

Limpieza de dos carbones colombianos usando una columna de flotación test-rig

Jorge Luis Piñeres-Mendoza¹, Marley C. Vanegas-Chamorro¹ & Geraldine P. Ariza-Carbonó¹
Universidad del Atlántico - Colombia



Para citaciones: Piñeres Mendoza, J., Vanegas Chamorro, M., & Ariza Carbonó, G. (2022). Limpieza de dos carbones colombianos usando una columna de flotación test-rig. *Ing-NOVA*, 1(1), 3-17.
<https://doi.org/10.32997/rin-2022-3724>

Recibido: 24 de julio 2021
Revisado: 7 de octubre 2021
Aprobado: 8 de octubre 2021

Autor de correspondencia:
Jorge Luis Piñeres Mendoza
jorgepineres@mail.uniatlantico.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2022. Piñeres Mendoza, J., Vanegas Chamorro, M., & Ariza Carbonó, G.. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



RESUMEN

Este estudio muestra el efecto del pH, concentración de espumante (FC) y colector (CC) sobre la recuperación másica (RM) y la reducción del contenido de cenizas (RC) en dos muestras de carbón Colombiano (M1 y M2) usando una columna de flotación. Los resultados mostraron que la muestra M1 presentó un máximo de RM del 93.76%, a pH neutro (pH 7), con una FC de 4.31 lb/ton y 3.67 lb/ton de CC, mientras que la muestra M2 presentó la mayor RM (98.36%) a pH neutro (pH 7), FC de 1.72 lb/ton y 2.93 lb/ton de CC. Para M1 y M2, la máxima RC fue de 48.73% y 72.95% respectivamente, a condiciones ácidas (pH 3) con FC de 3.45 lb/ton y 2.93 lb/ton de CC.

Palabras clave: Columna de flotación; pH; diseño de experimentos; carbón; reactivos de flotación.

Cleaning two Colombian coals using a flotation column Test-Rig

ABSTRACT

This study shows the effect of pH, frother (FC) and collector (CC) concentration on the mass yield (RM) and ash removal (RC) of two Colombian coal samples (M1 and M2) using a column flotation. The results showed that sample M1 presented a maximum RM of 93.76%, at neutral pH (pH 7), with a FC of 4.31 lb/ton and 3.67 lb/ton of CC, while sample M2 presented the highest RM (98.36%) at neutral pH (pH 7), FC of 1.72 lb/ton and 2.93 lb/ton of CC. For M1 and M2, the maximum RC was 48.73% and 72.95% respectively, at acidic conditions (pH 3) with FC of 3.45 lb/ton and 2.93 lb/ton of CC.

Keywords: Flotation column; pH; experimental design; coal; flotation reagents.

¹ Grupo de Investigación en Simulación de Procesos y Transformación del Carbón, Universidad del Atlántico, Carrera 30 Número 8-49, Puerto Colombia, Atlántico, Colombia.

1. Introducción

El carbón colombiano se destaca mundialmente por sus propiedades térmicas, bajo contenido de cenizas y alto contenido de materia volátil. Sin embargo, en Colombia existen reservas de carbón con alto contenido de materia mineral, que lo hacen menos atractivo para usos energéticos. El uso amigable con el medio ambiente del carbón como combustible requiere de procesos de limpieza que garanticen la disminución de la materia mineral (cenizas) y mejoren sus propiedades térmicas. Existen diversos procesos de limpieza de carbón para diferentes tamaños de partículas, en el caso de partículas finas los procesos se han centrado en el uso de la flotación espumante debido a su eficacia y amplia gama de condiciones de operación [1], [2].

Las columnas de flotación se introdujeron en la industria minera en la década de los años 1960 con la finalidad de procesar minerales finos [3],[4]. Las columnas de flotación presentan altos desempeños, especialmente para separaciones con partículas finas, debido a que elimina el problema del arrastre hidráulico y crea un ambiente tranquilo para el agregado partículas - burbuja, así como, genera pequeñas burbujas [5]. La separación eficiente de la materia mineral en el carbón está determinada por la hidrofobicidad del carbón y la materia mineral. Para mejorar la separación, la superficie debe modificarse adecuadamente, aumentando la hidrofobicidad de los carbones y también aumentando la hidrofiliidad de la materia mineral. El pH es un parámetro normalmente utilizado para modificar las propiedades superficiales del carbón y su flotabilidad [4].

Piñeres y Barraza (2012) [2] mostraron el efecto del pH, la velocidad del aire y la concentración de espumante sobre la recuperación de material combustible, la remoción cenizas y azufre en cuatro muestras de carbón bituminoso Colombiano: Cerrejón (Guajira), Nechí (Antioquia), Jagua (Cesar) y Guachinte (Valle del Cauca) utilizando una columna de flotación test-rig. En general, se observó que los carbones Cerrejón y Jagua presentaron valores más altos de recuperación de material combustible en condiciones ácidas que los carbones Nechí y Guachinte. Sin embargo, usando condiciones alcalinas esos carbones mostraron un efecto opuesto. Los carbones Nechí y Guachinte presentaron mayor recuperación de material combustible que los carbones Cerrejón y Jagua.

Dube y Honaker [6] han estudiado el mejoramiento del rendimiento de flotación de un carbón bituminoso oxidado. Los resultados de la investigación mostraron que los valores altos de pH y el uso de un colector que contiene grupos carboxílicos mejoraron los valores de recuperación de flotación en casi 45 puntos porcentuales absolutos. Debido a las propiedades

espumantes del colector carboxilo, la columna de flotación con lavado de espuma era necesaria para proporcionar valores de ceniza del producto tan bajos como 7.5%. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del pH, la concentración de colector (Diésel Oil) y espumante, (Flomin F – 672) sobre la recuperación másica y reducción del porcentaje de cenizas de dos muestras de carbón Colombiano.

