

## Representatividad de un modelo lineal de superficie para muestra de carbón mineral

EUNICE A. GONZÁLEZ BARRAZA<sup>1</sup>, DIEGO MARTÍNEZ-CARRILLO<sup>2</sup>, CLAUDIA LÓPEZ-BADILLO<sup>3</sup>, DANIELA M. RAMOS-MORENO<sup>4</sup>

### RESUMEN

*La Región Carbonífera de Coahuila posee carbón bituminoso y sub-bituminoso con propiedades variables en sus subcuencas. Se propone un diseño factorial de 2<sup>2</sup> para desarrollar una serie de flotaciones en dos etapas (robusta y fina), determinando un modelo de reacción que prueba la tendencia de uniformidad existente dentro de cada subcuenca. Se tomaron dos muestras de la subcuenca Saltillito-Lampacitos, se prepararon a -#100, se caracterizaron y concentraron por flotación. Se propone como variable de control el Grado (%) y como variables de estudio la concentración de espumante (MIBC, [A]) y la cantidad de colector (diésel, [B]) se modeló en los programas Minitab17 y Statística 13.3, el modelo de reacción de superficie obtenido fue  $\text{Grado} = 92.396 - 0.007033[A] - 0.014194[B]$ . La diferencia entre el modelo de reacción y los datos experimentales es aceptable por lo que se concluye que existe un comportamiento predictivo y hay una uniformidad dentro de la subcuenca.*

*Palabras clave:* carbón, flotación, modelo

Afiliación del autor...<sup>1</sup>MC, Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, [eunice\\_gonzalez@uadec.edu.mx](mailto:eunice_gonzalez@uadec.edu.mx), Orcid 0000-0002-2292-6109.

Afiliaciones de los coautores...<sup>2</sup>Dr., Centro de Investigación en Geociencias Aplicadas, Universidad Autónoma de Coahuila, Nueva Rosita, Coahuila, México, [diegomartinez@uadec.edu.mx](mailto:diegomartinez@uadec.edu.mx)

<sup>3</sup>Dr., Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, [cllopezb@uadec.edu.mx](mailto:cllopezb@uadec.edu.mx)

<sup>4</sup>Ing., Escuela Superior de Ingeniería "Lic. Adolfo López Mateos", Universidad Autónoma de Coahuila, Nueva Rosita, Coahuila, México, [danielaramosmoreno@uadec.edu.mx](mailto:danielaramosmoreno@uadec.edu.mx)

Autor de correspondencia: Eunice Alejandra González Barraza, [eunice\\_gonzalez@uadec.edu.mx](mailto:eunice_gonzalez@uadec.edu.mx)

Recibido: 22 / 10 / 2021

Aceptado: 25 / 03 / 2022

Publicado: 19 / 04 / 2022

**Cómo citar este artículo:**

González Barraza, E. A., Martínez Carrillo, D., López Badillo, C. M., & Ramos Moreno, D. M. REPRESENTATIVIDAD DE UN MODELO LINEAL DE SUPERFICIE PARA MUESTRA DE CARBÓN MINERAL. EPISTEMUS, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.207>

## Representativeness of a Linear Surface Model for Coal Samples

### ABSTRACT

*The Región Carbonífera of Coahuila has bituminous and sub-bituminous coal with variable properties in its sub-basins. A factorial design of  $2^2$  is proposed to develop a two-stage flotation series (robust and fine), determining a reaction model that tests the uniformity trend within each sub-basin. Two samples were taken from the Saltillito-Lampacitos sub-basin, prepared to -#100, characterized and concentrated by flotation. Grade (%) was proposed as a control variable and as study variables the concentration of frother (MIBC, [A]) and the amount of collector (diesel, [B]) were modeled in Minitab17 and Statistica 13.3 programs, the surface reaction model obtained was  $\text{Grade}=92.396-0.007033[A]-0.014194[B]$ . The difference between the reaction model and the experimental data is acceptable, so it is concluded that there is a predictive behavior and there is uniformity within the sub-basin.*

**Key words:** coal, flotation, model

## Introducción

A nivel global, el carbón suministra el 30% de las necesidades energéticas, es empleado en la generación de electricidad, así como en la fabricación de más del 70% del acero, es un notable combustible que juega un papel fundamental en la industria del cemento. Por estas razones, el carbón crece en demanda día con día, siendo producido en más de 40 países e importado por más de 70 [1].

México es conocido por ser un país minero donde sus principales yacimientos de carbón son localizados en los estados de Oaxaca, Sonora y Coahuila [2], es en este último donde podemos ubicar la Región Carbonífera poseedora de la mayor reserva de carbón del país, ocupando el primer lugar en la producción de carbón nacional aportando un 97.46% de la misma [3].

