

Análisis estadístico de un circuito hidrociclónico para el beneficio de carbones

Statistical analysis of a hydrocyclone system for coals benefit

María Alvarado Bawab¹, Marley Vanegas Chamorro², Guillermo Valencia Ochoa³

¹ M.Sc. en Ingeniería - Ingeniería Química. Director ejecutivo. Fundación Puerta de Oro de Colombia., Barranquilla-Colombia.

² PhD. en Tecnología, diversificación, calidad y ahorro energético. Docente de planta. Universidad del Atlántico.
Facultad de Ingeniería. Barranquilla-Colombia.

³ M.Sc. Ingeniería Mecánica. Docente de Planta. Universidad del Atlántico. Facultad de Ingeniería Barranquilla - Colombia.
E-mail: maryb_7213@hotmail.com

Recibido 29/02/2016
Aceptado 01/06/2016

Cite this article as: M. Alvarado, M. Vanegas, G. Valencia, "Statistical analysis of a hydrocyclone system for coals benefit", *Prospect*, Vol 14, N° 2, 53-61, 2016.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the effect of particle size, coal concentration, discharge diameter and type of hydrocyclone on the mass yield, organic recovery efficiency, and the ash and sulfur removal percentages in a Colombian coal from the Valle del Cauca department. A washing system with two hydrocyclones was developed, one with a flat bottom and the other with a conical bottom. A randomized fractional factorial design (IV order resolution) was built in order to determine the significant effects on the washing process.

The hydrocyclone discharge diameter was the most influential factor on the mass yield for both hydrocyclones. The study concluded that the conical bottom hydrocyclone should be used for getting a better yield mass; the flat bottom hydrocyclone should be used to remove the highest amount of ash and sulfur content during the process.

Keywords: Beneficiation; Hydrocyclone; Mass Yield; Organic Recovery Efficiency.

RESUMEN

Este estudio busca evaluar el efecto del tamaño de partícula, la concentración de carbón, el diámetro de descarga y tipo de hidrociclón sobre el rendimiento másico, la eficiencia de recuperación orgánica y los porcentajes de eliminación de ceniza y azufre de un carbón proveniente del departamento del Valle del Cauca - Colombia. Para esto se desarrolló un sistema de lavado que empleó dos hidrociclones, uno de fondo plano y otro de fondo cónico. Se desarrolló un diseño estadístico experimental factorial fraccionado de IV resolución aleatorizado con el objeto de determinar los efectos significativos en el proceso de lavado.

Los resultados evidenciaron que el diámetro de descarga del hidrociclón es el factor más influyente sobre el rendimiento másico; se concluyó que el hidrociclón de fondo cónico se debe emplear para alcanzar mayores rendimientos másicos mientras que el hidrociclón de fondo plano se debe emplear para remover la mayor cantidad de ceniza y/o azufre durante el proceso.

Palabras clave: Beneficio; Hidrociclón; Rendimiento másico; Eficiencia de recuperación orgánica.

Nomenclatura

<i>Símbolos</i>		<i>Unidades</i>
D_p	Diámetro de partícula	[mm]
D_e	Diámetro interno de alimentación	[mm]
D_t	Diámetro de la tubería	[mm]
D_u	Diámetro descarga	[mm]
B_{rd}	Boquillas de reducción de diámetro descarga	[mm]
D_v	Diámetro del buscador de vórtice	[mm]
E_v	Longitud libre de buscador de vórtice	[mm]
E.R.O	Eficiencia de recuperación orgánica	[adimensional]
H	Altura del hidrociclón	[mm]
M	Masa	[kg]
X	Concentración del slurry	[%]
S	Altura del soporte del buscador de vórtice	[mm]

<i>Letras griegas</i>		<i>Unidades</i>
η	Rendimiento másico	[adimensional]
θ	Ángulo de inclinación del hidrociclón	[grados]

Subíndice

C_o	Carbón en el alimento	[gramos]
C_s	Carbón en la parte superior del hidrociclón	[gramos]
C_i	Carbón en la parte inferior del hidrociclón	[gramos]

Superíndice

bs	base seca
----	-----------

1. INTRODUCCIÓN

La transformación de combustibles fósiles es la fuente principal de emisiones antropogénicas en todo el mundo. Aunque el uso del petróleo en el sector del transporte es la mayor fuente de emisiones de CO₂, el carbón es una fuente significativa de estas emisiones. La academia y la industria a nivel mundial se han esmerado por investigar y desarrollar diferentes tecnologías para dar respuesta a esta gran problemática medioambiental [1]. A nivel regional, existe el interés de aportar a la solución de esta problemática mediante el desarrollo de investigaciones experimentales, que pretendan mitigar los efectos medioambientales causados durante los procesos de conversión del carbón, con la finalidad de mejorar los sistemas o tecnologías que se emplean en la actualidad en los procesos de beneficio.