2. Metodología

2.1 Materiales

En este estudio se utilizaron dos muestras de carbón Colombiano; M1 (zona suroeste) y M2 (zona norte). Se realizó un estudio de liberación a las muestras para seleccionar el tamaño de partícula a utilizar; $-38 \mu\text{m}$ ($-M 400$). Diésel Oil, Flomin F – 672 (éteres de metilglicol), hidróxido de sodio (NaOH) 2.45M y ácido clorhídrico (HCl) 3.3M grado analítico se utilizaron como colector, espumante y modificadores del pH respectivamente.

2.2 Equipos

Se utilizó una columna de flotación con una altura de 2 m y un diámetro de 0.05 m. El flujo de alimentación está ubicado a 0.75 m medidos desde el tope y el flujo de aire (generación de burbujas) esta localizado en el fondo de la columna, la Figura 1 muestra un esquema de la columna de flotación usada [6]. Para el análisis de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se utilizó un espectrofotómetro infrarrojo IRAffinity-1, en tanto que para el análisis cuantitativo de los principales elementos constitutivos de las cenizas, expresado como óxidos, más pérdidas por ignición, en unidades de porcentaje en peso se usó absorción atómica de llama Flamee AA (ASTM D-3682-13) y plasma tipo ICP Inductive Coupled Plasma (ASTM D-6357-11).

2.3 Experimentación

Cuando la mezcla agua-carbón-reactivos este homogenizada, se introduce el flujo de alimentación y de aire hasta cuando la mezcla llegue al punto de interface (aproximadamente 0.1 m por encima del punto de alimentación). Luego se ajusta el flujo agua de lavado para mantener la altura deseada (interface). Las corrientes de tope y de fondo posteriormente se filtran, secan y finalmente se les realizan los análisis necesarios [7]. Se operó la columna de flotación en una sola etapa, con un 2.5 % (p/p) de concentración de la pulpa, se utilizaron cinco concentraciones de colector y espumante acorde al diseño experimental propuesto (3.67 lb/ton, 2.93 lb/ton, 2.20 lb/ton, 1.47 lb/ton, 4.40 lb/ton) y (3.46 lb/ton, 2.59 lb/ton, 4.32 lb/ton, 1.73 lb/ton, 5.19 lb/ton) respectivamente, así mismo con cinco valores de pH (3, 5, 7, 9 y 11). El flujo de fondo se ajustó acorde al flujo del aire [8], en la Tabla 1 se muestran las condiciones de operación.

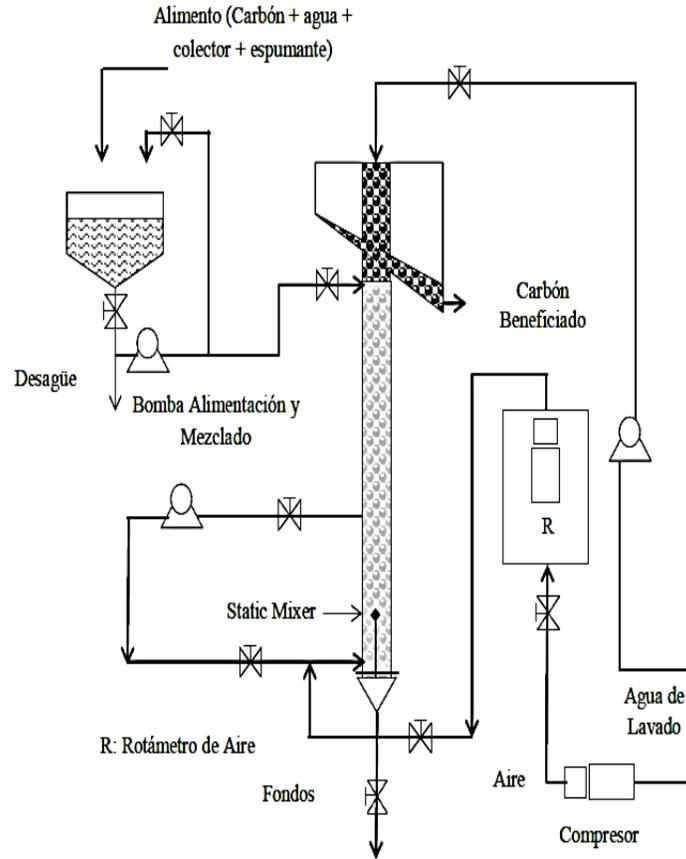


Figura 1. Esquema columna de flotación.

Tabla 1. Condiciones de operación.

Parámetro	Valores
Flujo volumétrico de alimento	13.6 cc/min
Flujo volumétrico de aire	14.9 cc/min
Flujo volumétrico de agua de lavado	2.2 cc/min
Flujo bias	1.3 cc/min

Mediante un diseño central compuesto se evaluó el efecto de las variables pH, CC y FC sobre la recuperación másica y la reducción del contenido de cenizas de dos muestras de carbón usando una columna de flotación, el error experimental fue de $\pm 5\%$ [8].

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización

La Tabla 2 muestra los resultados de los análisis próximos de las muestras M1 y M2. Con los resultados obtenidos y acorde a la clasificación del rango de carbones ASTM D388-12, se determinó que la muestra M1 está en el rango de carbón subbituminoso C y la muestra M2 está en el rango de carbón bituminoso B altamente volátil [9].

