

Evaluación del carbón mineral para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad

Evaluation of coal ore to reduce the sulphur content and improve its quality

Juan C. Quijandría L.¹, Vidal S. Aramburu R.²

RECIBIDO: 18/08/2016 - APROBADO: 15/09/2016

RESUMEN

Se desarrollan aspectos esenciales referidos al carbón mineral; sus principales características fisicoquímicas, petrográficas, mineralógicas, los procesos de lavabilidad y flotación. El carbón estudiado proviene de las minas San Alejandro, Oyón; es un carbón bituminoso de alto contenido volátil, con un buen rendimiento energético y baja concentración de cenizas y azufre. Se ha realizado la disminución de contenido de azufre, mejoramiento del carbón fijo y el poder calorífico del carbón mineral. Del estudio de caracterización del carbón mineral, se ha determinado una granulometría promedio de 93.51 % a una malla -200, una dureza de 3, densidad aparente de 1.30 gr/cm³, densidad real de 1.72 gr/cm³ y una porosidad de 0.79 %. Respecto al análisis inmediato, los promedios de las muestras en base seca son de 0.78 % de humedad, 18.73 % de materia volátil, 17.33 % de cenizas y 60.24 % de carbón fijo, poder calorífico superior de 7257.31 kcal/kg y un poder calorífico inferior de 7239.80 kcal/kg. El análisis microscópico muestra la presencia de 96.91 % de grafito (grf) y 3.09% de piritita (py). Las fracciones de finos de estos carbones han sido tratados mediante lavabilidad y flotación con espumantes. De los resultados obtenidos por lavabilidad, tenemos una disminución del contenido de cenizas promedio de 5.14 %, una eliminación promedio de 2.18% de azufre, un leve incremento de materia volátil a 18.65 % y carbón fijo a 62.43 %. De los resultados de flotación, se tiene una disminución notable de cenizas de 55.35 % y azufre de 36.61%; un incremento de carbón fijo de 16.91 % y el poder calorífico se incrementó de 7257.31 kcal/kg a 8141.22 kcal/kg.

Palabras clave: Carbón mineral, flotación, azufre, carbón fijo, poder calorífico.

ABSTRACT

Develop essential aspects relating to mineral coal; its main physico-chemical characteristics, petrográficas, mineralogical, processes of washability and float. The coal studied comes from mines San Alejandro, Oyón, is a bituminous coal of high content volatile, with good energy performance and low concentration of ash and sulfur. We have studied the removal of mineral matter with emphasis on the Sulfur Coal Fixed improvement and calorific value of coal mines of San Alejandro, Oyón. Principle del formulario. The study of characterization of the mineral coal has identified a granulometry average of 93.51% to a mesh -200, a hardness 3, apparent density of 1.30 g/cm³, real density of 1.72 g/cm³ and a porosity of 0.79%. With regard to the immediate analysis the averages of the samples on dry matter basis are of 0.78 % moisture, 18.73 % of volatile matter, 17.33 % ash and 60.24 % of fixed carbon, Gross Calorific Value OF 7257.31 Kcal/kg and a lower calorific value of 7239.80 Kcal/kg. The microscopic analysis shows the presence of 96.91 % of Graphite (grf) and 3.09% Pyrite (py). He fractions of fine of these coals have been treated by Washability and float with foaming agents. The results obtained by washability we have a decrease of ash content average of 5.14%, an elimination average of 2.18% of sulfur, a slight increase of Volatile Matter to \$18.65 % and Coal fixed at 62,43 %. The results of float is has a remarkable decline of Ashes of 55.35% and 36.61 Sulfur per cent; an increase of fixed carbon 16.91% and the calorific value increased from 7257.31kcal/kg to 8141.22 Kcal/Kg.

Keywords: Coal, flotation, sulfur, fixed carbon, calorific power.

1 Ingeniero químico, maestría en Matemática extractiva - Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: jcquijandrialav@hotmail.com.

2 Docente de la EAP de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. E-mail: vidalaramburu@hotmail.com

I. INTRODUCCIÓN

El carbón mineral es una sustancia dura, bituminosa oscura o casi negra, formada por vegetales fosilizados, que, aunque no arde con tanta facilidad como el carbón vegetal, produce más calor. El carbón es un recurso no renovable utilizado como combustible, reductor en los procesos industriales de siderurgia, fabricación del cemento, azúcar, licores, papel y cartón, entre otros, así como en la generación de electricidad (Barraza, 1988).

