

## **Incremento del poder calorífico de los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash mediante la técnica de flotación diferencial**

Increment of the calorific power of the coal anthracite minerals of the Ancash department, using the processing differential flotation

RICARDO CAYO CASTILLEJO MELGAREJO<sup>1</sup>, JULIO GREGORIO POTERICO HUAMAYALLI<sup>1</sup>,  
GUSTAVO ROBERTO BOJÓRQUEZ HUERTA<sup>1</sup> Y LOURDES LIZ HUAMÁN ROMERO<sup>1</sup>

### **RESUMEN**

La presente investigación permite introducir, dentro de la cadena de valor del sector no metálico, la actividad primaria de beneficio (procesamiento de minerales mediante la flotación diferencial) con el objetivo de incrementar el poder calorífico de los minerales de carbón antracita. El tipo de estudio es de carácter experimental aplicativo que analiza el fenómeno de flotación. La metodología en el trabajo de campo partió de los muestreos de los minerales de carbón antracita ubicados en el departamento de Áncash (Caraz, Huallanca, Sihuas y Mancos) para ser analizados y obtener los parámetros técnicos: poder calorífico, carbono fijo, cenizas, volátiles, humedad y azufre. Para la flotación de las muestras obtenidas se utilizó el laboratorio experimental de la planta Santa Rosa de Jangas de la UNASAM. En el procesamiento y análisis de los datos se utilizó la codificación y tabulación de datos en Excel y el programa estadístico SPSS versión 18; para el análisis se utilizó la prueba estadística t-Student, obteniéndose el requisito de normalidad con un nivel de significación del 5% ( $p$  menor 0,05). Se concluye que es factible el empleo de la flotación diferencial para el tratamiento de minerales de carbón del tipo antracita que mejora de manera notable el poder calorífico de 5400 Kcal/kg a 7800 Kcal/Kg.

**Palabras clave:** flotación diferencial; cenizas; carbón fijo; poder calorífico.

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Huaraz, Perú.

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista *Aporte Santiaguino* de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

## ABSTRACT

This research allows to introduce in the value chain of the non-metallic sector the primary activity of benefit (mineral processing by differential flotation) with the main purpose to increase the calorific value of anthracite coal minerals. The type of study was experimental application which analyzed the phenomenon of flotation, the methodology in the field work. It started with the analysis of the sample of anthracite coal minerals located in Ancash as Caraz, Huallanca, Sihuas and Mancos, and the obtained technical parameters were: calorific power, fixed carbon, ash, volatile, humidity and sulfur, for the flotation of the samples, the experimental laboratory of the Santa Rosa de Jangas plant of the UNASAM was used. For the processing and analysis of the data, the coding and tabulation of data in Excel and the SPSS statistical program version 18 were used; for the analysis, the t-Student statistical test was used, meeting a normal requirement, with a level of significance of 5% ( $p < 0,05$ ).

It is concluded that it is feasible to use differential flotation for the treatment of coal minerals of the anthracite type that significantly improves the calorific value of 5400 Kcal / kg at 7800 Kcal / Kg.

**Keywords:** differential float; ashes; fixed coal; calorific power.

## INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se analiza y determina la relación que existe entre el beneficio de los minerales no metálicos de carbón y el poder calorífico en los yacimientos ubicados en el departamento de Áncash. Uno de los objetivos es proponer a los productores de este combustible fósil el comercializar sus minerales con mayor valor agregado, el cual fue cuantificado mediante los parámetros técnicos de flotación y parámetros de los minerales de carbón, como son el nivel de cenizas, volátiles, azufre, carbón fijo, y poder calorífico.

El carbón es uno de los recursos importantes a nivel mundial, el 75% de la producción energética está representada por la combustión de este combustible fósil, para la fabricación del acero, interviene para mejorar las propiedades mecánicas, hasta la fecha no existe un combustible de menor precio para la producción de cemento a nivel mundial.

Babatunde y Adeleke (2013) demuestran que mediante la flotación de los carbones bituminosos de okaba, se reducen el nivel de Azufre de 0,2% a 0,02% representando casi el 90%, el nivel de cenizas de 9,6% a 5,85% representando una reducción del 43,25%.

