

Solubilización de níquel y cobalto presente en un escombros laterítico mediante el empleo de *Acidithiobacillus Thiooxidans*

Solubilization of nickel and cobalt in lateritic overburden by *Acidithiobacillus Thiooxidans*

Alexander Govin Sanjudo^{a,*} (0000-0002-9148-2484)
Güendis Leal Sanabria (0000-0003-0405-5802)
María Isabel Sánchez López (0000-0003-3982-486X)
María Caridad Ramírez Pérez^b (0000-0003-1262-7057)
José Alberto Pons Herrera^b (0000-0002-5265-2962)

^a Universidad de La Habana.

^b Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

* agovin@fbio.uh.cu

Recibido: 10 de diciembre de 2021;

Aceptado: 05 de mayo de 2022;

RESUMEN

El tratamiento de minerales de baja ley y de residuales sólidos mineros constituye un desafío para la comunidad científica, teniendo en cuenta el impacto negativo que tiene la acumulación de los mismos en los ecosistemas. En este sentido el empleo de microorganismos para la extracción de metales a partir de minerales oxidados ha ganado gran atención en los últimos años al constituir una estrategia más eficiente, económica y amigable con el medio ambiente. El siguiente trabajo tuvo como objetivo evaluar la solubilización de níquel y cobalto contenidos en escombros lateríticos mediante el empleo *Acidithiobacillus thiooxidans*. Se utilizó la cepa *A. thiooxidans* DSM 14887 y el escombros laterítico procedente del yacimiento laterítico de Moa (escombros de Camarioca norte Zona 12). Se evaluó la solubilización de Ni (II) y Co (II) en sistemas con diferentes concentraciones del mineral (5%, 10% y 20% p/v). Además, se evaluó el bioácido producido por la bacteria, como agente lixivante en la recuperación de níquel y cobalto. En presencia de 5% (p/v) de densidad de pulpa del mineral se lograron los mayores porcentajes solubilización (71,4% de Co y 48,5% de Ni). En los cultivos se detectó un aumento en la concentración de Fe (II), indicativo de la solubilización reductiva del Fe (III) contenido en el mineral. Los porcentajes de extracción del cobalto y níquel disminuyeron al utilizar el bioácido bacteriano, lo que resalta la importancia de la bacteria en el proceso extractivo. El empleo de la cepa *A. thiooxidans* en la recuperación de metales constituye una alternativa promisorio para el tratamiento de los minerales oxidados de baja ley.

Palabras claves: biolixiviación, minerales oxidados, densidad de pulpa, bioácido.

ABSTRACT

The treatment of low-grade minerals and solid mining waste constitutes a challenge for the scientific community, because of the negative impact that their accumulation has on ecosystems. The use of microorganisms for the extraction of metals from oxidized minerals has gained great attention in recent years as it constitutes a more efficient, economical and environmentally friendly strategy. The aim of this research was to evaluate the solubilization of nickel and cobalt contained in lateritic overburden using *Acidithiobacillus thiooxidans*. The strain *A. thiooxidans* DSM 14887 and the lateritic overburden from the lateritic deposit of Moa (overburden of Camarioca north Zone 12) were used. The solubilization of Ni (II) and Co (II) was evaluated in systems with different concentrations of the mineral (5%, 10% and 20% w/v). In addition, was evaluated the bioacid produced by the bacteria as a leaching agent in the recovery of nickel and cobalt. The highest solubilization percentages were achieved (71.4% Co and 48.5% Ni) by using 5% (w/v) of mineral pulp density. An increase in Fe (II) concentration was detected in the cultures, it indicative of the reductive solubilization of Fe (III) contained in the mineral. The extraction percentages of cobalt and nickel decreased when using the bacterial bioacid. The use of the *A. thiooxidans* strain in the recovery of metals constitutes a promising alternative for the treatment of low-grade oxidized minerals.

Keywords: bioleaching, oxides ores, pulp density, bioacid.

INTRODUCCION

El níquel y el cobalto se encuentran entre los metales más utilizados en la industria moderna (Chen *et al.*, 2020). El níquel metálico puro o sus compuestos se utilizan en el galvanizado de metales, en la fabricación de baterías alcalinas, monedas, productos de soldadura, imanes, contactos eléctricos y electrodos, intercambiadores de calor y prótesis quirúrgicas y dentales (Ghosh & Paul, 2016). En el caso del cobalto se emplea en los teléfonos móviles, en los automóviles eléctricos, además en las baterías recargables. Aleaciones de cobalto se emplean en las tecnologías armamentista (producción de municiones, rotores y hélices de helicópteros), en implantes ortopédicos, moldes de implantes dentales y quirúrgicos (Baran, 2018).