En la combustión del carbón se presentan emisiones de gases, fundamentalmente el SO_2 y material particulado, que contaminan el medio ambiente y afectan la salud de los humanos, la fauna y el agua. Sin embargo, el uso de tecnologías limpias minimiza los efectos negativos de la utilización del carbón (Aramburú, 2007).

La preparación del carbón involucra su limpieza desde la producción en bruto de una mina para generar un producto que se puede extraer y comercializar. La comerciabilidad depende de las propiedades, incluidas el valor de la ceniza, la humedad y la fluidez. El logro de estas propiedades depende de la característica de lavabilidad del carbón. Para mejorar estas propiedades, se utilizan diversas técnicas de separación de gravedad para separar el carbón de la ceniza en una amplia gama de tamaños de partículas. Adicionalmente, se requiere una técnica de separación que no dependa de la densidad para tratar el carbón fino. También se utiliza la flotación que aprovecha las diferencias entre la química de la superficie del carbón, que es hidrofóbica, y de la ceniza, que es hidrofílica.

Actualmente, a nivel mundial la tendencia de las tecnologías existentes y de las nuevas es encontrar procesos no contaminantes, que puedan producir beneficios económicos acordes con las reglamentaciones ambientales (León, 2006), (Gomes, 1996), (Prieto, 1989), (Giraldo, 2007).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Procedimiento metodológico de la investigación

La secuencia metodológica de la investigación se describe en la Figura N° 1.

2.2. MUESTRA

La muestra que es materia de investigación es el carbón mineral de la mina San Alejandro N0 17. La cantidad establecida de las muestras para los estudios correspondientes es de 100 kg. Cada prueba realizada es de 10 kg (Tabla N° 1).

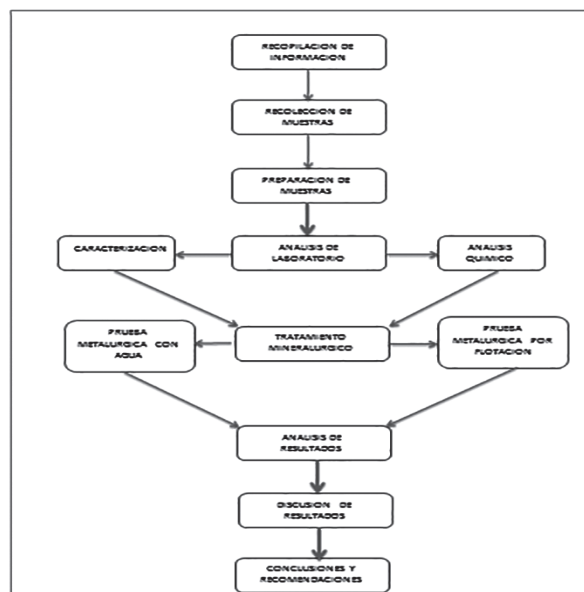


Figura N° 1. Diagrama metodológico de la investigación realizada del carbón mineral.

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Determinación de las muestras

Para los análisis se utilizó la fórmula:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_{ij} + \beta_k + (\alpha\beta)_{ik} + \epsilon_{ijk}$$

En la tabla N° 1 se muestra la cantidad de análisis realizados y su respectiva codificación

2.4. Tratamiento de las muestras

Las muestras de carbón mineral fueron secadas en una estufa, a temperaturas de 30 °C a 40 °C.

La clasificación se realiza en forma manual, mediante un proceso de selección visual (pallaqueo), con el objeto de separar la fracción mineral del estéril. Luego, cada muestra fue homogeneizada y cuarteada utilizando el cuarteador Jones de 12 aberturas, por la trituradora de mandíbulas Denver de 2 a 3 cm y, finalmente, a conminución en el molino de rodillos Denver del tipo DA, hasta obtener un d_{80} de 3 mm.

Tabla N° 1: Cantidad de muestras a analizar.

pH	TIEMPO (min.)	MUESTRA				
		M1	M2	M3	M4	M5
8	5	M1-85	M2-85	M3-85	M4-85	M5-85
	7	M1-87	M2-87	M3-87	M4-87	M5-87
	9	M1-89	M2-89	M3-89	M4-89	M5-89
9	5	M1-95	M2-95	M3-95	M4-95	M5-95
	7	M1-97	M2-97	M3-97	M4-97	M5-97
	9	M1-99	M2-99	M3-99	M4-99	M5-99
10	5	M1-105	M2-105	M3-105	M4-105	M5-105
	7	M1-107	M2-107	M3-107	M4-107	M5-107
	9	M1-109	M2-109	M3-109	M4-109	M5-109

Fuente: Elaboración propia.

