

Tratamiento cinético del proceso de neutralización del licor ácido con residuos sólidos de carbonato de calcio de la industria del mármol

Kinetic treatment of acid liquor neutralization process with calcium carbonate solid residues from marble industry

Mercedes Eulalia Sosa-Martínez^{1*} <https://orcid.org/0009-0002-2947-3488>

Miguel Garrido-Rodríguez² <https://orcid.org/0000-0002-7174-9452>

Nadielza Góngora- Fonseca¹ <https://orcid.org/0009-0003-5947-1878>

Miguel Ángel Ponce-Moreno¹ <https://orcid.org/0009-0008-9872-1565>

¹Universidad de Moa, Cuba.

²Universidad Tecnológica de La Habana.

*Autor para la correspondencia: msosa@ismm.edu.cu

RESUMEN

Esta investigación propone sustituir el cieno carbonatado que se utiliza como agente neutralizante en la tecnología de lixiviación ácida por los polvos residuales de la industria del mármol. El proceso de neutralización del licor en la lixiviación ácida a presión presenta concentraciones de ácido sulfúrico en exceso con valores de pH igual a 1,9 unidades, lo cual permite utilizar los residuos sólidos de carbonato de calcio de la industria del mármol. La investigación se realizó a escala de laboratorio con un régimen de agitación de 68 rpm. Se utilizó el diseño factorial multinivel, donde se estudian dos factores: la masa de sólido del agente neutralizante (1, 2, 3 y 4 g) y la temperatura (50 C y 700 C). Se evaluó, además, el comportamiento de las variables mediante el modelo cinético. Los modelos estadísticos

evidenciaron una relación directa entre el aumento de la masa de sólido y la temperatura, donde el primer factor ejerce una influencia positiva en el proceso. Los mejores resultados de pH se obtienen en la prueba 1, para (50 °C y 1 g), donde se logran valores desde 2,37 hasta 2,53, en el tiempo desde uno hasta 10 minutos.

Palabras clave: ácido libre, licor ácido, lixiviación ácida, modelo cinético

ABSTRACT

This research is a proposal for replacing carbonated silt used as neutralizing agent in acid leaching technology with residual dust from marble industry. The liquor neutralization process in pressure acid leaching contains sulfuric acid concentration to excess with pH values equal to 1.9 units, which allows using solid calcium carbonate residues from marble industry. The research was carried out at laboratory scale with an agitation regime of 68 rpm. The multilevel factorial design was used, where two factors are studied: solid mass of neutralizing agent (1, 2, 3 and 4 g) and temperature (50 °C and 700 °C). Behavior of variables was also assessed by means of kinetic model. The statistical models showed a direct relationship between the increase of solid in the mass and the temperature, where the first factor exerts a positive influence on the process. The best pH results are obtained in test 1, for (50 °C and 1 g), where values from 2,37 to 2,53 are achieved between one to ten minutes.

Keywords: free acid, acid liquor, acid leaching, kinetic model

Recibido: 01/04/2024

Aceptado: 23/04/2024

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha hecho cada vez más creciente la preocupación por la protección y conservación del medio y sus recursos naturales (Bustillo & López, 1996). Unas de las causas fundamentales del deterioro y agotamiento de estos recursos en el municipio de Moa están ocasionados por el uso del cieno coralino procedente de los arrecifes de la bahía de Moa como materia prima en las empresas productoras de níquel y cobalto (Granda, 1986; Leal & Martin, 1988; Sosa-Martínez & Bassas, 2001; Cueto, 2005; Mulet-Hing *et al.*, 2023). Durante el proceso de lixiviación ácida a presión la cantidad de ácido empleada para la extracción del mineral niquelífero se encuentra sustancialmente en exceso con respecto al estequiométricamente necesario, lo que trae consigo la obtención de licores lixiviados con alto grado de acidez (pH inferior a 1,6) el cual se debe ajustar a valores entre 2,4 y 2,6 para la precipitación eficiente de los sulfuros de níquel y cobalto.

