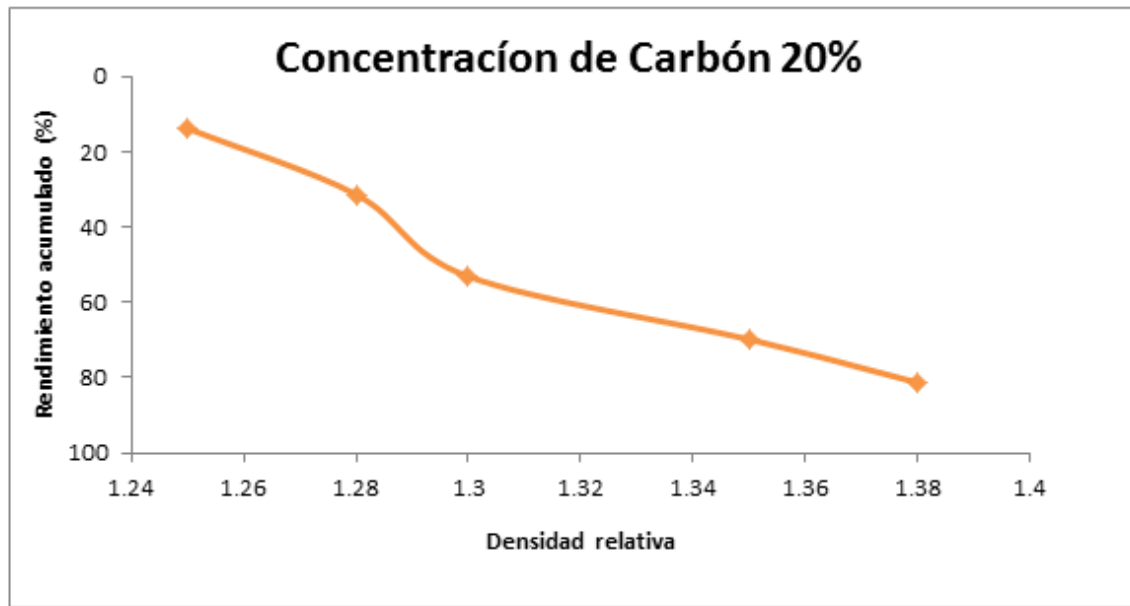


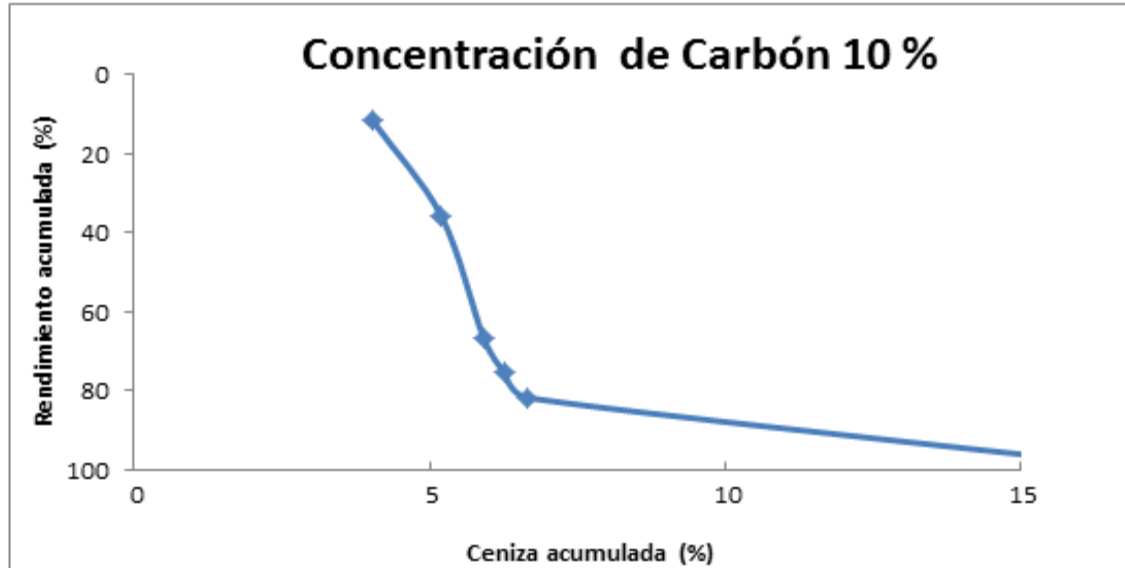
Figura C.1. Curva densimétrica a concentración de carbón 10%