Con el objeto de mitigar las emisiones de estos gases nocivos y así contribuir a la conservación del medioambiente, se deben establecer políticas concretas a partir de las discusiones entre los entes

gubernamentales, expertos en la temática a nivel industrial e investigadores del sector académico que conduzcan a este camino. Todas las previsiones apuntan a un aumento de la demanda mundial de energía primaria promovida fundamentalmente por los países en vía de desarrollo como China, India y Oriente Medio, con incremento de las emisiones de CO₂ que causarían una elevación apreciable de la temperatura media mundial [2].

La región carbonífera del Valle del Cauca (Colombia) cuenta con un área minera ubicada en Yumbo-Asnazú, para la cual se han estimado reservas medidas de 29,8 Mt [3], la cual se caracteriza por poseer carbones con alto contenido de cenizas y azufre, lo que los hace poco susceptibles para ser usados como combustible. Los procesos de beneficio consisten en someter al carbón a un proceso de trituración, tamizado y lavado con el fin de obtener fracciones de carbón con mejores características tales como el incremento de la capacidad calorífica y por ende reducción del contenido de materia mineral, que lo hacen más apto para su uso como combustible [1].

En la actualidad, se cuenta con diferentes tecnologías que facilitan el proceso de limpieza de los combustibles fósiles. Entre estas se pueden mencionar como relevantes los procesos de desmineralización mediante ataque químico con compuestos básicos, ácidos o con solventes [4], donde se eliminan carbonatos y/o silicatos contenidos en el carbón dependiendo de cuál sea la sustancia que se emplee durante este procedimiento [5]; los procesos de separación gravimétrica, donde se concentra la materia orgánica mediante inmersiones sucesivas en un medio que cumpla con ciertas características de acuerdo a los resultados que se desean obtener de este procedimiento [6,7]; la separación en medio denso [8], tecnología muy utilizada para beneficio de carbones debido a que es bastante eficaz donde hay materiales con densidades bastante cercanas y tamaños de partícula finos; la tecnología de flotación burbujeante [4], la cual utiliza la diferencia de tensión superficial que existe entre la materia mineral y la materia orgánica para separarlos; entre otras tecnologías.

En Colombia varias instituciones desarrollan investigación en el área de beneficio de carbones utilizando la técnica de separación por medio denso. Rojas y Barraza [9] beneficiaron carbones del Cauca y Valle del Cauca utilizando un circuito ciclónico con medio denso en dos etapas de separación en serie obteniendo rendimientos de las fracciones beneficiadas entre 28 y 58% en la primera etapa mientras que en la segunda etapa alcanzaron rendimientos hasta del 71% en uno de los carbones estudiados. Estos mismos investigadores estudiaron la distribución de minerales en dos carbones empleando separación en medio denso, obteniendo fracciones concentradas en materia mineral enriquecidas con minerales tales como caolinita, cuarzo, dolomita, jarosita, yeso y piritita, mientras que las concentradas en materia orgánica tenían afinidad con minerales tales como siderita y valerita [10].

Otro estudio reportado en la bibliografía científica que emplea la técnica de separación en medio denso es la determinación del factor de partición elemental cuyo objetivo fue conocer la afinidad de los carbones beneficiados mediante esta tecnología hacia las fases ricas en materia orgánica o materia mineral; en este estudio se encontró que cuando el tamaño de partícula de las fracciones de carbón disminuye se aumenta la afinidad de los elementos hacia la materia mineral [11]. Otro aspecto fundamental es estimar en tiempo real el avance en la separación de los componentes, por lo cual en un estudio reciente se estudió a través de simulaciones de dinámica de fluido computacional en 2D para una mezcla de agua y aceite, una técnica rentable para medir en tiempo real de forma no invasiva el contenido de aceite en agua en hidrociclones

instalados mar adentro, logrando determinar a partir de la concentración del producto procesado a la entrada y salida del hidrociclón, los controles de operación para incrementar la efectividad y reducir los costo del proceso [12]. Por otra parte, otro estudio demostró que la disipación de energía mecánica en la descarga de un hidrociclón operado con suspensiones newtonianas evidencian que es un factor importante para obtener aspectos relevantes de operación como la geometría de diámetros de salida, la partición de caudales, el diámetro de aire en la descarga y el ángulo de descarga [13].

El beneficio por separación en medio denso presenta ventajas con respecto a otros sistemas ya que el mantenimiento de los ciclones es bastante económico, no ocupa mucho espacio y utiliza agua o un medio denso como medio de separación [6,14]. Un ciclón es esencialmente una cámara de sedimentación en la cual se inyecta un fluido, medio líquido mezclado con partículas de carbón, de forma tangencial en su parte cilíndrica, el cual llega a tener una elevada energía rotacional debido a la aceleración centrífuga, de tal forma que las partículas de mayor tamaño y más densas son centrifugadas, saliendo por la boquilla de descarga, mientras que las partículas más finas y menos densas salen por rebose en la parte superior del hidrociclón [15].