Choon (1983) plantea que la mejora de la recuperación de los carbones bituminosos de la zona de Iowa es con el uso de petróleo diésel como colector principal de 0,26 lib/t

a 0,3 lib/t, como espumante el MIBC en 0,32 lib/t y el carbonato de sodio al 2%, se obtiene como recuperación general de 94,5%.

Curtis (1997) da cuenta que hay mejora en la cinética de flotación de los minerales de carbón bituminoso de Westers coals Canadian haciendo uso como colector principal al kerosene en 1,2 l/t y como espumante al IMBC en 20% en volumen.

Mejía (2009) sostiene que la flotación burbujeante y lixiviación con ácidos favorecen satisfactoriamente en el incremento del poder calorífico.

Barraza (2011) concluye que la mejora de la recuperación de los minerales de carbón se logra en 75% de malla -200.

Hippo y Deepak (2001) concluyen que la alta recuperación y calidad de los minerales de carbón es por el uso del Metil Iso Butil Carbinol “MIBC” con el Dowfroht D250.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El tipo de investigación es experimental aplicativo con propuesta, en el departamento de Ancash existen yacimientos de carbón antracita ubicados en las zonas de Caraz, Mancos, Huallanca y Sihuas en los cuales se realizó el muestreo en el interior de las minas lográndose obtener 06 muestras de 4 kg de mineral de cabeza. Para el análisis de los parámetros de los minerales de carbón nos apoyamos de la empresa privada UNACEM, las muestras se prepararon y se flotaron en las instalaciones del laboratorio experimental de la planta Santa Rosa de Jangas de propiedad de la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo” (UNASAM). La aplicación de esta metodología nos permitió realizar un análisis cuantitativo y cualitativo sobre los parámetros de los minerales de carbón antracita, como son el poder calorífico, carbono fijo, cenizas, volátiles, humedad y azufre para luego ser tabulados en Excel y el programa estadístico SPSS versión 18, para el análisis se utilizó la prueba estadística t-Student, si cumple con el requisito de normalidad con un nivel de significación del 5% (p menor 0,05).

### **Población**

Los estudios realizados por el Instituto Geológico Minero Metalúrgico (INGEMMET) de los recursos existentes en el Perú de carbón del tipo antracita, Áncash es el departamento que posee más del 50% de la reserva nacional, existen operaciones formales e ilegales, por lo que se ha tomado como población las operaciones formales de las zonas de Caraz, Mancos, Huallanca y Sihuas.

### **Muestra**

Por tratarse de una población reducida, la muestra será la misma.

## RESULTADOS

### 1. Características físico-mecánicas del carbón del departamento de Áncash

Tabla 1. Parámetros físico-mecánicos por áreas de investigación

Parámetros	Unidad	Caraz	Mancos	Sihuas	Yuracmarca
Densidad	t/m <sup>3</sup>	1,25	1,28	1,35	1,32
Humedad	%	2,58	3,16	7,66	2,15
Resistencia compresiva	Mpa	35	40	37	45
Dureza	Mohs	5,5	5,5	5	5,5
Índice de molindabilidad	HGI	45	40	55	45
Índice de trabajo	Kw-h/tc	9	10	8	9

Como se muestra en la tabla 1, los minerales de carbón del departamento de Áncash no presentan problemas en lo referente a preparación mecánica, por la baja dureza y consumo energético.

### 2. Parámetros técnicos según la ASTM

Tabla 2. Parámetros técnicos promedios del carbón de departamento de Ancash según la ASTM (American Society for Testing Materials)

Zona de investigación	Humedad (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Azufre (%)	Poder calorífico (Kcal/Kg)	Carbón fijo (%)
Caraz	2,5	28,7	6,0	0,6	5572,8	64,7
Mancos	3,1	24,9	4,3	0,5	5821,0	70,3
Sihuas	7,52	28,04	6,7	0,47	5462,0	64,79
Yuramarca	2,2	29,6	4,7	0,4	5530,3	65,3

Se muestra en la tabla 2 que los valores de las cenizas son muy elevadas, que influye en el bajo poder calorífico que presentan los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash.

