

Efectividad del ácido sulfúrico para la lixiviación extractiva de Níquel de escoria siderúrgica

Mariangélica Morales, Moises Leal, Xiomara Mendez y Arelis Arrieta

Escuela de Química, Facultad de Ingeniería. Universidad Rafael Urdaneta.
Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela.

Correo electrónico: moiseslealduarte@gmail.com, xiomep@hotmail.com, ingarelisarrieta@gmail.com

Recibido: 04-11-2019

Aceptado: 12-01-2020

Resumen

El objetivo de esta investigación consistió en analizar la efectividad del ácido sulfúrico para la lixiviación extractiva del Níquel en muestras de escoria siderúrgica del estado Aragua. En relación a lo anterior, esta investigación se consolidó mediante varios procesos de lixiviación llevados a cabo a 0.200, 0.250 y 0.300 kg/L y a temperaturas de 29 y 85°C, obteniendo así una correlación gráfica entre estas variables y el efecto que tienen sobre el rendimiento del Níquel. Siendo que, de las dos variables independientes la temperatura resultó ser la que presentó una mayor significancia en la variación del mismo. Lo anterior pudo ser comprobado mediante un análisis ANOVA, del cual se obtuvo que la temperatura es estadísticamente significativa dado que su valor p es de 0,0271. Conjuntamente se obtuvo un rendimiento de 115.56 mg /kg y un porcentaje de extracción 48,92%, obtenido a 0,300 kg/L y 85°C.

Palabras claves: Lixiviación, escoria siderúrgica, Níquel, rendimiento.

Effectiveness of the sulfuric acid for extractive leaching of nickel from siderurgical slag

Abstract

The Objective of this research was to analyze the effectiveness of sulphuric acid for the extractive leaching of nickel in samples of steel slag from the state of Aragua. In relation to the above, this research was consolidated by several leaching processes carried out at 0.200, 0.250 and 0.300 kg/L and at temperatures of 29 and 85 °C, obtaining a graphical correlation between these variables and the effect they have on nickel performance. Whereas, of the two independent variables, temperature turned out to be the one that presented the greatest significance in its variation. The above could be verified by an ANOVA analysis, from which it was obtained that the temperature is statistically significant since its p-value is 0.0271. Together they were.

Keywords: Leaching, siderurgical slag, Nickel, performance.

Introducción

Actualmente la acumulación de desechos sólidos industriales se ha traducido en un importante problema ambiental, debido a que estos metales en el ambiente se degradan de su estado metálico al oxidarse. Estos metales oxidados representan en el ambiente toxinas que envenenan a los animales y plantas de los diferentes ecosistemas con los que entran en contacto. De hecho, para el año 1993 ya existían una gran cantidad de contaminantes según la Environmental Protection Agency (EPA) Davis y Masten [1], tales como Antimonio (Sb), Arsénico (As), Berilio (Be), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Mercurio (Hg), Níquel (Ni) entre otros. Dicho efecto también se extrapola a los seres humanos, cuyo contacto con los mismos causa peligrosas enfermedades.

Es por lo anterior, que dicha situación se ha convertido en un importante tema de interés para el mundo de la ingeniería. Un ejemplo de estos desechos sólidos industriales se encuentra en el estado Aragua procedente de la fabricación del ferro-Níquel, conocida como escoria siderúrgica. Dicho producto, proviene de la capa de desecho del proceso de fundición-reducción, siendo este rico en Magnesio y Silicio que forman parte del fundente utilizado, así como, trazas de Níquel, Hierro, Calcio y Aluminio principalmente.

En pro de solucionar esta situación esta investigación consiste en probar un método que permita darles uso a estos desechos, obteniendo como beneficio adicional la recuperación de Níquel. Este método a probar es la lixiviación, siendo esta una operación unitaria definida por Perry, Green y Malonoy [2] (19-53) como "el retiro de una fracción soluble en forma de solución a partir de una fase sólida permeable e insoluble con que se asocia". Siendo que, para el caso de esta investigación se plantea el uso de ácido sulfúrico para la extracción de Níquel de la muestra de escoria siderúrgica.

