

ANÁLISIS DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE HIERRO DESDE EL LODO ROJO GENERADO EN UNA INDUSTRIA DE ALUMINIO VENEZOLANA^a

ANALYSIS OF THE EXTRACTION PROCESS OF IRON FROM RED MUD GENERATED IN A VENEZUELAN ALUMINUM INDUSTRY

DARWIN LÓPEZ^{b*}, CARLOS LINARES^c, EDITH FIGUEREDO^b

Recibido 14-07-2022, aceptado 18-10-2022, versión final 11-11-2022

Artículo Investigación

RESUMEN: El presente trabajo muestra el estudio del proceso de extracción de hierro proveniente de lodos rojos a través de su lixiviación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) bajo un diseño de experimentos factorial de dos niveles con cuatro factores (2^4). Los factores analizados en este trabajo fueron: temperatura de reacción, tiempo de contacto, concentración del ácido y relación líquido a sólido. Se observó que la temperatura de reacción es el factor con mayor incidencia en la cantidad de hierro extraída (80.89 %), seguido de la concentración de ácido (3.54 %). La interacción de segundo orden (relación líquido a sólido y temperatura de reacción), de tercer orden (concentración, tiempo y temperatura de reacción) y cuarto orden (concentración de ácido, tiempo de contacto, relación líquido-sólido y temperatura de reacción) afectan de manera significativa la variable respuesta. En base a los factores e interacciones más significativas, se seleccionó como mejor condición para la lixiviación: 30 %v/v de ácido sulfúrico, 3 horas de reacción, relación líquido a sólido 30 mL/g y temperatura de 100 °C.

PALABRAS CLAVE: Diseño de experimentos; hierro; lixiviación; lodo rojo.

ABSTRACT: The present work shows the study of the iron extraction process from the red mud by its leaching with sulfuric acid (H_2SO_4) through a factorial design of two levels and four factors (2^4). The analyzed factor in this work was: reaction temperature, time of contact, acid concentration and the liquid to solid ratio were varied. It was observed that the temperature is the factor with the greatest influence on the quantity of extracted iron (80.89 %), following the acid concentration (3.54 %). The second order (liquid to solid ratio and reaction temperature), the third order (concentration, time and reaction temperature) and the fourth order (acid concentration, time of contact, solid to liquid ratio and reaction temperature) interactions affect significantly the response factor. On basis to the most significant factors and interactions, it was selected as the best condition for leaching: 30 %v/v acid sulfuric concentration, 3 hour of reaction, liquid to solid ratio 30 mL/g and a temperature of 100°C.

^aLópez, D., Linares, C. & Figueredo, E. (2023). Análisis del proceso de extracción de hierro desde el lodo rojo generado en una industria de aluminio venezolana. *Rev. Fac. Cienc.*, 12 (1), 47–58. DOI: <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v12n1.103693>

^bDepartamento de Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia. Edo. Carabobo, Venezuela.

* Autor para correspondencia: dlopez34@uc.edu.ve

^cDepartamento de Química, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología, Unidad de Síntesis de Materiales y Metales de Transición, Universidad de Carabobo, Valencia. Edo. Carabobo, Venezuela.

KEYWORDS: Experiment design; iron; leaching; red mud.

1. INTRODUCCIÓN

El proceso Bayer, es el método más utilizado a nivel industrial para la extracción de alúmina (Al_2O_3) de la bauxita, el cual se basa en la extracción selectiva de los componentes en el mineral mediante una disolución alcalina (Zinoveev *et al.*, 2021). La fracción insoluble del mineral, es el residuo sólido conocido como lodo rojo (Zinoveev *et al.*, 2021), cuya apariencia rojiza se debe a su alto contenido en hierro (Agrawal *et al.*, 2018). Por cada tonelada de Al_2O_3 se generan aproximadamente entre 0.8 y 1.5 toneladas de lodo rojo (Evans, 2016; Vasters & Franken, 2020) que varían dependiendo de la calidad de la materia prima y de las condiciones del proceso (Agrawal *et al.*, 2018). Para el año 2017, se produjeron entre 155 y 175 millones de toneladas de lodo rojo (Vasters & Franken, 2020), y para 2020 la cantidad almacenada a nivel mundial excedió los 5 billones de toneladas (Qi, 2021). En Venezuela se tenía una producción acumulada de 14 millones de toneladas entre los años 1983 y 2000 (Galarraga *et al.*, 2002). Se estima que más de 35 millones de toneladas de lodo rojo se encuentran almacenadas en los sistemas lagunares de la Corporación Venezolana de Guayana (CVG) Bauxilum (Centeno-Bordones & Jiménez, 2020).