2.5. Caracterización y análisis de las muestras

Para determinar las principales propiedades físicas, químicas y mineralógicas, la granulometría y poder realizar las pruebas de lavabilidad y flotación, se realizó una serie de análisis que se detallan a continuación.

2.5.1. Tipos de análisis

Análisis físico (color, lustre, fractura, friabilidad, dureza, densidad real, densidad aparente y porosidad), análisis químico inmediato (análisis de humedad, análisis de materia volátil (MV), análisis de cenizas (CZ), análisis de carbón fijo (CF) y análisis de azufre), análisis químico elemental (poder calorífico, difracción de rayos X y análisis petrográfico) y análisis granulométrico.

2.5.2. Pruebas de lavabilidad

Para las pruebas de lavabilidad, se utilizaron 50 kg de muestra a una malla +4 y -50 de la serie ASTM (10 kg por cada prueba) y soluciones preparadas con densidades de 1.6 g/cm³, realizándose las pruebas de acuerdo al procedimiento estandarizado descrito en la Norma ASTM D4371-06 (AST, 2008) y siguiendo el sistema de elutriación modificado, de acuerdo a la Figura N° 2.

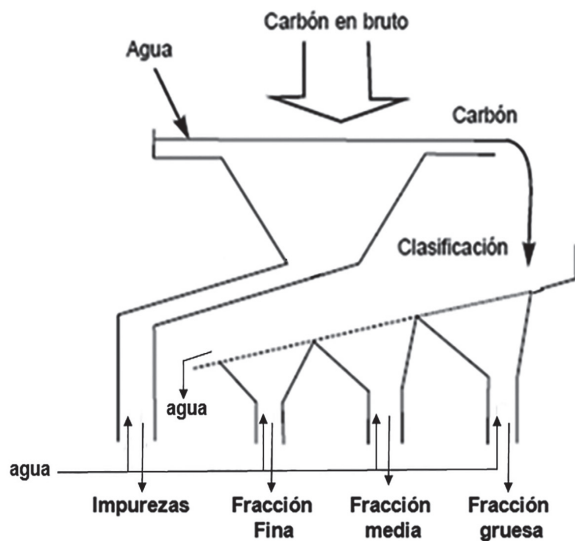


Figura N° 2. Unidad de lavado y clasificación del carbón.

Fuente. Elaboración propia.

Este circuito permite el lavado y la clasificación del carbón mineral. Las muestras obtenidas fueron secadas y preparadas para los análisis respectivos.

2.7. Pruebas de flotación

Las muestras tratadas por lavabilidad, pasan cada una respectivamente a constituirse como muestras en la etapa de flotación.

Al tamizar se obtuvo una muestra de 89 % - 200 mallas Tyler, y se procedió a su flotación. Para ello, se usó una

celda Denver donde fue colocada la pulpa formada por carbón y agua, en una relación líquido / sólido de 3:2.

La pulpa es acondicionada durante 10 minutos, tiempo en el cual se agregó el colector (3g/kg mineral) y el espumante (MIC, 0.6 g/KG mineral). Luego se procedió a flotar. La espuma flotada, o concentrado fue recolectada, filtrada, secada y enviada para el análisis de azufre.

Las condiciones de preparación de cada muestra para la flotación son:

Peso: 500 g

Agua: 750 cc

Tiempo: 10 min.

R L/S: 3/2

Colector: Kerosene 3 g/kg mineral

Espumante: Metil Isobutil Carbonil (MIC, 0.6 g/kg mineral).

Las condiciones para el proceso de flotación son:

Granulometría promedio: 89 a 91% a -200.

pH Inicial: 6

pH Flotación: 8, 9 y 10

Densidad de pulpa: 1040 g/l

Tiempo de acondicionamiento: 5 min.

Tiempo de flotación: 5, 7 y 9 min.

Espumante: Aceite de pino (2 gotas).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis del carbón mineral

Tabla N° 2. Análisis granulométrico.