La Región Carbonífera se ubica en la porción norte-central de Coahuila y se extiende al oriente hasta incluir una pequeña área del Estado de Nuevo León. Como muestra la Figura 1, esta región está constituida por ocho subcuencas que corresponden a sinclinales amplios, cuya orientación SW-NE se ajusta a la estructura regional. Estas subcuencas se designan localmente como Sabinas, Esperanzas, Saltillito-Lampacitos, San Patricio, Las Adjuntas, Monclova y San Salvador [4-7].

Cabe destacar que esta zona está comprendida por carbones que van del sub-bituminoso tipo A al bituminoso bajo volátil [8-10]. Su uso es comúnmente para la industria siderúrgica, como combustible y reductor de menas metálicas en los altos hornos, o para la industria térmica como combustible pulverizado en la producción de energía eléctrica [11-13].

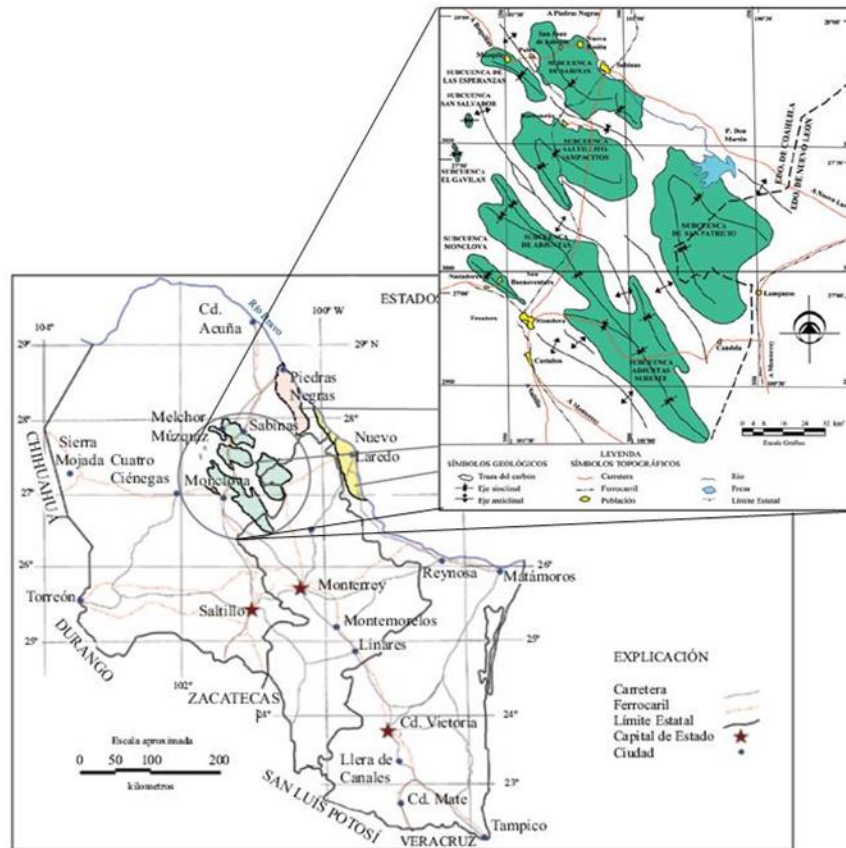
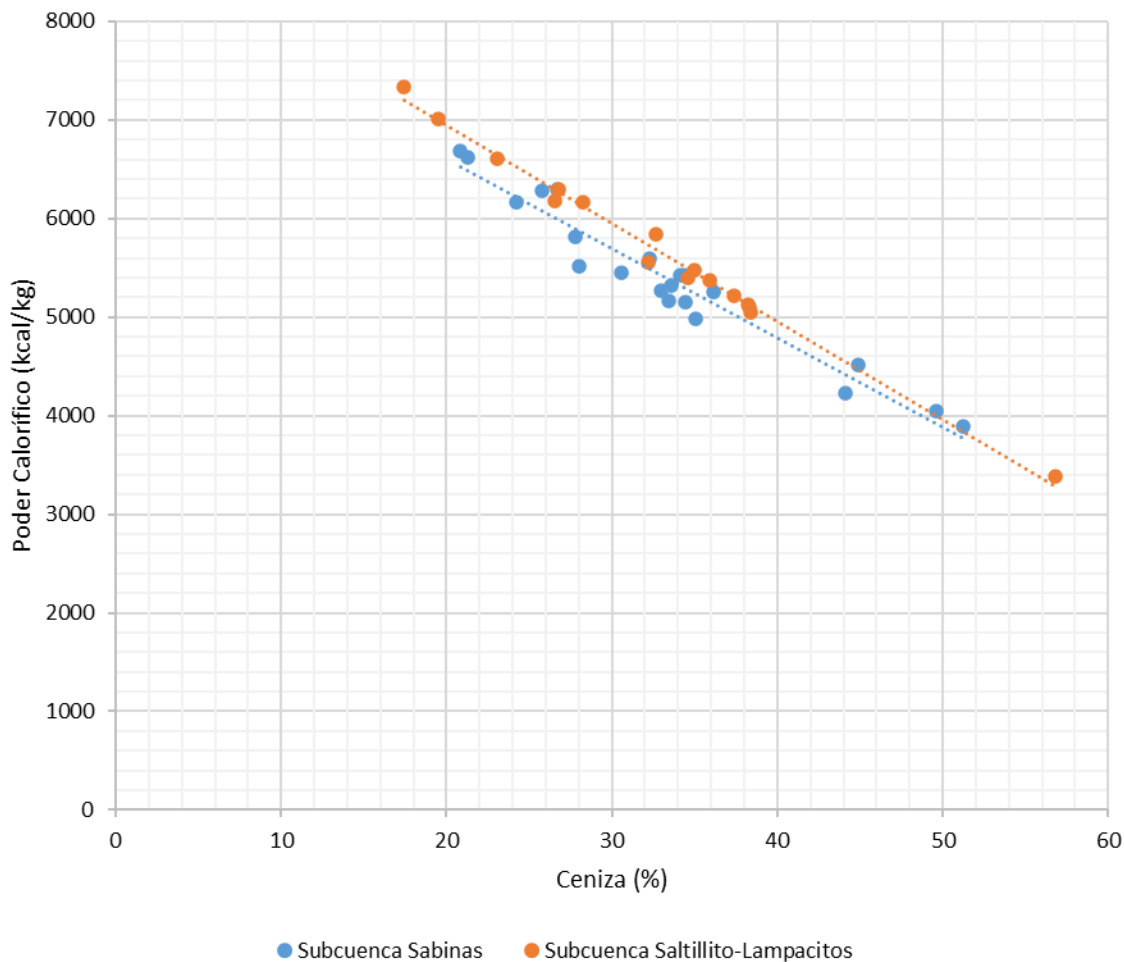


