

COAL DESULFURIZATION BY LEACHING WITH NITRIC ACID FOR THE MANUFACTURE OF BRIQUETTES IN THE LLARAY HAMLET - LA LIBERTAD, 2023

Daniel Alva, Ing1, Ricardo Portilla, Ing1, Sujey Castañeda Ing1

1 Universidad Privada del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. daniel.alva@upn.edu.pe, miguel.portilla@upn.edu.pe, sujeyanabel_01@hotmail.com

ABSTRACT- *The objective of this research is to determine the level of desulfurization of coal by leaching with nitric acid for the manufacture of coal briquettes in the Llaray hamlet - La Libertad. We worked based on geology for the recognition of the study area and physicochemical analysis where 3 samples were taken to analyze the different properties of coal.*

The samples were treated by leaching with 25% nitric acid for 84 minutes at a temperature of 80 °C, obtaining an average decrease of 35% of the sulfur level, which is a significant achievement from a coal quality perspective. The study of sulfur reduction in coal is essential for society, since it would reduce pollution and improve quality, guaranteeing its price in the market and making it more efficient.

Keywords: *desulfurization, leaching, nitric acid, briquette manufacture, sulfur.*

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

DESULFURACIÓN DEL CARBÓN MEDIANTE LIXIVIACIÓN CON ÁCIDO NÍTRICO PARA LA FABRICACIÓN DE BRIQUETAS, EN EL CASERIO LLARAY – LA LIBERTAD, 2023

RESUMEN- La presente investigación tiene como objetivo determinar el nivel de desulfuración del carbón mediante la lixiviación con ácido nítrico para la fabricación de briquetas de carbón en el caserío Llaray - La Libertad. Se trabajó en base de la geología para el reconocimiento del área de estudio y análisis fisicoquímicos, donde se aplicó la toma de 3 muestras para analizar las diferentes propiedades del carbón.

Se trató las muestras mediante la lixiviación con ácido nítrico al 25%, durante 84 minutos a una temperatura de 80 °C, obteniéndose en promedio una disminución notable del 29% del nivel de azufre, lo cual es logro significativo desde una perspectiva de calidad del carbón. El estudio de la reducción de azufre en el carbón es esencial para la sociedad, ya que minoraría la contaminación y mejoraría la calidad, garantizando su precio en el mercado y haciéndolo más eficaz.

Palabras claves: desulfuración, lixiviación, ácido nítrico, fabricación de briquetas, azufre.

I. INTRODUCCIÓN

Según [1], la Agencia Internacional de Energía (IEA) señala que el carbón es responsable del 40% de la producción de energía a nivel mundial, lo que lo convierte en la segunda fuente de energía primaria más importante. A pesar de sus impactos ambientales negativos, el carbón sigue siendo relevante en diferentes partes del mundo como una forma alternativa de energía, especialmente en países en vías de desarrollo. En estos países, el carbón a menudo reemplaza al gas natural y al petróleo, los cuales tienen un suministro limitado. Asimismo, para [2], este mineral no metálico es de alta importancia en el mercado debido a su uso como fuente de generación de electricidad con una capacidad instalada de 2,074.732 MW en todo el mundo. China cuenta con la mayor capacidad instalada de centrales de carbón activas (1,064.401 MW), seguida de India (231,947 MW) y EE. UU (226,978 MW).

En relación con el párrafo anterior, [3] menciona que el carbón es una fuente importante de energía para las industrias, especialmente para aquellas que requieren grandes cantidades de energía en sus procesos de producción, como la fabricación de cemento o combustibles. El carbón mineral es competitivo en el mercado internacional, y su extracción depende de factores como la profundidad y la calidad de las reservas, así como de consideraciones geológicas y ambientales. Por otra parte, [4] indica que, en el carbón, son importantes sus propiedades ya que varía significativamente en su precio para su respectiva comercialización; por ello, es importante analizar

su poder calorífico, ceniza, humedad, materia volátil y azufre.