A nivel mundial, sólo alrededor del 15% del lodo rojo generado anualmente se recicla (Zhang *et al.*, 2018) y la mayor parte se dispone en rellenos, lagunas o en el lecho marino (Zinoveev *et al.*, 2021). Debido a su elevada alcalinidad (pH entre 10 y 12.5), alto contenido de óxidos de hierro, de aluminio, de titanio y cantidades traza de otros elementos metálicos tóxicos (Sc, Mn, Ct, Nb, Ga, Zr, Sn, Cu, Zn, Y, U, Th) (Zinoveev *et al.*, 2021; López & Linares, 2018), esta gran cantidad de lodo rojo almacenado ha ocasionado serios problemas ambientales en los países productores, que incluyen contaminación de suelo, de aguas subterráneas, e incluso contaminación marina. Además, su almacenamiento en lagunas o piscinas, ocupa grandes áreas de terreno, y el lodo rojo secado por el aire puede conducir a contaminación por partículas, la cual es un serio problema de salud para las personas que viven cerca de dichas instalaciones (Li *et al.*, 2017). La construcción y el mantenimiento de las instalaciones diseñadas para este fin requieren grandes cantidades de recursos, material financiero y humano (Zinoveev *et al.*, 2021).

Varios accidentes industriales asociados al lodo rojo se han registrado, como el ocurrido en el año 2010, en la refinería de aluminio de Akja (Hungría), en el cual 700.000 m^3 de una mezcla acuosa de este material se derramaron destruyendo la flora y la fauna en las localidades cercanas (Ruyters *et al.*, 2011; Mayes *et al.*, 2016). La situación descrita anteriormente, ha impulsado la necesidad de encontrar usos para este residuo peligroso, por ejemplo, la extracción de elementos metálicos como las tierras raras mediante diferentes tipos de ácidos minerales y mezclas de éstos (Karimi *et al.*, 2018; Borra *et al.*, 2016), escandio mediante una mezcla de ácido clorhídrico-EDTA y ácido sulfúrico (Zhou *et al.*, 2018; Lymperopoulou *et al.*, 2019), y de hierro mediante el uso de diversos como el acético (Yang *et al.*, 2015) o ácido sulfúrico (H_2SO_4) variando las condiciones del proceso (Debadatta & Pramanik, 2013; Magalhães *et al.*, 2012).

El propósito del presente trabajo es mostrar el estudio del proceso de extracción del hierro presente en el lodo rojo proveniente de la planta refinadora de alúmina CVG Bauxilum C.A., ubicada en Guayana, Venezuela, utilizando ácido sulfúrico, para determinar las condiciones más adecuadas del proceso mediante un diseño de experimentos factorial de dos niveles (2^k). El análisis de este proceso permitiría establecer las aplicaciones industriales del residuo generado, ya que el hierro extraído podría ser utilizado en la producción de óxidos de hierro, los que a su vez son de gran importancia en áreas como la catálisis y pigmentos. El mencionado material, también podría usarse como materia prima en la producción de sulfato férrico polimérico una sustancia muy utilizada en el tratamiento de agua (Liu *et al.*, 2009).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Digestión del lodo rojo

Se pesó un gramo de lodo rojo seco, y posteriormente se transfirió a un balón esmerilado de 100 mL provisto de dos bocas. Luego, se añadió un volumen de solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de concentración 20%v/v o 30%v/v. La mezcla obtenida se colocó en el equipo de reflujo. El sólido se mantuvo en digestión por un periodo de tiempo específico, contado desde el momento en que la mezcla alcanzó la temperatura deseada, el control de esta variable se realizó de forma manual, empleando un termómetro de vidrio marca Taylor. Finalizada la reacción, se procedió a filtrar al vacío, utilizando papel de filtro Whatman con tamaño de poro de $2.0\mu m$, y lavados con agua destilada hasta pH neutro, conservándose, además del filtrado, el primer lavado.