### 3. Parámetros técnicos según la ASTM

Tabla 3. Parámetros promedio de operación para la flotación experimental

Parámetros	Unidad	Caraz	Mancos	Sihuas	Yuramarca
Grado de liberación	-200%	50	60	50	60
Tiempo de molienda	min	8	10	9	10
Tiempo de acondicionamiento	min	3	3	3	3
Tiempo de flotación	min	12	15	10	15
RPM	r/min	375	375	375	375
Nivel de acidez	pH	6,5	6,5	6,5	6,5
Densidad de pulpa	g/cc	1200	1200	1200	1200
Peso de muestra	g	1000	1000	1000	1000
Volumen de agua	cc	900	900	900	900

En la tabla 3, se muestra que el grado de liberación de los minerales de carbón se logra entre 50% a 60 % de malla -200; así mismo, se puede observar que debido al bajo índice de trabajo el tiempo de molienda varía de 8 minutos a 10 minutos.

### 4. Consumo de reactivos

Tabla 4. Dosificación promedio de reactivos para la flotación experimental

Reactivos	unidad	Caraz	Mancos	Sihuas	Yuramarca
Espumante D-250	Kg/t	0,12	0,15	0,12	0,15
Espumante MIBC	Kg/t	0,07	0,07	0,07	0,07
Colector D-2	Kg/t	0,18	0,18	0,18	0,18
	Kg/t	0,02	0,02	0,02	0,02

La tabla 4 nos indica que el consumo promedio del colector D-2 en el proceso de flotación es de 0,18 Kg/t, el espumante MIBC es de 0,07 Kg/t, el D-250 es de 0,15 Kg/t y el silicato de sodio neutro está en el orden de 0,2 Kg/t.

### 5. Balance metalúrgicos por zona de trabajo

Tabla 5. Balance metalúrgico de la zona de Caraz

Producto	Peso	Ley %C	Contenido C (g)	Recuperacion % C	Ratio
Cabeza	1000	64,7	647,0	100	
Conc. Carbón	764,10	83,4	637,3	98,5	1,31
Relave	235,90	4,13	9,7	1,5	

En la presente tabla, se muestra que la calidad del carbón se incrementa de 64,7% a 83,4%, con recuperación en el proceso de 98,5%, así mismo se observa que el desplazamiento al relave representa 1,5%.

Tabla 6. Balance metalúrgico de la zona de Mancos

Producto	Peso	Ley %C	Contenido C (G)	Recuperación % C	Ratio
Cabeza	1000	70,3	703,0	100	
Conc. Carbón	842,99	82,5	695,5	98,9	1,19
Relave	157,01	4,8	7,5	1,1	

En la tabla 6 se muestra que la calidad del carbón se incrementa de 70,3% a 82,5%, con recuperación en el proceso de 98,9%, así mismo se observa que el desplazamiento al relave representa 1,1%

Tabla 7. Balance metalúrgico de la zona de Sihuas

Producto	Peso	Ley %C	Contenido C (G)	Recuperación % C	Ratio
Cabeza	1000	65,3	653,0	100	
Conc. Carbón	762,82	83,8	639,2	97,9	1,31
Relave	237,18	5,8	13,8	2,1	

En la tabla 7 se muestra que la calidad del carbón se incrementa de 65,3% a 83,8%, con recuperación en el proceso de 97,9%, así mismo se observa que el desplazamiento al relave representa 2,1%

Tabla 8. Balance metalúrgico de la zona de Yuracmarca

Producto	Peso	Ley %C	Contenido C (G)	Recuperación % C	Ratio
Cabeza	1000	64,8	648,0	100	
Conc. Carbón	773,84	82,4	637,6	98,4	1,9
Relave	226,16	4,58	10,4	1,6	

En la tabla 8 se muestra que la calidad del carbón se incrementa de 64,8% a 82,4%, con recuperación en el proceso de 98,4%, así mismo se observa que el desplazamiento al relave representa 1,6%

## 6. Validación estadística del informe

Tabla 9. Prueba de muestras relacionadas – zona de Caraz

Zona de Caraz	Media	D.E	Prueba t-Student para la diferencia de medidas con varianzas iguales	Valor de P
Antes PC	-1989,833	45,146	-107,962	0,000
Después PC				

En el presente cuadro, se observa que las diferencias son estadísticamente significativas ( $p$  menor a 0,005), por lo que se puede afirmar que la flotación diferencial favorece significativamente en el poder calorífico de los minerales de carbón antracita.