N° TAMIZ (ASTM)	DIAMETRO ABERTURA (mm)	PESO (gr)	PESO (%)	% RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO PASANTE
60	0.25	0.00	0.00	0.00	100.00
100	0.149	1.91	0.38	0.38	99.62
140	0.105	5.04	1.01	1.39	98.23
170	0.088	10.94	2.19	3.58	94.65
200	0.074	449.66	89.93	93.51	1.14
> 200		32.45	6.49	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia. Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

Tabla N° 3. Análisis físico de las muestras de carbón.

MUESTRA	COLOR	LUSTRE	FRACTURA	FRIABILIDAD	DUREZA	DENSIDAD APARENTE (gr/cm ³)	DENSIDAD REAL (gr/cm ³)	POROSIDAD (%)
M-01	Café Marrón	Opaco	Irregular	Malo	1	1.107	1.57	0.71
M-02	Negro	Brillante	Concoide	Muy Buena	4	0.918	1.41	0.85
M-03	Negro	Opaco	Concoide	Buena	4	1.83	2.10	0.87
M-04	Oscuro	Opaco	Cubos	Buena	3	1.22	1.56	0.78
M-05	Gris oscuro	Semi Brillante	Cubos	Irregular	2	1.42	1.94	0.73

Fuente: Elaboración propia. Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

Tabla N° 4. Análisis inmediato del carbón mineral.

MUESTRA	HUMEDAD (%)	MATERIA VOLATIL (%)	CENIZA (%)	CARBÓN FIJO (%)
M-01	0.87	19.42	18.47	58.85
M-02	0.73	19.32	16.45	61.83
M-03	0.69	18.68	16.13	61.09
M-04	0.84	17.56	18.72	59.64
M-05	0.78	18.67	16.89	59.78
Promedio	0.78	18.73	17.33	60.24

Fuente: Elaboración propia. Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

Tabla N° 5. Análisis elementales de las muestras de carbón.

BASE RECIBIDA						
UNIDAD (%)	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	PROMEDIO
CARBONO	62,9	61,37	61,28	62,43	61,49	61,894
HIDROGENO	4,02	4,46	4,37	3,98	3,95	4,156
NITROGENO	0,68	0,72	0,64	0,68	0,71	0,686
AZUFRE	2,19	2,25	2,21	2,18	2,24	2,214
OXIGENO	23,5	23,82	24,39	24,56	24,29	24,112
PODER CALORIFICO (Kcal/Kg)	7242,86	7232,36	7243,86	7251,45	7247,26	7243,59
BASE SECA						
CARBONO	63,24	62,74	62,43	63,09	62,74	62,85
HIDROGENO	4,24	4,71	4,82	4,13	4,18	4,42
NITROGENO	0,71	0,74	0,69	0,72	0,75	0,72
AZUFRE	2,26	2,31	2,28	2,26	2,34	2,29
OXIGENO	24,7	24,94	24,99	24,86	24,78	24,85
PODER CALORIFICO (Kcal/Kg)	7254,29	7247,28	7256,29	7267,39	7261,28	7257,31

Fuente: Elaboración propia.
Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

Figura 3.1: Partículas libres de grafito (C) y pirita (py). 200X

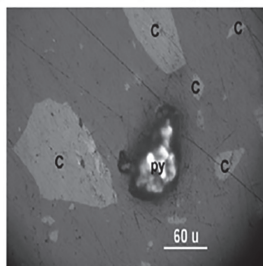
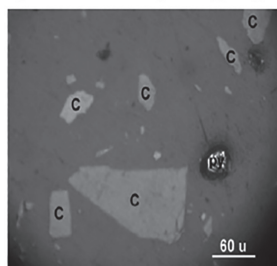


Figura 3.2: Partículas libres de grafito (C) y pirita (py). 200X



Fuente: Elaboración propia.
Elaborado en los Laboratorios de la FIGMMG-UNMSM.

3.2. TRATAMIENTO DEL CARBÓN MINERAL POR LAVABILIDAD

Tabla N° 6. Análisis de tamices Promedio con H₂O.

PROMEDIO DE MUESTRA / AGUA					
N° TAMIZ (ASTM)	DIAMETRO ABERTURA (mm)	PESO (gr)	PESO (%)	% RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO PASANTE
60.00	0.25	0.00	0.00	0.00	100.00
100.00	0.15	0.98	0.20	0.20	99.80
140.00	0.11	1.25	0.25	0.45	99.36
170.00	0.09	1.67	0.33	0.78	98.58
200.00	0.07	470.65	94.13	94.91	3.67
> 200		25.45	5.09	100.00	0.00

Fuente: Elaboración propia.
Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

Tabla N° 7. Análisis del carbón mineral tratado con H₂O.