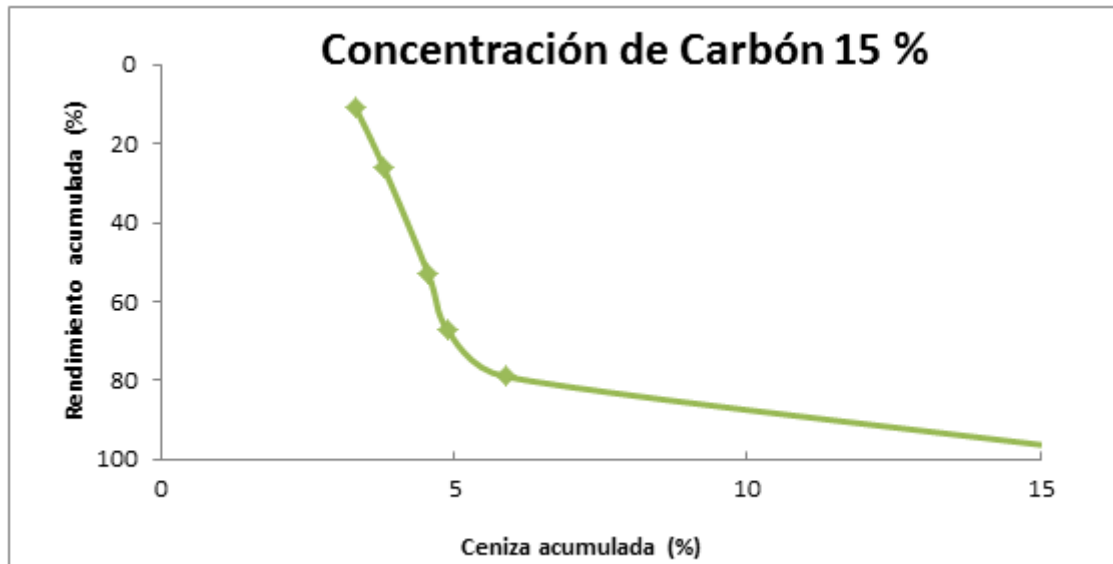
Grafica C.2. Curva densimétrica a concentración de carbón 15%



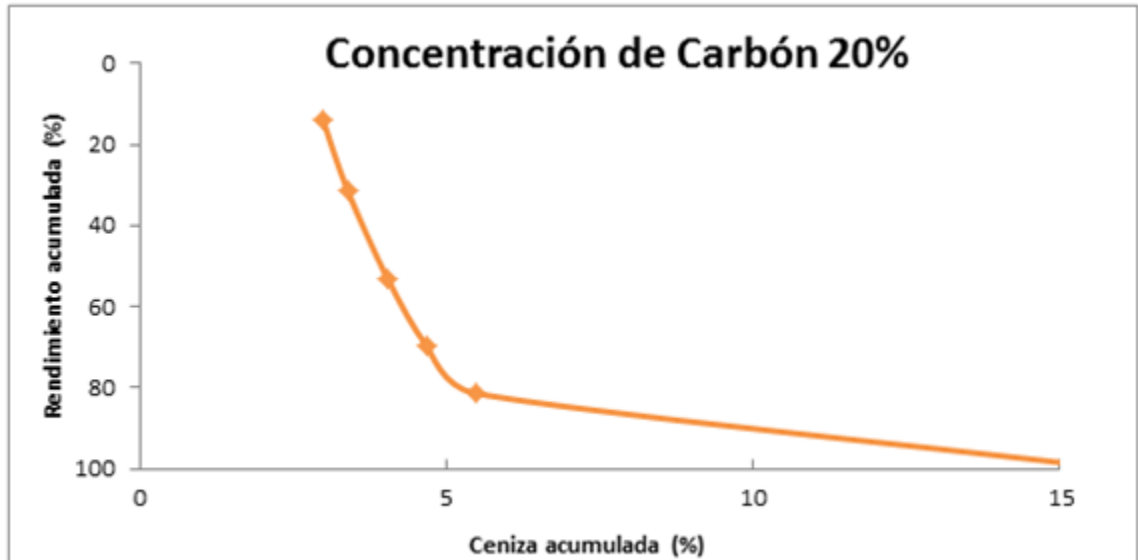
Grafica C.3. Curva densimétrica a concentración de carbón 20%



Grafica C.4. Curva de lavabilidad a concentración de carbón 10%



Grafica C.5. Curva de lavabilidad a concentración de carbón 15%



Grafica C.6. Curva de lavabilidad concentración de carbón 20%