Un antecedente notorio de esta investigación Gainza, Sánchez y Domínguez [3] titulada como "Lixiviación de Níquel y Cobalto en las colas al variar diferentes parámetros de estudio". Ellos realizaron el proceso de extracción sobre colas, las cuales son una mezcla de desechos sólidos emanados del proceso carbonato amoniacal, proceso utilizado para la recuperación de Cobalto de materia prima que solo logra extraer un 40% del Cobalto. Lo cual dado al precio, utilidad y potencial como contaminante de estos metales es inadmisibles. De esta manera, este trabajo propuso como objetivo experimentar la lixiviación del Níquel y el Cobalto empleando como agente lixivante disoluciones de ácido sulfúrico, variando parámetros de estudio como la concentración de ácido (40-100 g/L), temperatura (27-90 °C), grado de agitación del sólido (500-110 rpm), relación líquido sólido (1-3), obteniendo como las mayores extracciones de Níquel (41,2 %) y Cobalto (48,6%) en las colas se obtienen con una relación L/S=3, 90°C de temperatura, concentración del ácido sulfúrico de 100 g/L, en 1 hora con velocidad de agitación de 500 rpm y presión atmosférica.

Teniendo esto como referencia, se estableció una temperatura de trabajo 5 grados por encima que la utilizada por estos autores, con la finalidad de constatar si se obtenía un proceso más efectivo con una temperatura mayor a la de los mismos, obteniendo un producto en forma de gel (posiblemente debido a las pérdidas por vaporización) que no se podía analizar fácilmente, razón por la cual se seleccionó 85 grados centígrados como temperatura de operación y una temperatura menor, de 29 grados centígrados como temperatura ambiente.

Otra investigación importante es Barrera, Endara, De la Torre y Manangón [4] titulada "Recuperación de Níquel, Vanadio y Molibdeno del catalizador agotado de la unidad de craqueo catalítico fluidizado (FCC)". En la cual, se realizó el estudio de la lixiviación del catalizador agotado de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) de la Refinería Esmeraldas con el objetivo de recuperar Níquel, Vanadio y Molibdeno. Para esto, se realizó la caracterización física, química y mineralógica del catalizador, posteriormente se realizó la lixiviación de este catalizador con diferentes soluciones de ácidos orgánicos (oxálico, cítrico y tartárico), ácidos inorgánicos (sulfúrico, clorhídrico, nítrico y fluorhídrico) y bases (hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno). De la misma forma, variando la concentración del agente lixivante (50, 100, 150, 200 y 250 g/L), porcentaje de sólidos (1, 10, 20 y 30 %) y tiempo de procesos (0, 0.5, 1, 3, 6, 12 y 24 horas). Los mejores resultados de recuperaciones fueron con el ácido sulfúrico a 250 g/L, 10% de sólidos y 3 horas de residencia del sólido, tiempo en que se alcanza el equilibrio del sistema.

Tomando en consideración lo anterior, se decidió trabajar con la condición óptima de dichos autores, así como con una concentración más baja y una más alta con respecto a la misma, resultando en que se llevó a cabo la investigación a concentraciones de ácido de 0.200, 0.250 y 0.300 kg/L, para obtener una curva que representara el rendimiento del Níquel versus concentración de ácido, tomando como referencia central la concentración utilizada por estos autores.

Con respecto a las investigaciones anteriores, estas permiten resaltar la efectividad que tiene el ácido sulfúrico como agente lixivante en la extracción de metales como el Níquel, además, permiten demostrar que parámetros como la concentración del agente lixivante, temperatura, la relación sólido-líquido y el tiempo de residencia, son variables importantes de estudio que se pueden considerar en investigaciones relacionadas con procesos de lixiviación.

Siendo así que, esta investigación tiene como objetivo determinar la efectividad que tiene este ácido en la extracción del Níquel de la escoria siderúrgica del estado Aragua, llevando a cabo el proceso de lixiviación a las diferentes temperaturas y concentraciones de las soluciones lixivantes ya mencionadas, con el fin de determinar el efecto que tienen estas variables sobre el rendimiento del metal extraído. Con lo que, posteriormente se realizaría además un análisis estadístico para determinar cuáles son las condiciones óptimas de entre los rangos estudiados.

Por su parte esta investigación tiene como aporte científico develar la efectividad de este proceso y las condiciones óptimas a las que puede ser llevado a cabo el mismo, siendo esto un apoyo hacia futuras investigaciones que deseen optimizar este proceso. En este sentido, el aporte práctico se ve reflejado en que puede ser una base para el diseño de pantas recuperadoras de Níquel de yacimientos secundarios de baja ley. Pudiendo esto ser de utilidad para el aprovechamiento de desechos industriales, lo cual se deriva en una disminución de la contaminación que estos representan.