2.2. Caracterización del filtrado

La determinación de la concentración de hierro presente en la fase líquida se realizó mediante espectroscopia de absorción atómica (AA) por aspiración directa en llama de aire-acetileno, empleando un espectrofotómetro GBC 932 AA, en un rango de barrido entre 2 y 80 ppm y una longitud de onda de 372 nm. En este sentido, se realizó una dilución de la muestra en proporción: 1/100. El espectrofotómetro fue calibrado con patrones de concentraciones comprendidas entre 5 y 80 ppm. Mediante interpolación en la curva obtenida se determinó la concentración de hierro en la muestra.

2.3. Diseño de experimentos factorial 2^k completo

Para el análisis se aplicó un diseño de experimentos factorial de dos niveles completo, para el cual se seleccionaron cuatro factores: temperatura de reacción, tiempo de contacto, concentración de ácido, y relación líquido a sólido (Tabla 1) considerados en investigaciones similares donde se analizó el proceso de extracción de metales del lodo rojo (Karimi *et al.*, 2018; Lymperopoulou *et al.*, 2019; Debadatta & Pramanik, 2013; Magalhães *et al.*, 2012; Yanmei, 2021; dos Passos *et al.*, 2015). Los niveles de la variable

Tabla 1: Variables y niveles seleccionados para diseño 2^4 . Fuente: López-Uscátegui (2016)

Factores	Min	Max
Concentración de ácido (%v/v) A	20	30
Tiempo de contacto (h) B	2	3
Relación líquido a sólido (mL/g) C	20	30
Temperatura de reacción ($^{\circ}$ C) D	70	100

temperatura de reacción se fijaron por encima de 70°C , ya que por debajo de este valor la extracción de hierro es poco significativa (Liu *et al.*, 2009); para los demás factores se consideraron los niveles establecidos por Debadatta & Pramanik (2013), Magalhães *et al.* (2012) y dos Passos *et al.* (2015).

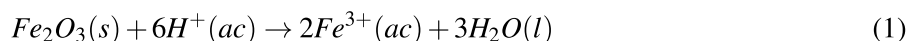
De acuerdo a Lymperopoulou *et al.* (2019), el ácido sulfúrico (H_2SO_4) tiene un impacto ambiental moderado, si se compara con otros ácidos minerales a la misma concentración.

Se realizaron dos réplicas, dando un total de 32 corridas. Como variable respuesta se seleccionó la masa de hierro extraído por gramo de lodo rojo (gFe/g de lodo rojo), la matriz del diseño, el análisis de varianza, y la validación de los supuestos se realizó empleando un software estadístico (Minitab 16). La caracterización inicial de hierro en el residuo fue presentada por López & Linares (2018) y López-Uscátegui (2016), donde se observa el alto contenido de aluminio y hierro en el residuo: $(43.944 \pm 0.001)\% \text{Al}$ y $(36.432 \pm 0.001)\% \text{Fe}$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Proceso de extracción

La ecuación química mostrada describe la reacción involucrada en la lixiviación del hierro, en el cual se alcanza la neutralización total del lodo rojo. El óxido férrico se transforma en su sulfato (Debadatta & Pramanik, 2013; Liu *et al.*, 2009):



En algunas investigaciones se ha modelado este proceso, mediante estudios cinéticos y difusionales, encontrándose una buena adaptación al modelo de difusión intrapartícula para lodos rojos no calcinados (Liu *et al.*, 2009). En el caso de lodos previamente calcinados, existe una buena adaptación al modelo de núcleo no reaccionado, observándose que la cinética del proceso de lixiviación es controlada por la reacción química (dos Passos *et al.*, 2015).