En cuanto a nuestro país, [5] señala que actualmente el carbón se usa como fuente de energía a nivel artesanal ya que, a gran escala, no se consume. El INGEMMET y Minero Perú han realizado estudios para la industrialización del carbón, pero el impedimento ha sido el costo del transporte por la infraestructura vial no adecuada, así como los aspectos geomorfológicos de nuestro territorio que imposibilitan la extracción de este combustible. En relación con lo mencionado anteriormente, [6] indica que, las principales reservas están en las regiones de La Libertad, Ancash, Lima y Cajamarca con tipos de carbón: antracita, bituminoso y subbituminoso. En industrias y ladrilleras, [7] nos menciona que se usa el carbón antracita sin lavado como combustible en pequeña cantidad y las empresas que lo consumen son: Cementos Lima y Andino con 240,000 TM anuales; asimismo, cementos Pacasmayo con 80,000 TM al año, entre otras.

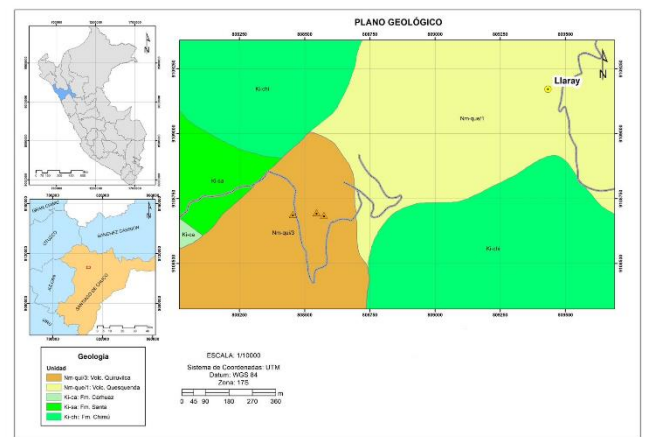


Fig. 1. Plano geológico o de ubicación de la zona de estudio

II. METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación es de tipo aplicativo, ya que busca la aplicación de los conocimientos adquiridos para determinar el nivel de desulfuración del azufre y de acuerdo con el alcance, sería de tipo correlacional – explicativo, ya que tiene como objetivo determinar el nivel de desulfuración del carbón mediante la lixiviación ácida para la fabricación de briquetas de carbón como fuente de energía doméstica.

En el enfoque de la investigación, es de tipo cuantitativo debido a que, se procesarán datos en laboratorio para saber el porcentaje de azufre, las propiedades del

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

carbón y analizar los datos mediante la estadística, como cálculo de análisis estadísticos, histogramas, etc. [8]

El diseño es experimental ya que las variables se manipularán directamente, lo que nos permitió analizar el porcentaje del azufre y ver su influencia en la fabricación de briquetas. Es de corte transversal, es decir, los datos se registrarán en un solo momento.

Para la muestra de estudio, se realizó la toma de tres muestras de carbón mineral en el caserío Llaray, La Libertad, que contengan azufre.

Las técnicas empleadas se dan por la observación directa en campo, la cual consiste en que el investigador observó directamente las muestras del carbón que se quiere analizar, lo que le permitió obtener datos reales in situ. Por otra parte, está el análisis documental que permite realizar la búsqueda de información de artículos científicos, revistas, tesis entre otros en diferentes bases de datos, la cual ayuda a desarrollar una investigación de manera profunda y detallada según el análisis de la información encontrada. [8]

Para la recolección de datos se usó la tecnología XRF proporcionada por Olympus, la cual brinda datos geoquímicos en tiempo real y tiene alta precisión en suelos, rocas y minerales, asimismo está el Ash Probe que ayuda en la medición instantánea del contenido de cenizas del carbón, facilitando la identificación de una de las principales propiedades del carbón. Por otra parte, como instrumento se tiene a los formatos de laboratorio para el análisis del carbón que ha sido adaptado del Laboratorio Industrial del Norte E.I.R.L. mostrando validez, debido a que muestra el análisis de las propiedades fisicoquímicas del carbón y es sellado por un ingeniero químico.

Para los materiales o equipos de campo están la brújula, GPS, picota, lupa, computadora portátil, bolsas de muestreo, cinta métrica, lápiz de dureza, libreta de campo, cámara fotográfica, tablero. En los materiales para la lixiviación están Reactor de vidrio de 250 mL, las muestras de 10 gramos de carbón sacadas de las tres muestras generales, y la solución acuosa de 50 mL.