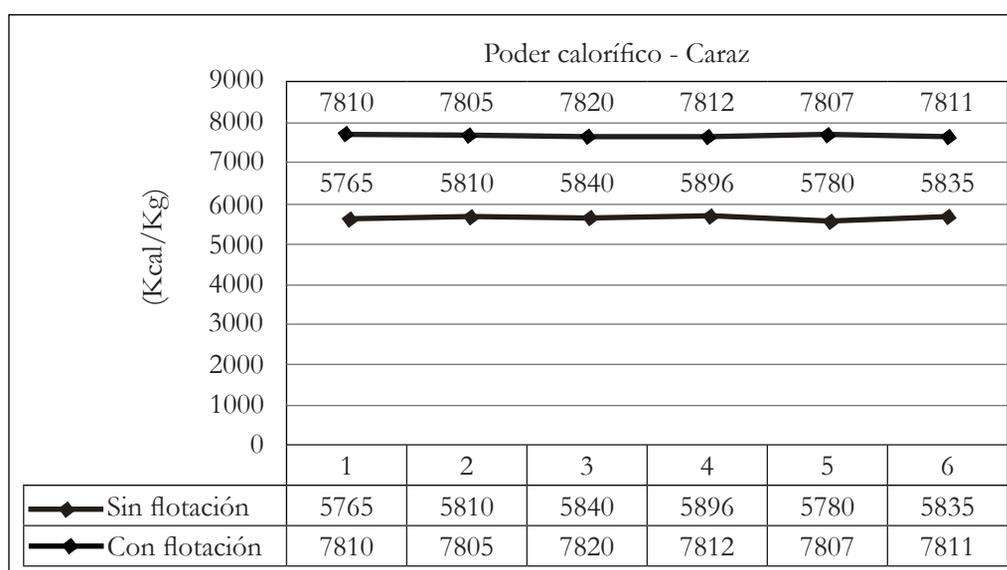


Figura 1. Poder calorífico en cabeza y concentrado de la zona de Caraz

La comercialización de los minerales de carbón está en función del poder calorífico, la flotación de los minerales favorece de manera sustancial en el incremento del poder calorífico uno por la reducción de cenizas y el otro por el incremento de carbón fijo.

Tabla 10. Prueba de muestras relacionadas – zona de Mancos

Zona de Mancos	Media	D.E	Prueba t-Student para la diferencia de medidas con varianzas iguales	Valor de P
Antes PC	-1998,333	48,157	-107,645	0,000
Después PC				

En el presente cuadro, se observa que las diferencias son estadísticamente significativas ( $p$  menor a 0,005), por lo que se puede afirmar que la flotación diferencial favorece significativamente en el poder calorífico de los minerales de carbón antracita.