Los hidrociclones aunque parecen equipos simples, presentan un sistema de funcionamiento un poco complejo que sirven para la recuperación y selección de minerales. Algunas ventajas de los hidrociclones es la versatilidad en su operación (clarificación, clasificación, concentración, separaciones gas-líquido), su facilidad de instalación y mantenimiento, el ahorro de espacio en su instalación y los esfuerzos cortantes altos que evitan la aglomeración del mineral. En cuanto a las desventajas se encuentra la limitante de la capacidad del equipo, ya que a mayor capacidad presentan menor eficiencia en la concentración [16].

Con el fin de ampliar el campo de trabajo de los hidrociclones de fondo cónico hacia tamaños de corte mayores, por encima de las 150 micras, surgió el desarrollo de los ciclones de fondo plano, llamados por su inventor el Profesor Helmut Trawinski, Ciclones CBC (Circulating Bed Cyclone) o ciclones de lecho circulante [18]. Por esta razón, en esta investigación se trabajó con ambos ciclones, fondo cónico y plano, con la idea de hacer un análisis comparativo de su desempeño durante el proceso de beneficio de carbones.

El principal aporte de este artículo es la presentación de las características de lavabilidad de un carbón colombiano proveniente del Valle del Cauca en un

circuito hidrociclónico; así mismo, la determinación de factores geométricos y operacionales estadísticamente significativos sobre el Rendimiento Másico (η), la Eficiencia de Recuperación Orgánica (E.R.O) y los porcentajes de eliminación de ceniza ($\%E_{Cz}$) y azufre ($\%E_s$); finalmente, se presenta una correlación de la eficiencia de cada hidrociclón válida dentro de unos rangos de operación, la cual puede ser utilizada con un buen nivel de confianza para el dimensionamiento de estos dispositivos.

2. METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de este estudio se seleccionó una muestra de carbón cuyo análisis próximo para las diferentes fracciones de tamaño se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de la muestra bruta y fracciones de tamaños de partícula en base seca.

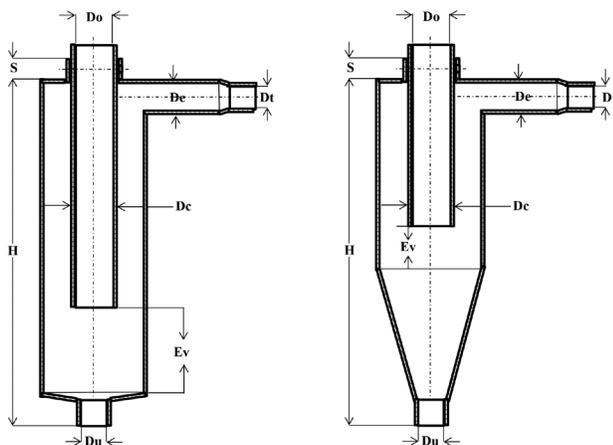
Table 1. Raw sample characterization and particle size fractions at dry basis.

Caracterización	Tamaño de partícula (mm)		
	Bruto	3,4-1,4	1,4-0,6
Humedad total (% p/p)	2,2	1,6	1,7
Cenizas (% p/p)	15,1	18,3	15,6
Azufre (% p/p)	1,4	1,1	1,1
Carbono fijo (% p/p)	82,6	80,0	82,7
Poder Calorífico (kJ/kg)	29039	28146	28727

Las muestras de carbón se redujeron de tamaño seleccionando los intervalos de tamaños de partícula 3,4-1,4 y 1,4-0,6 mm de acuerdo al diseño geométrico de los hidrociclones utilizados. En la figura 1 se presentan los hidrociclones utilizados en este estudio.

Figura 1. Diagrama del hidrociclón plano [6] y cónico [17].

Figure 1. Hydrocyclone scheme plane [6] and conical [17].



Las diferentes fracciones de carbón obtenidas del proceso de trituración y tamizado se caracterizaron para calcular el contenido de humedad, cenizas, azufre total y poder calorífico empleando para el análisis de humedad total la norma ASTM D3173-06, cenizas la norma ASTM D 3174-06, azufre total la norma ASTM D 4239-06 y para el poder calorífico norma ASTM D 3286-06.

Se realizaron pruebas de lavabilidad en dos tipos de hidrociclones diseñados y construidos en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Atlántico con el fin de emplearlos en proceso de beneficio de diferentes carbones de la Costa Caribe Colombiana. Las características de éstos se relacionan en la tabla 2.

Tabla 2. Características de diseño de los ciclones empleados en el proceso de lavado.