MUESTRA	HUMEDAD (%)		MATERIA VOLATIL (%)		CENIZA (%)		CARBON FIJO (%)		AZUFRE (%)	
	INICIAL	LAVADO	INICIAL	LAVADO	INICIAL	LAVADO	INICIAL	LAVADO	INICIAL	LAVADO
M-01	0.87	0.63	19.42	18.82	18.47	16.36	58.85	62.12	2.26	2.23
M-02	0.73	0.61	19.32	19.25	16.45	16.42	61.83	62.10	2.31	2.26
M-03	0.69	0.59	18.68	18.44	16.13	15.75	61.09	63.33	2.28	2.23
M-04	0.84	0.65	17.56	18.38	18.72	17.14	59.64	62.11	2.26	2.21
M-05	0.78	0.67	18.67	18.38	16.89	16.52	59.78	62.48	2.34	2.28
Promedio	0.78	0.63	18.73	18.65	17.33	16.44	60.24	62.43	2.29	2.24

Fuente: Elaboración propia.
Elaborado en los Laboratorios de la FIQ-UNICA.

3.3. PRUEBAS DE TRATAMIENTO POR FLOTACIÓN

Tabla N° 8. Resultados de las pruebas metalúrgicas de flotación.

RESUMEN PROMEDIO DE CADA MUESTRA							
CONDICION	pH	TIEMPO (min)	MATERIA VOLATIL (%)	CENIZAS (%)	CARBON FIJO (%)	PODER CALORIFICO (Kcal/Kg)	AZUFRE (%)
		7	18,65	16,19	62,43	7257,31	2,24
		9	18,65	16,08	62,43	7257,31	2,24
9	5	18,65	15,75	62,43	7257,31	2,24	
		7	18,21	14,99	64,96	7272,65	2,18
		9	18,11	13,72	66,78	7308,18	2,12
10	5	18,03	7,53	72,99	8140,66	1,42	
		7	17,78	7,34	73,00	8141,23	1,42
		9	17,78	7,34	73,00	8141,23	1,42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 9. Comparación de muestra inicial y muestra flotada a pH 10 y 7 min.

MUESTRA	MATERIA VOLATIL (%)		CENIZA (%)		CARBON FIJO (%)		PODER CALORIFICO (Kcal/Kg)		AZUFRE (%)	
	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.
M-01	19.42	17.78	18.47	7.43	58.85	72.65	7254.29	8172.14	2.26	1.47
M-02	19.32	17.75	16.45	7.65	61.83	74.13	7247.28	8047.11	2.31	1.37
M-03	18.68	17.83	16.13	7.28	61.09	75.33	7156.29	8191.29	2.28	1.44
M-04	17.56	17.72	18.72	7.2	59.64	71.49	7267.39	8142.64	2.26	1.41
M-05	18.67	17.81	16.89	7.16	59.78	71.39	7261.28	8152.96	2.34	1.41
Promedio	18.73	17.78	17.33	7.34	60.24	73.00	7257.31	8141.23	2.29	1.42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 10. Comparativo del Análisis Químico Elemental de las muestras inicial y flotadas.

UNIDAD (%)	M-01		M-02		M-03		M-04		M-05		PROMEDIO	
	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.	INICIAL	FLOT.
CARBONO	63.24	71.32	62.74	71.97	62.43	72.12	63.09	71.09	62.74	71.36	62.85	71.57
HIDROGENO	4.24	4.73	4.71	4.97	4.82	4.99	4.13	4.61	4.18	4.52	4.42	4.76
NITROGENO	0.71	0.75	0.74	0.79	0.69	0.74	0.72	0.77	0.75	0.79	0.72	0.77
AZUFRE	2.26	1.47	2.31	1.37	2.28	1.44	2.26	1.41	2.34	1.41	2.29	1.42
OXIGENO	24.70	29.14	24.94	29.76	24.99	30.11	24.86	29.84	24.78	29.69	24.85	29.71