Tabla 2. Análisis próximos de las muestras M1 y M2

Análisis ^(a)	M1	M2
Materia volátil (%)	36.04	39.15
Cenizas (%)	33.80	4.14
Azufre (%)	0.86	0.68
Carbono fijo (%)	30.16	56.71
Poder calorífico (BTU/lb)	10302	13470

a: Base seca

La Tabla 2 muestra el análisis próximo de las muestras, el carbón M1 presenta un mayor contenido de cenizas (33.8%) y azufre (0.86%) que el carbón M2 (4.14 % de cenizas y 0.68 % de azufre). Los valores caloríficos están relacionados con el contenido de cenizas, el carbón de M2 tiene un valor calorífico superior (13470 BTU/lb), lo cual puede ser debido a su menor porcentaje de cenizas de la muestra (mayor contenido de carbono fijo) [10], [11]. Los carbones M1 y M2 presentan valores de material volátil cercanos.

De la Tabla 3, se observa que las cenizas de las muestras M1 y M2 están compuestas principalmente por silicio, aluminio, hierro, calcio y titanio, y menor presencia de magnesio, potasio. La composición de estos elementos está reportada como óxidos, aunque en el carbón están presentes como silicatos, óxidos, sulfatos y carbonatos.

Tabla 3. Resultado del análisis mineralógico de las muestras.

Análisis	M1 (%)	M2 (%)
Magnesio (MgO)	0.3	0.1
Aluminio (Al ₂ O ₃)	11.9	0.7
Silicio (SiO ₂)	14.2	1.6
Azufre (SO ₃)	0.7	0.6
Potasio (K ₂ O)	0.3	0.1
Calcio (CaO)	0.9	0.2
Titanio (TiO ₂)	0.6	0.2
Hierro (Fe ₂ O ₃)	2.0	0.4

La muestra M1, presenta altos contenidos en silicio, aluminio y hierro los cuales constituyen el 90 % de las cenizas y bajos niveles de impurezas mayoritarias tales como los óxidos de calcio, magnesio, potasio y titanio que aportan el 6.8 %. Las cenizas de la muestra M2, presenta una concentración relativamente baja de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, debido al bajo contenido de alúmina. Las concentraciones de calcio y titanio constituyen el 10 % de las cenizas y en proporciones mínimas contiene magnesio y potasio.

La muestra M1 posee los contenidos más altos de SO₃, CaO y MgO, esta muestra también presenta los valores más altos en Fe₂O₃ y SO₃ lo que hace

posible inferir la existencia de pirita. Para ambas muestras (M1 y M2), el azufre reportado como SO_3 presenta una composición relativamente constante y se encuentra dentro de los límites normales, 0.7% y 0.6% respectivamente.

Las Figuras 2 y 3 (no tienen la misma escala) ilustran los espectros obtenidos utilizando FTIR en las dos muestras de carbón (M1 y M2), con lo que fue posible identificar cualitativamente los grupos químicos funcionales presentes. Se considera que la intensidad de cada pico a una longitud de onda determinada está directamente relacionada con la concentración del grupo. El espectro muestra una variedad de vibraciones correspondientes a grupos tales como: grupos $-NH - NH_2 - OH-$ ($3400-3700\text{ cm}^{-1}$), grupos CH_2 , CH_3 ($2850-2920\text{ cm}^{-1}$), $-C = O - O - CO$ grupos, $C = C - OH$ (aromático), $C = O$, $C = C$, aromático $-OH$ ($1580 - 1800\text{ cm}^{-1}$), minerales ($460 - 540$ y $1000 - 1050\text{ cm}^{-1}$), aromático ($600 - 920\text{ cm}^{-1}$), $C = O$, aromático-O-aromático ($1100-1380\text{ cm}^{-1}$), grupos nitrito unidos a alquenos y estructuras aromáticas ($1330-1530\text{ cm}^{-1}$), cadenas alifáticas cortas (2850 cm^{-1}) y cadenas alifáticas largas (2920 y 3920 cm^{-1}).

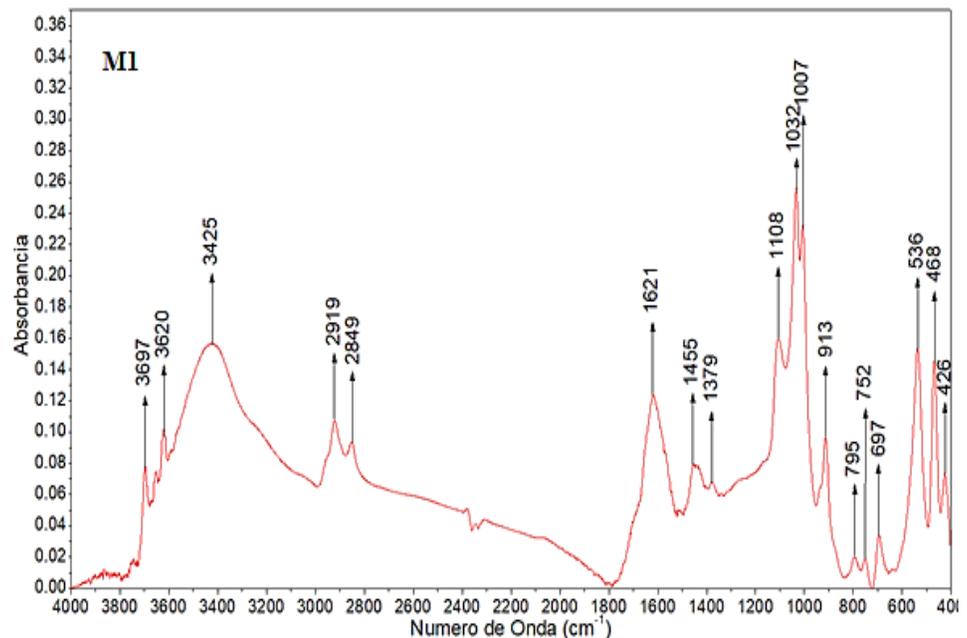


Figura 2. Espectro infrarrojo de la muestra M1.