Materiales y Métodos

Primeramente, para la determinación de las concentraciones de metales en la muestra de escoria siderúrgica se procedió a utilizar las técnicas de digestión, para eliminar posibles interferencias en pasos posteriores, y la espectrofotometría de absorción atómica definida por Harris [5] como "el uso de luz para medir las concentraciones de sustancias químicas" (p. 4). Haciendo uso del espectrofotómetro de absorción atómica marca Perkin ELMER 3300 y los métodos de la Environmental Protection Agency (EPA) 3050B [6] y de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) [7] 2769-91. Dichas normas se explican a continuación.

Norma EPA 3050B.

El siguiente es un resumen del procedimiento especificado en la norma para la digestión de muestras sólidas.

Medir 1 g de la muestra sólida.

Agregar 10 ml de ácido nítrico 1:1 y calentar a reflujo por 10 minutos.

Agregar 5 ml de ácido nítrico concentrado y calentar a reflujo hasta que la digestión sea completa (indicada por el aclaramiento de la solución), posteriormente evaporar hasta que queden 5 ml y enfriar.

Agregar 2 ml de agua destilada y 3 ml de peróxido de hidrógeno al 30%, continuar y agregar 1 ml adicional de peróxido de hidrógeno, para posteriormente dejar evaporar hasta 5 ml.

Filtrar y aforar a 100 ml en un matraz aforado.

Posteriormente, se procedió a medir las concentraciones de los metales de interés (Calcio, Aluminio, Magnesio, Silicio, Hierro y Níquel), mediante espectrofotometría de absorción atómica haciendo uso de la norma explicada a continuación.

Norma COVENIN 2769-91.

Instalar una lámpara de cátodo hueco para el metal deseado, en el instrumento y regular el dial de longitud de onda de acuerdo al manual del fabricante.

Regular el ancho de ranura del haz de luz de acuerdo a las recomendaciones del fabricante, de acuerdo al elemento que se va a determinar.

Encender el instrumento y aplicar a la lámpara de cátodo hueco la corriente sugerida por el fabricante, posteriormente dejar calentar el instrumento hasta que se estabilice la fuente de energía entre 20 y 30 minutos.

Optimizar la longitud de onda regulando el dial respectivo hasta obtener la mayor ganancia de energía.

Alinear la lámpara siguiendo las instrucciones del fabricante, lo cual hace referencia a alinear el haz de luz de manera tal que este pase completamente por la llama donde se están atomizando los elementos y que el haz apunte hacia el receptor de equipo.

Instalar y regular la posición del mechero.

Abrir el paso de aire y regular la velocidad de flujo conforme a la especificación del fabricante, a fin de obtener sensibilidad máxima para el metal que se está determinando.

Abrir el paso del acetileno y regular la velocidad del flujo en el valor especificado, para seguidamente encender la llama.

Aspirar una solución patrón y regular la velocidad de aspiración del nebulizador.

Atomizar un patrón (generalmente uno cercano a la mitad del intervalo de trabajo lineal) y regular el mechero para obtener respuesta máxima.

Registrar la absorbancia de este patrón e identificar la lámpara usada.

Por último, medir un conjunto de patrones de diferentes concentraciones del metal que se desea determinar para que el equipo pueda realizar una curva de calibración interna de dicho metal y medir la absorbancia de la muestra problema, para que así este pueda estimar la concentración del metal deseado en esta.

Procedimiento de lixiviación.

Como procedimiento central de la investigación se tiene la lixiviación, realizada a temperaturas de 29 y 85 °C, y con tres concentraciones de solución ácida a 0.200, 0.250 y 0.300 kg/L; Siendo este procedimiento guiado por el trabajo de investigación de los autores Gainza, Sánchez y Domínguez [3], los cuales realizaron este mismo proceso sobre un material de desecho semejante al tratado en este estudio, razón por la cual se seleccionó su procedimiento.

Primeramente, se procedió a preparar la muestra de escoria siderúrgica, llevando a cabo un pretratamiento. Iniciando con un proceso de mezclado de la muestra, seguido de molienda, haciendo uso de mortero y mazo de porcelana. Consecuentemente, se prosiguió con un proceso de tamizado, haciendo uso de tamices de 200 mm y tamiz para polvo, para disminuir el volumen de los granos y aumentar su área específica. De forma tal, que al momento de proceder a la lixiviación se facilitará un mejor contacto sólido

líquido y que no hubiese influencia sobre los resultados por la falta de homogeneidad que normalmente tienen los materiales sólidos. Para este proceso se usaron los materiales de la figura 1.