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Presentación de resultados

El análisis granulométrico de las muestras iniciales de carbón presentan un retenido acumulado de 93.51 % a -200 malla (Tabla N° 2), porcentaje alto debido a que el carbón es un material blando y presenta un alto índice de porosidad, de acuerdo a los análisis físicos (Tabla N° 3). El análisis inmediato muestra una humedad promedio de 0.78 %, materia volátil 18.73 %, ceniza 17.33 % y carbón fijo 60.24 % (Tabla N° 4); en cuanto al análisis elemental en base recibida se tiene 61.897 % de carbono, 2.214 % de azufre y un poder calorífico superior de 7243.59 kcal/kg en promedio y en base seca 62.85 % de carbono, 2.29 % de azufre y un poder calorífico superior de 7257.31 kcal/kg en promedio (Tabla N° 5).

La caracterización mineralógica de la muestra de carbón realizado en el microscopio ha arrojado la presencia de grafito (grf) y pirita (py), como se puede observar en las Figuras 3.1 y 3.2.

La distribución porcentual indica que el carbón mineral estudiado contiene 96.91 % de grafito y 3.09 % de pirita. Las partículas mayormente están libres, motivo por el cual, de acuerdo al análisis modal, el grado de liberación

tanto del grafito y piritita es de 100%; es decir, todas las partículas contadas están libres. Por las razones expuestas, se realizaron pruebas de separación por el proceso de flotación, incrementando el pH para deprimir la piritita y, como el grafito es hidrofóbico, se realizó una flotación bulk, utilizando como reactivo solamente pequeñas cantidades de espumante (aceite de pino).

Para el estudio de tratamiento con agua y por flotación, se han tomado los datos del análisis elemental de las muestras de carbón en base seca.

Los resultados del análisis granulométrico muestran que el 94.91 % ha pasado la malla 200 (470.65 g) en promedio (Tabla N° 6), porcentaje equivalente al carbón inicial debido a que los tiempos de agitación mecánica son cortos (5, 7 y 9 min.). El análisis inmediato refleja una considerable disminución de los porcentajes de humedad de 0.78 % a 0.63 %, cenizas de 17.33 % a 16.44 % y azufre de 2.29 % a 2.24 % y una leve disminución de materia volátil de 18.73 % a 18.65 % y un leve incremento en el porcentaje de carbón fijo de 60.24 % a 62.43 % (Tabla N° 7), los cuales favorecen en la mejora de la calidad del carbón mineral, considerando que en esta etapa se ha realizado el lavado del carbón mineral solo con agua.

Para las pruebas de separación por flotación, a cada una de las muestras, incrementando el pH a 8, 9 y 10 y tiempos de 5, 7 y 9 minutos, para ello se realizó una serie de combinaciones en la que se han determinado 45 pruebas en total (Tabla N° 1); las pruebas de flotación se han realizado para deprimir la piritita y como el grafito es hidrofóbico se realizó una flotación bulk, utilizando como reactivo pequeñas cantidades de espumante (MIC) y colector. Para ello, se usó una celda Denver donde fue colocada la pulpa formada por carbón y agua, en una relación de líquido/sólido de 3:2. La pulpa es acondicionada durante 5 minutos, tiempo en el cual se agregó el colector (diésel, 3 g/kg mineral) y el espumante (MIC, 0.6 g/kg mineral). Luego se procedió a flotar en los tiempos y pH establecidos, de acuerdo a las muestras codificadas. La espuma flotada, o concentrado, fue recolectada, filtrada, secada y enviada para los análisis respectivos.

En la Tabla N° 8 se muestra el resumen de los promedios de las muestras flotadas, en donde se puede ver que a un pH de 10 y a un tiempo de 7 minutos, el proceso de flotación presenta las mejores condiciones; estos resultados corresponden a las muestras codificadas con el 105 (Tabla N° 9), sin embargo hay que tener en cuenta que al mismo pH (10) y en tiempos de 9 minutos no hay variaciones, lo que supone además que a mayores tiempos no habrá variaciones, y en tiempo de 5 minutos los valores son relativamente similares a tiempos de 7 y 9 minutos; las variaciones de los resultados en estos rangos no difieren mucho, por lo que también se consideran estos tiempos como aceptables.