Cueto (2005) propone neutralizar el licor reducido de la planta de neutralización del proceso ácido con sólidos residuales o colas provenientes del proceso carbonato amoniacal, aplicado también en Moa. Su estudio se realizó a escala de laboratorio, en un reactor de dos litros, bajo un régimen de agitación, caracterizado por valores de Reynolds (Re) iguales a 16 500, 20 500 y 24 500; para ello se utilizó el residual como agente neutralizante, con una relación ácido-magnesio de 0,67 g/g; 0,87 g/g y 1 g/g, con temperaturas de 50°C, 60°C, y 70 °C, para valores de tiempo de 15, 30 y 45 min, obteniéndose unidades de pH iguales a 2,11; 2,35 y 2,45 ya optimizados y procesados estadísticamente.

Sosa-Martínez (2006) trata el licor residual con métodos químicos de precipitación selectiva, sentando las bases para la presente investigación. Se utiliza el sulfuro de sodio como agente precipitante, en concentraciones desde 0,1 mol/L hasta 1 mol/L y a temperatura ambiente (273 K). Obtiene porcentajes de recuperación cercanos a 45 para el zinc, 50 para el cobre, 67 para el níquel y 65 para el cobalto.

Al agregar, en estas mismas condiciones, otros agentes precipitantes como el hidróxido de amonio y el hidrogenosulfuro de amonio alcanza recuperaciones de 65 %, 60 %, 69 % y 70 % en ese orden para el zinc, cobre, níquel y cobalto.

Para comprobar el precipitante hidrogenosulfuro de sodio, Sosa-Martínez & Bassas (2006) utilizan concentraciones de 0,1 mol/L; 0,5 mol/L y 1 mol/L, temperaturas de 298 K y 313 K, así como una frecuencia de agitación entre 135 rpm y 255 rpm. Los valores de recuperación de fueron en ese caso de 65 %, 60 %, 69 % y 70 % para el zinc, cobre, níquel y cobalto, respectivamente, todas superiores a las obtenidas con el sulfuro de sodio. Esos resultados permiten establecer los rangos óptimos de pH y las concentraciones adecuadas para la precipitación selectiva de los sulfuros metálicos de las especies ya nombradas a partir del licor ácido de desecho.

Entre las investigaciones que ahondan en la neutralización de residuos ácidos destacan las publicadas por Guerra-Pérez (2015); Pérez-Rosales (2015); Parejo-Gutiérrez (2021); Alegre-Jara & Tresierra-Aguilar (2023); Arteaga-Gómez & Gutti-Jara (2023); Arbona-Cabrera *et al.* (2023); Cortez-Velasquez & Paz-Calvo (2023); Chávez-Aguilar (2023) y Alegre-Jara & Tresierra-Aguilar (2023) y Madeira *et al.* (2024).

La presente investigación se realizó con el objetivo de sustituir, en el proceso de neutralización del licor ácido de la industria cubana del níquel, el cieno carbonatado por los polvos residuales de la industria del mármol como agente neutralizante para disminuir el impacto medioambiental negativo y lograr mayor eficiencia económica del proceso de lixiviación ácida que conlleve un mejor aprovechamiento de los recursos naturales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales, reactivos y equipos

Se empleó el carbonato de calcio residual con un 99 % de pureza, licor ácido con una concentración de 15 g/L de ácido sulfúrico libre, tamices de 200 mesh y 100 mesh, balanza digital, beaker de 1L de capacidad, erlenmeyer, embudos, papel de filtro, bomba de vacío, pH-metro digital HI 90 23 C, picnómetro, termómetro, plancha eléctrica y agitador mecánico de cuatro paletas planas. Las condiciones del equipamiento fueron comprobadas por el Instituto de Metrología y control de la calidad de la provincia de Holguín, Cuba.