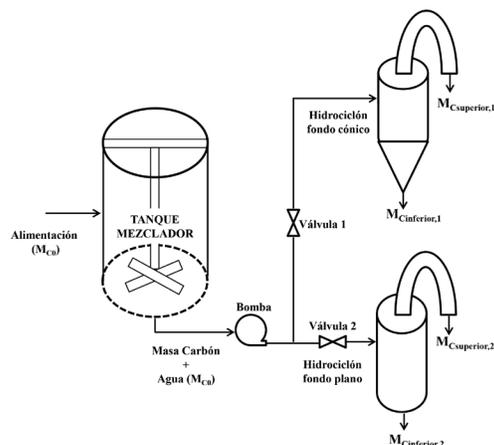
Table 2. Design features of cyclones used in the washing process.

Características de los hidrociclones	Fondo cónico	Fondo plano
	(mm) [14]	(mm) [6]
Diámetro interno de alimentación (D_c)	38,1	28,0
Diámetro del buscador de vórtice (D_v)	50,8	38,3
Diámetro de descarga (D_d)	25,4	25,9
Boquillas de reducción diámetro descarga (B_{rd})	12,7-19,1	12,7-19,1
Altura del hidrociclón (H)	01,6	411,0
Longitud libre de buscador de vórtice (E_v)	25,4-37,9	102,7
Altura del soporte del buscador de vórtice (S)	25,4	25,4
Diámetro de la tubería alimentación (D_i)	25,4	25,4
Ángulo de inclinación (θ)	30,0	160,0

Para la ejecución de las pruebas experimentales, inicialmente se bombeó agua por la tubería de entrada hasta obtener 500 L en el tanque de mezcla, se agregó carbón hasta obtener concentraciones en peso del 5% y 10%, manteniéndose una presión constante de 10 psi durante la operación de acuerdo con resultados obtenidos previamente [17]. La figura 2 presenta el esquema del circuito utilizado para este procedimiento.

Figura 2. Diagrama del circuito hidrociclónico.

Figure 2. Hydrocyclone circuit diagram.



Se utilizó un diseño experimental factorial fraccionado aleatorizado (1/2 de resolución IV) debido a la gran cantidad y volumen de muestras requeridas, lo cual representa altos costos para desarrollar cada prueba. Con el análisis estadístico obtenido se determinaron los factores significativos en el proceso de lavabilidad. Se evaluaron tres factores cuantitativos y uno cualitativo con dos niveles como se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Diseño experimental factorial fraccionado.
Table 3. Fractional factorial experimental design.

Factor	Niveles	
	1	2
Diámetro de partícula (D_p), mm	0,6-1,4	1,4-3,4
Concentración del slurry (X), %	5	10
Boquillas de reducción diámetro descarga (B_d), mm	12,7	19,1
Tipo de hidrociclón	Fondo plano	Fondo cónico

Para estimar los efectos principales e interacciones influyentes en el proceso de lavado, se empleó el diseño de experimento factorial fraccionado 2^{4-1} con relación de definición I=ABCD, donde los efectos no pueden estimarse de manera individual, por lo que se estiman sumas o restas de efectos que son alias (equivalentes) entre sí. Para el caso particular del diseño aplicado en este estudio, el cual es de resolución IV, ningún efecto principal se encuentra confundido entre sí o con interacción entre dos factores pero éstas pueden tener alias entre sí [19].

Los experimentos se realizaron con una réplica y las corridas fueron aleatorizadas para minimizar los ruidos en los resultados. Las fracciones superiores e inferiores lavadas se caracterizaron en cuanto a su contenido de cenizas y azufre con el fin de evaluar el desempeño de los hidrociclones durante el proceso de beneficio. Los resultados obtenidos se utilizaron para calcular el rendimiento másico, la eficiencia de recuperación orgánica y los porcentajes de eliminación de ceniza y azufre.

El rendimiento másico (η) se calculó como se expresa en la (ecuación 1).

$$\eta (\%) = \frac{M_{C_s}^{bs}}{M_{C_o}^{bs}} \times 100 \quad (1)$$

En la anterior expresión, M representa la masa de carbón, el superíndice bs indica que su valor está dado en base seca, el subíndice C_s es la corriente de carbón de la parte superior del hidrociclón y el subíndice C_o es la corriente de carbón en el alimento. Es decir, que que $M_{C_s}^{bs}$ se refiere a la masa de carbón beneficiado en base seca recuperada en el rebose del hidrociclón, y $M_{C_o}^{bs}$ hace referencia a la masa de alimento o la suma de las cantidades de carbón en base seca obtenidas de

las dos corrientes de descarga (superior e inferior) del hidrociclón como lo expresa la (ecuación 2).

$$M_{C_o}^{bs} = (M_{C_s}^{bs} + M_{C_i}^{bs}) \quad (2)$$

En la (ecuación 2), el subíndice C_i representa a la corriente de carbón en la parte inferior del hidrociclón.