Figura 1. Localización de las subcuencas carboníferas de Coahuila, México [14].

Para determinar la calidad del carbón se establece las cantidades relativas de humedad, materias volátiles, carbono fijo, materia mineral (cenizas), y poder calorífico, estos análisis realizados por métodos estandarizados son considerados primarios o próximos y aunque su realización es sencilla, los resultados sirven para la selección de un carbón propicio con base a su uso tecnológico [15].

Como se mencionó anteriormente, el carbón de la región es variable, puesto que cada subcuenca se comporta de manera distinta entre sí, sin embargo, conserva cierta tendencia de uniformidad

dentro de cada una de ellas, como se aprecia en la Figura 2, donde se observan la ceniza y el poder calorífico presentes en las subcuencas Sabinas y Saltillito-Lampacitos.



**Figura 2. Comparación de ceniza vs poder calorífico en carbones de las subcuencas Sabinas y Saltillito-Lampacitos [16].**

Estas propiedades fisicoquímicas tienen un efecto muy marcado al momento de realizarse una concentración por flotación, donde se requiere de un modelo propicio que entrelace el grado de recuperación con las variables controlables del proceso.

Por lo cual, se hará uso de los diseños factoriales y/o modelos de superficie de reacción para ayudan a describir los comportamientos de flotación por espuma, lo cual ha sido comprobado en diversas investigaciones [17-19]. El objetivo de esta investigación es demostrar que el carbón de la región carbonífera no solo obedece cierta tendencia a través de las variables de caracterización, sino también al modelo de superficie de reacción de la flotación, de dos muestras de una misma subcuenca.

## Metodología

### Recolección y preparación de muestra

El carbón todo uno (CTU), empleado en esta investigación proviene de la subcuenca Saltillo-Lampacitos ubicada dentro de la localidad de Aura, Coahuila. La recolección se realizó en dos fases de acuerdo a la Norma ASTM D 2234, obteniéndose 2 muestras de 30.705 kg y 25.050 kg respectivamente.

Con base a la Norma ASTM D2013-86 las muestras de CTU se llevaron al laboratorio de análisis físico-químicos de carbón y se introdujeron a la estufa de secado a una temperatura de  $107\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$  por un lapso de 20 min, posteriormente se homogenizaron y cuartearon obteniéndose las muestras representativas necesarias en el análisis próximo de carbón y las pruebas de flotación. Una vez caracterizado el CTU, se tamizó a -#100 ambas muestras, ambas muestras se volvieron a caracterizar acorde a las normas ASTM correspondientes (ASTM D3173, ASTM D3174-97, ASTM D3286-96) y estas se dispusieron para el desarrollo experimental de la concentración de carbón por flotación.