Condiciones de trabajo

La composición química media del licor ácido se muestra en la Tabla 1. El licor utilizado de la tecnología ácida a presión procede de la planta de lavaderos y tiene las características siguientes: ácido libre: 15 g/L; pH: 1,9; sólidos en suspensión: 0,6 g/L (600 ppm) (valor máximo). Las muestras de licor se tomaron cada ocho horas durante 30 días. Se escogió como agente neutralizante el carbonato de calcio residual del mármol (Tabla 2), atendiendo a sus características químicas, físicas y precio favorable.

Tabla 1. Composición química del licor ácido (en g/L)

Ni	Co	Fe	Mn	Cu	Zn
4,88	0,476	1,01	1,8	0,113	0,1

Tabla 2. Composición química (en %) y parámetros físicos del polvo residual de mármol

Composición química del polvo residual			
CaCO ₃	Cd	Mg	Otros
99 ± 0,1	0,00002	0,17 ± 0,01	0,8
Parámetros físicos del polvo residual de mármol			
Densidad aparente, g/cm ³	Densidad real, g/cm ³	Absorción de agua, %	
2,2 ± 0,05	2,3 ± 0,03	0,11 ± 0,01	

Se empleó Espectrofotometría de Absorción Atómica, de Emisión por Plasma Inductivamente acoplado y método volumétrico de valoración

con hidróxido de sodio. Los análisis se realizaron en los laboratorios del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ), en Moanickel. S.A., Empresa productora de Ni y Co Ernesto Che Guevara y en la Universidad de Moa.

Metodología para el cálculo del pH teórico de neutralización del licor ácido

A partir de la expresión 1, se calcularon los valores teóricos de pH para el proceso de neutralización del licor ácido (Levenspiel 1986)

$$\text{pH} = - \log c(\text{H}_3\text{O}^+) \quad (1)$$

Donde: $c(\text{H}_3\text{O}^+)$: concentración de iones hidronio.

Metodología para el cálculo de la cinética del proceso de neutralización

La cinética del proceso metalúrgico ofrece la posibilidad de conocer su velocidad, así como la incidencia en este de múltiples factores. El proceso de neutralización de licores ácidos es un proceso heterogéneo, el cual transcurre en dos etapas fundamentales:

- ✓ Difusión del ácido libre desde el volumen de la solución hasta la superficie del sólido.
- ✓ Reacción química.

Las etapas difusivas 1 y 2 pueden ocurrir en dependencia de las características del agente neutralizante y la formación o no durante la operación de una nueva fase sólida (Zelikman *et al.*, 1975; Perry´s & Chilton, 1999; Levenspiel, 1986). La cantidad de ácido libre neutralizado en la unidad de tiempo depende de la temperatura y la masa de sólido presentes en el proceso. Este puede estar limitado por la difusión, por la reacción química o por ambas a la vez.

En el primer caso tendría lugar en un régimen difusivo, caracterizado por un pequeño valor de energía de activación; la velocidad del proceso podría incrementarse con el aumento de la temperatura y la adición de

agente neutralizante. En el segundo caso la reacción tendría lugar en la zona cinética donde la energía de activación alcanza mayor valor y afectada fundamentalmente por la variación de la temperatura. Puede ocurrir un tercer estadio, siendo este una situación intermedia entre los casos anteriores, también llamada etapa transitoria (Zelikman *et al.*, 1975).

Metodología del método cinético de investigación

El método de estudio cinético del proceso de neutralización a escala de laboratorio tiene como fin determinar la velocidad de las transformaciones físico-químicas, así como la influencia de los parámetros de estudio, expresado a través de una ecuación que describe el modelo cinético. Teniendo en cuenta que es un proceso heterogéneo y complejo, se partió de la expresión cinética general (Zelikman *et al.*, 1975; Dobrojotov, 1988; Sosa-Martínez, 2006; Sosa-Martínez & Bassas, 2006).

$$-\frac{dc(Me)}{d\tau} = k \cdot V \cdot C_1^a C_2^b \dots C_n^f \cdot Re^x \cdot S^y \cdot sól^z \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (2)$$

Donde:

dc(Me): Contenido del metal en el sólido (%)

k: Constante de velocidad

C1, C2, Cn: Concentración de los reactivos 1, 2 – n (g/L)