Para el procedimiento de la investigación se dividió en dos etapas, la primera en gabinete, en esta etapa se realizó la búsqueda y revisión bibliográfica de las variables de nuestra investigación usando fuentes confiables como: Google Académico, Renati, Eumed, OATD, Dialnet que contribuyeron positivamente a la fundamentación teórica. En cuanto a la información cartográfica, topográfica y geológica se recurrió a la información contenida en la plataforma GEOCATMIN del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. Se consideró que las investigaciones estén directamente relacionadas con las variables para garantizar la relevancia y aplicabilidad de la información recopilada proporcionando una base sólida al trabajo, asimismo la limitación de los últimos diez años, la cual sirve para mantener en vigencia la investigación asegurando avances y desarrollos significativos en el campo de estudio.

Luego, para conocer y entender las zonas de estudio se realizó búsquedas de revisiones y análisis en trabajos hechos por el INGEMMET de la zona de la Libertad.

Después, para la planificación del muestreo se realizó los siguientes procesos, se elaboraron los siguientes mapas para la identificación de la zona de estudio y para delimitarla:

- Mapa geológico
- Mapa Satelital
- Mapa topográfico.

En la etapa de campo, se realizó la toma de 3 muestras de carbón de diferentes puntos de la zona de estudio de una manera cuidadosa para no contaminar al mineral, con un peso de aproximadamente 1 kg para su respectivo análisis general del carbón. Para este muestreo se llevó a cabo de puntos estratégicos en diferentes partes de la zona de estudio.

Posteriormente, las muestras fueron codificadas en las bolsas, para luego ser enviadas a laboratorio para su respectivo análisis de propiedades del carbón, donde se obtuvo diferentes porcentajes en las características de éste, que nos permitió realizar uso de histogramas para ver sus variaciones de las tres muestras. Los métodos utilizados por el laboratorio se muestran en la Tabla 1.

TABLA I
MÉTODOS UTILIZADOS POR EL LABORATORIO

MÉTODO	PROCEDIMIENTO
ASTM D3302/D3173	Determinación de humedad.
ASTM D3174	Determinación de Ceniza.
ASTM D3175	Determinación de materia volátil.
ASTM D4239	Determinación de Azufre.
ASTM D5865	Determinación de Poder Calorífico

Después, se hizo uso de la lixiviación acida con el ácido nítrico, en la cual se prepararon 3 soluciones acuosas de 71 mL al 25% de concentración, así como las muestras de carbón, las cuales se redujeron a 10 g y pulverizándolas a 210 µm de diámetro, se estableció la temperatura a 80 °C y se inició el tiempo de lixiviación en 84 minutos según el experimento, agitando suavemente el reactor durante el proceso de lixiviación con una velocidad de agitación de 700 rpm.



Fig. 2. Preparación de insumos y materiales

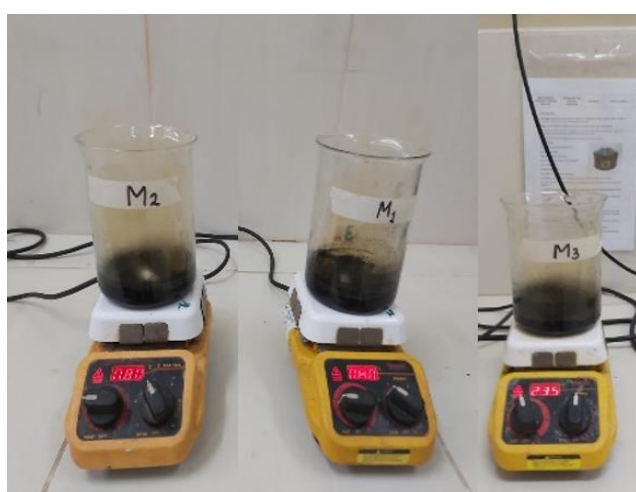


Fig. 3. Lixiviación de muestras M1, M2 y M3

Una vez finalizada la lixiviación, se lavaron las muestras con H₂O, se secaron las muestras, y se volvió a pulverizar a 210 μ m y se etiquetaron para llevar al laboratorio.

Se realizó el análisis nuevamente en las muestras lixiviadas para determinar los nuevos niveles de azufre y otros valores. Se compararon los niveles de azufre iniciales y finales de las tres muestras, y se calculó la desulfuración del carbón.

Para el análisis de datos se tomó en cuenta los siguientes elementos el HNO₃ y el S. En donde, el ácido nítrico actuará en el tratamiento de la desulfuración del carbón oxidando al azufre combustible del carbón en forma de sulfato en las cenizas. Para luego proceder a usar los datos en software estadístico Minitab. Se dará de la siguiente manera, en los análisis estadísticos se obtuvo parámetros como media, desviación estándar, varianza y moda para las tres muestras de carbón, de la misma manera en el análisis univariable para la obtención de histogramas, gráficos para ver si las muestras tienen diferente comportamiento.