Los fenómenos químicos y de transporte de masa, antes mencionados, justifican que después de realizada la lixiviación, existiese una disminución en la cantidad de masa del residuo, debido a la extracción del

hierro y de otros metales presentes como impurezas en el lodo rojo. También se observó una pérdida de la coloración roja, característica del residuo de bauxita, debido a la hidratación y posterior disolución de la hematita presente, a las elevadas condiciones de acidez utilizadas en el proceso de lixiviación, permitiendo la formación de acuocomplejos férricos (Jang *et al.*, 2007; Centeno-Bordones *et al.*, 2020). El sólido retenido en el filtró presentó una coloración amarilla, atribuible a fases no solubles como cuarzo (SiO_2), o compuestos de aluminio en forma de *k*-feldespato (Liu *et al.*, 2009), como la albita (López & Linares, 2018), aunque también podría estar presente la fase amorfa limonita que precipitaría debido al incremento del pH del sólido durante el lavado (Centeno-Bordones & Jiménez, 2020).

3.2. Diseño de experimentos factorial

En la matriz (Tabla 2) se muestra la variable respuesta, cantidad de hierro extraída, obtenida al variar el conjunto de variables independientes, la concentración de ácido sulfúrico (A), el tiempo de contacto (B), la relación líquido a sólido (C) y la temperatura de reacción (D).

De acuerdo al coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajustada) (Gutiérrez & De la Vara, 2008), el modelo de regresión obtenido describe un 91.15 %, de la variabilidad de la respuesta, por lo que los factores estudiados son responsables o explican en un alto porcentaje la variabilidad observada en la cantidad de hierro extraído del lodo rojo. En cuanto a los supuestos del ANOVA, al aplicar la prueba de Ryan-Joiner se observa que el coeficiente de correlación de los datos con sus puntuaciones normales es cercano a la unidad (0.978) con un valor-p mayor a 0.100, por lo que no se puede rechazar la hipótesis nula de normalidad con un nivel de confianza de 95 %. La independencia se midió mediante la prueba de Durbin-Watson, con un valor de 2.24 para el estadístico, el cual es mayor que la cota superior para los valores de la prueba (Gutiérrez & De la Vara, 2008), afirmando que no existe correlación entre los residuos. El supuesto de varianzas constante se verificó mediante la prueba de Bartlett donde el estadístico de la prueba resultó ser 20.21 con un valor p de 0.164, aceptándose la hipótesis nula de igualdad de varianzas. Por lo tanto, el modelo estadístico aplicado cumple con los supuestos del ANOVA.

En cuanto a los efectos principales, la concentración de ácido sulfúrico y la temperatura presentan un p-valor menor a 0.05 indicando que afectan significativamente la cantidad de hierro extraído con un nivel de confianza de 95 % (Tabla 3). La temperatura contribuye en un 80,89 % a la variabilidad de la respuesta (Tabla 4), con un efecto positivo, lo cual concuerda con el resultado obtenido por Lympelopoulou *et al.* (2019). El aumento de la lixiviación del hierro con la temperatura (Debadatta & Pramanik, 2013; Liu *et al.*, 2009), lo cual se debe al incremento de la energía cinética de las moléculas presentes en el líquido, las cuales chocan con más frecuencia contra las partículas del lodo rojo, intensificando su movimiento Browniano y favoreciendo su difusión (Yanmei, 2021), además, la constante de equilibrio de la reacción también se incrementa con la temperatura (Liu *et al.*, 2009). La concentración de ácido sulfúrico presenta una contribución de 3.54 % a la variabilidad de la cantidad de hierro extraído (Tabla 4), al aumentar esta variable aumenta la concentración de iones hidronio (H^+) presentes en la solución, facilitando su reacción con el óxido de hierro (ecuación 1);

Tabla 2: Cantidades extraídas de hierro para cada corrida del diseño de experimentos 2^4 . Fuente: López-Uscátegui (2016)