E: Energía de activación (kJ/mol)

R: Constante universal de los gases (kJ/mol·K)

T: Temperatura (K)

V: Volumen utilizado (L)

S: Superficie (mm²)

Sól: Contenido de sólido (%)

Re: Número de Reynolds

a, b, f, x, y, z: Coeficientes empíricos

A partir de los resultados experimentales, según el diseño empleado, se realiza el análisis individual de cada factor. Para obtener la influencia de la masa de sólido se utiliza la expresión 3. Y para la influencia de la temperatura, la 4.

$$\frac{d(pH)}{d\tau} = k \cdot V \cdot m(sól^z) \quad (3)$$

$$\frac{d(pH)}{d\tau} = k \cdot V \cdot e^{\frac{-E}{RT}} \quad (4)$$

a) Para determinar el coeficiente 'z' se parte de la expresión 3, para los tiempos 1 y 2. Se plantea la expresión, se simplifica, se aplica logaritmo neperiano y se obtiene la expresión 5:

$$\left(\frac{d(pH)}{d\tau}\right)_1 = k \cdot V \cdot m(sol^z)_1; \left(\frac{d(pH)}{d\tau}\right)_2 = k \cdot V \cdot m(sól^z)_2$$

$$\frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)}{\ln\left(\frac{m(sól)_1}{m(sól)_2}\right)} = z \quad (5)$$

b) Para determinar el coeficiente E se parte de la expresión 4, para los tiempos 1 y 2. Se plantea la expresión, se simplifica, se aplica logaritmo neperiano y se obtiene la expresión 6:

$$\left(\frac{d(pH)}{d\tau}\right)_1 = k \cdot V \cdot e^{\frac{-E}{RT_1}}; \left(\frac{d(pH)}{d\tau}\right)_2 = k \cdot V \cdot e^{\frac{-E}{RT_2}}$$

$$\frac{\ln\left(\frac{\tau_2}{\tau_1}\right) \cdot R}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} = E \quad (6)$$

Diseño de experimentos

Para el diseño de la matriz se utilizó el método factorial multinivel, basado en las posibles combinaciones entre las variables de estudio y los niveles escogidos. Se estudiaron dos factores (temperatura y masa de sólido) con dos y cuatro niveles, respectivamente, quedando de la siguiente manera la cantidad de pruebas (N) a realizar (Ángel-Gutiérrez, 2007)

$$N = p \cdot g \quad (7)$$

Donde:

N : número de experimentos

p : niveles del factor temperatura

g : niveles del factor masa de sólido.

Los cálculos indicaron realizar ocho pruebas. En la Tabla 3 se muestran los factores y niveles utilizados en los experimentos. A partir del diseño de experimentos se realiza la matriz experimental descodificada (Tabla 4).

Tabla 3. Factores y niveles utilizados en los experimentos

Factores	Temperatura (°C)	Masa de sólido (g)
Niveles	50	1
		2
	70	3
		4

Tabla 4. Matriz Experimental descodificada

Pruebas	Temperatura (°C)	Masa de Sólido (g)
1	50	1
2	70	1
3	50	2
4	70	2
5	50	3
6	70	3

7	50	4
8	70	4

Procedimiento experimental

Se tomó un volumen de 1000 mL de licor ácido con un pH inicial de 1,9 unidades, se añadió carbonato de calcio residual de la industria del mármol en un rango de masas comprendidas entre 1 g y 4 g; en el reactor, se fijó la frecuencia de agitación a 68 rpm y se alternaron los valores de temperatura 50 °C y 70 °C para cada prueba experimental. Con la instalación de vacío adjunta al reactor se extrajeron muestras y se filtraron. Al líquido clarificado separado se le determinó el valor de pH, para conocer la concentración de ácido sulfúrico neutralizado por unidad de tiempo.