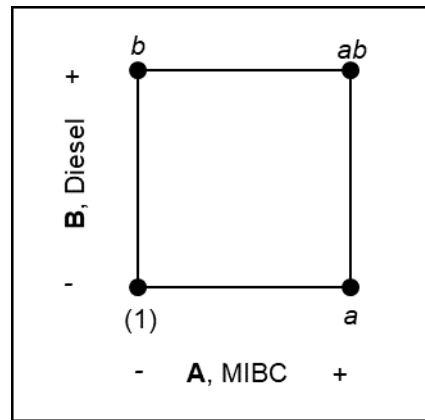
### Diseño experimental.

Se desarrolló un diseño experimental factorial de 2<sup>2</sup> para la modelación del comportamiento de la recuperación del concentrado de carbón en dos etapas. La primera etapa corresponde a parámetros robustos, mientras que en la segunda etapa los parámetros son más finos o cercanos. Las variables de análisis son la cantidad de espumante (MIBC, [A]) y la cantidad de colector (diésel, [B]). Los valores de operación para la flotación se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Diseño experimental 2<sup>2</sup> aplicado en la primera y segunda etapa. A es la cantidad de MIBC y B es la cantidad de Diésel.**

Efecto	Factor		Combinación de tratamientos	Primera etapa g/ton		Segunda etapa g/ton	
	A	B		A	B	A	B
(1)	-	-	A bajo, B bajo	48.5	46.5	97	93
a	+	-	A alto, B bajo	485	46.5	194	93
b	-	+	A bajo, B alto	48.5	465	97	186
ab	+	+	A alto, B alto	485	465	194	186

Las cuatro combinaciones de tratamientos, en caso de este estudio se muestran en la Figura 3. Por lo tanto, **a** representa la combinación de tratamientos con MIBC en el nivel alto y diésel en el nivel bajo, **b** representa el MIBC en el nivel bajo y el diésel en el nivel alto, y **ab** representa ambos factores en el nivel alto. Por convención, se usa **(1)** para denotar que ambos factores están en el nivel bajo [20].



**Figura 3. Tratamientos para el diseño factorial 2<sup>2</sup>.**

En el diseño factorial con dos niveles, buscamos el efecto principal de cada factor, así mismo como la interacción entre ellos. Los cuales se calcularon, tal cual se muestra a continuación.

Efecto principal de A:

$$A = \frac{1}{2} [ab + a - b - (1)] \quad (1)$$

Efecto principal de B:

$$A = \frac{1}{2} [ab + b - a - (1)] \quad (2)$$

Efecto de la interacción AB:

$$A = \frac{1}{2} [ab + (1) - a - b] \quad (3)$$

## Flotación

La flotación se llevó a cabo en 2 etapas con un diseño factorial de 2<sup>2</sup>, cada una consta de 4 pruebas de flotación por triplicado. Cada prueba se realiza acorde a la metodología establecida.

La pulpa de flotación (10% en contenido de sólidos) es vertida en una celda Denver D-12 y se acondiciona a una velocidad de 1200 RPM, en lapsos de 5 minutos, 2 minutos y 20 segundos. El



primer lapso está destinado solamente para la pulpa, el segundo para el colector y el último para el espumante. Concluido este tiempo, se inicia la inyección de aire. Cuando se empieza la producción de espuma, esta se recupera, aislándose en otro recipiente. Los tiempos de recuperación empleados son de 20, 40, 60, 80, y 120 segundos, dando así un tiempo de 2 minutos de flotación.

Al finalizar las pruebas, el concentrado y el fondo son filtrados y secados en una estufa por un periodo de 10 a 15 minutos, a una temperatura de  $107^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ , posteriormente se registra el peso y se le realizan los análisis de ceniza y humedad.

De los resultados obtenidos se calculó la variable de control (Grado) a partir de la fórmula:

$$\text{Grado} = 100 - Ac \quad (4)$$

Donde  $Ac$  es el contenido de ceniza del concentrado expresado en %.

### Cinética de Flotación

Con base en la recuperación de mineral se determina la cinética de flotación, para ello se emplea la ecuación desarrollada por García-Zuñiga (1935), que se describe a continuación:

$$R = R_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad (5)$$

Donde:

R: Recuperación acumulativa para tiempo  $t$  (%).

$R_{\infty}$ : Recuperación de equilibrio a tiempo prolongado (%), es decir, la recuperación máxima obtenible del material de interés según las condiciones establecidas.

k: Constante de velocidad específica de flotación o constante cinética ( $\text{min}^{-1}$ ).

t: Tiempo de flotación acumulado (min).