Las mayores reservas de níquel en la litosfera están contenidas en las lateritas (más del 70%), estos son minerales oxidados en el que el níquel se encuentra asociado con minerales de hierro férrico como la goetita (a-FeO.OH) (Hallberg *et al.*, 2011). Cuba posee una de las mayores reservas de níquel y cobalto a nivel mundial, las que se ubican principalmente al noroeste de la isla, en Moa (Valcarce y Rojas, 2017). En esta región, se encuentra una industria minero- metalúrgica que explota la corteza ferroniquelífera para la extracción de níquel y cobalto. La mena laterítica ferruginosa que ingresa al proceso metalúrgico debe tener un contenido mínimo de 0,9 % (p/p) de níquel. En el caso de las menas con valores inferiores, se desechan y desde el punto de vista industrial constituyen las lateritas fuera de balance o escombros (Sánchez *et al.*, 2014). Los escombros lateríticos están formados por óxidos de hierro y además presentan níquel, cobalto, cromo y aluminio. Estos se consideran pasivos ambientales mineros y tienen un impacto negativo en el medio ambiente (Ramírez *et al.*, 2019). Estos residuales se sitúan en las cercanías de la propia mina y forman las conocidas escombreras las que, se estima, alcanzan volúmenes mayores de 90×10^6 t (Palacios & García, 2014).

El agotamiento de las reservas minerales a nivel mundial ha llevado a desarrollar estrategias para la explotación de los minerales de baja ley y los residuales de la industria minera y metalúrgica. En esta área, los métodos biotecnológicos han ganado gran interés demostrando mayor eficiencia con respecto a los métodos convencionales (Marrero *et al.*, 2016). Estas estrategias consumen menos energía, son más económicas debido a que comprenden menores costos de inversión y son más amigables con el medio ambiente (Feng *et al.*, 2019). La biolixiviación constituye uno de los procesos más utilizados en la biominería para el procesamiento de minerales (Yin *et al.*, 2018), permite la solubilización de metales presentes en una mena o concentrado mineral mediante el acción directa o indirecta de microorganismos (Erhlich, 1981; Gentina & Acevedo, 2016).

La biolixiviación de minerales sulfurosos se aplica desde hace más de cinco décadas, principalmente en la minería del cobre para el procesamiento de minerales de baja ley (Oliveira *et al.*, 2019). En esta área, los resultados a nivel de laboratorio, se han aplicado a escala industrial logrando recuperar cantidades significativas de metales a partir de minerales sulfurosos de baja ley (Tanaka, 2017; Yin *et al.*, 2018).

En el caso de los minerales lateríticos son difíciles de procesar por vía biológica a través de un mecanismo oxidativo (Hallberg *et al.*, 2011), por esta razón los estudios biotecnológicos en este campo aún permanecen a escala de laboratorio. Diferentes estrategias se aplican para la biolixiviación de níquel y cobalto de minerales oxidados entre estos se encuentran el empleo de hongos filamentosos los que excretan ácidos orgánicos como el ácido cítrico y el tartárico, considerados agentes lixiviantes (Coto *et al.*, 2005; Coto *et al.*, 2008; Ghosh & Paul, 2016; Petrus *et al.*, 2018). Entre las desventajas de esta estrategia se listan la formación de un complejo metal- ácido orgánico muy estable y la biosorción de los metales por las biomasas fúngicas (Marrero *et al.*, 2015a)

En las últimas décadas se fomenta el empleo de bacterias acidófilas quimiolitótrofas, principalmente *Acidithiobacillus thiooxidans* para el tratamiento de estos minerales (Hernández *et al.*, 2009; Coto & Schippers, 2011). Esta bacteria como resultado de la oxidación de azufre elemental y otras especies reducidas del azufre produce el ácido sulfúrico, el que se reconoce como un excelente agente lixiviante, que ataca el mineral mediante un proceso de acidólisis (Hernández *et al.*, 2009). También se aplican estrategias de disolución reductiva en condiciones de anaerobiosis donde se emplean bacterias acidófila como *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Smith *et al.*, 2017) y en condiciones aerobias con el empleo de *Acidithiobacillus thiooxidans* (Marrero *et al.*, 2015 a,b). En este último enfoque, no se requiere el

suministro de nitrógeno libre de oxígeno, para crear las condiciones anaerobias, por lo que representa una ventaja desde el punto de vista económico. En este sentido los estudios dirigidos al bioprocesamiento de escombros lateríticos empleando *Acidithiobacillus thiooxidans* y sus metabolitos constituyen una alternativa para el tratamiento de estos minerales, logrando su aprovechamiento integral y tributando con mejoras al medio ambiente. Teniendo en cuenta esto, el siguiente trabajo se trazó como objetivo: evaluar la solubilización de níquel y cobalto contenido en el escombros laterítico mediante el empleo la cepa *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 14887.

MATERIALES Y MÉTODOS

Microorganismo empleado

Se empleó la cepa *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 14887 de la Colección Alemana de Microorganismos y Cultivos Celulares (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen, DSMZ). Esta cepa se conservó en agua ácida (pH 2,5) y en dimetilsulfóxido al 7% (v/v) a -20°C.

Escombros laterítico

El escombros laterítico que se utilizó en este estudio, proviene de la zona de explotación minera Camarioca norte Zona 12 (E-Zona 12) en la región de Moa, Holguín, Cuba. La composición química del escombros se presenta en la tabla 1.

Tabla 1. Composición química del escombros laterítico Camarioca norte Zona 12 (Ramírez et al., 2019)
Composición química Concentración (%) (p/p).

Composición química	Concentración (%) (p/p)
CoO	0,070
MnO	0,597
MgO	0,241
SiO ₂	3,090
Al ₂ O ₃	14,069
Cr ₂ O ₃	2,701
Fe(Tot)	39,263
NiO	0,412
Fe ²⁺	0,106
Fe ³⁺	39,157

Solubilización de Ni (II) y Co (II) contenido en el escombros laterítico mediante *A. thiooxidans* DSM 14887.