Metodología de análisis estadístico-matemático

Para demostrar la veracidad de los resultados experimentales y comprobar el comportamiento de los diferentes factores, se realizó un análisis estadístico-matemático, utilizando el software STATGRAPHICS 5.1 plus y Microsoft Excel. Se aplicó la metodología explicada por Ángel-Gutiérrez (2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de la masa de sólido sobre la variación del pH en el proceso de neutralización del licor

La influencia de la masa de sólido sobre el pH durante la neutralización del licor ácido se evaluó en las condiciones experimentales determinadas.

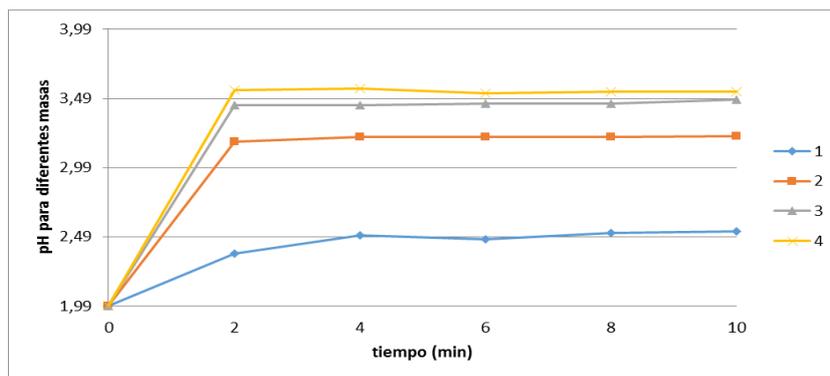


Figura 1. Comportamiento del pH en el tiempo para diferentes masas de sólido.

En la Figura 1, se muestran las curvas determinadas para 1, 2, 3 y 4 g de masa de sólido a una temperatura de 50 °C, donde se aprecia que en los dos primeros minutos existe un incremento considerable de los valores de pH, en todos los casos, a partir de ese tiempo los valores de pH permanecen prácticamente constantes. Con los resultados anteriores se determinó el coeficiente empírico en función del contenido de sólido, según la ecuación 5.

Influencia de la temperatura sobre la variación del pH en el proceso de neutralización del licor

La Figura 2 refleja la influencia de la temperatura sobre la variación de pH. Las variaciones del pH a temperaturas de 70 °C son inferiores a las que se alcanzan a 50 °C.

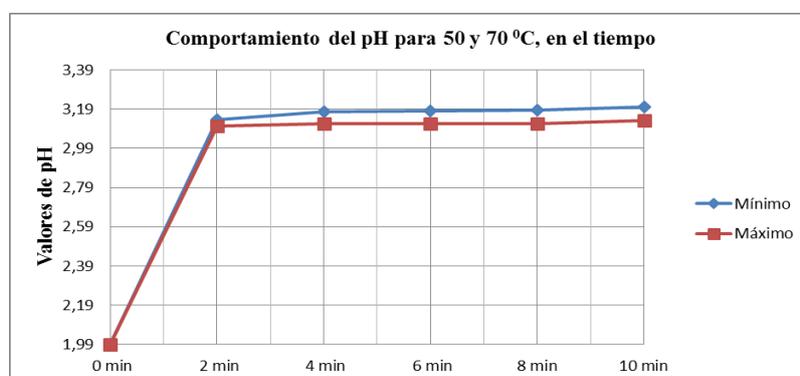


Figura 2. Variación de pH contra temperatura en el tiempo.

Como regularidad, en las curvas de pH a diferente temperatura se aprecia un incremento brusco de esta durante los primeros dos minutos, posteriormente una estabilización a partir de los cuatro minutos; siendo más pronunciado para el menor valor de temperatura. En la Figura 2 se observan ligeras diferencias, por lo que se puede afirmar que el factor temperatura no ejerce gran influencia en el proceso de neutralización del licor ácido con polvo residual de mármol. Se obtuvo la energía aparente de activación del proceso, según la ecuación (6). El valor obtenido demuestra que el proceso ocurre en un régimen difusivo; ello indica que las temperaturas experimentadas son suficientes y su incremento no determina la velocidad del proceso.

Resultados del modelo cinético del proceso de neutralización

Una vez calculado el coeficiente empírico "z" y la energía de activación "E" se determinó la ecuación cinética del proceso de neutralización con el polvo residual de la industria del mármol. En la expresión 2, se sustituyen los valores del coeficiente empírico "z" y la energía de activación "E" y se obtiene la expresión 8, la cual se integra para obtener la 9, cuya solución genera la expresión 10:

$$-\frac{dpH}{d\tau} = 0,0182(pH_e - pH_t).m(sól^{0,97}).e^{\frac{38,78}{RT}} \quad (8)$$

$$\int_{pH_0}^{pH_t} \frac{dpH}{(pH_e - pH_t)} = -0,0182.m(sól^{0,97}).e^{\frac{38,78}{RT}} \cdot \int_{\tau_0}^{\tau} d\tau \quad (9)$$

$$\log \left(\frac{pH_e - pH_{\tau_1}}{pH_e - pH_{\tau_0}} \right) = -0,0182.m(sól^{0,97}).e^{\frac{38,78}{RT}} \cdot (\tau_1 - \tau_0) \quad (10)$$

Considerando que $\tau_0 = 0$ y $pH_{T0} = 1,9$ se obtiene la expresión final (11) para la determinación del pH en función del tiempo. A partir de (11) se obtiene la expresión general (12):

$$pH_{\tau_1} = pH_e - (pH_e - pH_{\tau_0}) \cdot e^{-0,0182m(sól^{0,97}) \cdot e^{\frac{38,78}{RT}} \cdot \tau_1} \quad (11)$$

$$(pH_{\tau_1}) = pH_{\max} (1 - e^{-0,0182m(sól^{0,97}) \cdot e^{\frac{38,78}{RT}} \cdot (\tau_1)}) - pH_{\tau_0} \cdot e^{-0,0182m(sól^{0,97}) \cdot e^{\frac{38,78}{RT}} \cdot (\tau_1)} \quad (12)$$

La expresión 12 permitió determinar la influencia de los principales factores cinéticos sobre el proceso de neutralización de licores ácidos y comparar los valores máxicos teóricos y experimentales del agente neutralizante en la investigación. Los resultados del estudio cinético y estadístico experimental del proceso de neutralización del licor ácido con polvo residual señalan una baja influencia de la temperatura en la variación del pH.

Validación del modelo cinético

La validación del modelo se realiza mediante la contraposición de los resultados experimentales y los obtenidos con del modelo resultante según la ecuación 12. Se obtienen los valores teóricos y prácticos con las siguientes condiciones: (1-teórico para 1,5 g y 60 °C); (2- teórico para 2,5 g y 65 °C) y I; II son los resultados prácticos para las mismas condiciones de 1 y 2 (Figura 3).

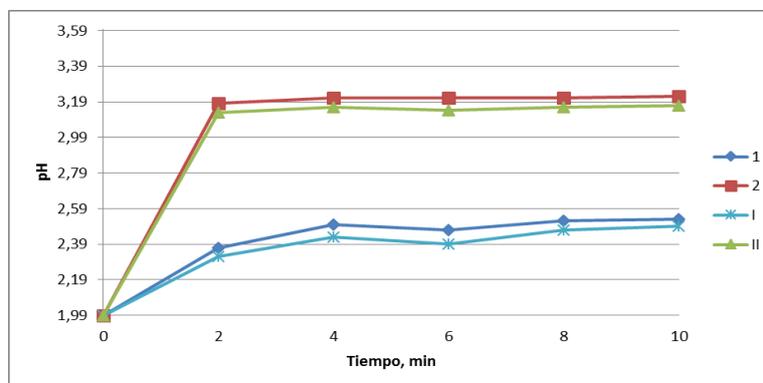


Figura 3. Valores obtenidos experimentalmente y por simulación.

En la Figura 3 se observa que los valores prácticos se asemejan a los valores obtenidos por el modelo cinético, los márgenes de error que se pueden apreciar son poco considerables, de manera que el modelo queda validado.

Análisis de los resultados estadísticos–matemáticos

Los resultados de laboratorio fueron sometidos en primer orden a un control de homogeneidad para el caso de la influencia de los principales parámetros en el proceso de neutralización. Las expresiones de la 13 a la 17, exponen los modelos que representan la influencia de las variables independientes: temperatura y masa agente precipitante, así como la interrelación entre ellas. En todos los casos los índices de correlación obtenidos fueron de 0,95.

$$\text{pH 2 min} = 2,01 + 0,0035 \cdot T + 0,48 \cdot \text{Masa de sól.} - 0,002 \cdot T \cdot \text{Masa de sól.} \quad (13)$$

$$\text{pH 4 min} = 2,5125 - 0,00375 \cdot T + 0,3285 \cdot \text{Masa de sól.} + 0,00025 \cdot T \cdot \text{Masa de sól.} \quad (14)$$

$$\text{pH 6 min} = 2,5775 - 0,00475 \cdot T + 0,306 \cdot \text{Masa de sól.} + 0,0006 \cdot T \cdot \text{Masa de sól.} \quad (15)$$

$$\text{pH 8 min} = 2,5575 - 0,00425 \cdot T + 0,321 \cdot \text{Masa de sól.} + 0,0003 \cdot T \cdot \text{Masa de sól.} \quad (16)$$

$$\text{pH 10 min} = 2,53 - 0,0035 \cdot T + 0,3355 \cdot \text{Masa de sól.} + 0,00005 \cdot T \cdot \text{Masa de sól.} \quad (17)$$

La variable de mayor significación en la neutralización del licor ácido resultó ser la masa de agente neutralizante, lo que indica que el incremento de los valores de este parámetro favorece el proceso en gran medida. Para los mayores valores de esta variable independiente (prueba 1), se obtuvieron valores máximos de pH, lográndose desde 2,37 hasta 2,53 en el tiempo desde uno hasta diez minutos.

Los resultados de laboratorio fueron sometidos en primer orden a un control de homogeneidad para el caso de la influencia de los principales parámetros en el proceso de neutralización.

CONCLUSIONES

- Se determina el mecanismo del proceso de neutralización del licor ácido con polvo residual de la industria del mármol y su modelo cinético, el cual quedó validado por datos experimentales.
- Se demuestra que el polvo residual del mármol cumple con los requisitos necesarios como agente neutralizante en el proceso de neutralización del licor ácido. Los mejores resultados de pH se obtienen en la prueba 1 (para 50 °C y 1 g), lográndose valores desde 2,37 hasta 2,53 en un tiempo desde un minuto hasta 10 minutos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la valiosa colaboración del Ms.C. Ramón Fernández Guerra y al Dr.C. Amaury Palacios Rodríguez para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Ángel-Gutiérrez, J. C. (2007). *Estadística General Aplicada*. Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Alegre-Jara, M. J. & Tresierra-Aguilar, A. E. (2023). Optimización del proceso de neutralización de aguas ácidas en galvanizado siderúrgico. Impactos ambientales y económicos. *Ciencia Latina*, 7(6), 2923-2940.
<https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/8895>
- Arbona-Cabrera, M., Cabrera-Estrada, I., O´Farril-Pie, E. & Fabelo-Falcón, J. A. (2023). Determinación de la influencia de variables de operación en la neutralización aguas residuales textiles con CO₂. *Afinidad*, 80(599), 187-192. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/417974>

- Arteaga-Gómez, E. & Gutti-Jara, S. (2023). *Neutralización del drenaje ácido mediante cenizas de carbonato de calcio en unidad minera Nivel V*.
- Bustillo, R. M. & López, J. C. (1996). *Recursos Minerales. Tipología, prospección, evaluación, explotación, mineralurgia e impacto ambiental*. Gráficas Arias Montana. Madrid.
- Cortez-Velasquez, L. F. & Paz-Calvo, O. C. (2023). *Eficiencia de neutralización de aguas ácidas de mina con lechada de cal en una minera artesanal, La Libertad-2021*. Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/34743>
- Cueto, F. (2005). *Tratamiento del licor residual de la ECPSA Moa-Nickel, SA*. (Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa).
- Chávez-Aguilar, C. B. (2023). *Evaluación de la capacidad de absorción de CO₂ con un proceso mecánico para la neutralización de aguas residuales industrias Albus S.A.* (Tesis Doctoral, Universidad Mayor de San Andrés). <https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/31584>
- Dobrojotov, G. N. (1988). *Representación gráfica de los resultados investigativos experimentales*. Informe. Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.
- Granda, O. (1986). *Aprovechamiento de la serpentina niquelífera en la neutralización del (WL)*. Informe de investigación, Centro de Investigaciones y Proyectos de la Industria Minero Metalúrgica. La Habana.
- Guerra-Pérez, Y. (2015). *Neutralización de licor ácido con residuos sólidos de carbonato de calcio de la industria del mármol* (Trabajo de Diploma, Instituto Superior Minero Metalúrgico). <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/2478>
- Leal, L. & Martín M. (1988). *Utilización de la serpentina como neutralizante del licor WL*, Informe Técnico, Instituto Superior Minero Metalúrgico. Moa.

Levenspiel, O. (1986). Ingeniería de las reacciones química. Pueblo y Educación.

Madeira, L. M., Teixeira, M. R., Almeida, A. & Carvalho, F. (2024).

Poderá o CO₂ atmosférico funcionar como agente neutralizante no tratamento de águas residuais? *Ualgoritmo*, 53.

<https://sapientia.ualg.pt/bitstream/104000.1/12772/17/UALGORITMO%ESPECIAL.pdf#page=55>

Mulet-Hing, M., Bazán De Los Santos, M., Giralt-Sánchez, A.,

Ramírez-Sola, R. (2023). Propuesta de sistema de automatización para el circuito de aprovechamiento de rechazo en la planta de cienes carbonatados. *Tecnología Química*, 43(3), 533-552.

<https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5360>

Parejo-Gutiérrez, J. A. (2021). Automatización del sistema de

neutralización de aguas residuales mediante el control de PH en una termoeléctrica.

<https://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/3136/1/2020JulioAlbertoParejoGutierrez.pdf>

Pérez-Rosales, A. (2015). Cinética de la acidificación de suelos calcáreos. [http://](http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2852)

colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/2852

Perry`S, R. H. and Chilton C. H. (1999). *Chemical Engineers Handbook*. University of Kansas.

Sosa-Martínez, M. & Bassas, A. (2001). Recuperación de metales del licor de desecho WL en forma de compuestos químicos. *Minería y Geología*, 18(3-4), 107-112.

<https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/225>

Sosa-Martínez, M. & Bassas, A. (2006). Cinética de precipitación de los sulfuros con hidrógeno sulfuro de sodio en el licor de desecho (WL). *Revista Cubana de Química*, 18(1), 318-319.

<https://go.gale.com/apps/doc/A308436194/IFME?Scholar&xid=0ec07156>

Sosa-Martínez, M. (2006). *Regularidades físico químicas en la recuperación de las principales especies metálicas del licor residual de la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba, Moa Nickel. S.A.* (Tesis doctoral, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa).
<http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1316>

Zelikman, A. N., Bolman, G. M. & Beliaeuskaia, L. V. (1975). *Teoría de los Procesos Hidrometalúrgicos*. Moscú: Editorial Metalurgia.

Conflicto de intereses

No se declaran.

Contribución de los autores

MESM: idea del estudio, parte experimental, redacción del original, interpretación de resultados, revisión y corrección de la versión final, corrección y actualización de las referencias. MGR: Redacción del original, interpretación de resultados, aprobación de la versión final. NGF: parte experimental, revisión y corrección de la versión final, corrección y actualización de las referencias. MAPM: experimentos, revisión de la literatura, revisión y aprobación de la versión final.