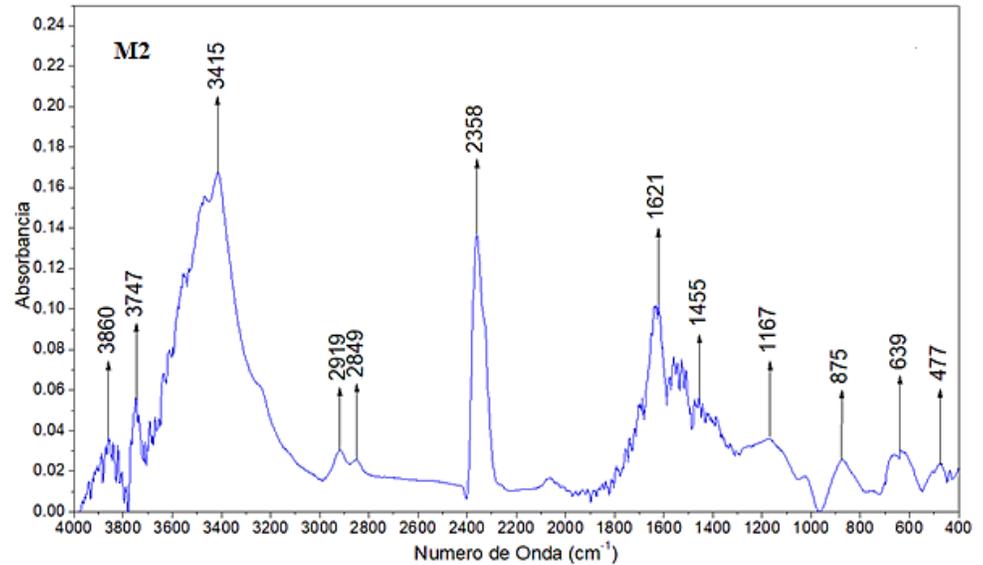


Figura 3. Espectro infrarrojo de la muestra M2.

Se destaca que estas bandas representan grupos característicos y no se puede especificar una estructura específica, debido a la naturaleza compleja de la estructura del carbón. Por ejemplo, en el caso del grupo $C = C$ se puede unir a estructuras aromáticas simples o complejas. Las longitudes de onda características de estos grupos se tomaron de otros trabajos realizados con carbones bituminosos [12]-[15].

Con base en las longitudes de onda reportadas, la Figura 2 muestra que M1 presenta una gran cantidad de grupos funcionales que contienen oxígeno, $-C = O - O - CO$, $C = C - OH$ (aromático), $C = O$, $C = C$, aromático - (OH) en comparación con M2 (Figura 3). M2 presenta menor cantidad de minerales M1, lo cual puede ser observado en los análisis próximos (Tabla 2), siendo M1 el que presenta la mayor cantidad de mineral (Tabla 2) y la mayor intensidad de la banda correspondiente. M2 tiene una menor concentración del grupo aromático-O-aromático en comparación con M1. También se observa que las dos muestras de carbón muestran valores cercanos de los grupos CH_2 , CH_3 y $-NH - NH_2 - OH-$.

3.2 Efecto del pH

El efecto del pH, CC y FC sobre la RM para las dos muestras de carbón es mostrado en la Figura 4 y 5. La muestra M1 presenta RM superiores al 50% (53.03% - 93.76%). La mayor RM para la muestra M1 (93.76%) se obtuvo a pH 7, CC de 3.67 lb/ton y 4.31 lb/ton de FC. Por su parte, la muestra M2 presenta RM superiores al 92% (92.75% - 98.36%), la RM de 98.36%, se obtuvo a pH neutro (pH 7), CC de 2.93 lb/ton y 1.72 lb/ton de FC. Como se observa en la Figura 4 y 5, en ambas muestras se obtienen los mayores valores de RM en el intervalo de pH ácido (pH 5 a 7); lo cual puede ser debido

a que en condiciones ácidas las superficies de los carbones (M1 y M2) se vuelven más hidrófobas, como consecuencia de que no ocurre ionización de los grupos carboxílicos, carbonilos y fenólicos polares en su superficie, (posiblemente debido a la naturaleza compleja de estos grupos con la superficie del carbón, o a que podrían estar unidos con alguna estructura química compleja los cuales no se pueden determinar con el análisis FT.i.r), disminuyendo la mojabilidad (hidratación) de la superficie, promoviendo una adhesión favorable de partículas de carbón y burbujas de aire.