La eficiencia de recuperación orgánica (E.R.O) se define como la (ecuación 3) [20] y su magnitud se calcula empleando la (ecuación 4):

$$E.R.O = \frac{\text{Materia Orgánica Recuperada en la parte superior}}{\text{Materia Orgánica Introducida en el Alimento}} \quad (3)$$

$$E.R.O = \frac{(100 - \%Ceniza_{C_s}^{bs})_{superior}}{(100 - \%Ceniza_{C_o}^{bs})_{alimento}} \times \eta \quad (4)$$

El porcentaje de eliminación de cenizas ($\%E_{C_z}$) y azufre ($\%E_s$) se calculó a partir de las (ecuaciones 5 y 6):

$$\%E_{C_z} = \left[\left(1 - \frac{M_{C_{superior}}}{M_{C_o}} \right) \left(\frac{\%Ceniza_{superior}}{\%Ceniza_{C_o}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\%E_s = \left[\left(1 - \frac{M_{C_{superior}}}{M_{C_o}} \right) \left(\frac{\%Azufre_{superior}}{\%Azufre_{C_o}} \right) \right] \quad (6)$$

Para evaluar la influencia de los factores de estudio sobre el rendimiento másico, la recuperación de materia orgánica, la eliminación de ceniza y azufre se elaboró el análisis de varianza ANOVA factorial fraccionado 24-1 para cada uno de estos factores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el proceso de trituración y tamizado se obtuvo un porcentaje menor al 10% para las fracciones con tamaños de partícula menores de 0,6 mm, por lo que se decidió no tenerlos en cuenta para este estudio, además de la dificultad que representa lavar finos con este tipo de tecnología. En la tabla 1 se evidencia como el contenido de azufre en el carbón bruto disminuye durante el proceso de trituración y tamizado, lo cual podría indicar que la mayoría del contenido de este mineral es de tipo pirítico ya que se concentró en las fracciones más finas [20]; este resultado hace parte de otra temática y por ende no se presenta aquí.

Al aplicar el diseño experimental factorial fraccionado 2^{4-1} , se obtuvieron los resultados que se presentan en la tabla 4 para cada una de las pruebas. La tabla 4 presenta los valores obtenidos de la eficiencia, la Eficiencia Recuperada Orgánica (E.R.O), contenido de ceniza y azufre, para cada una de las combinaciones del diseño de experimento seleccionado en la operación del proceso de beneficio del carbón.

Tabla 4. Corridas experimentales y resultados obtenidos.

Table 4. Experimental tests and results obtained.

Nº	Peso %	Du (mm)	Dp (mm)	Tipo de equipo	η (%)	E.R.O (%)	Cz %	S %
1	5	12,7	0,6 - 1,4	Plano	14,4	16,0	94,0	83,7
2	10	12,7	0,6 - 1,4	Cónico	75,4	80,3	48,9	19,4
3	5	19,1	0,6 - 1,4	Cónico	20,6	22,4	89,3	78,7
4	10	19,1	0,6 - 1,4	Plano	19,8	21,9	91,3	80,4
5	5	12,7	1,4 - 3,4	Cónico	55,9	62,5	73,9	46,2
6	10	12,7	1,4 - 3,4	Plano	46,0	52,8	84,4	51,5
7	5	19,1	1,4 - 3,4	Plano	9,6	11,0	96,0	90,4
8	10	19,1	1,4 - 3,4	Cónico	12,2	14,0	95,7	87,7
9	5	12,7	0,6 - 1,4	Plano	13,0	14,3	94,1	86,5
10	10	12,7	0,6 - 1,4	Cónico	70,9	76,1	57,5	26,5
11	5	19,1	0,6 - 1,4	Cónico	20,9	22,8	89,4	78,3
12	10	19,1	0,6 - 1,4	Plano	13,8	15,2	93,2	85,8
13	5	12,7	1,4 - 3,4	Cónico	55,0	62,0	76,2	46,0
14	10	12,7	1,4 - 3,4	Plano	69,9	78,9	70,7	28,9
15	5	19,1	1,4 - 3,4	Plano	7,9	9,1	97,3	92,0
16	10	19,1	1,4 - 3,4	Cónico	33,9	38,2	85,2	66,7

Los resultados del análisis estadístico ANOVA se muestran en tabla 5, donde se puede observar en términos generales que el diámetro de descarga D_u es la variable con mayor efecto significativo en este proceso de lavado, mientras que el diámetro de la partícula no influye sobre el rendimiento másico, lo anterior basado en el Valor-P superior a 0,05. Las pruebas 6 y 14 que se muestran en la tabla 4 presentan errores estandarizados grandes por lo cual se consideran como corridas

inusuales. Los datos obtenidos de las corridas para el rendimiento másico, la eficiencia de recuperación orgánica y la eliminación de azufre y ceniza presentan una distribución normal; así mismo, los residuos calculados no presentan ninguna tendencia, lo cual indica que no hay evidencia suficiente de que alguna variable influyente no hubiera sido considerada para las corridas realizadas.