Los resultados de la Tabla N° 10 detallan la comparación de las muestras iniciales y las muestras flotación a un pH 10 y tiempo de 7 minutos, así como el promedio de los análisis inmediatos y elementales del carbón mineral; donde se ilustra que, en general, las muestras de materia volátil disminuyen levemente de 18.73 % a 17.78 % en promedio, el contenido de ceniza es considerablemente menor que los

del carbón inicial, de 17.33 % a 7.34 %; un incremento promedio considerable de carbón fijo de 60.24 % hasta 72.99 % en promedio y una disminución considerable de azufre de 2.29 % a 1.42 % en promedio.

En la tabla N° 10 se muestran los resultados de los análisis químicos de las muestras iniciales comparados con las muestras flotadas. Las fracciones flotadas mostraron incremento en los contenidos de carbono (62.85% a 71.57%), hidrógeno (4.42% a 4.76%), nitrógeno (0.72% a 0.77%) y oxígeno (24.85% a 29.71%) en comparación con el carbón inicial. Los mayores contenidos de carbono e hidrógeno están de acuerdo con los incrementos de materia volátil y carbón fijo encontrados en el análisis proximal. En relación con el azufre, se observó que ocurrió una reducción de su concentración en las fracciones flotadas comparativamente con el carbón alimento, de 2.29 a 1.44 en promedio.

A pesar de que se presentó reducción en los contenidos de ceniza y materia volátil en las fracciones flotadas, los resultados anteriores muestran que usando el proceso de flotación burbujeante es efectivo para obtener carbones para reducir los contenidos de azufre y reducir los contenidos de ceniza e incrementar el poder calorífico del carbón mineral.

IV. CONCLUSIONES

1. Del estudio de caracterización se obtuvo que el carbón mineral contiene: 96.91 % de grafito, 3.09 % de piritita, 62.85 % de carbono, 4.42 % de hidrógeno, 0.72 % de nitrógeno, 2.29 % de azufre, 24.85 % de oxígeno, 17.33 % de ceniza, 18.73 % de materia volátil y 7257.31 kcal/kg de poder calorífico.
2. De la evaluación realizada al carbón mineral tratado después del tratamiento por lavabilidad y flotación (proceso completo), se determina que se puede reducir el contenido de azufre en 37.99 % (2.29 inicial a 1.42 final) y aumentar el poder calorífico en 12.18 % (De 7257.31 a 8141.23 kcal/kg en promedio), resultados muy satisfactorios para los procesos metalúrgicos y que hacen factible el uso de carbón para la industria.
3. Las condiciones óptimas en el proceso de flotación son: una granulometría de 93 % - 200, un pH de 10, una densidad de pulpa de 1040 g/l, adición de espumante de 2 gotas de aceite de pino, un tiempo de acondicionamiento de 5 minutos y un tiempo de flotación óptima de 7 minutos.

V. AGRADECIMIENTO

A Dios, que con su bendición me ha permitido alcanzar mis metas.

A las autoridades de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por la publicación de este artículo.

A la Universidad Nacional San Luis Gonzaga de Ica por su apoyo con los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica.

Un agradecimiento especial al Ing. Daniel Lovera y al Dr. Vidal Aramburú, por sus sugerencias y aportes al trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barraza, J., Díaz, A. y Write, A. (1988). Beneficio de los carbones de las industrias y las carboeléctricas del valle del Cauca y Cauca. En Memorias IV Congreso Nacional y II Internacional en Ciencia y Tecnología del Carbón. Paipa (Boyacá), p. 147 – 160. Colombia.
- [2] Elard, F. y León, D. (2006). Importancia del carbón mineral en el desarrollo. *Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG*. Volumen 9, N° 18, 91-97. Lima: UNMSM.
- [3] Gómez, J. (1996). Eliminación de azufre y elementos traza de carbones de alto rango mediante métodos físicos de depuración. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. España.
- [4] Prieto, I. (1989). *Análisis de los parámetros de operación de la combustión del carbón que intervienen en la reducción de las emisiones de dióxido de azufre*. España: Universidad Politécnica de Madrid. .
- [5] Giraldo, M. y Blas, W. (2007). Minería actual del carbón en el norte del Perú. *Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG*. Volumen 10, N° 20, 76-8. Lima: UNMSM. .
- [6] Aramburú, R. y Núñez, P. y otros (2007). Disminución del contenido de azufre en carbón mineral, mediante procesos metalúrgicos para uso industrial. *Revista del Instituto de Investigaciones de la FIGMMG*. Volumen 10, N° 20, 7-12. Lima: UNMSM.