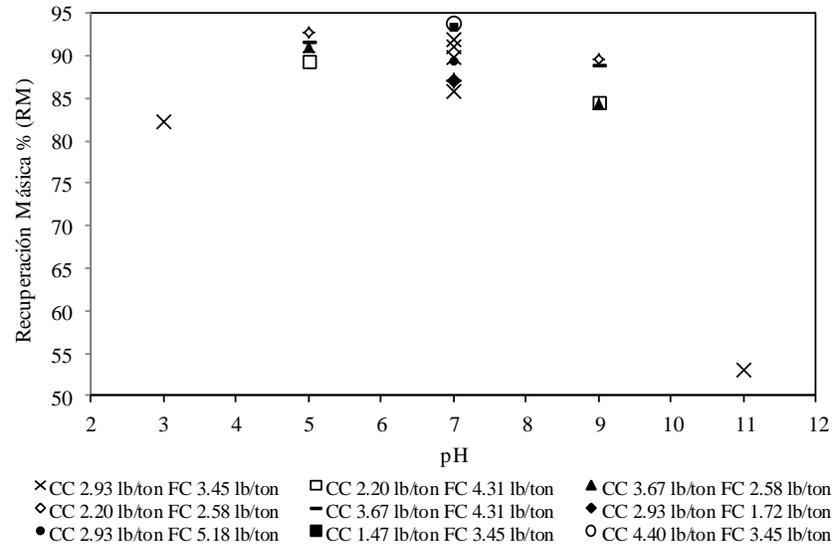


Figura 4. Recuperación másica M1.

La Figura 4 muestra que la RM disminuye con el incremento del pH; para la muestra M1 se presenta una disminución del porcentaje de RM a pH alcalinos (pH 9 a 11), lo cual puede ser atribuido a la ionización de los grupos carboxilos (COOH), carbonilos (CO) y fenólicos polares [4] incrementando la humectación de la superficie de la muestra a través de la creación de puentes de hidrógeno con moléculas de agua [16] como puede verse de las Figuras 2 y 3, la muestra M2 presenta altos valores de recuperación másica en todos los intervalos de concentración de colector, debido a que la muestra es altamente hidrofóbica.

El efecto del pH, CC y FC sobre la RC para las dos muestras de carbón es mostrado en la Figura 6 y 7. Para M1 y M2, el porcentaje más alto de RC (48.73% y 72.95% respectivamente) se obtuvo a condiciones ácidas (pH 3) con CC de 2.93 lb/ton y 3.45 lb/ton de FC. Este comportamiento puede ser debido a que para valores bajos de pH ocurre la disolución de las especies minerales (Fe, Ca, Mg entre otros) y la precipitación de las especies de Al (aluminio) presentes en las muestras de carbón [17] lo que contribuye a una disminución en el contenido de materia mineral en la corriente de flotado.

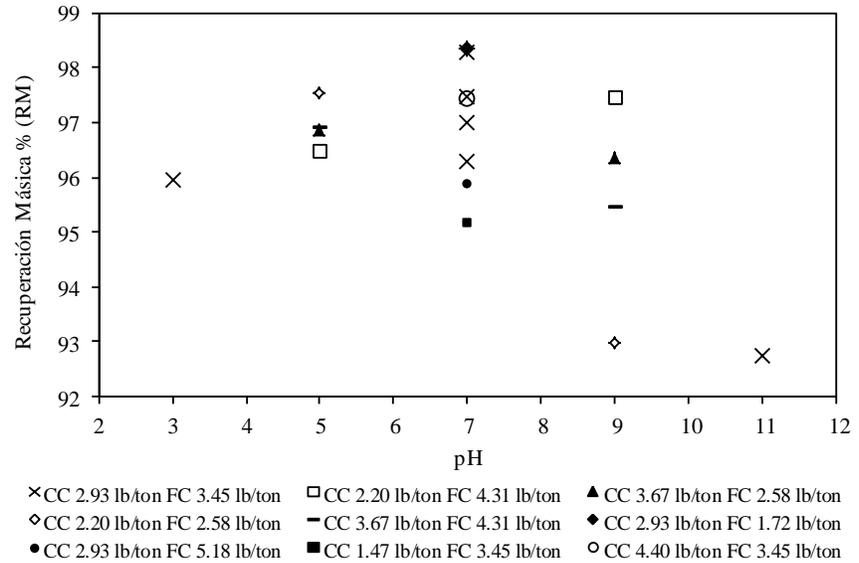


Figura 5. Recuperación másica M2.

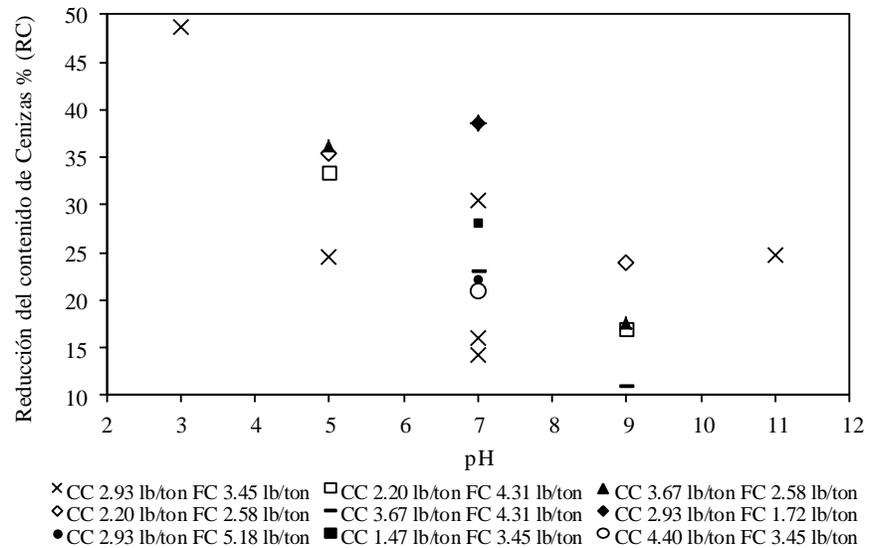


Figura 6. Reducción del contenido de cenizas M1.