### Modelado

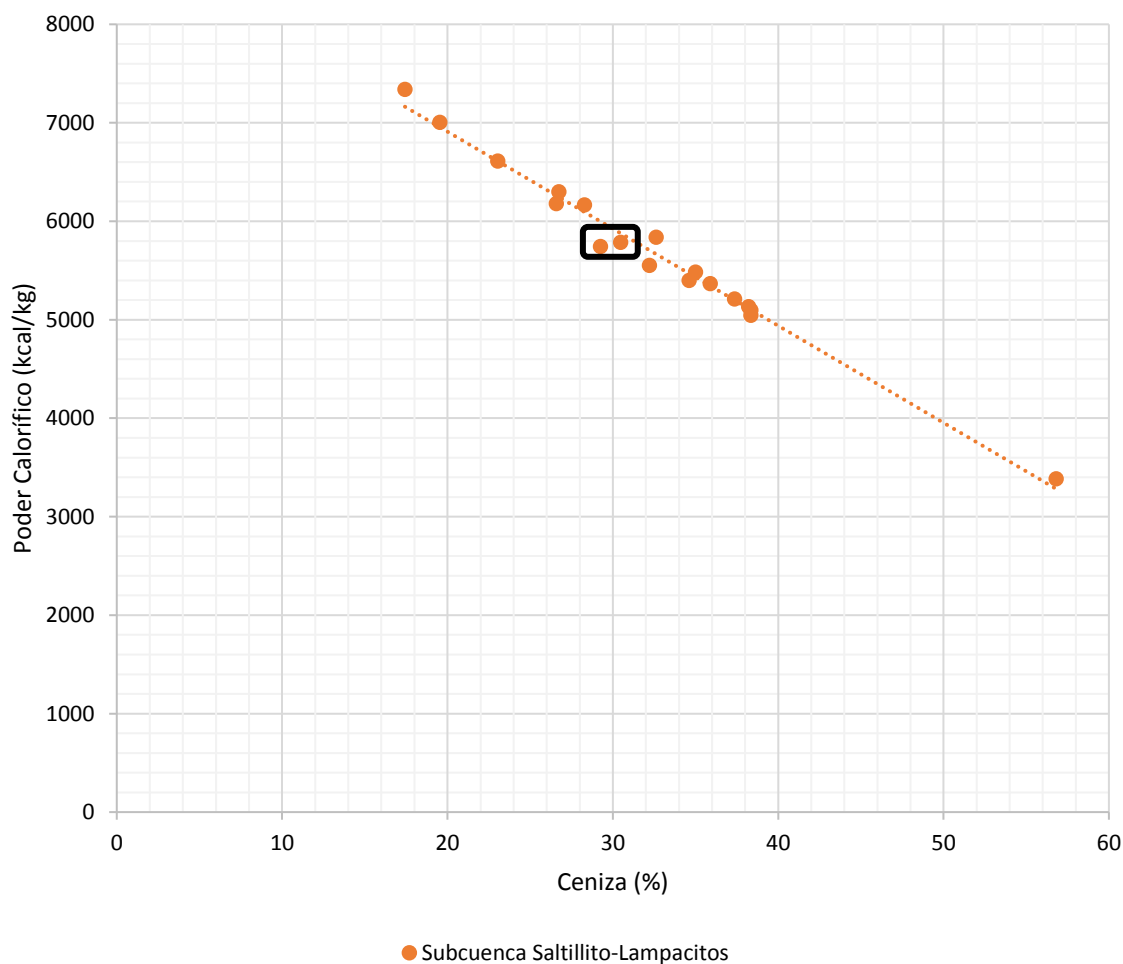
Los datos obtenidos de las etapas 1 y 2 se graficaron en contornos de superficie de respuesta y se realiza una comparación.

Posteriormente se efectúa un análisis de superficie de reacción con la ayuda de los softwares Minitab17 y Statistica 13.3, para concluir con la construcción del modelo.

## **PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados arrojados por la caracterización fueron: para la Muestra 1, 30.46% de ceniza con un poder calorífico de 5786 kcal/kg; y para la Muestra 2, 29.24% de ceniza con un poder calorífico de 5744 kcal/kg. Según la clasificación ASTM D388-92, ambas muestras entran en el rango de carbón sub-bituminoso tipo A.

En primera instancia se verificó que la relación Poder Calorífico/% de ceniza se ajuste al modelo de la base de datos de la subcuenca Saltillito-Lampacitos, para lo cual se incluyeron los resultados de las muestras 1 y 2 dentro del grafico de dispersión mostrado en la Figura 1. En la Figura 4 se observa que ambas muestras se encuentran dentro de la línea de tendencia y se ajusta a las expectativas esperadas.