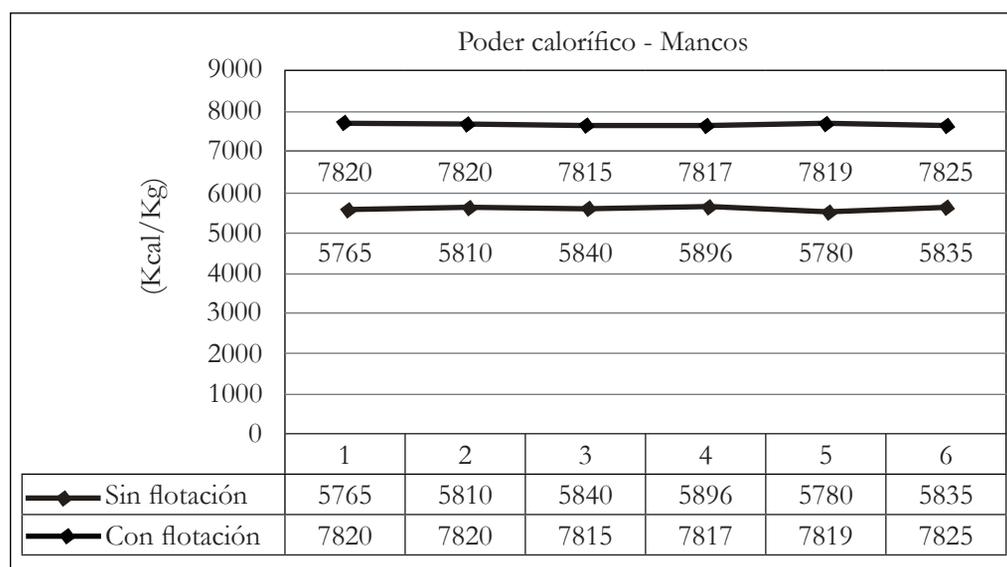


Figura 2. Poder calorífico en cabeza y concentrado de la zona de Mancos

La comercialización de los minerales de carbón está en función del poder calorífico, la flotación de los minerales favorece de manera sustancial en el incremento del poder calorífico uno por la reducción de cenizas y el otro por el incremento de carbón.

Tabla 11. Prueba de muestras relacionadas – zona de Sihuas

Zona de Sihuas	Media	D.E	Prueba t-Student para la diferencia de medidas con varianzas iguales	Valor de P
Antes PC	-2229,667	65,473	-83,417	0,000
Después PC				

En el presente cuadro, se observa que las diferencias son estadísticamente significativas ( $p$  menor a 0.005), por lo que se puede afirmar que la flotación diferencial favorece significativamente en el poder calorífico de los minerales de carbón antracita.

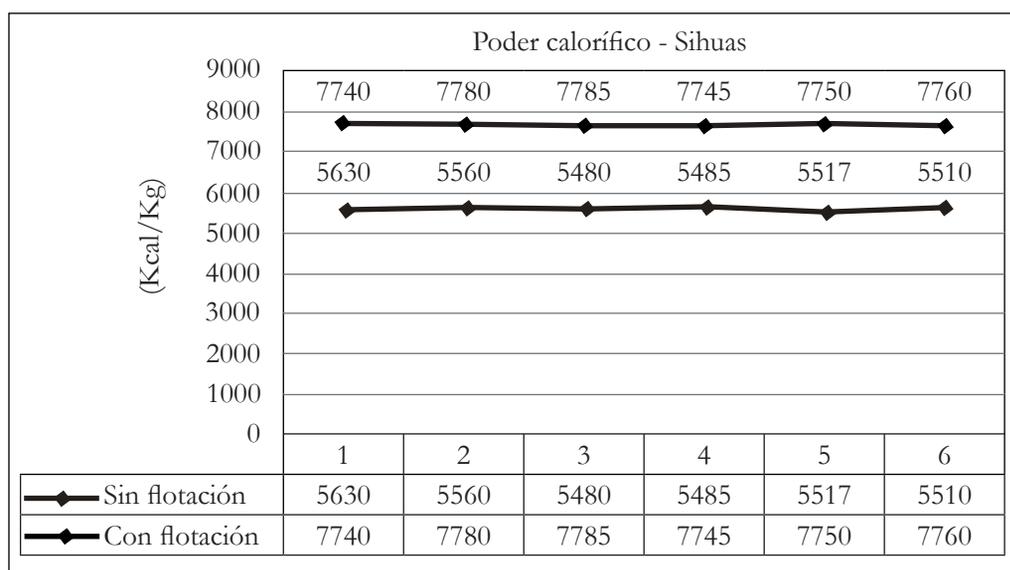


Figura 3. Poder calorífico en cabeza y concentrado de la zona de Sihuas

La comercialización de los minerales de carbón está en función del poder calorífico, la flotación de los minerales favorece de manera sustancial en el incremento del poder calorífico uno por la reducción de cenizas y el otro por el incremento de carbón.