Figura 1. Materiales para el pretratamiento de la escoria

En función de lo anterior, para ambas condiciones se trataron las muestras, sólidas y líquidas, de la misma forma inicialmente, con un proceso de pesado en la balanza analítica marca OHAUS modelo Explorer EX623 con una exactitud de ± 0.001 g, midiendo aproximadamente 50 gramos de sólido y 150 gramos de solución en cada caso, de manera que se obtuviese una relación sólido-líquido de 1:3.

Para el proceso a 29°C se mezclaron directamente luego del pesado, el sólido con la solución ácida correspondiente para cada muestra de 0.200, 0.250 y 0.300 kg/L en un beaker de 250 ml, para seguidamente empezar la agitación de la misma haciendo uso de una plancha de agitación-calentamiento marca BOECO modelo MSH 300. Una vez pasado el tiempo de operación seleccionado de una hora, se llevó a cabo el proceso de filtrado, haciendo uso de papel de filtro, embudos y el soporte universal. Por último, se trasvasó el filtrado a un cilindro de 250 ml.

Por su parte con el proceso a 85°C , se realizó un precalentamiento del líquido lixivante a la temperatura de operación y se mantuvo la misma durante toda la experiencia. Además, otra diferencia fundamental recae en el tipo de instrumento usado para realizar el mismo, esto consistió en el uso de un matraz Erlenmeyer 250 ml y una agitación haciendo uso de la varilla de vidrio, en lugar de un beaker y la plancha de agitación. Este cambio fue llevado a cabo debido a la obtención de un gel no analizable, probablemente obtenido por las pérdidas por vaporización que se presentaron durante el proceso de calentamiento.

Como última actividad del diseño experimental, una vez obtenido el líquido lixivante, este fue sometido a un proceso de digestión, para un posterior análisis en el espectrofotómetro de absorción atómica, según los métodos especificados en la norma EPA 301A[8] y en la norma COVENIN 2769-91, respectivamente.

EPA 3010A.

Medir 100 ml de solución acuosa y trasvasar a un beaker de 250 ml.

Agregar 3 ml de ácido nítrico concentrado y cubrir con un vidrio reloj.

Colocar en una plancha de calentamiento o baño de María, hasta que quede un volumen pequeño de líquido de 5 ml.

Enfriar la solución y agregar 3 ml de ácido concentrado nuevamente.

Calentar y agregar ácido nítrico si es necesario hasta completar la digestión de la muestra (generalmente indicado por un cambio de color de la solución, a un tono más claro).

Enfriar la solución y agregar ácido clorhídrico 1:1, de manera de que sea el 10% del volumen de solución final.

Cubrir el beaker y dejar en calentamiento por 15 minutos más.

Si se presentan precipitados, filtrar la solución y verificar que la concentración final del ácido sea del 10%.

Colocar en un matraz aforado de 100 ml, y completar hasta el aforo con agua destilada.

Conforme a los pasos explicados anteriormente, se realizó el proceso de digestión ajustando este a las cantidades de muestra obtenidas de las lixiviaciones realizadas. Siendo que, se midieron 50 ml de muestra, esto como consecuencia de que los volúmenes obtenidos de líquido lixiviado no fueron mayores a 70 ml en su mayoría. Debido a esto para la realización del cálculo de los rendimientos de Níquel, se incluyó un factor de dilución de 100 ml sobre 50 ml, que representa el volumen final al que se aforaron los productos digeridos sobre los volúmenes de muestra que se obtuvieron del proceso de lixiviación.

Análisis estadístico.

Por último, se utilizó el programa estadístico Statgraphics [11], que es una herramienta de análisis de datos que combina una amplia gama de procedimientos analíticos con gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis que puede ser aplicado en cada una de las fases de un proyecto, así mismo, la base del software incluye estadística descriptiva, como tabulación y frecuencias de cruces estadísticas de dos variables, además de pruebas T, ANOVA y de correlación, entre otras muchas funciones.

Este mismo fue usado para calcular los rendimientos y los porcentajes de extracción a las diferentes condiciones estudiadas, haciendo uso del mismo para posteriormente realizar una gráfica de rendimiento vs concentración de los respectivos agentes lixiviantes usados en cada caso y a las diferentes temperaturas del proceso, obteniendo además una regresión polinomial, que se ajusta al comportamiento de estas variables. Así mismo, se realizó un análisis Analysis of Variance (ANOVA) para determinar si las variables independientes tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el rendimiento del Níquel y se utilizaron los porcentajes de extracción para discernir sobre las mejores condiciones operacionales.