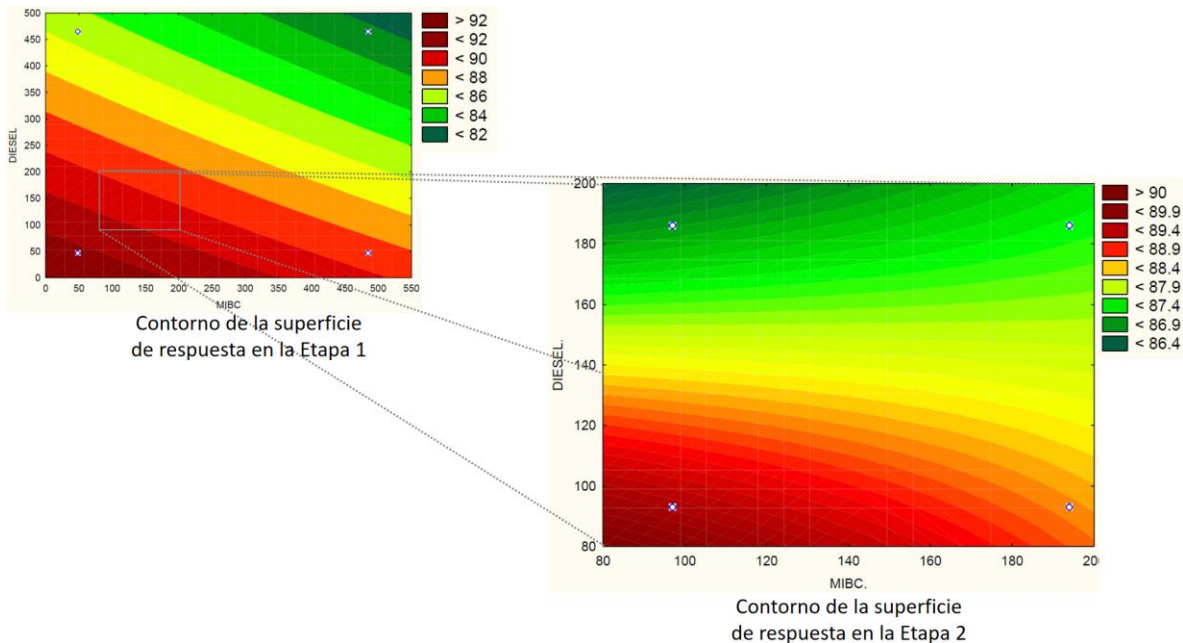
**Figura 4. Inclusión de parámetros de las muestras en el modelo de la subcuenca Saltillo-Lampacitos.**

Los Grados resultantes de cada flotación realizada se presentan en la Tabla 2 y dentro de los contornos de superficie de respuesta de la Figura 5.

**Tabla 2.- Resultados obtenidos de la flotación de carbón en las dos etapas.**

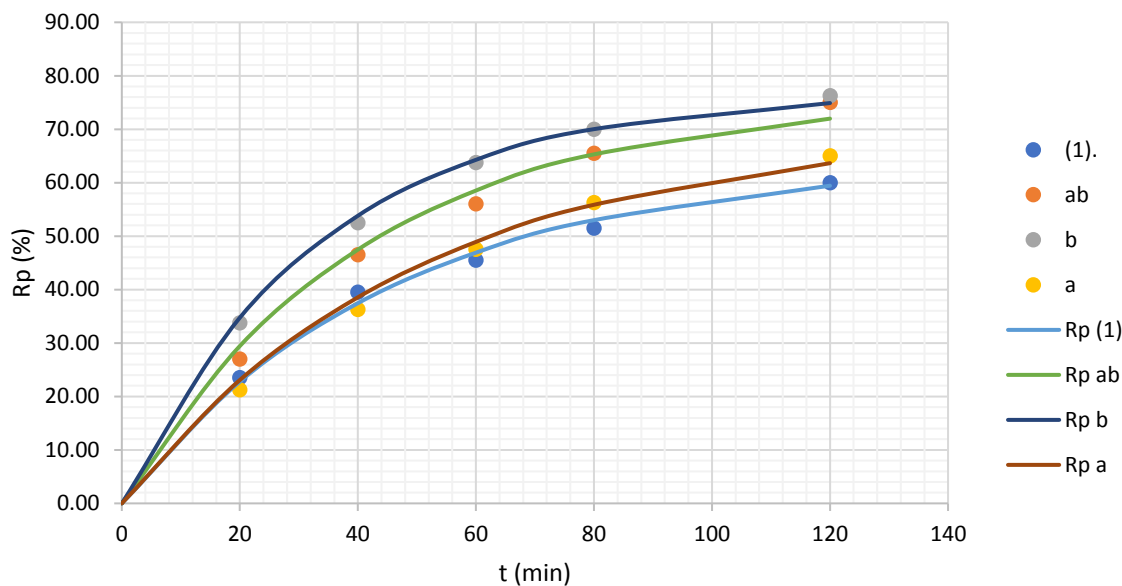
Efecto	Grado	
	Primera etapa	Segunda etapa
(1)	91.23	89.47
a	88.49	88.54
b	85.62	86.89

ab	82.22	87.43
----	-------	-------



**Figura 5. Contornos de las superficies de respuesta en las etapas 1 y 2.**

Como se observa, los resultados de las pruebas de flotación obtenidos del diseño experimental 2<sup>2</sup> mostraron en general contenidos de ceniza por debajo del 20% y se lograron obtener grados por encima del 88% al disminuir el colector durante la etapa 2, lo cual evidenció el impacto de las concentraciones de los reactivos y su interacción sobre la cinética de operación (Figura 6).