La solubilización de Ni (II) y Co (II) contenido en los escombros lateríticos se estudió en sistemas con diferentes densidades de pulpa del mineral. La cepa *A. thiooxidans* DSM 14887 se cultivó en un medio salino suplementado (pH 2,5) con 1% (p/v) de azufre elemental (Nancucheo et al., 2017), a 150 rpm, en zaranda orbital (IKA HS 501) 30°C, durante cinco días. Posteriormente, se adicionó el mineral laterítico (E-Zona 12) a diferentes densidades de pulpa: 5, 10 y 20% (p/v). Los cultivos se incubaron a 150 rpm-1, a 30°C, durante 30 días. En el caso del control abiótico se sustituyó el inóculo por agua ácida estéril (pH 2,5). La experiencia se realizó por triplicado. Se tomaron muestras periódicas (0, 2, 7, 10, 14, 21, 27 y 30 días) de los cultivos y se determinó: la concentración de sulfato; mediante el método turbidimétrico con BaCl₂ (Alcaraz, 2004), el pH del medio, la concentración de Fe (II) y de Fe total mediante el método colorimétrico de la ferrozina (Stookey, 1970). La concentración de Ni (II) y Co (II) se determinó mediante el empleo de las tiras reactivas del estuche comercial MERCKOQUANT®.

Evaluación del bioácido producido por *A. thiooxidans* DSM 14887 como agente lixivante

La evaluación del bioácido bacteriano como agente lixivante se realizó siguiendo la metodología de dos etapas aplicada por Coto et al. (2007). En la primera etapa se produjo el bioácido el que se obtuvo a través de un cultivo de la bacteria en medio salino suplementado con 1% (p/v) de azufre elemental, durante cinco días a 30°C y 150 rpm. Posteriormente el cultivo se centrifugó (centrífuga Hettich

Universal Mikro 12-24) durante 10 minutos a 12 000 rpm. El sobrenadante se filtró a través de un filtro de nitrocelulosa de 0,2 μm y el filtrado contenía el ácido producido por la bacteria, el que se denominó bioácido. En una segunda etapa se enfrentó 100 mL del bioácido al escombro laterítico a una concentración final de 10 % (p/v); en los controles abióticos el bioácido se sustituyó por 100 mL de medio salino y se incubaron a 30°C, 150 rpm en zaranda orbital (IKA HS 501), durante 30 días. La experiencia se realizó por triplicado. Se tomaron muestras en diferentes momentos (0, 2, 4, 14, 21, 28 y 30 días) y se determinó: pH del medio a través del pH metro (PHS-W series) y la concentración de níquel y cobalto en solución mediante las tiras reactivas del estuche comercial MERCKOQUANT®.

Análisis biométricos.

A todos los datos se les realizaron de forma preliminar las pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianza con el empleo de las pruebas de Shapiro Wilks y Levene, respectivamente. Una vez comprobadas las premisas se realizó un Análisis de varianza de clasificación simple seguido de una prueba de Tukey de comparación múltiple de medias. Para comparar los porcentajes de extracción todos los datos fueron transformados al logaritmo antes de realizar los análisis estadísticos. Para determinar las concentraciones de sulfato, de Fe (II) y Fe total respectivamente, se realizó una regresión lineal a partir de los datos obtenidos con las mediciones espectrofotométricas de una curva patrón para cada ion, utilizando sulfato de sodio y sulfato de Fe (II) respectivamente. Todos los análisis se realizaron con el empleo del programa STATISTICA versión 8.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Solubilización de Ni (II) y Co (II) empleando *A. thiooxidans* DSM14887

El pH del medio aumentó al adicionar el escombro laterítico, siendo más representativos en los sistemas con mayor densidad de pulpa del mineral (Figura 1A). Este parámetro continuó aumentando en los cultivos con 10 y 20% (p/v) de escombro, mientras en los cultivos con 5% (p/v) de mineral el pH disminuyó significativamente, registrándose el menor valor al terminar la experiencia. En el caso de los controles abióticos el pH aumentó en más de una unidad en los primeros dos días y posteriormente se mantuvo constante. Al concluir el experimento el pH de los cultivos con 5% (p/v) de escombro fue 1,5 mientras que el de los cultivos con 10 y 20% (p/v) fue 2,5 y 3,16 respectivamente. El aumento del pH en los primeros días se puede deber a la liberación de sustancias alcalinas del mineral y al carácter básico del escombro laterítico (Marrero et al., 2016).

En todos los tratamientos inoculados con la bacteria se detectó sulfato en el medio. La concentración de este ion (Figura 1B) fue mayor en los cultivos con 5% (p/v) de mineral, la que superó dos veces la concentración detectada en los cultivos con 10 y 20 % (p/v). A partir de los 21 días de incorporar el escombro a los cultivos, en los medios con mayor densidad de pulpa, la concentración de sulfato se mantuvo constante. En los controles abióticos la concentración de sulfato en el medio no fue significativa.