Tabla 5. ANOVA del rendimiento másico.

Table 5. ANOVA of the mass yield.

Fuente	*GL	Suma Cuadrados			F	P
		Por Regresión	Por Ajuste	**MCA		
Efectos principales	4	7112,4	7112,4	1778,1	25,8	0,000
Peso (%)	1	1306,8	1306,8	1306,8	18,9	0,002
D_u (mm)	1	4283,7	4283,7	4283,7	62,1	0,000
D_p (mm)	1	108,2	108,2	108,2	1,6	0,246
Tipo de Equipo	1	1413,8	1413,8	1413,8	20,5	0,002
2-Interacciones de (No.) factores	3	1300,9	1300,9	433,6	6,3	0,017
Peso (%) * D_u (mm)	1	665,6	665,6	665,6	9,7	0,015
Peso (%) * D_p (mm)	1	374,4	374,4	374,4	5,4	0,048
Peso (%) *Tipo de Equipo	1	260,8	260,8	260,8	3,8	0,088
Error residual	8	552,0	552,0	69,0	-	-
Error puro	8	552,1	552,1	69,0	-	-
Total	15	8965,4	-	-	-	-

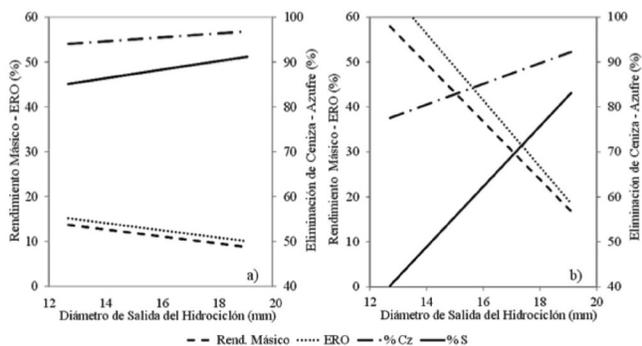
*GL: grados de libertad, **MCA: mínimos cuadrados ajustados.

El ANOVA presentó un R^2 ajustado aceptable alrededor del 88% con un nivel de confianza del 95%. La influencia de la interacción entre el % peso y el tipo de equipo presentó un Valor-P superior a 0,05 para todas las variables de respuesta estudiadas; por lo cual, esta interacción no se puede considerar como influyente para este estudio.

Por lo anterior, se construyeron gráficas para el hidrociclón de fondo plano como se muestra en la figura 3 y para el hidrociclón de fondo cónico (ver figura 4) en función del diámetro de descarga o diámetro de salida del hidrociclón con 5% y 10% de porcentaje de carbón peso a peso. En estas figuras se presenta el rendimiento másico y la eficiencia de recuperación orgánica en el eje primario (ordenada) mientras que en el eje secundario se representa el porcentaje de ceniza y azufre eliminado durante el proceso de lavabilidad tanto en el hidrociclón de fondo plano como en el de fondo cónico.

Figura 3. Rendimiento de lavabilidad de carbón en hidrociclón de fondo plano. (a) Concentración del 5% y (b) Concentración del 10%.

Figure 3. Coal washability performance in plane bottom hydrocyclone. (a) 5% concentration and (b) 10% concentration.



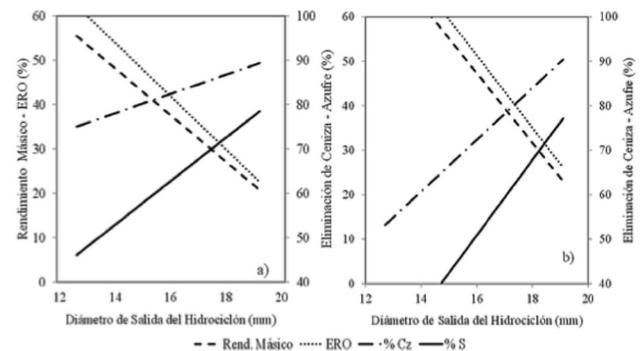
De la figura 3 se observa que para la concentración de 5% en peso de carbón los factores estudiados son levemente influenciados por el diámetro de descarga del hidrociclón de fondo plano. Sin embargo, para la concentración del 10% en peso del carbón, el incremento del diámetro de descarga del hidrociclón disminuye el rendimiento másico y ERO, pero incrementa la cantidad de ceniza y azufre removida en el carbón. Se pueden alcanzar eliminaciones de ceniza y azufre entre el 70% y 85% con rendimientos másicos y ERO entre el 30% y 40% si se utiliza una descarga entre 15 y 17 mm de diámetro y una concentración del 10% de carbón en el alimento.