Tabla 12. Prueba de muestras relacionadas – zona de Yuracmarca

Zona de Yuramarca	Media	D.E	Prueba t-Student para la diferencia de medidas con varianzas iguales	Valor de P
Antes PC	-2229,667	6,055	-926,216	0,000
Después PC				

En el presente cuadro, se observa que las diferencias son estadísticamente significativas ( $p$  menor a 0,005), por lo que se puede afirmar que la flotación diferencial favorece significativamente en el poder calorífico de los minerales de carbón antracita.

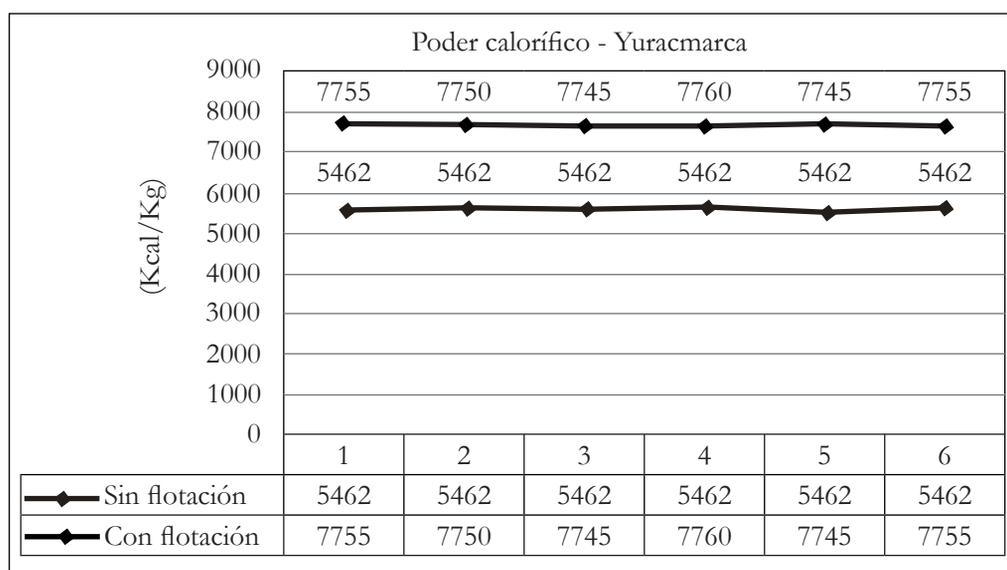


Figura 4. Poder calorífico en cabeza y concentrado de la Zona de Yuracmarca

La comercialización de los minerales de carbón está en función del poder calorífico, la flotación de los minerales favorece de manera sustancial en el incremento del poder calorífico uno por la reducción de cenizas y el otro por el incremento de carbón.

## DISCUSIÓN

Las tendencias actuales de los sectores extractivos, en particular el sector minero, es comercializar productos con mayor valor agregado, con la finalidad de mejorar la rentabilidad de los productores de este combustible fósil. Los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash se comercializan como sale de mina, con valores altos en el nivel de cenizas lo que origina que el poder calorífico no apoye satisfactoriamente en la valorización, con el presente trabajo de investigación se pretende mejorar sustancialmente las calorías del mineral.

Babatunde y Adeleke (2013) demuestran que mediante la flotación de los carbones bituminosos de okaba, se reducen el nivel de Azufre de 0,2% a 0,02% representando casi el 90%, el nivel de cenizas de 9,6% a 5,85% representando una reducción del 43,25% el cual demuestra que la flotación diferencial de los minerales de carbón antracita reduce significativamente el nivel de cenizas.

Choon (1983) plantea que la mejora la recuperación de los carbones bituminosos de la zona de Iowa es con el uso de petróleo diésel como colector principal de 0,26 lib/t a 0,3 lib/t, como espumante el MIBC en 0,32 lib/t y el carbonato de sodio al 2%, se obtiene como recuperación general de 94,5%. A nivel experimental se demuestra que la mejora en el poder calorífico del carbón del tipo antracita es con el uso como colector el petróleo diésel y como espumante el MIBC.