**Figura 6. Cinética de flotación de las muestras correspondientes a la etapa 1.**

Hay que recordar que los valores de  $R^\infty$  y  $k$  pertenecientes a la cinética de flotación resultan ser característicos según el componente flotable, en este caso el carbón de la subcuenca Saltillito-Lampacitos, y las condiciones de operación, es decir cantidad y tipo de reactivos empleados, pH, velocidad y agitación, flujo de aire, diseño de la celda, etc., por lo que debe determinarse para cada situación en particular y es variable de una a otra (Méndez-Muñoz, 2009). Las variaciones presentadas entre las etapas 1 y 2 poseen una similitud aceptable, en la Tabla 3 se observa dicha semejanza, los valores promedios para la etapa 1 son  $R^\infty=64\%$  y  $k=0.0241\text{min}^{-1}$ ; así como  $R^\infty=67.8\%$  y  $k=0.035\text{min}^{-1}$  para la etapa 2.

**Tabla 3. Parámetros cinéticos y coeficientes de correlación de las flotaciones en las etapas 1 y 2.**

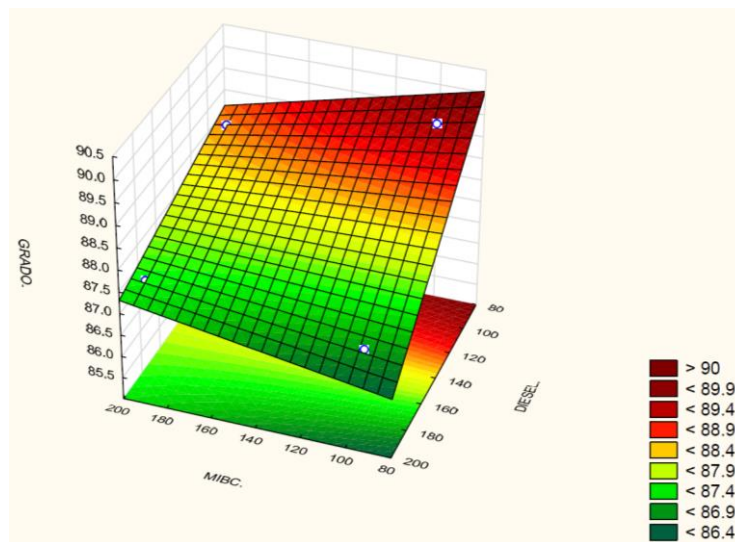
Pruebas	Etap 1	Etap 2
---------	--------	--------

	<b>R<sub>inf</sub></b>	<b>k</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sub>inf</sub></b>	<b>k</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
(1)	64	0.0220	0.9888	67.8	0.0350	0.9649
Ab	76	0.0245	0.9799	75	0.0410	0.9224
B	77	0.0300	0.9953	73	0.0410	0.9208
A	70	0.0200	0.9880	76	0.0315	0.8689
Promedios	71.75	0.0241	---	72.95	0.0371	---

Por otra parte, al realizarse un análisis de superficie de reacción con los valores de la Tabla 2 en el software Minitab17 y Statistica 13.3, se determinó el modelo presentado en la Figura 7, para el cual se propone la siguiente ecuación:

$$\text{Grado} = 92.396 - 0.007033 [A] - 0.014194 [B] \tag{6}$$

La cual se ajusta aceptablemente a los valores experimentales obtenidos.



**Figura 7. Modelo de superficie de reacción.**

Aplicando este modelo de reacción a los parámetros utilizados en la etapa 2 y comparándolos con los valores experimentales obtenidos (Figura 7), se tiene una diferencia de alrededor del 1.1% para las condiciones (1), a y ab; siendo de 2.51 para la condición b (Tabla 4). Esto indica que efectivamente se tiene un comportamiento predictivo tanto en la caracterización del carbón de la

subcuenca Saltillito-lampacitos como en el comportamiento en la recuperación dentro de este rango de estudio.

**Tabla 4. Diferencia entre el modelo de reacción y el experimental.**

Grado, %		Diferencia, %
Datos experimentales	Modelo de reacción	
89.47	90.39	1.03
88.54	89.71	1.32
86.89	89.07	2.51
87.43	88.39	1.10

## Conclusión

El comportamiento predictivo observado entre la caracterización de carbón realizada y su recuperación selectiva, así como su cinética de flotación, demuestran una diferencia mínima y se concluye con ello que los parámetros fisicoquímicos del carbón dentro de cada subcuenca guardan la misma semejanza, independientemente del lugar del que procedan, su uniformidad se mantiene.