De la figura 4 se concluye que tanto para la concentración de 5% en peso como para la de 10% todos los factores estudiados son influenciados por el

diámetro de descarga o salida del hidrociclón de fondo cónico. Cuando el diámetro de descarga se encuentra alrededor de 17 mm se logran buenos rendimientos másicos con apreciables porcentajes de eliminación de azufre y ceniza en el carbón.

Figura 4. Rendimiento de lavabilidad de carbón en hidrociclón de fondo cónico. (a) Concentración del 5% - (b) Concentración del 10%.

Figure 4. Coal washability performance in conical bottom hydrocyclone. (a) 5% concentration of and (b) 10% concentration.



Para el hidrociclón de fondo cónico empleado en este trabajo se pueden alcanzar eliminaciones de ceniza y azufre entre el 70% y 80% con rendimientos másicos y ERO entre el 30% y 40% si se utiliza una descarga entre 15 y 17 mm de diámetro y una concentración del 5% de carbón en el alimento.

Finalmente, se realizó un análisis de varianza para determinar un modelo que permitió calcular el rendimiento másico de cada tipo de hidrociclón como se observa en la tabla 6. Los valores de $R^2 = 0,9384$ y $R^2_{ajustado} = 0,8845$ implican un buen ajuste de los modelos propuestos. A partir de un valor F de 17,4 se puede decir que el modelo es significativo y finalmente un 0,03% de cambio en la eficiencia que el modelo no pueda explicar. Falta el nombre de la tabla:

Tabla 6. ANOVA del modelo de regresión para el rendimiento másico.

Table 6. ANOVA of the regression model for the mass yield.

Fuente	*GL	Suma Cuadrados	Media de cuadrados	F	P
Modelo	7	8413,3	1201,9	17,4	0,0003
Peso (%)	1	1306,8	1306,8	18,9	0,0024
D_n (mm)	1	4283,7	4283,7	62,1	<0,0001
D_p (mm)	1	108,2	108,2	1,6	0,2456
Tipo de Equipo	1	1413,8	1413,8	20,5	0,0019
Peso (%) * D_n (mm)	1	665,6	665,6	9,7	0,0145
Peso (%) * D_p (mm)	1	374,4	374,4	5,4	0,0482
Peso (%) * Tipo de Equipo	1	260,8	260,8	3,8	0,0878
Error puro	8	552,1	69,0	-	-
Total	15	8965,4	-	-	-

El modelo presentado en la tabla 6, se desarrolló a partir de los datos experimentales obtenidos en el

diseño de experimento mostrado en la tabla 4, con el fin de estimar las variables que tienen estadísticamente efecto significativo sobre el rendimiento másico de los hidrociclones plano y cónico. El rendimiento másico de los hidrociclones plano y cónico utilizados en esta investigación, se puede calcular en función de los parámetros correlacionados en las (ecuaciones 7 y 8), respectivamente.

$$\eta_{plano} = -72,6 + 22,9P_{eso} + 0,9D_u + 42,8D_p - 0,8XD_u - 4,8XD_p \quad (7)$$

$$\eta_{cónico} = -29,5 + 19,7P_{eso} + 0,9D_u + 42,8D_p - 0,8XD_u - 4,8XD_p \quad (8)$$

Finalmente, a partir de las figuras 3 y 4 se puede afirmar, según el comportamiento de los efectos principales del proceso de lavado, que el tipo de equipo a emplear debe ser seleccionado en función del objetivo deseado del proceso; es decir, si se desea remover la mayor cantidad de ceniza y/o azufre el equipo a emplear debería ser el hidrociclón de fondo plano, mientras que si el objeto es alcanzar un mayor rendimiento másico debería emplearse un hidrociclón de fondo cónico.

4. CONCLUSIONES

- Con el hidrociclón de fondo plano y cónico con diámetro de descarga entre 15 y 17 mm, se logran obtener rendimientos másicos entre 70% y 80% y eliminaciones de ceniza y azufre similares entre 30% y 40%, con la diferencia que el hidrociclón de fondo plano permite obtener estos resultados con el doble de la concentración de carbón en el alimento, es decir el 10%.

- Del análisis estadístico se concluye que tanto el diámetro de partícula como las interacciones entre los factores, % en peso-Dp y % en peso-tipo de equipo, no tienen un efecto significativo sobre el rendimiento másico basados en el valor de P superior a 0,05.