En general, la muestra M1 presenta valores relativamente bajos de RC (10.83% - 48.73%) en comparación con la muestra M2 que presenta un RC entre 16.91% y 72.95%, esto resultado puede ser atribuido principalmente a las especies minerales hidrofóbicas y las concentraciones de iones Fe^{n+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Mg^{2+} presentes en la estructura de la muestra M1. Estos resultados muestran que la adsorción de iones multivalentes puede afectar drásticamente la hidrofobicidad del carbón y deprimir la flotación, principalmente por la formación de los precipitados $CaOH^+$, $AlOH^{2+}$ y $Fe(OH)_3$ que se absorben sobre la superficie del carbón y vuelven hidrofílicas las partículas de carbón [16], [17].

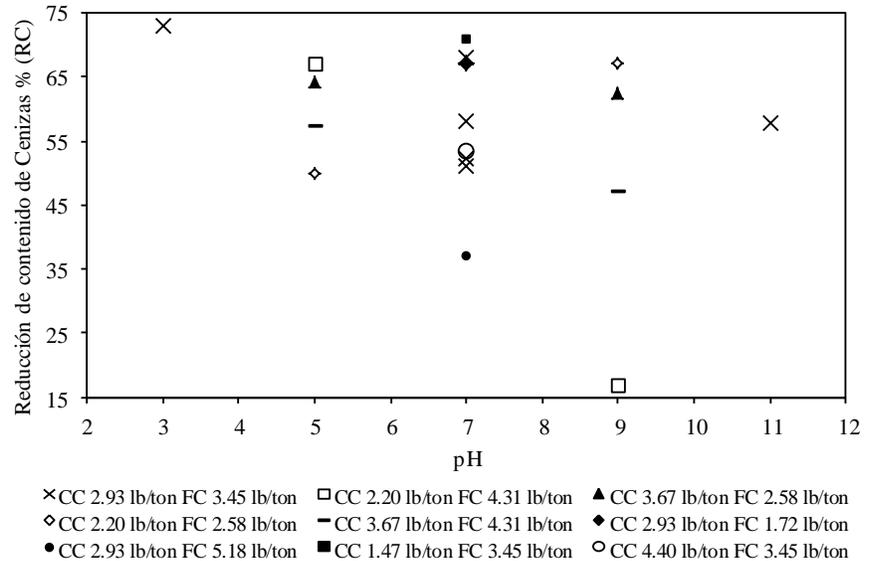


Figura 7. Reducción del contenido de cenizas M2.

3.3 Efecto de la concentración de colector

El colector utilizado fue el diésel oíl, un hidrocarburo alifático tipo no polar (insoluble en el agua) con estructura molecular $C_{12}H_{26}$, que se adhiere a la superficie de las partículas de carbón con el objeto de incrementar su hidrofobicidad y mejorar la adhesión partícula – burbuja. El sitio ideal de adsorción (o adhesión) para el diésel oíl es en las regiones carbonosas, naturalmente hidrófobas, donde las gotitas de colector se unen como potenciador de la hidrofobicidad del carbón [18]. En ambas muestras, no existe relación directa entre el aumento de la FC y el incremento de la RM.

3.4 Efecto de la concentración de espumante

De los resultados obtenidos se puede establecer que el espumante utilizado muestra un comportamiento dual, es decir, el espumante presenta una fuerte afinidad química con los iones presentes en la materia mineral del carbón, favoreciendo su flotabilidad, por lo tanto, estas especies minerales hidrofóbicas aparecen en el flotado, aumentando el contenido de cenizas y provocando la reducción de la selectividad del proceso de flotación [2], [17].

3.5 Análisis estadístico

La Tabla 4 muestra el análisis de varianza de la recuperación másica y contenido de cenizas para las muestras M1 y M2. De la Tabla 4 se observa que el modelo tiene un efecto significativo, ($F > F_c$), en tanto que la carencia de ajuste tiene un efecto no significativo ($F < F_c$) indicando que el modelo de regresión determinado es adecuado para una predicción de las variables de respuesta en función de las variables independientes y sus interacciones. Para la RM, el pH tiene un efecto significativo ($F > F_c$) tanto para los términos de primer y segundo orden en las dos muestras de carbón [19].

Estos resultados indican que el pH es un factor determinante en la RM del carbón, debido a que los iones OH^- y H^+ afectan el potencial de superficie (cambiando la magnitud de su potencial zeta y su signo), al cambiar el grado de polaridad entre el agua y la partícula de carbón [20]. Para la muestra M1, la RM presenta una gran disminución con el incremento del pH y en la muestra M2, se obtiene una disminución relativamente pequeña de la RM con el aumento del pH, este comportamiento puede ser atribuido a la disminución de la hidrofobicidad de las muestras de carbón debido tanto a la adsorción de los precipitados de hidróxidos metálicos como a la precipitación de los iones disueltos en las superficies del carbón [21].

Tabla 4. Análisis de varianza (ANOVA) para las muestras M1 y M2.