Orden Estándar	Variable				Variable codificada				Etiqueta	$(m_{Fe} \pm 0.003)$ g Fe/g lodo
	A(% v/v)	B(h)	C(mL/g)	D ($^{\circ}C$)	x_1	x_2	x_3	x_4		
1	20	2	20	70	-1	-1	-1	-1	(1)	0.147
2	30	2	20	70	1	-1	-1	-1	a	0.130
3	20	3	20	70	-1	1	-1	-1	b	0.150
4	30	3	20	70	1	1	-1	-1	ab	0.150
5	20	2	30	70	-1	-1	1	-1	c	0.113
6	30	2	30	70	1	-1	1	-1	ac	0.162
7	20	3	30	70	-1	1	1	-1	bc	0.117
8	30	3	30	70	1	1	1	-1	abc	0.140
9	20	2	20	100	-1	-1	-1	1	d	0.181
10	30	2	20	100	1	-1	-1	1	ad	0.191
11	20	3	20	100	-1	1	-1	1	bd	0.205
12	30	3	20	100	1	1	-1	1	abd	0.201
13	20	2	30	100	-1	-1	1	1	cd	0.212
14	30	2	30	100	1	-1	1	1	acd	0.210
15	20	3	30	100	-1	1	1	1	bcd	0.216
16	30	3	30	100	1	1	1	1	abcd	0.221
17	20	2	20	70	-1	-1	-1	-1	(1)	0.123
18	30	2	20	70	1	-1	-1	-1	a	0.146
19	20	3	20	70	-1	1	-1	-1	b	0.146
20	30	3	20	70	1	1	-1	-1	ab	0.162
21	20	2	30	70	-1	-1	1	-1	c	0.111
22	30	2	30	70	1	-1	1	-1	ac	0.162
23	20	3	30	70	-1	1	1	-1	c	0.144
24	30	3	30	70	1	1	1	-1	abc	0.142
25	20	2	20	100	-1	-1	-1	1	d	0.188
26	30	2	20	100	1	-1	-1	1	ad	0.199
27	20	3	20	100	-1	1	-1	1	bd	0.189
28	30	3	20	100	1	1	-1	1	abd	0.205
29	20	2	30	100	-1	-1	1	1	cd	0.217
30	30	2	30	100	1	-1	1	1	acd	0.199
31	20	3	30	100	-1	1	1	1	bcd	0.182
32	30	3	30	100	1	1	1	1	abcd	0.230

Tabla 3: Análisis de varianza para los datos de extracción de hierro. Fuente: López-Uscátegui (2016)

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor P
A	0.00136	1	0.00136	12.45	0.003
B	0.00037	1	0.00036	3.33	0.071
C	0.00000	1	0.00000	0.01	0.336
D	0.00015	1	0.00015	1.35	0.000
AB	0.00029	1	0.00029	2.62	0.939
AC	0.00028	1	0.00028	2.56	0.124
AD	0.00000	1	0.00000	0.02	0.194
BC	0.03117	1	0.03117	284.31	0.153
BD	0.00020	1	0.00020	1.85	0.974
CD	0.00000	1	0.00000	0.01	0.009
ABC	0.00055	1	0.00055	4.98	0.698
ABD	0.00112	1	0.001124	10.25	0.034
ACD	0.00032	1	0.000322	2.94	0.100
BCD	0.00005	1	0.000048	0.43	0.524
ABCD	0.00092	1	0.000920	8.39	0.009
Error	0.00175	16			

de acuerdo a Yanmei (2021), se incrementan la cantidad de moléculas que pueden ser activadas por unidad de volumen.

Para los niveles estudiados, la relación líquido a sólido y el tiempo presentaron bajas contribuciones a la respuesta ($< 1\%$, Tabla 4). Según Liu *et al.* (2009), el tiempo de vida media ($t^{1/2}$) del proceso de lixiviación del hierro es de 92min a $70\text{ }^\circ\text{C}$ y decrece a mayores temperaturas. Yanmei (2021) encontraron que a $100\text{ }^\circ\text{C}$, la concentración de hierro lixiviado se hace constante por encima de los 90 min , lo que explicaría la baja incidencia del tiempo en la variabilidad de la cantidad de hierro extraído. En cuanto a la relación líquido-sólido, al haber una mayor cantidad de solución se espera una mayor solubilización de los metales en la fase sólida (Debadatta & Pramanik, 2013; Yanmei, 2021).