- Para concentraciones del 5% y 10 % en peso de carbón, se concluye que el Du tiene un efecto significativo en el proceso de lavado cuando se utiliza el hidrociclón de fondo cónico mientras que cuando se utiliza el hidrociclón de fondo plano y concentraciones del 5% esta variable tiene un efecto despreciable sobre el proceso.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad del Atlántico y a la Empresa Carbones del Caribe S.A., especialmente a los ingenieros Antonio Vengoechea y Luis Hernández por su gran aporte para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

[1] World Coal Institute (2005). El carbón como

recurso. Una visión general del carbón [Internet]. Disponible desde: <[http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_resource_overview_coal_spanish\(03_06_2009\).pdf](http://www.worldcoal.org/bin/pdf/original_pdf_file/coal_resource_overview_coal_spanish(03_06_2009).pdf)> [Acceso 15 abril de 2014].

[2] IPCC-AR4 (2007). Climate Change 2007 [Internet]. Disponible desde: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg3_report_mitigation_of_climate_change.htm> [Acceso 13 mayo de 2014].

[3] UPME-Ministerio de Minas y Energía (2012). La cadena del carbón [Internet]. Disponible desde: <<http://www.simco.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=ghcA7YSxZko%3D&tabid=96>> [Acceso, 9 mayo de 2014].

[4] J. Barraza, I. Mejía. "Producción de carbones ultralimpios usando flotación burbujeante y lixiviación con ácidos". *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 49, 50-60, 2009.

[5] M. Vanegas Chamorro, (2012). Estudio del mecanismo de grafitización de antracitas sudafricanas, Tesis de Doctorado, Universidad de Oviedo.

[6] M. Vanegas Chamorro, G. Escorcía, J. Castillo, A. Santiago, L. Hernández, A. Vengoechea, "Características de lavabilidad de algunos carbones del Valle del Cauca y estudio de los efectos sobre el desempeño de un ciclón de lecho circulante para el beneficio de carbones", *Explorando El Caribe. Una visión desde las Ciencias Básicas, Farmacia e Ingeniería.*, Universidad del Atlántico, 2011, pp. 333-362.

[7] M. Vanegas Chamorro, (1998). Licuefacción de fracciones de carbón beneficiadas mediante separación gravimétrica. Tesis de Maestría, Universidad del Valle.

[8] M. Caicedo, (2000). Beneficio de carbones de la Región Sur-Occidental Colombiana: remoción de cenizas y azufre mediante separación hidrociclónica. Tesis de Maestría, Universidad del Valle.

[9] A. Rojas y J. Barraza. "Beneficio de los carbones de Guachinte (Cauca) y Golondrinas (Valle del Cauca) usando un circuito ciclónico en dos etapas de separación". *Dyna*, 156, pp. 165-176, 2008.

[10] A. Rojas y J. Barraza. "Distribución de minerales en dos carbones del sur-occidente colombiano usando separación ciclónica y oxidación a baja temperatura". *Dyna*, 162, pp. 169-178, 2010.

[11] A. Rojas y J. Barraza. "Particionado de elementos en dos carbones del sur-occidente colombiano". *Dyna*, 152, 187-196, 2007.

- [12] P. Durdevic, L. Hansen, C. Mai, S. Pedersen, Z. Yang. "Costo-Effective ERT Tecnique for Oil-in-Water Measurement for Offshore Hydrocyclone Installations". IFAC-PapersOnLine, 48-6, 147-153, 2015.
- [13] L. Chica, O. Bustamante, A. Barrientos. "Disipación de energía mecánica en la descarga de un hidrociclón: nueva estrategia de modelado". Dyna, 181, pp. 136-145, 2013.
- [14] L. Fernández, A. Gutiérrez, M. Mahamud, J. Bueno. "Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation". *Chemical Engineering and Processing*, 47, 192-199, 2008.
- [15] Soler, L. y Ochoa, B. "Sobre la instalación de ciclones espesadores en el lavadero del pozo María Luisa". *Boletín informativo del Instituto Nacional del Carbón.*, 50, 1-8, 1961.
- [16] Y. Heredia, W. Zapata, (2015). Estudio para el montaje y puesta en marcha de una planta para el beneficio del mineral de oro en la zona de reserva especial minera del municipio de Quinchia Risaralda. Tesis fin de carrera, Universidad Tecnológica de Pereira.
- [17] M. Vanegas Chamorro, C. Martínez, V. Muñoz y S. Ortega, (2005). Diseño, montaje y puesta en marcha de un circuito hidrociclónico para el beneficio de carbones. Tesis fin de carrera, Universidad del Atlántico.
- [18] J. Bouso Eral, Equipos y Procesos S.A. Canteras y Explotaciones (1999). Hidrociclones de fondo plano [Internet]. Disponible desde: <<http://eralchile.com/pdf/14.pdf>> [Acceso 14 mayo de 2014].
- [19] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*. México: Limusa Wiley Editores, 2004, pp. 304-317.
- [20] Z. Atkas, F. Karacan, A. Olcay. "Centrifugal float-sink separation of fine Turkish coals in dense media". *Fuel Processing Technology*, 55 (3), 235-250, 1998.