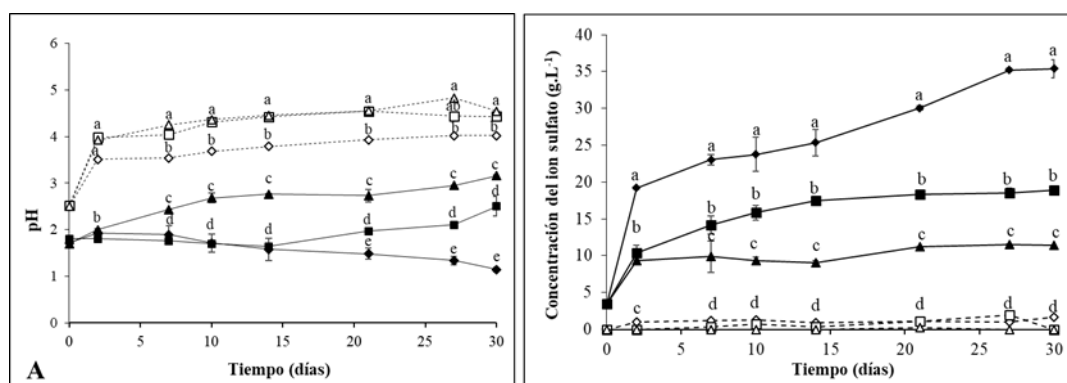


Fig. 1. Variación: (A) del pH y (B) de la concentración del ion sulfato en el medio salino inoculado con *A. thiooxidans* DSM14887 a diferentes concentraciones del escombro laterítico (♦5, ■10, ▲20% p/v) durante 30 días, a 30°C y 150 rpm. Controles abióticos (◇5, □10, △20% p/v). Las letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos, cada tiempo evaluado, Tukey (n=3, p<0,05).

El comportamiento en el pH y en la concentración del ion sulfato en el medio se debe a que *A. thiooxidans* utiliza el azufre elemental como fuente de energía y lo oxida a sulfato (ácido sulfúrico), esto provoca una disminución en la concentración hidrogeniónica del cultivo, por lo que la determinación del pH y la concentración de sulfato del medio constituyen dos parámetros que permiten monitorear el crecimiento bacteriano (Ciftci & Atick, 2017). El metabolismo del azufre en el género *Acidithiobacillus* continua en estudio (Yin et al., 2019, Cortés et al., 2020, Camacho et al., 2020 y se han identificado en los últimos años diferentes vías metabólicas y genes involucrados en las mismas (Cao et al., 2018; Zhan et al., 2019; Wang et al., 2019). El incremento de la densidad de pulpa del mineral en el sistema tuvo un efecto negativo en la oxidación del azufre. El aumento del pH pudo afectar el crecimiento de la bacteria, lo que se reflejó en la disminución de la oxidación del azufre.

En todos los tratamientos se detectó en el medio Fe (II). La concentración de este ion (Figura 2A) superó en más de dos veces la concentración de hierro férrico (Figura 2B) en los medios con 5 y 10% (p/v) de mineral. En sistemas con 20% (p/v) del mineral, las concentraciones de hierro ferroso y férrico no fueron apreciables. La mayor concentración de hierro ferroso se detectó en el medio con 10% (p/v) de densidad de pulpa. La concentración de hierro ferroso registrada en los cultivos con 5% y 10% (p/v) fue significativamente superior a la registrada en los respectivos controles abióticos, lo que indica que *A. thiooxidans* bioacelera la disolución reductiva del hierro férrico contenido en los minerales lateríticos.

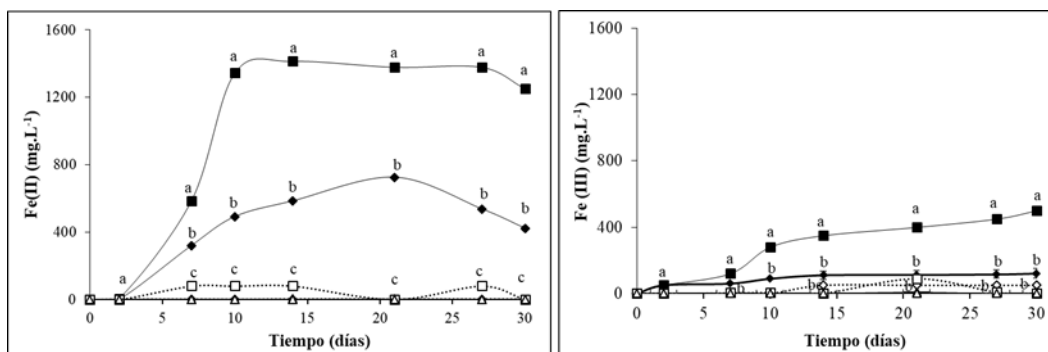


Fig. 2. Variación de la concentración de (A) Fe (II) y de (B) Fe (III) en el medio salino inoculado con *A. thiooxidans* DSM14887 y diferentes concentraciones del escombro laterítico (♦5, ■10, ▲20% p/v) durante 30 días, a 30°C y 150 rpm. Controles abióticos (◇5, □10, △20% p/v). Las letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos, en cada tiempo evaluado, Tukey ($n=3$, $p<0,05$).

En todos los sistemas inoculados se detectó níquel y cobalto en solución, siendo los porcentajes de solubilización de cobalto superiores a los del níquel. Estos resultados pueden deberse a que el cobalto está predominantemente asociado a manganeso-hierro, lo que significa que a medida que se reduce el hierro férrico a hierro ferroso se libera el cobalto a la solución. Mientras que el níquel está asociado a los geles de hierro, goetita y hematita (Palacios & García, 2014). En los controles abióticos no se detectó metales en solución (Figura 3).