Además, se observa que algunas interacciones presentan un p-valor menor a 0.05 indicando que afectan significativamente la variable respuesta con un nivel de confianza de 95% (Tabla 3). La interacción de líquido/sólido \times temperatura contribuye en un 2.92% a la variabilidad de la respuesta (Tabla 4) con un efecto positivo, lo que implica que la relación líquido-sólido debe estar en su valor alto (30 mL/g) para incrementar la cantidad de hierro extraído. La interacción de tercer orden concentración \times tiempo \times temperatura contribuye en 1.42% , (Tabla 4) con un efecto positivo, por lo que se requiere que el tiempo esté en su valor alto (3 h) para aumentar la cantidad de hierro extraído. Finalmente, la interacción de cuarto orden, que involucra los cuatro factores tiene un peso de 2.39% (Tabla 4) sobre la variabilidad de la respuesta, y su efecto es positivo, en este sentido para aumentar el valor de la respuesta se requiere que todos los factores se encuentren en su valor alto. En base a este análisis se seleccionaron las siguientes condiciones como las más adecuadas: $30\%v/v$, 3 h , 30 mL de ácido/ 1 g de lodo rojo, y $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 4: Efectos de los factores y suma de cuadrados estimados para el diseño factorial aplicado al proceso de extracción de hierro.
Fuente: López-Uscátegui (2016)

Término del modelo	Estimación del efecto ± 0.000001	Suma de cuadrados ± 0.000001	Contribución porcentual $\pm 0.01 \%$
A	0.013061	0.001365	3.54
B	0.006759	0.000365	0.95
AB	-0.000339	0.000001	0.00
C	0.004301	0.000148	0.38
AC	0.005987	0.000287	0.74
BC	-0.005919	0.000280	0.73
ABC	-0.000503	0.000002	0.01
D	0.062423	0.031173	80.89
AD	-0.005036	0.000203	0.53
BD	0.011853	0.000001	0.00
ABD	0.008259	0.000546	1.42
CD	0.011853	0.001124	2.92
ACD	-0.006346	0.000322	0.84
BCD	0.002442	0.000048	0.12
ABCD	0.010726	0.000920	2.39

El gráfico de superficie estimada (Figura 1) para la cantidad de hierro extraído (gFe/g lodo rojo) en función de los efectos principales significativos (concentración y temperatura) indican que los mayores valores de la variable respuesta, cuyos coeficientes se muestran en la Tabla 5, se presentan para los valores más alto de estos factores.

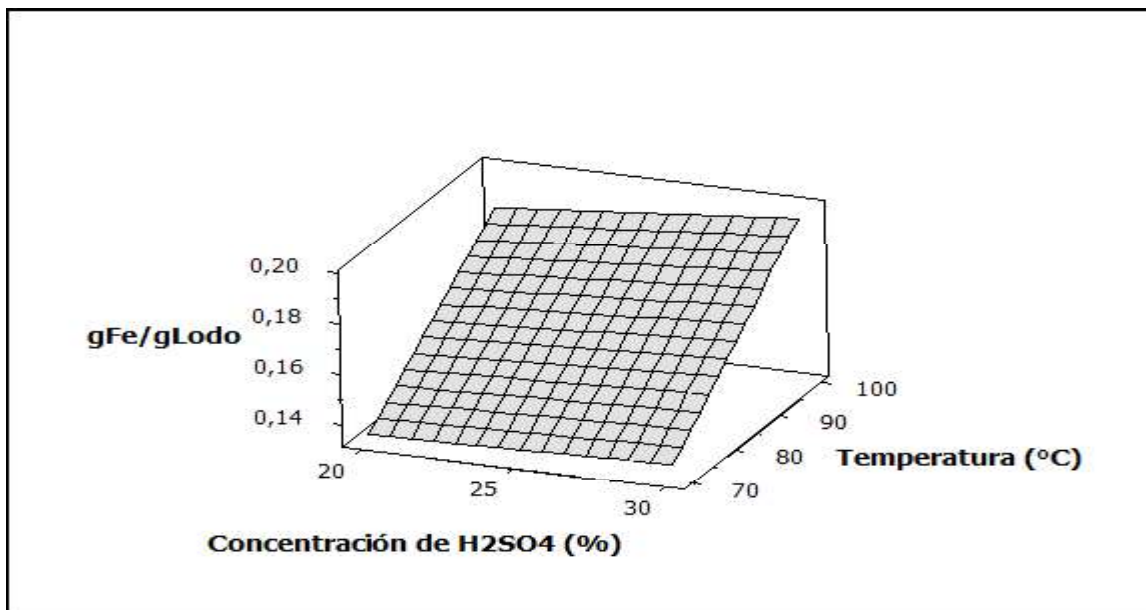


Figura 1: Superficie respuesta del modelo considerando los factores concentración de ácido – temperatura. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Coeficientes para el modelo de regresión (variables no codificadas). Fuente: López-Uscátegui (2016)