Curtis (1997) da cuenta que hay mejora en la cinética de flotación de los minerales de carbón bituminoso de Westers coals Canadian haciendo uso como colector principal al kerosene en 1,2 l/t y como espumante al IMBC en 20% en volumen. El kerosene salió del mercado peruano hace más de dos décadas, entre el petróleo diésel y el kerosene no hay diferencia sustancial en la mejora de la recuperación, a nivel experimental se ha demostrado que haciendo uso de petróleo la recuperación del carbón antracita supera a 98%.

Mejía (2009) sostiene de la flotación burbujeante y lixiviación con ácidos favorecen satisfactoriamente en el incremento del poder calorífico. También nos dice que la flotación burbujeante favorece satisfactoriamente el poder calorífico, el cual se ratifica que la flotación diferencial de los minerales de carbón antracita realizada a nivel experimental en las instalaciones de la planta Santa Rosa de Jangas, mejora sustancialmente el nivel del poder calorífico superando los 7700 Kcal/kg.

Barraza (2011) sustenta que la mejor recuperación de los minerales de carbón se logra liberando el mineral de la ganga en la malla 75% - 200. Con la presente investigación se demuestra que la liberación de los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash se logra en las mallas 50% y 60% -200.

Hippo y Deepak (2001), en su publicación, hacen notar que la alta recuperación y calidad de los concentrados se logra con el uso de los espumantes D-250 y MIBC, por lo que la presente investigación ratifica que los niveles de recuperación superan a 93%, mientras que las calidades de los concentrados superan a 83%.

## **CONCLUSIÓN**

La técnica de flotación diferencial usada para los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash favorece notablemente en la mejora del poder calorífico, por el incremento de carbono fijo de 66,27% a 82,9% en promedio, que incide favorablemente en el poder calorífico.

Como se puede observar de los cuadros anteriores, los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash, presentan un elevado contenido de cenizas en promedio de 28,8%, el cual repercute de manera notable en el poder calorífico.

De los balances metalúrgicos se afirma que el nivel de recuperación de carbón en el proceso de beneficio es muy satisfactorio que supera a 97%, por consiguiente el desplazamiento de carbón al relave en el orden de 3%. El incremento de carbón en

el concentrado es satisfactorio, en un valor promedio de 63,5% a 84,6% que favorece sustancialmente en el incremento del poder calorífico. De las tablas N° 5 al N° 8, se afirma que el beneficio de los minerales de carbón tiene un comportamiento dócil, no presenta dificultad alguna en las operaciones unitarias de flotación diferencial, el cual se afirma por el elevado nivel de recuperación.

El colector usado para la presente investigación es el petróleo diésel D-2, con un consumo promedio de 0,18 Kg/t, cuya comercialización es libre en el Perú, a diferencia del kerosene que salió fuera de mercado de los hidrocarburos. Al tener minerales de carbón con poder calorífico que superan a 7700 Kcal/kg, los productores del departamento de Áncash, se verán beneficiados en sus ingresos por venta de los minerales concentrados, es decir dejarán de llevar desmonte a la ciudad de Lima y obtener mejoras en los términos comerciales.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestros sinceros agradecimientos al grupo empresarial UNACEM por los análisis de los parámetros realizados a los minerales de carbón antracita de cabeza y concentrado. Así mismo, a la Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo” por el uso del laboratorio experimental de la planta Santa Rosa de Jangas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Babatunde, Yahaya y Adeleke, Abraham. 2013. *Froth flotation upgrading of low grade coal*. Cogi: Petroleum & coal.
- Choon, Han. 1983. *Coal cleaning by froth flotation*. Iowa. Chemical engineering commoms.
- Curtis, Andrews. 1997. *Effect of particle size on coal flotation Kinetics*. Kingston: Pearson & Associates.
- Barraza, Juan. 2011. *Avances en la flotación de carbón*. Cali: Universidad del Valle.
- Hippo, Edwin y Deepak, Danton. 2001. *Coal Flotation with/ oil Froth*. Illinois: University of Newcastle.
- Mejía, Isabel. 2009. *Producción de carbonos ultralimpios usando flotación burbujeante y lixiviación con ácidos*. Cali. Universidad del Valle.

**Recepción:** 03/03/2018

**Aceptación:** 03/06/2018

## Correspondencia

Ricardo Castillejo Melgarejo  
rcastillejo77@gmail.com