Resultados y Discusión

Posteriormente, a la obtención de las concentraciones de Níquel en las muestras lixiviadas y digeridas, se procedió a realizar los cálculos pertinentes para determinar los rendimientos del Níquel obtenidos a las diferentes temperaturas del proceso y concentraciones de la solución ácida utilizadas. En este sentido, para calcular el rendimiento primero se colocaron los nombres a cada columna, seguidamente se multiplicó la concentración obtenida por el factor de dilución 100/50 explicado en el apartado de digestión, para posteriormente multiplicar por el volumen de líquido lixiviado y por último dividir entre la masa de muestra de escoria siderúrgica que se expuso al agente lixivante en cada uno de los casos tratados.

Consecuentemente, para cada proceso de cálculo, se eligió con el cursor la columna donde se iban a guardar los resultados, se presionó click izquierdo, se seleccionó la opción de generar datos y se introdujo la fórmula de cálculo. Lo cual puede ser observado mediante la figura 2.

Col_1	volumen en ml	volumen L	concentración en mg/L Ni	xfactor de dilución para Ni	mg de Ni	Col_7
dtamb 200g/l	83	0,083	6,60	13,20	1,096	
dtamb 250g/l	102	0,102	14,90	29,80	3,040	
dtamb 300g/l	73	0,073	23,10	46,20	3,373	
t85 200g/l	68	0,068	31,70	63,40	4,311	
t85 250g/l	98	0,098	24,60	49,20	4,822	
dt85 300g/l	107	0,107	27,00	54,00	5,778	

STATGRAPHICS Centurion - graficas.sgp						
Comparar Relacionar Pronósticos CEP DDE SnapStats!! Herramientas Ver Ventana Ayuda						
C:\Users\pc\Documents\moises\graficas.sgd						
Concentración de ácido Kg/L	mg Ni a 29 °C	mg Ni a 85 °C	peso de la muestra a Kg	peso de la muestra a 85 en kg	rendimiento de Ni mg/kg amb	rendimiento de Ni mg/kg 85°C
0,200	1,096	4,311	0,050007	0,050005	21,91	86,21
0,250	3,040	4,822	0,050001	0,050004	60,79	96,42
0,300	3,373	5,778	0,050005	0,050000	67,44	115,56

Figura 2. Rendimientos calculados

Seguidamente, estos datos fueron graficados para observar el comportamiento de la variable dependiente, rendimiento, con respecto a las variables independientes de esta investigación, temperatura del proceso de lixiviación y concentración del agente lixivante. Esta actividad fue realizada en el programa Excel y se presenta a continuación en la figura 3.

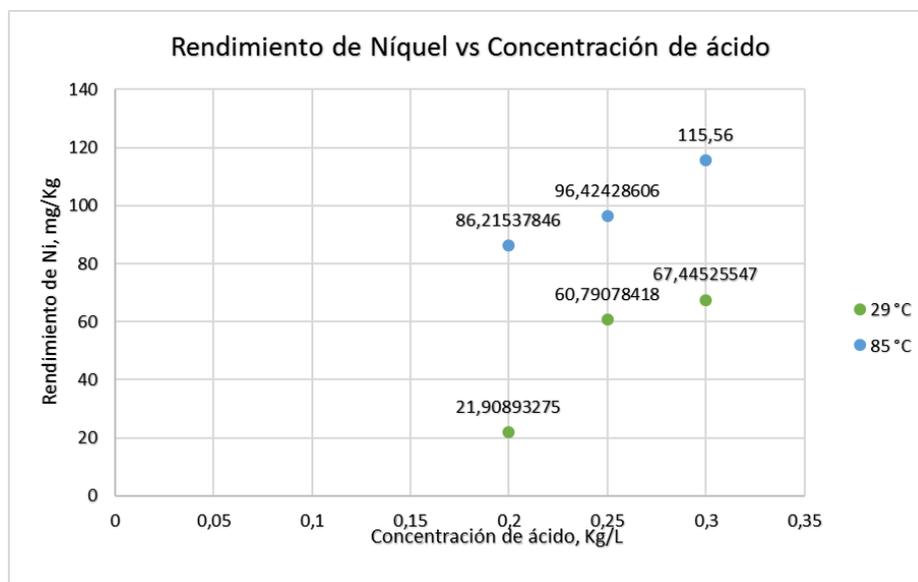


Figura 3. Rendimiento de Níquel obtenido por lixiviación a dos temperaturas y tres concentraciones de ácido

De las gráficas anteriores, se observó el comportamiento esperado, ya que, al haber mayor cantidad de moles de ácido en la solución, se forma una mayor cantidad de sales sulfatadas que disminuyen la concentración efectiva de los metales en la solución. Lo cual según Chang y College [9] por principio de Le Chatelier, específicamente por el efecto del ion común, aumenta la solubilidad de estos componentes en la solución para reestablecer el equilibrio de los mismos que se ven afectados por la reacción en serie de formación de sales con el ion sulfato.