Término	Notación	Coefficiente
Constante	β_0	3.54481
A	β_1	-0.146454
B	β_2	-1.18905
C	β_3	-0.170592
D	β_4	-0.0400643
AB	β_{12}	0.0518562
AC	β_{13}	0.0069673
AD	β_{14}	0.00169032
BC	β_{23}	0.0573331
BD	β_{24}	0.0142884
CD	β_{34}	0.00199682
ABC	β_{123}	-0.00245136
ABD	β_{124}	-6.05×10^{-4}
ACD	β_{134}	-8.00×10^{-5}
BCD	β_{234}	-6.83×10^{-4}
ABCD	β_{1234}	2.86×10^{-5}

4. CONCLUSIONES

Mediante el proceso de extracción, los iones de hierro (III) se transfirieron desde la fase sólida a la fase líquida, observándose una disminución del color rojo que caracteriza al residuo generado durante la producción de alúmina. El análisis de este proceso mediante un diseño de experimentos factorial permitió establecer que la concentración de ácido sulfúrico (%v/v) y la temperatura de reacción contribuyen positivamente a la extracción del hierro presente en el lodo rojo; así como también las interacciones de segundo orden (relación sólido-líquido y temperatura de reacción), las de tercer orden (concentración de ácido, tiempo de contacto y temperatura) y de cuarto orden (concentración de ácido, tiempo de contacto, relación sólido-líquido y temperatura de reacción). Finalmente, la condición seleccionada, a partir del diseño de experimentos, como la más apropiada para realizar el proceso de extracción de hierro fue 30 %v/v de ácido sulfúrico, 3 horas de reacción, relación sólido a líquido 1/30 g/mL y una temperatura de reacción de 100 °C.

Contribución de los autores

Darwin López: investigación, recolección y análisis de datos, preparación del manuscrito.

Carlos Felipe Linares: Jefe del proyecto y revisión crítica del manuscrito.

Edith Figueredo: preparación y revisión crítica del manuscrito.

Referencias

- Agrawal, S, Rayapudi, V. & Dhawan, N (2018). Extraction of Iron values from Red mud. *Materials Today: Proceedings 5*, 17064 - 17072; doi: 10.1016/j.matpr.2018.04.113
- Borra, C. R., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K. & Van Gerven, T. (2016). Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): a review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 365-386.
- Centeno-Bordones, G. & Jiménez, Y. (2020). Evaluación del Lodo Rojo Activado como Catalizador Heterogéneo en Procesos de Oxidación Avanzada con Radiación Solar para la Degradación de Aguas Agrias Petroleras. *Revista Tecnología y Ciencia*, año 18(39), 62–84. <https://doi.org/10.33414/rtyc.39.62-84.2020>
- Centeno-Bordones, G., Pernía, L., Jiménez, Y. & García, J. V. (2020). Degradación de fenol e identificación por HPLC de los productos generados utilizando lodo rojo como catalizador en procesos de oxidación avanzada solar. *Revista INGENIERÍA UC*, 27(2), 150-164.
- Debadatta, D. & Pramanik, K. (2013). A study on chemical leaching of iron from red mud using sulphuric acid. *Research Journal of Chemistry and Environment*, 17(7), 50–56.