	RM M1			RM M2			RC M1			RC M2		
	GI	F	F _c (α5%)	GI	F	F _c (α5%)	GI	F	F _c (α5%)	GI	F	F _c (α5%)
Modelo	13	23.42	5.89	12	6.94	4.68	6	9.35	3.09	5	6.29	3.11
A- Espumante	1	0.51	7.71	1	6.59	6.61	1	8.40	4.84	1	10.94	4.75
B-Colector	1	0.17	7.71	1	5.52	6.61	1	4.33	4.84	1	0.0935	4.75
C-pH	1	101.16	7.71	1	19.07	6.61	1	29.57	4.84	1	5.14	4.75
AB	1	3.99	7.71	1	5.12	6.61						
AC	1	0.11	7.71	1	5.82	6.61				1	9.53	4.75
BC				1	0.75	6.61						
A ²	1	0.48	7.71				1	2.55	4.84			
B ²	1	2.10	7.71	1	2.62	6.61	1	0.23	4.84			
C ²	1	140.65	7.71	1	26.33	6.61	1	11.04	4.84			
ABC	1	0.78	7.71	1	11.34	6.61				1	5.74	4.75
A ² B	1	0.06	7.71	1	2.06	6.61						
A ² C	1	35.65	7.71									
AB ²	1	0.79	7.71	1	8.11	6.61						
A ² B ²	1	31.50	7.71	1	1.16	6.61						
Residual	4			5			11			12		
Ajuste	1	0.04	10.1	2	0.20	9.55	8	0.35	8.85	9	1.02	8.85
Error	3			3			3			3		
Total	17			17			17			17		

En relación con las interacciones, en la muestra M1 se presenta un efecto de interacción bidireccional de (FC – pH) el cual puede ser debido a la disminución de los iones del Flomin F-672 con el incremento del pH de la pulpa, produciendo un efecto positivo sobre la RM. Por otro lado, se presenta un efecto bidireccional significativo (FC – CC) en ambas muestras, para la muestra M1, esta interacción tiene un efecto positivo y para la muestra M2 tiene un efecto negativo sobre la RM [2], [19]. La atracción entre el diésel oil

y Flomin F-672 es posible debido a la interacción hidrófoba, el efecto de interacción del diésel oil y el Flomin F-672 puede ser atribuido a que el diésel oil adsorbido en los componentes del carbón atraerá una parte hidrófoba del espumante (Flomin F-672), mientras que la materia mineral hidratada formará enlaces de hidrógeno con el grupo $-OH$ del espumante, por lo tanto, habrá un aumento en la hidrofobicidad de las partículas con alto contenido de materia mineral [22]. En la muestra M2, se encontró significancia ($F > F_c$) en un efecto cruzado para las tres variables.

En las Tabla 4, se observa que, para la RC, el pH tiene un efecto significativo ($F > F_c$) para las muestras de carbón M1 y M2. La muestra M1 presenta un efecto significativo ($F > F_c$) para el término cuadrático del pH. Los efectos negativos y positivos del pH en las muestras de carbón indican que el pH es una variable importante para mejorar la selectividad. El efecto positivo encontrado se debe a que la flotabilidad/hidrofobicidad de las muestras de carbón depende del pH, presentando un máximo en la región de pH ácido. El efecto negativo encontrado se debe a la flotación de las especies minerales que incrementaron su dispersión a altos valores de pH, mejorando la interacción con los reactivos de flotación [2].

La FC tiene un efecto significativo ($F > F_c$) para ambas muestras sobre la RC, el cual puede ser atribuido a la buena adsorción del espumante que permite la interacción hidrófoba entre la superficie del carbón y la molécula del espumante, por otro lado, los grupos polares en las moléculas de espumantes, hidroxilo ($-OH$), enlaces éter ($-O-$) y carbonilo ($-C=O$) no forman enlaces estables con las especies minerales y se orientan preferentemente hacia el interfaz agua/aire trayendo como consecuencia un efecto positivo sobre la disminución del contenido de cenizas[22].

Para la muestra M1, se encontró un efecto significativo ($F > F_c$) en la interacción del pH y la FC en la RC. Este comportamiento puede ser debido a la acción selectiva del espumante sobre la materia mineral del carbón a altos valores de pH [2], aumentando el contenido de cenizas.

4. Conclusiones

En general, se observó que los carbones M1 y M2 presentaron valores altos de RM, para la muestra M1 y M2, la RM presenta una disminución con el incremento del pH. El carbón M2 reportó un rendimiento superior al 92% (92.75% - 98.36%), la RM de 98.36%, se obtuvo a pH neutro (pH 7), CC de 2.93 lb/ton y 1.72 lb/ton de FC, respectivamente; mientras que el carbón M1 arrojó rendimientos superiores al 50% (53.03% - 93.76%), el mayor valor de RM para la muestra M1 (93.76%) se obtuvo a pH 7, CC de 3.67 lb/ton y 4.31 lb/ton de FC. Con respecto a la RC, la muestra M1 presenta valores

relativamente bajos (10.83% - 48.73%) en comparación con la muestra M2 que presenta un RC entre 16.91% y 72.95%. Para M1 y M2, el porcentaje más alto de RC (48.73% y 72.95% respectivamente) se obtuvo a condiciones ácidas (pH 3) con CC de 2.93 lb/ton y 3.45 lb/ton de FC.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad del Atlántico a través del Proyecto: Séptima convocatoria interna fortaleciendo a grupos de investigación de la Universidad del Atlántico – 2016, ING02.FGI 2016, por el apoyo financiero.