## Referencias

- [1] Subsecretaría de Minería (2021, octubre 1). Perfil de Mercado del Carbón (2017). Available: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287796/Perfil\\_Carbon\\_\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287796/Perfil_Carbon__2017.pdf).
- [2] Rivera, J.C., y Alcocer, C. (2003). La situación actual del aprovechamiento del carbón en el Estado de Coahuila. Boletín técnico del Consejo de Recursos Minerales, IX, 54. pp, 2-19.
- [3] SGM (2021, octubre 1). Panorama minero del estado de Coahuila (2018). Available: <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/COAHUILA.pdf>.

- [4] Robeck, R. C.; Pesquera, V. R. y Ulloa, A. S. (1956). Geología y depósitos de carbón de la región de Sabinas, Estado de Coahuila, en XX Congreso Geológico Internacional: México, 109 p.
- [5] Flores-Galicia, E. (1988). Geología y reservas de los yacimientos de carbón en la República Mexicana. In Salas, G. ed., Geología Económica de México. Fondo de Cultura Económica. México, p. 175-217.
- [6] Flores-Espinoza, E. (1989). Stratigraphy and sedimentology of the Upper Cretaceous terrigenous rocks and coal of the Sabinas-Monclova area, Northern Mexico: Austin, Texas, Tesis de Doctorado, 315 p.
- [7] Brizuela, V.L., (1992). Geología General de la zona Carbonífera de Monclova-Sabinas, Estado de Coahuila: Minerales Monclova S.A. de C.V. Tomo I, 74 p.
- [8] Sánchez-Salazar, T. (1995). La minería del carbón y su impacto geográfico-económico en el centro-oriente y noreste de Coahuila, México. Boletín Investigaciones Geográficas. XXXI. 93-112.
- [9] Corona-Esquivel, R.; Tritlla, J.; Muñoz, M.; Piedad-Sanchez, N. y Villafranca, I. (2006). Geología y características de los yacimientos de carbón mineral en México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. LVIII. 141-160.
- [10] Corona, M., Camporredondo, J.E., García, A., Camacho, L. y Servín, R. (2014). Caracterización de carbones de la región carbonífera de Coahuila (México), para la determinación de dispersión, formas geométricas, concentración y tipos de azufre presentes. Revista Colombiana de Materiales. V. 84-90.
- [11] León, E. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. 9.18. 91-97. ISSN: 1628-8097.
- [12] León-Altamirano, C. (2008). El carbón. ¿Garantía del futuro energético? Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 16.3. 229-238. I.S.S.N.: 1132-9157
- [13] Estupiñan, L. J. (2009). "El carbón en la cuenca de Sabinas, electricidad y metalurgia. Cienciabierto. 18 1-3.





- [14] Chávez-Cabello, G. (2005). Deformación y Magmatismo Cenozoico en el Sur de la Cuenca de Sabinas, Coahuila, México. Tesis de Doctorado, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Juriquilla, Qro. México, 312 p.
- [15] Gupta, R. (2007). Advanced Coal Characterization: A Review†. *Energy & Fuels*, 21(2), 451–460. doi:10.1021/ef060411m
- [16] Martínez-Carrillo, D., Pecina-Treviño, E., Gómez-Borrego, M., y Estrada-Ruiz, R. (2012). Analysis of washability of sabinas basin coal: influence of ash content and fixed carbon on calorific value. *MRS Online Proceedings Library*, 1380, Imrc2011-1380-s21-full021. Doi:10.1557/opl.2012.406
- [17] Öney, Ö.; Samanlı, S.; Celik, H. y Tayyar, N. (2015). Optimization of Operating Parameters for Flotation of Fine Coal Using Box-Behnken Design. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 35. 150203140514004. 10.1080/19392699.2015.1009050.
- [18] Abkhoshk, E.; Kor, M. y Rezai, B. (2010). A study on the effect of particle size on coal flotation kinetics using fuzzy logic. *Expert Syst. Appl.* 37. 5201-5207. DOI: 10.1016/j.eswa.2009.12.071.
- [19] Barnwal, J. P.; Govindarajan, B.; Majumder, A. K. y Rao, T. C. (2004). Kinetic analyses of flotation of Indian coal in continuous cell operation, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 113:3, 161-166, DOI: 10.1179/037195504225005732
- [20] Montgomery D.C (1992). *Diseño y Análisis de Experimentos*, Editorial LIMUSA SA de CV. Capítulo 6. Páginas 218-276.

**Cómo citar este artículo:**

González Barraza, E. A., Martínez Carrillo, D., López Badillo, C. M., & Ramos Moreno, D. M. REPRESENTATIVIDAD DE UN MODELO LINEAL DE SUPERFICIE PARA MUESTRA DE CARBÓN MINERAL. *EPISTEMUS*, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.207>