- dos Passos, K. L. M., Viegas, B. M., Macêdo, E. N., Souza, J. A. S. & Magalhães, E. M. (2015). Mathematical modeling of leaching process of red mud in order to obtain the kinetics parameters. *Revista de Engenharia Térmica*, 14(2), 90-94.
- Evans, K. (2016). The history, challenges, and new developments in the management and use of bauxite residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 316–331.
- Galarraga, R. A., Carneiro, R. R., Keane, R. E. & Nguyen, G. (2002). CVG- bauxilum red mud neutralization. In *LIGHT METALS-WARRENDALE- PROCEEDINGS-* (pp. 133-140). TMS.
- Gutiérrez, H. & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos. Editorial Mc Graw Hill.
- Jang, J., Dempsy, B. & Burgos, W. (2007). Solubility of hematite revisited: effects of hidrattation. *Environmental science & technology*, 41(21), 7303–7308.
- Karimi, Z., Allahverdi, A. & Mahinroosta, M. (2018). Recovery of Metals from Red Mud Using Mineral Acids. *Proceedings of Iran International Aluminium Conference (IIAC2018)* April 24–25, Tehran, I.R. Iran.
- Li, C., Zeng, C., Liu, P., Yu, J., Guo, F., Xu, G. & Zhang, Z. (2017). The recycle of red mud as excellent SCR catalyst for removal of NOx. *Rsc Advances*, 7(84), 53622–53630.
- Liu, Z., Zeng, K., Zhao, W. & Li, Y. (2009). Effect of Temperature on Iron Leaching from Bauxite Residue by Sulfuric Acid. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 82 (1), 55–58.
- López-Uscátegui, D. E. (2016). Síntesis de pigmentos de hierro a partir de los lodos rojos generados por la Industria CVG Bauxilum, CA (*Master's thesis*).
- López, D. & Linares, C. (2018). Caracterización del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas. *Ingeniería UC*, 25(1), 86–92.
- Lymperopoulou, T., Georgiou, P., Tsakanika, L., Hatzilyberis, K. & Ochsenkuehn-Petropoulou, M. (2019). Optimizing conditions for scandium extraction from bauxite residue using Taguchi methodology. *Minerals* 9(4), 236; doi:10.3390/min9040236
- Magalhães, E. M., Macêdo, E. N., Quaresma, D. D., Souza, J.A. & Quaresma, J. N. (2012). Extraction of Iron Oxide and Concentration of Titanium Compounds in Red Mud. In *EPD Congress 2012* (pp. 345-352). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc
- Mayes, W. M., Burke, I. T., Gomes, I. J., Anton, Á. D., Molnár, M., Feigl, V. & Ujaczki, É. (2016). Advances in understanding environmental risks of red mud after the Ajka spill, Hungary. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 332–343. DOI 10.1007/s40831-016-0050-z
- Qi, Y. (2021). The neutralization and recycling of red mud—a review. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1759(1), IOP Publishing

- Ruyters, S., Mertens, J., Vassilieva, E., Dehandschutter, B., Poffijn, A. & Smolders, E. (2011). The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil. *Environmental Science & Technology*, 45(4), 1616–1622.
- Vasters, J., Franken, G. (2020). Aluminum - Sustainable Information. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, BGR, Julio, 2020.
- Yang, Y., Wang, X., Wang, M., Wang, H. & Xian, P.(2015). Recovery of iron from red mud by selective leach with oxalic acid. *Hydrometallurgy*, 157, 239–245.
- Yanmei, J. (2021). Preparation of polymeric aluminum ferric sulphate from waste residue of aluminum industry. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 271). EDP Sciences.
- Zhang, T., Wang, T., Lu, G., Liu, Y., Zhang, W. & Zhao, Q. (2018). Comprehensive Utilization of Red Mud: Current Research Status and a Possible Way Forward for Non-hazardous Treatment. *Light Metals*, In: Martin O. (eds) *Light Metals 2018*. TMS 2018. The Minerals, Metals & Materials Series, 135–141.
- Zhou K., Teng, C., Zhang, X., Peng, C. & Chen, W. (2018). Enhanced selective leaching of scandium from red mud. *Hydrometallurgy*, 182, 57–63
- Zinoveev, D., Pasechnik, L., Fedotov, M., Dyubanov, V., Grudinsky, P. & Alpatov, A. (2021). Extraction of valuable elements from red mud with a focus on using liquid media—a review. *Recycling*, 6(2), 38. <https://doi.org/10.3390/recycling6020038>