El aumento de la densidad de pulpa tuvo un efecto negativo en el recobrado del metal. Los mayores porcentajes de recuperación del níquel y cobalto se registraron en los sistemas con 5 % (p/v) de escombro, en lo que se logró solubilizar el 71,4% del cobalto a los 14 días, mientras que para el níquel la mayor solubilización se detectó a los a los 27 días (48,5%). Estos valores superaron significativamente los porcentajes alcanzados en los medios con 10% (42,8% de Co y 24,2% de Ni) y 20% (21,4 % de Co y 10,9% de Ni) de escombro.

Este comportamiento puede deberse al aumento de la concentración de productos solubles disueltos como los metales. Aunque el níquel y el cobalto son esenciales para la célula a altas concentraciones son tóxicos para la célula (Das et al., 2019; Mahey et al., 2020), de ahí que inhiba el crecimiento microbiano y como consecuencia disminuye la solubilización de los metales (Pathak et al., 2017; Ciftci & Atick, 2017). Además, el aumento de la densidad de pulpa hace el medio más viscoso por lo que influye

negativamente en la transferencia de oxígeno entre las células y el medio (Simate & Ndlou, 2008), asimismo, esto provoca el incremento de fuerza de rozamiento entre el mineral y la bacteria afectando su crecimiento (Das & Ghosh, 2018).

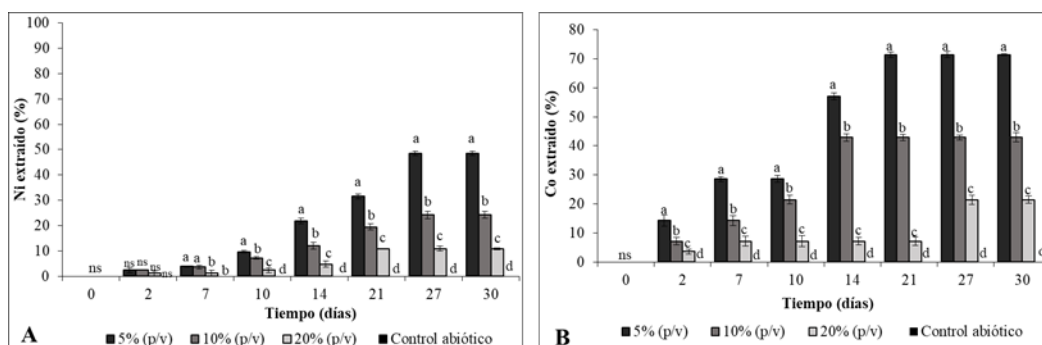


Fig. 3. Variación del porcentaje de solubilización de: níquel (A) y cobalto (B) en cultivos de *A. thiooxidans* DSM14887 y diferentes concentraciones del escombro laterítico (5, 10 y 20 % p/v), durante 30 días, a 30°C y 150 rpm. Control abiótico: sin inocular. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre los porcentajes de extracción de cada tratamiento, en cada tiempo evaluado, Tukey ($n=3$, $p<0,05$).

El efecto negativo del aumento en la densidad de pulpa se informó por Coto et al. (2008) quienes evaluaron la solubilización de Ni y Co a partir de la cola del proceso CARON mediante el empleo de *A. thiooxidans* en el medio OK suplementado con azufre elemental (2% p/v) y diferentes densidades de pulpa (2,5%, 5%, 10% p/v). Los mayores porcentajes de extracción lo obtuvieron en presencia de 2,5% (p/v) del mineral. Este efecto también se refiere en el estudio de la biolixiviación de Mn a partir de un mineral oxidado de hierro- manganeso, proveniente de una mina de Orissa, en la India mediante una cepa de *Bacillus* sp. y diferentes densidades de pulpa del mineral (2-10% p/v). Los mejores porcentajes de extracción de Mn se lograron cuando se utilizó 2% (p/v) de densidad de pulpa del mineral (Das & Ghosh, 2018).

La solubilización de los metales contenidos en los minerales lateríticos empleando *A. thiooxidans* se debe a un mecanismo que combina la producción de ácido sulfúrico por la bacteria (acidólisis), con su capacidad bioacelerar la disolución reductiva del Fe (III) contenido en esos minerales (Marrero et al, 2015a; b). La disolución reductiva del Fe (III) contenido en los escombros lateríticos por *A. thiooxidans* se demostró por Marrero et al. (2016). Además, *A. thiooxidans* presenta un mecanismo de expresión constitutiva de reducción de hierro férrico en condiciones aerobias (Marrero et al., 2015a). En este estudio se evidenció que en los medios con 5 y 10% (p/v) del mineral la concentración de Fe (II) fue significativamente superior a la de Fe (III), evidenciando este mecanismo de disolución reductiva, no observándose en el sistema con 20% (p/v) (Figura 2), lo que indica que en esta concentración ocurre una inhibición del proceso. En la disolución reductiva las bacterias reducen el hierro férrico contenido en la fase mineral de la mena y permiten la liberación del metal que está asociado al mismo (Nancucheo et al., 2017). Los resultados registrados en este estudio permitieron determinar las mejores concentraciones del mineral para que ocurra el proceso de solubilización de los iones metálicos en presencia de la bacteria.