Con respecto a la otra variable independiente estudiada, se tiene que la temperatura afecta significativamente la cantidad de metal extraído por el agente lixiviante, esto se confirma al observar que las líneas compuestas por las experiencias realizadas a 85°C presentan un rendimiento bastante superior en contraste con las realizadas a temperatura ambiente. Lo anterior se explica debido a que la solubilidad de los metales es directamente proporcional a la temperatura Domic [10].

Del análisis de varianza (ANOVA), se obtuvo que el valor de probabilidad crítica fue de 0.0271 para la temperatura, siendo que este fue menor al nivel de significancia de 5%, lo que significa que con un 95% de confianza esta variable es significativa estadísticamente para el rendimiento. De igual forma, se obtuvo que la concentración de ácido de la solución lixiviante no es significativa estadísticamente para el rendimiento con un 95% de confianza con un valor p de 0.1250.

Como se mencionó anteriormente se llevó a cabo una regresión polinomial con la finalidad de obtener una ecuación que relacione directamente al rendimiento del Níquel en función de la concentración a cada una de las temperaturas estudiadas, lo cual se muestra en las figuras 4 y 5.

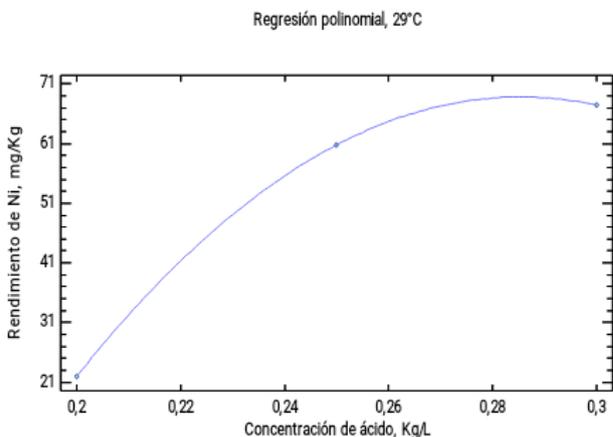


Figura 4. Ajuste por regresión polinomial a 29 °C

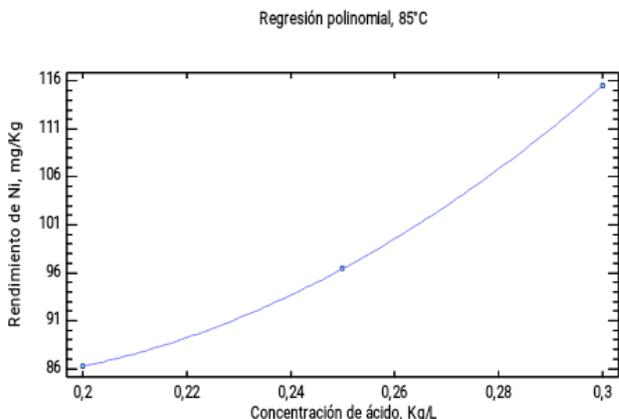


Figura 5. Ajuste por regresión polinomial a 85 °C

Ambas graficas mostradas anteriormente, muestran la tendencia ascendente que tiene el rendimiento con respecto al aumento de la concentración, así mismo se puede respaldar los resultados obtenidos mediante el análisis ANOVA, al comparar la gran diferencia que tienen las escalas de ambas gráficas, que varían de 21 a 71 y de 86 a 116 mg/kg, para los procesos a 29 y 85 °C respectivamente. A continuación, se muestran las ecuaciones 1 y 2 que reflejan el comportamiento directo que tiene el rendimiento con respecto a la concentración, a 29 y 85 °C respectivamente.

$$R_{Ni} = -455.892 + 3678.1 \cdot A - 6445.48 \cdot A^2 \quad R^2 = 1 \tag{1}$$

$$R_{Ni} = 134.648 - 599.234 \cdot A + 1785.36 \cdot A^2 \quad R^2 = 1 \tag{2}$$

Para ambas ecuaciones se especifican sus símbolos a continuación.