Referencias

- [1] J. Piñeres, W. Pertuz, J. Castro, "Effect of pH and agitation time on combustible recovery and ash rejection in a coal sample using selective hydrophobic coagulation," *Ing. Comp.*, vol 20, no 2, pp. 99-108, Aug. 2018 DOI: [10.25100/iyca.v20i2.6408](https://doi.org/10.25100/iyca.v20i2.6408)
- [2] J. Piñeres, J. Barraza, "Effect of pH, air velocity and frother concentration on combustible recovery, ash and sulphur rejection using column flotation," *Fuel Process. Technol.*, vol. 97, pp. 30-37, May. 2012, DOI: [10.1016/j.fuproc.2012.01.004](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.01.004)
- [3] G. Dobby, J. Finch, "Flotation column scale-up and modelling," *CIM Bulletin.*, vol 79, no. 891, pp. 89-96, 1986.
- [4] J. Finch, G. Dobby, *Column Flotation*, First Edition, Oxford, England Pergamon Press, 1990.
- [5] R. Honaker, M. Mohanty, "Enhanced column flotation performance for fine coal cleaning," *Miner. Engin.*, vol. 9, no. 9 pp. 931-945, Sept. 1996. DOI: [10.1016/0892-6875\(96\)00085-4](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00085-4)
- [6] R. Dube, R. Honaker, "Improving the flotation performance of an oxidized bituminous coal source," *Min. Engin.*, vol 142, Oct. 2019, Art. No. 105937, DOI: [10.1016/j.mineng.2019.105937](https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105937)
- [7] S. Bellich, "Diseño y montaje de una columna de flotación a escala de laboratorio para la remoción de la materia mineral presente en carbones térmicos," B.S. Thesis, Dep. Ing. Quím., U. del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2016, <http://biblioteca.uniatlantico.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=78734>
- [8] G. Ariza, "Evaluación del potencial de limpieza de muestras de carbón con alto contenido de materia mineral a partir de una columna de flotación," B.S. Thesis, Dep. Ing. Quím., U. del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2019

<http://biblioteca.uniatlantico.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=165967>

- [9] J. W. Leonard, B. C. Hardinge, "Coal Preparation. Society for Mining, Metallurgy and Exploration," Inc. Littleton, Colorado, USA, pp. 467-470, 199.
- [10] J. Quijandría, V. Aramburu, "Evaluación del carbón mineral para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad," *Revista del Instituto de Investigación, figmmg-unmsm*, vol 19, no. 38, pp. 61-66, Jul. – Dic. 2016.
- [11] J. Piñeres, J. Barraza, S. Bellich, "Effect of Diesel Oil and Mixture of Alcohol-Glycol Ether on Colombian Ultrafine Coal Cleaning Using a Test-Rig Closed-Loop Flotation Column," *Ing. Investig.*, vol. 42, no. 1, Abr. 2022, Art. No. e88273, DOI: [10.15446/ing.investig.v42n1.88273](https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n1.88273)
- [12] M. Sobkowiak, E. Reisser, P. Given, P. Painter, "Determination of aromatic and aliphatic CH groups in coal by FT-i.r. 1. Studies of coal extracts," *Fuel*, vol. 63, no. 9, pp. 1245–1252, Sep. 1984, DOI: [10.1016/0016-2361\(84\)90433-2](https://doi.org/10.1016/0016-2361(84)90433-2)
- [13] N. Cooke, E. Maynard, R. Gaikwad, "FT-i.r spectroscopic analysis of coals and coals extracts," *Fuel*, vol. 65, no. 9, pp. 1254–1260, Sep. 1986, DOI: [10.1016/0016-2361\(86\)90238-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(86)90238-3)
- [14] P. Solomon, R. Carangelo, "FT-i.r analysis of coal 2. Aliphatic and aromatic hydrogen concentration," *Fuel*, vol. 67, no. 7, pp. 949–959, Jul. 1988, DOI: [10.1016/0016-2361\(88\)90095-6](https://doi.org/10.1016/0016-2361(88)90095-6)
- [15] S. Xinqian, W. Zuna, X. Jingqiu X, "Separation and preparation of macerals in Shenfu coals by flotation," *Fuel*, vol. 81, no. 4, pp. 495-501, March. 2002, DOI: [10.1016/S0016-2361\(01\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00106-5)
- [16] D. Liu, P. Somasundaran, T. V. Vasudevan, C. Harris, "Role of pH and dissolved mineral species in Pittsburgh No. 8 coal flotation system - I. Floatability of coal," *Int. J. Min. Process.*, vol 41, no. 3-4, pp. 201-214, Jul. 1994, DOI: [10.1016/0301-7516\(94\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0301-7516(94)90028-0)
- [17] S. Kelebek, U. Demir, O. Sahbaz, A. Ucar, M. Cinar, C. Karaguzel, B. Oteyaka, "The effects of dodecylamine, kerosene and pH on batch flotation of Turkey's Tuncbilek coal," *Int. J. Min. Process.*, vol. 88, no. 3-4, pp. 65-71, Sep. 2008, DOI: [10.1016/j.minpro.2008.06.004](https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.06.004)
- [18] M. Polat, H. Polat, S. Chander, "Physical and chemical interactions in coal flotation," *Int. J. Min. Process.*, vol. 72, no. 1-4, pp. 199-213, Sep. 2003, DOI: [10.1016/S0301-7516\(03\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00099-1)
- [19] H. Gutiérrez, R. De la Vara, "Análisis y diseño de experimentos," Seg. Ed., Mc Graw Hill, Mexico, 2008.

- [20] X. Yaowen, G. Xiahui, C. Yijun, W. Yingwei, X. Mengdi, W. Dongyue, L. Chenwei, "Effect of compound collector and blending frother on froth stability and flotation performance of oxidized coal," *Powder Technol.*, vol. 305, pp. 166-173, Jan. 2017, DOI: [10.1016/j.powtec.2016.10.003](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.003)
- [21] J. Piñeres, J. Barraza, "Efecto del pH, velocidad del aire y concentración de espumante sobre la cinética de flotación de cuatro carbones colombianos," *Ing. Comp.*, vol. 10, no. 2, pp. 29-40, 2008, DOI: [10.25100/icy.v10i2.2472](https://doi.org/10.25100/icy.v10i2.2472)
- [22] J. Laskowski, "*Coal Flotation and Fine Coal Utilization*," 1st Ed., Vancouver, Elsevier, 2001.