Solubilización de Ni (II) y Co (II) a partir del bioácido producido por la cepa *A. thiooxidans* DMS14887
Los resultados de la evaluación del bioácido en la solubilización de níquel y cobalto a partir de los minerales en estudio empleando 10% (p/v) de densidad de pulpa se presentan en la figura 4. El recobrado de los metales aumentó en el tiempo. En los controles abióticos no se detectó los metales evaluados en solución. Los porcentajes de extracción de Co (II) fueron significativamente superiores a los de Ni (II). A los 14 días se logró extraer la mayor concentración de cobalto (31,5%), mientras que la concentración de níquel se mantuvo constante en el medio a partir del cuarto día, obteniéndose 2% de solubilización de este metal.

El pH del medio aumentó en el tiempo, tanto en los medios con el bioácido como en los controles abióticos (Figura 4B), al concluir el experimento el pH del sistema con el bioácido fue de 2,47 mientras

que el del control abiótico fue 4,02. A pesar de que estos resultados indican que el bioácido bacteriano permite la solubilización de Ni y Co, los porcentajes de solubilización estos fueron ocho y dos veces superiores, respectivamente, en presencia de la bacteria.

El ácido sulfúrico, producido como parte del metabolismo de la bacteria, se reconoce como un excelente agente lixivante (Hernández et al., 2009). La biolixiviación en dos etapas con el empleo, en la segunda etapa, del sobrenadante libre de células puede mitigar el efecto tóxico del mineral. A la vez constituye una alternativa para el tratamiento de materiales y residuales tóxicos. Con esta estrategia se logró solubilizar más del 30% del Co y solo el 2% del Ni, estos valores son inferiores a los registrados en presencia de la bacteria, lo que resalta la importancia del microorganismo en el proceso de solubilización.

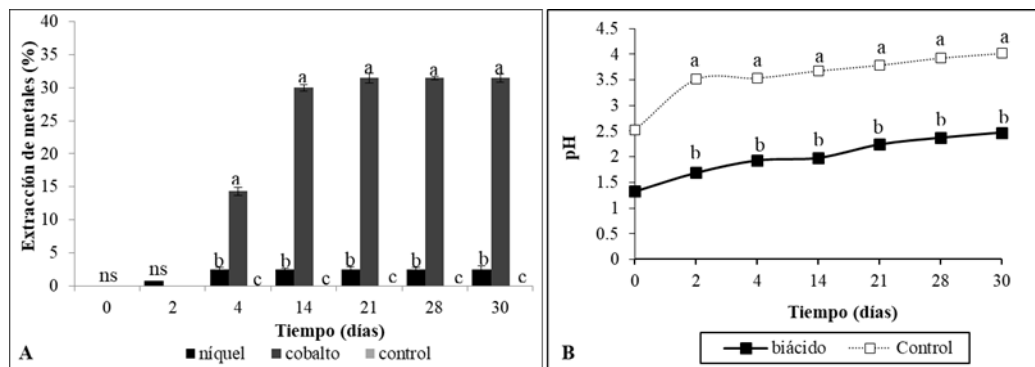


Fig. 4. Variación del (A) porcentaje de extracción de Ni y Co y (B) pH en los medios con el bioácido bacteriano y el escombro laterítico, incubados durante 30 días, a 30°C y 150 rpm. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre los porcentajes de solubilización, en cada tiempo evaluado Tukey ($n=3$, $p<0,05$).

Los resultados obtenidos en esta investigación están en correspondencia con los informados por Wu et al. (2018) quienes evaluaron la biolixiviación de cobre a partir de residuales de placas de circuitos impresos (printed circuit boards) empleando el bioácido producido por *Leptospirillum ferriphilum* y *Sulfobacillus therosulfidooxidans*. Esto permitió el recobrado del 93,4% del cobre contenido en el material a los 9 días de incubación. Además, mediante este estudio se avalan los resultados referidos por Marrero et al. (2015a) en el tratamiento de colas del proceso CARON y escombros lateríticos (Marrero et al., 2016) respectivamente a la vez que resalta la efectividad de *A. thiooxidans* como agente lixivante.

CONCLUSIONES

El empleo de *A. thiooxidans* DSM 14887 en un sistema con 5% (p/v) de densidad de pulpa del escombro permite altos recobrados de Ni y Co lo que constituye una excelente alternativa para el tratamiento de residuales minerales oxidados. La optimización de la densidad de pulpa es parámetro necesario para lograr el crecimiento del microorganismo y mejorar la eficiencia de la solubilización de los metales. El ácido producido por la bacteria permite la solubilización de níquel y cobalto del mineral, aunque los porcentajes de extracción son inferiores comparado con los sistemas en presencia de la bacteria, lo que destaca la importancia de la bacteria en el proceso de extracción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz, AJ. (2004). Biolixiviación de minerales sulfuro-ferroso en jales: aislamiento y caracterización de cultivos puros y mixtos de microorganismos involucrados. Tesis para optar el grado de Doctor en Ciencias. Universidad de Colima.
- Baran, EJ. (2018). Cobalto: un elemento crítico y estratégico. *Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat.*, 70, 77-106.
- Camacho, D, Frazao, R, Fouillen, A, Nanci, A, Lang, BF, Apte, SC, Baron, C & Warren, LA. (2020). New Insights Into *Acidithiobacillus thiooxidans* Sulfur Metabolism Through Coupled Gene