Rendimiento de Ni, mg de Ni/kg de muestra

Concentración de la solución ácida, kg/L

Consecuentemente con lo anterior, los resultados obtenidos colindan con los reportados Barrera, Endara, De la Torre y Manangón [4] que, al probar con varias concentraciones de diferentes ácidos, demostraron que a mayor concentración de estos era más eficiente la extracción de los metales. Siendo que, sus mejores resultados se dieron a 250 g/L de ácido sulfúrico, la mayor de las concentraciones utilizadas por ellos.

Este mismo efecto fue reportado en esta investigación, puesto que las condiciones óptimas a las que se obtienen los resultados más beneficiosos, es a las condiciones máximas de ambas variables estudiadas. Dichas condiciones son de 85°C y 0.300 kg/L de solución ácida, siendo el rendimiento del Níquel en estas condiciones de 115,56 mg/kg, esto se observó en la figura 6.

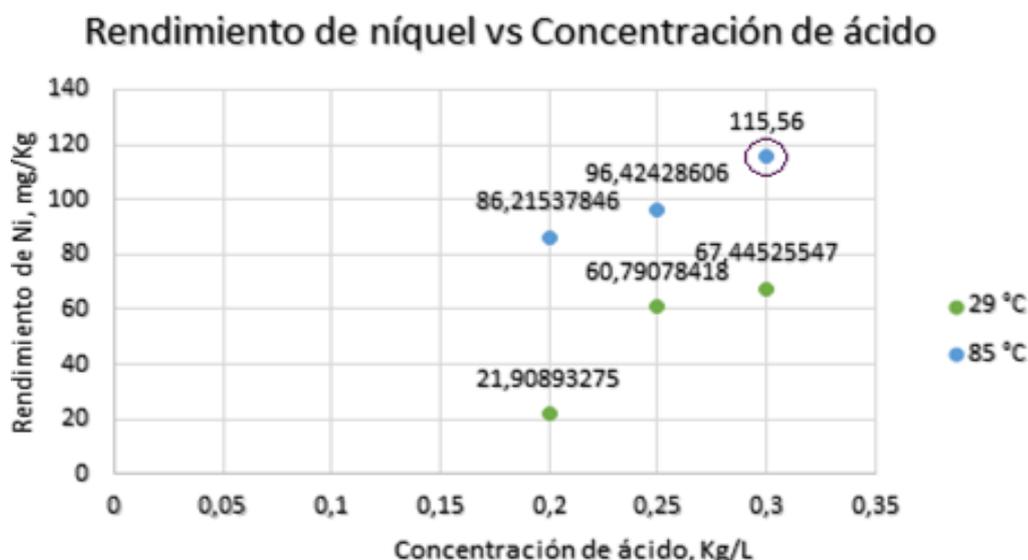


Figura 6. Mejor condición de operación

Así mismo, para darle un peso mayor sobre los resultados y constatar el efecto que tuvo el ácido sulfúrico sobre el Níquel en la escoria, se procedió a calcular los porcentajes de extracción del mismo a cada una de las concentraciones del agente lixivante y temperaturas del proceso. Esto se llevó a cabo debido a que, pese a que el rendimiento es útil para comparar entre resultados y ver la eficacia del proceso, este no nos da una idea de la efectividad del proceso respecto a la masa inicial de Níquel antes de la

extracción. Cabe destacar que, para el cálculo fue necesario abstraer la masa final de Níquel en la muestra y la masa inicial, que se obtuvo al multiplicar la concentración inicial de Níquel en el sólido y la masa de muestra sólida sometida al proceso de lixiviación. Este último cálculo pudo hacerse a través de la ecuación 3. Los datos mencionados anteriormente para el mismo se muestran en la figura 7.

$$\% \text{Extracción} = \frac{M_F}{M_I} \cdot 100 \quad (3)$$

M_I = Masa inicial de Níquel en el sólido, mg

M_F = Masa final de Níquel en el líquido, mg

Col_1	volumen L	concentración en mg/L Ni	xfactor de dilución para Ni	masa final de Ni	masa de sólido lixiviado	masa inicial de Ni	%extracción
dtamb 200g/l	0,083	6,60	13,20	1,096	0,050007	11,813	9,275
dtamb 250g/l	0,102	14,90	29,80	3,040	0,050001	11,811	25,735
dtamb 300g/l	0,073	23,10	46,20	3,373	0,050005	11,812	28,552
t85 200g/l	0,068	31,70	63,40	4,311	0,050005	11,812	36,498
t85 250g/l	0,098	24,60	49,20	4,822	0,050004	11,812	40,820
dt85 300g/l	0,107	27,00	54,00	5,778	0,050000	11,811	48,920

Figura 7. Porcentajes de extracción calculados

Haciendo uso de la ecuación y el instrumento de recolección de datos plasmados anteriormente, se obtuvo un porcentaje de extracción de 48,92% en las condiciones máximas de las variables independientes, 85°C y 0.300 kg/L. De forma tal que, puede asumirse que estas representan las condiciones operacionales óptimas dentro del rango evaluado en esta investigación, ya que son las condiciones más eficaces y eficientes para el proceso.