Los aspectos éticos que se tomó en cuenta en esta investigación fueron, el respeto hacia autores realizando una

adecuada citación y presentando sus respectivas fuentes bibliográficas. Asimismo, la obtención de los permisos correspondientes para el ingreso a la comunidad. Para la obtención de los insumos se presentó una solicitud formal a un laboratorio autorizado para trabajar con ácido nítrico y azufre, siempre siguiendo con los protocolos de bioseguridad. Se manejó una estricta privacidad y confidencialidad en el manejo de la información. Para la validación de la tesis se incluyó técnicas y análisis adecuadas para producir datos fiables y se siguió hoy los protocolos establecidos por la Universidad Privada del Norte – Cajamarca.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ANÁLISIS DE CARBÓN MINERAL

3.1.1. Análisis fisicoquímico del carbón mineral

TABLA II
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO EN BASE RECIBIDA

Muestra	Humedad (%)	Materia Volátil (%)	Ceniza (%)	Carbón Fijo (&)
M-01	4.06	5.36	13.62	76.96
M-02	4.65	3.83	11.56	79.96
M-03	3.15	3.85	9.80	83.20
Promedio	3.95	4.34	11.66	80.04

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra los resultados del análisis fisicoquímico del carbón en base recibida.

TABLA III
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO EN BASE SECA

Muestra	Humedad (%)	Materia Volátil (%)	Ceniza (%)	Carbón Fijo (&)
M-01	-	5.59	14.20	80.21
M-02	-	4.02	12.12	83.86
M-03	-	3.98	10.12	85.90
Promedio	-	4.53	12.14	83.32

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra los resultados del análisis fisicoquímico del carbón en base seca.

Los resultados de los análisis fisicoquímicos del carbón guardan relación con [10], el cual indica que los análisis deben tener las propiedades tales como: humedad, materia volátil, ceniza, carbón fijo, azufre y poder calorífico. Asimismo, [1] menciona que, además del formato de las propiedades, se debe llevar a cabo los análisis en un

laboratorio certificado. Por ello, la investigación tiene como fortaleza al Laboratorio Industrial Del Norte que, actualmente es el laboratorio más completo en análisis del carbón de La Libertad, el cual se encuentra certificado con ISO 9001:2015, lo cual garantiza la legitimidad de los resultados.

3.1.2. Análisis elemental de acuerdo con las bases

TABLA IV
ANÁLISIS DE BASE RECIBIDA DEL AZUFRE

Unidad (%)	M-01	M-02	M-03	Promedio
Azufre	1.58	1.72	1.63	1.64

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra el promedio del azufre en base recibida.

TABLA V
ANÁLISIS DE BASE SECA DEL AZUFRE

Unidad (%)	M-01	M-02	M-03	Promedio
Azufre	1.65	1.80	1.68	1.71

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra el promedio del azufre en base seca.

Para esta investigación tomaremos en cuenta los resultados de base seca para la medición del azufre, en los cuales se obtienen los siguientes parámetros estadísticos.

3.1.3. Análisis del poder calorífico

TABLA VI
PODER CALORÍFICO DE BASE RECIBIDA

	M-01	M-02	M-03	Promedio
(Kcal/Kg)	6537.29	6687.09	6977.86	6734.08

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra el promedio del poder calorífico de la base recibida.

TABLA VII
PODER CALORÍFICO DE BASE SECA

	M-01	M-02	M-03	Promedio
(Kcal/Kg)	6813.94	7013.20	7204.81	7010.65

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra el promedio del poder calorífico de la base seca.

3.2. ANÁLISIS DE CARBÓN MINERAL TRATADO

3.2.1. Análisis fisicoquímico del carbón mineral tratado

TABLA VIII
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO EN BASE RECIBIDA

Muestra	Humedad (%)		Materia Volátil (%)		Ceniza (%)		Carbón Fijo (&)	
	Inicial	Tratado	Inicial	Tratado	Inicial	Tratado	Inicial	Tratado
M-01	4.06	1.63	5.36	13.62	13.62	14.69	76.96	79.38
M-02	4.65	1.98	3.83	12.83	11.56	15.49	79.96	79.38
M-03	3.15	1.74	3.85	13.02	9.80	15.39	83.20	79.38
Promedio	3.95	1.78	4.34	13.15	11.66	15.19	80.04	79.38

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra los comparativos (inicial – tratado) del análisis fisicoquímico en base recibida.

TABLA IX
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO EN BASE SECA

Muestra	Humedad (%)		Materia Volátil (%)		Ceniza (%)		Carbón Fijo (&)	
	Inicial	Tratado	Inicial	Tratado	Inicial	Tratado	Inicial	Tratado
M-01	-	-	5.59	5.85	14.20	14.93	80.21	71.22
M-02	-	-	4.02	4.09	12.12	15.80	83.86	71.11
M-03	-	-	3.98	4.25	10.12	15.66	85.90	71.09
Promedio	-	-	4.53	4.73	12.14	15.46	83.32	71.14

Nota. Resultados obtenidos en el laboratorio LABINORTE. Esta tabla muestra los comparativos (inicial – tratado) del Análisis fisicoquímico en base seca.

Por otra parte, para [4], la disminución de contenido de azufre, mediante los métodos de lixiviación y lavabilidad con H₂O, obtuvo resultados de 58% en reducción de azufre. Asimismo, en la investigación de [13], en la que también se aplicó el uso de lavabilidad usando H₂O y cloruro de zinc redujo un 48% de azufre. Se puede inferir que cuando se realizó el lavado con H₂O al carbón después de la lixiviación, se obtuvo mejores resultados en la reducción de azufre.

3.2.2. Análisis elemental de acuerdo con las bases

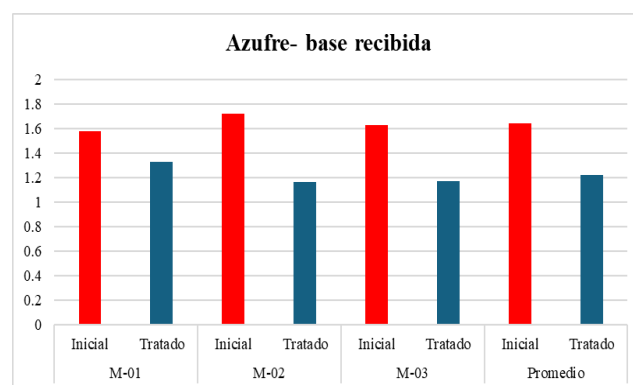


Fig. 4. Azufre - base recibida del carbón tratado.
Fuente. Elaboración propia.

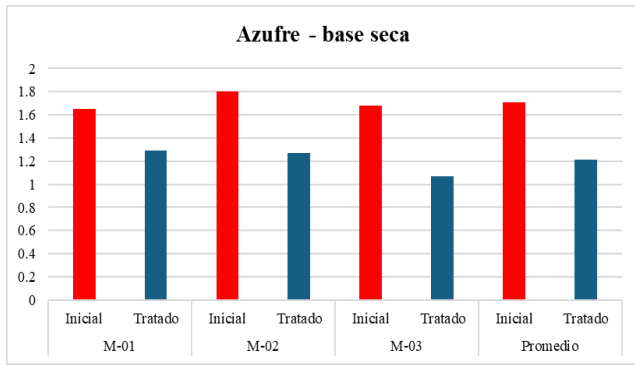


Fig. 5. Azufre base seca del carbón tratado.
Fuente. Elaboración propia.

Por otro lado, en la reducción de azufre mediante la lixiviación ácida, [11] indica que es efectiva para la desulfuración de azufre tanto inorgánico como orgánico, lo cual se ha verificado con la investigación de [12], donde la desulfuración por este método obtuvo un resultado favorable de 45%.

Para esta investigación tomaremos en cuenta los resultados de base seca para la medición del azufre, en los cuales se obtienen los siguientes parámetros estadísticos

3.2.3. Análisis del poder calorífico

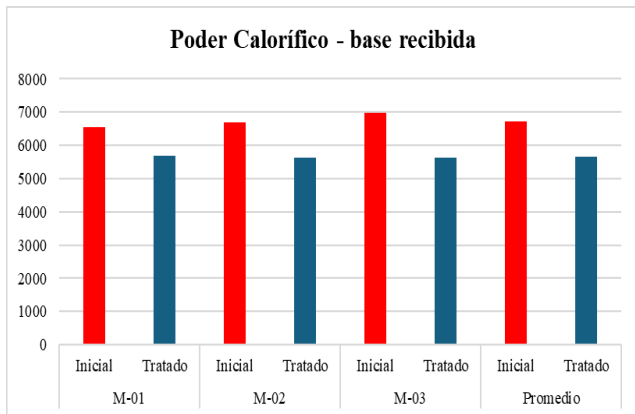


Fig. 6. Poder calorífico de base recibida.
Fuente. Elaboración propia.

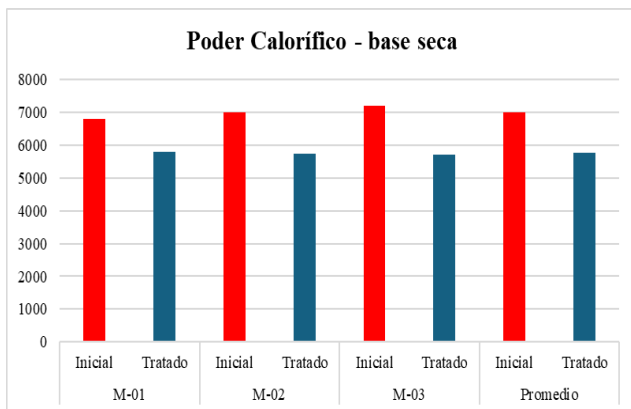


Fig. 7. Poder calorífico de base seca.
Fuente. Elaboración propia.

3.3. CÁLCULO Y COMPARACIÓN DE REDUCCIÓN DE AZUFRE

Para el cálculo de la desulfuración del carbón, compararemos las muestras iniciales con las tratadas, como indica la siguiente tabla.

TABLA X

CÁLCULO Y COMPARACIÓN DE % DE REDUCCIÓN DE AZUFRE EN LAS MUESTRAS M-01, M-02 Y M-03

Muestra	Azufre (%)		% Reducción Azufre
	Inicial	Tratado	
M-01	1.65	1.29	22%
M-02	1.80	1.27	29%
M-03	1.68	1.07	36%
Promedio	1.71	1.21	29%

Nota. Esta tabla muestra la comparación de las muestras iniciales y tratadas de carbón, asimismo el porcentaje de reducción de azufre.

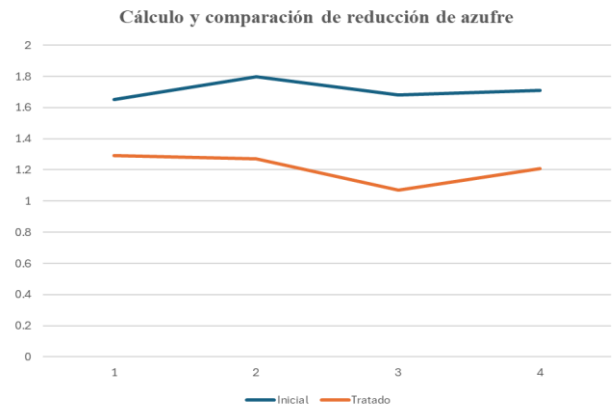


Fig. 8. Comparación de las muestras iniciales y tratadas de carbón.
Fuente. Elaboración propia.

En la investigación se determinó que la desulfuración del carbón mediante la lixiviación con ácido nítrico fue del 29%. Estos resultados respaldan la hipótesis inicial, la cual supera la cifra del 25% establecida, lo que indica que la técnica de lixiviación utilizada es efectiva para reducir significativamente el contenido de azufre en el carbón, donde la muestra tres (M-03) fue la más viable en el tratamiento por lixiviación, obteniendo una reducción total de 36% de desulfuración. Esto es diferente a la investigación de [9], quien determinó una desulfuración máxima de aproximadamente 87% con la concentración de ácido (10-30%), temperatura (40-80 °C) y el tiempo de reacción (40-30%) 100 minutos. Por tanto, en base a lo anterior, se demuestra que el porcentaje de reducción de azufre va a cambiar según el tiempo, concentración y temperatura.

El tratamiento que el nivel de azufre de las muestras iniciales extraídas en el caserío de Llaray en La Libertad ya contaban con nivel bajo de azufre, en comparación con los niveles globales. Aun así, con el tratamiento de lixiviación se logró disminuir en un 29% de promedio el nivel de azufre, aunque se tuvo limitaciones como el tema

económico y la dificultad de poder obtener ácido nítrico, por lo cual se decidió reducir las muestras a un tamaño significativo de 10 g cada una, aplicando una regla de tres simple a los resultados.

IV. CONCLUSIONES

Las tres muestras presentan diferente tipo de las propiedades del carbón, siendo la muestra 02 la que tiene mayor humedad, mientras que en materia volátil y ceniza la muestra 01 es la más elevada, asimismo con la muestra 03 donde se muestra mayor carbón fijo.

Se determinó el contenido de azufre en las tres muestras de carbón, dando como resultado un promedio de 1.21% de azufre, de la cual la muestra 01 presentó mayor contenido de azufre.

Se calculó el nivel de desulfuración de las tres muestras, donde la muestra 01 obtuvo una reducción de azufre de 22%, mientras que la muestra 02 un 29% y finalmente la muestra 03 un 36%, obteniendo así un promedio general del 29% de disminución de azufre. También se encontró, mediante comparación de las 3 muestras, que la Muestra Tres (M-03), fue la que obtuvo la mayor cantidad de desulfuración, lo cual infiere que el punto de donde se obtuvo la Muestra Tres es el más viable de los 3 para obtener carbón, tratarlo con lixiviación de ácido nítrico, y posteriormente fabricar briquetas de carbón con un menor grado de contaminación.

Además, este hallazgo tiene implicaciones relevantes tanto para la sostenibilidad y la viabilidad económica de la producción de briquetas en Llaray, así como en la disminución de emisiones de dióxido de azufre, que contribuyen a la lluvia ácida y problemas respiratorios. La obtención de un nivel de desulfuración promedio de 29% abre la puerta a la fabricación de briquetas de carbón que cumplen con los estándares de calidad y que pueden ser competitivas en el mercado. Esto puede ser especialmente importante en regiones donde el acceso a fuentes de energía alternativas es limitado o costoso.

En conclusión, los resultados de este estudio confirman que la desulfuración del carbón mediante la lixiviación con ácido nítrico es un método efectivo para la producción de briquetas de alta calidad en Llaray, La Libertad. Sin embargo, se requiere una evaluación más amplia de los aspectos económicos y ambientales para garantizar la viabilidad y la sostenibilidad de esta iniciativa.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Privada del Norte.

REFERENCIAS

- [1] N. Toro, «Proceso de biodesulfurización del azufre orgánico presente en un carbón colombiano, mediante el uso de una cepa pura de *Rhodococcus rhodochrous* IGTS8,» Medellín, 2014.
- [2] C. Ruiz, «Impacto del carbón mineral en la salud humana,» 2022.
- [3] J. Aquino, «Factibilidad técnica económica de la conversión del horno de la cementera YURA S.A. De carbón mineral a gas natural,» Arequipa, 2020.
- [4] J. Quijandría, «Evaluación del carbón mineral, para disminuir el contenido de azufre y mejorar su calidad,» Lima, 2016.
- [5] A. Luyo, «Visión futura del carbón peruano,» *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, vol. 15, n° 29, pp. 135-140, 2012.
- [6] M. Rojas, «Perspectivas de procesamiento y uso del carbón mineral peruano,» *Ingeniería industrial*, vol. 1, n° 26, pp. 231-250, 2008.
- [7] E. León, «La importancia del carbón mineral en el desarrollo,» *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, vol. 9, n° 18, pp. 91-97, 2006.
- [8] R. Hernández-Sampieri, *Metología de la investigación*, Sexta edición ed., México: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V, 2016, p. 632.
- [9] S. Shahraki, M. Karamoozian y A. Azizi, «Desulfurization of coal by HNO₃ leaching: Optimization of influential factors using Box-Behnken design,» *Journal of Mining and Environmet*, vol. 9, n° 3, pp. 657-665, 2018.
- [10] J. Arana, «Geología y explotación del carbón mina Chimú - La Libertad - Perú,» Arequipa, 2015.
- [11] D. Guiachetti, «Consumo de ácido sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre,» Santiago de Chile, 2011.
- [12] X. Wencheng y X. Guangyuan, «A technological review of developments in chemical-related desulfurization of coal in the past decade,» *International Journal of Mineral Processing*, vol. 161, n° 2017, pp. 65-71, 2017.
- [13] A. Mendiola, C. Aguirre, Y. Chero, N. Churampi, J. Quispe y R. Sedano, *Explotación del carbón antracita : viabilidad del yacimiento Huayday-Ambara*, Primera ed., Lima, Lima: ESAN, 2013, p. 140.