- Expression, Solution Chemistry, Microscopy, and Spectroscopy Analyses. *Front. Microbiol.* 11:411. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00411.
- Cao, X, Koch, T, Steffens, L, Finkensieper, J, Ziggann, R, Cronan, JE, & Dahl, C. (2018). Lipoate-binding proteins and specific lipoate-protein ligases in microbial sulfur oxidation reveal an atypical role for an old cofactor. *Elife* 7:37439. DOI: 10.7554/eLife.37439.
- Chen, X, Liu, Q, Bai, T, Wang, W, He, F, & Ye, M. (2020). Nickel and Cobalt Sulfide-Based Nanostructured Materials for Electrochemical Energy Storage Devices. *Chemical Engineering Journal*. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127237.
- Ciftci, H, & Atik, S. (2017). Microbial leaching of metals from a lateritic nickel ore by pure and mixed cultures of mesophilic acidophiles. *Metall. Res. Technol.* 114. www.metallurgical-research.org.
- Cortés, MP, Acuña, V, Travisany, D, Siegel, A, Maass, A, & Latorre, M. (2020). Integration of Biological Networks for *Acidithiobacillus thiooxidans* Describes a Modular Gene Regulatory Organization of Bioleaching Pathways. *Front. Mol. Biosci.* 6:155. DOI: 10.3389/fmolb.2019.00155
- Coto, O, & Schippers, A. (2011). Influence of sulfur source on nickel and cobalt bioleaching from laterite tailings using *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Bioleaching Applications*, Section V, 580-583.
- Coto, O, Galicia, F, González, E, Hernández, I, Marrero, J, & Donati, E. (2007). Cobalt and Nickel Recoveries from Laterite Tailings by Organic and Inorganic Bioacids. *Advanced Materials Research*, 20, 107-110. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.20-21.107
- Coto, O, Galizia, F, Hernández, I, Marrero, J, & Donati, E. (2008). Cobalt and nickel recoveries from laterite tailings by organic and inorganic bio-acids. *Hydrometallurgy*, 94, 18–22. doi: 10.1016/j.hydromet.2008.05.017
- Coto, O, Peguero, M, Abín, L, Bruguera, N, Marrero, J, & Bosecker, K. (2005). Bioleaching of laterite by *Aspergillus niger* strain O5: an acidophilic, and nickel and cobalt resistant fungus. *Proceedings of the 16th International Biohydrometallurgy Symposium*. Cape Town, South Africa, 357–364.
- Das, AP, & Ghosh, S. (2018). Bioleaching of Manganese from mining waste materials. *Materials Today: Proceedings*, 5, 2381–2390.
- Das, K, Reddy, R, Bagoji, I, Das, S, Bagali, S, Mullur, L, Khodnapur, J, & Biradar, M. (2019). Primary concept of nickel toxicity – an overview. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, 30(2), 141-152. DOI: 10.1515/jbcpp-2017-0171
- Ehrlich, HL. (1981). *Geomicrobiology* New York: Decker. Metallurgical processing, 5, 57-60.
- Feng, S, Li, K, Huang, Z, Tong, Y, & Yang, H. (2019). Specific mechanism of *Acidithiobacillus caldus* extracellular polymeric substances in the bioleaching of copper-bearing sulfide ore. *PLoS ONE* 14(4), e0213945. DOI: 10.1371/journal.pone.0213945.
- Gentina, JC, & Acevedo, F. (2016). Copper Bioleaching in Chile. *Minerals Engineering*, 6, 23. DOI: 10.3390/min6010023.
- Ghosh, S, & Paul, AK. (2016). Bioleaching of nickel by *Aspergillus humicola* SKP102 isolated from Indian lateritic overburden. *Journal of Sustainable Mining*, 1-7. DOI: 10.1016/j.jsm.2016.11.002.
- Hallberg, KB, Grail, BM, du Plessis, CA, & Johnson, DB. (2011). Reductive dissolution of ferric iron minerals: A new approach for bio processing nickel laterites. *Minerals Engineering*, 24: 620–624. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.09.005
- Hernández, I, Galizia, F, Pérez, OC, & Donati, ER. (2009). Reduction of heavy-metal content in overburden material by bacterial action. *Advanced Materials Research*, 71, 653-656. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.71-73.653
- Mahey, S, Kumar, R, Sharma, M, Kumar, V, & Bhardwaj, R. (2020). A critical review on toxicity of cobalt and its bioremediation strategies. *SN Appl. Sci.* 2, 1279. DOI: 10.1007/s42452-020-3020-9
- Marrero, J, Coto, O, & Schippers, A. (2015b). Reductive Dissolution of Ferric Iron in Laterite Overburden using *Acidithiobacillus* Spp. and Neutrophilic Iron-Reducing Consortia. *Advanced Materials Research*, 1130, 351-354. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.351
- Marrero, J, Coto, O, & Schippers, A. (2016). Anaerobic and aerobic reductive dissolution of iron-rich nickel laterite overburden by *Acidithiobacillus*. *Hydrometallurgy*, DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.08.012.

- Marrero, J, Coto, O, Goldmann, S, Graupner, T, & Schippers, A. (2015a). Recovery of Nickel and Cobalt from Laterite Tailings by Reductive Dissolution under Aerobic Conditions Using *Acidithiobacillus* Species. *Environmental Science Technology*, 49, 6674–6682. DOI:10.1021/acs.est.5b00944
- Nancucho, I, Johnson, B, Lopes, M, & Oliveira, G. (2017). Reductive Dissolution of a Lateritic Ore Containing Rare Earth Elements (REE) Using *Acidithiobacillus* Species. *Solid State Phenomena Submitted*, 262, 299-302. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.262.299
- Oliveira, DN, Lucheta, AR, Palmieri, MC, Vilaça, AL, Pereira, PM, de Pádua, RV, Junca, E, Fardin, F, & Oliveira, J. (2019). Bioleaching for Copper Extraction of Marginal Ores from the Brazilian Amazon Region. *Metals*, 9, 81. DOI: 10.3390/met9010081.
- Palacios, A, & García, E. (2014). Extracción de cobalto de escombros lateríticos mediante lixiviación ácida. *Minería y Geología*, 30 (2), 73-86. ISSN 1993-8012.
- Pathak, A, Morrison, L, & Healy, MG. (2017). Catalytic potential of selected metal ions for bioleaching, and potential techno-economic and environmental issues: A critical review. *Bioresource Technology*, 229, 211–221. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.01.001
- Petrus, HB, Wanta, KC, Setiawan, H, Perdana, I, & Astuti, W. (2018). Effect of pulp density and particle size on indirect bioleaching of Pomala a nickel laterite using metabolic citric acid. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 285, 1-5. DOI:10.1088/1757-899X/285/1/012004.
- Ramírez, MC, Pons, JA, & Ortiz, J. (2019) Regularidades de los pasivos ambientales minerometalúrgicos sólidos, generados por las industrias del níquel en Cuba. *Infomin*, 11, E-ISSN: 1992-4194.
- Sánchez, C, Gaínza, Y, & Magaña, ME. (2014) Evaluación de la extracción de níquel y cobalto en una mezcla de cola y lateritas fuera de balance. *Revista Tecnología Química*, 34 (3), 275-282. ISSN 2224-6185
- Simate, GS, & Ndlovu, S. (2008). Bacterial leaching of nickel laterites using chemolithotrophic microorganisms: Identifying influential factors using statistical design of experiments. *Int. J. Miner. Process.* 88, 31–36. DOI:10.1016/j.minpro.2008.06.001
- Smith, SL, Grail, BM, & Johnson, DB. (2017). Reductive bioprocessing of cobalt-bearing limonitic laterites. *Minerals Engineering*, 106, 86–90. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.09.009.
- Stookey, LL. (1970). Ferrozine-A New Spectrophotometric Reagent for Iron. *Analytical Chemistry*, 42 (7), 779-781. DOI: 10.1021/ac60289a016.
- Tanaka, M. (2017). A Comparison Study of Heap Bioleaching Sites in Chile and Finland for Further Development of Biotechnology for Mining. *EVERGREEN Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 4(4), 1-7. DOI:10.5109/1929724
- Valcarce, RM, & Rojas, IS. (2017). Análisis euclidiano de agrupación aplicado al estudio del yacimiento Yagrumaje Oeste. *Revista Cubana de Ingeniería*, 7(2), 3 - 10. ISSN 2223 – 1781.
- Wang, R, Lin, JQ, Liu, XM, Pang, X, Zhang, CJ, Yang, CL, Gao, XY, Lin, CM, Li, YQ, Li, Y, Lin, JQ, & Chen, LX. (2019). Sulfur Oxidation in the Acidophilic Autotrophic *Acidithiobacillus* spp. *Front Microbiol*, 10,9:3290. DOI: 10.3389/fmicb.2018.03290.
- Wu, W, Liu, X, Zhang, X, Zhu, M, & Tan, W. (2018). Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacteria-free cultural supernatant of iron–sulfur-oxidizing bacteria. *Bioresource and Bioprocessing*, 5, 10, DOI: 10.1186/s40643-018-0196-6.
- Yin, S, Wang, L, Kabwe, E, Chen, X, Yan, R, An, K, Zhang, L, & Wu, A. (2018). Copper Bioleaching in China: Review and Prospect. *Minerals*, 8, 32, DOI: 10.3390/min8020032.
- Yin, Z, Feng, S, Tong, Y, & Yang, H. (2019). Adaptive mechanism of *Acidithiobacillus thiooxidans* CCTCC M 2012104 under stress during bioleaching of low-grade chalcopyrite based on physiological and comparative transcriptomic analysis. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 46(12), 1643-1656. DOI: 10.1007/s10295-019-02224-z.
- Zhan, Y, Yang, M, Zhang, S, Zhao, D, Duan, J, Wang, & W, Yan, L. (2019). Iron and sulfur oxidation pathways of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *World J Microbiol Biotechnol*, 27; 35(4):60. DOI: 10.1007/s11274-019-2632-y.

Este artículo no presenta conflicto de interés

ROLES DE AUTORÍA:

Alexander Govin Sanjudo: Conceptualización; investigación; metodología; visualización; redacción - borrador original.

Güendis Leal Sanabria: Investigación, curación de datos, visualización, redacción - borrador original.

María Isabel Sánchez López: Supervisión; redacción – revisión.

María Caridad Ramírez: Recursos y administración del proyecto.

José Alberto Pons: Recursos y administración del proyecto.