Conclusiones

La temperatura es un factor determinante en los procesos de lixiviación. Ya que, si la misma es muy cercana al punto de ebullición puede provocar considerables pérdidas por vaporización, que podría en algunos casos resultar en productos demasiados viscosos como para ser analizados por un espectrofotómetro. Cosa que, se constató al usar una temperatura de proceso de 95°C en la lixiviación. Razón por la cual en la misma se disminuyeron 10°C, trabajando así con 85°C.

Se observó de forma gráfica que las variables independientes manipuladas, concentración de ácido y la temperatura del proceso, tienen un comportamiento proporcional a la variable dependiente. Ya que, mientras mayores fueron los valores utilizados para las mismas, mayores fueron los rendimientos, y así mismo los porcentajes de extracción del Níquel. Esto a su vez, se confirma mediante las regresiones polinomiales obtenidas.

Se obtuvo que la concentración de ácido en el agente lixivante no es estadísticamente significativa para el rendimiento del Níquel, mientras que la temperatura tuvo un efecto significativo con un 95% de confianza según el análisis ANOVA realizado.

Los mejores resultados fueron a 85°C y 0.300 kg/L de solución ácida, con un rendimiento de 115.56 mg/Kg de Níquel con un porcentaje de extracción del mismo de 48,92%. Resultado esperado ya que eran las condiciones que en teoría favorecían más al proceso de extracción.

Referencias Bibliográficas

[1] Davis, M. y Masten, S. (2004). Ingeniería y ciencias ambientales (3era Ed). Editorial McGraw-Hill: México D. F.

[2] Perry, R., Green, D. y Malonoy. (Ed.). (1996). *Perry manual del ingeniero químico* (6ta Ed.). Editorial McGraw-Hill: Caracas.

[3] Gainza, Y., Sánchez, C. y Domínguez, A. (2014). Lixiviación de Níquel y cobalto en las colas al variar diferentes parámetros de estudio. *Tecnología química*, 34(3), 283-295. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S222461852014000300007

[4] Barrera A., Endara D., De la Torre E. y Manangón L. (2015). Recuperación de Níquel, Vanadio y Molibdeno del Catalizador Agotado de la Unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC). *Revista Politécnica*, 36(2), 59-66. Recuperado de: <https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen36/tomo2/RecuperaciondeNiquelVanadioyMolibdenodelCatalizador.pdf>

[5] Harris, D. (1992). *Análisis químico cuantitativo* (3 Ed). Grupo Editorial Iberoamérica, S. A.: México D.F.

[6] Environmental Protection Agency (EPA, 1996). *Method 3050B: acid digestion of sediments, sludges, and soils*. Washington D. C., Estados Unidos. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/epa-3050b.pdf>

[7] Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN, 1991). *COVENIN 2769-91: Aguas naturales, industriales y residuales. Determinación de metales por espectrofotometría de absorción atómica*. Caracas, Venezuela. Recuperado de <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/2769-91.pdf>

[8] Environmental Protection Agency (EPA, 1992). *Method 3010A: acid digestion of aqueous samples and extracts for total metals for analysis by FLAA or ICP spectroscopy*. Washington D. C., Estados Unidos. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3010a.pdf>

[9] Chang, R. y College, W. (2002). *Química* (7ma Ed.). Editorial McGraw-Hill: Santafé de Bogotá,

[10] Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia, fundamentos, procesos y aplicaciones*. Auto-editado: Santiago de Chile.

[11] Statgraphics (Sf.). *Statgraphics Centurion XVIII*. Recuperado de <https://statgraphics.net/>

Nota Especial

Artículo de investigación derivado del Trabajo Especial de Grado, titulado: EFECTIVIDAD DEL ÁCIDO SULFÚRICO COMO AGENTE LIXIVIANTE PARA LA EXTRACCIÓN DE NÍQUEL DE MUESTRAS DE ESCORIA SIDERÚRGICA, presentado ante la Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela