

Efecto de la temperatura sobre el potencial redox, la especiación del hierro y la población microbiana durante la biolixiviación en columnas de la calcopirita

Effect of Temperature on Redox Potential, Iron Speciation, and Microbial Population during Chalcopyrite Column Bioleaching

BIANCA RUTH VEGA BACA^{1*}  | WALTER DIMAS FLOREZ PONCE DE LEÓN²  | LINLEY SALOMÓN VEGA VEGA³ 

Afiliación:

^{1,2,3}Dirección de la Gestión de la Investigación, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna, Perú

Información del artículo:

Recibido: 26/09/2026
Aceptado: 05/10/2026
Publicado: 12/10/2026

Autor de correspondencia: E-mail: *bvegab@unjbg.edu.pe

Resumen

La temperatura constituye un factor determinante en la actividad de los microorganismos acidófilos y las reacciones de oxidación-reducción durante la biolixiviación de minerales sulfurados. El objetivo fue evaluar el efecto de la temperatura sobre el potencial redox (Eh), la especiación del hierro y la población microbiana durante la biolixiviación en columnas de calcopirita de baja ley (0,52 % Cu). Se evaluaron tres temperaturas de operación (22, 32 y 42 °C), con cuatro tratamientos por temperatura, mediante un diseño Box-Behnken. El proceso se desarrolló durante 105 días, correspondientes a siete ciclos de riego-reposo. Se determinaron el potencial redox, hierro total, Fe²⁺, Fe³⁺ y la población del consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans*–*Leptospirillum ferriphilum*. El potencial redox final promedio fue de 575,3, 584,3 y 565,3 mV para 22, 32 y 42 °C, respectivamente. La concentración de hierro total fue de 1300,0, 1525,0 y 1002,5 mg/L, mientras que la población microbiana alcanzó $5,35 \times 10^8$, $7,77 \times 10^8$ y $5,98 \times 10^8$ células/mL. La relación Fe³⁺/Fe²⁺ fue mayor a 32 °C (405,2), al igual que la recuperación de cobre (4601,5 mg/L). Los resultados indican que 32 °C presentó la respuesta más favorable, evidenciando que aumentar la temperatura hasta 42 °C no necesariamente mejora la actividad del consorcio mesófilo.

Palabras clave: biolixiviación; calcopirita; hierro; potencial redox; temperatura.

Abstract

Temperature is a key factor in the activity of acidophilic microorganisms and the redox reactions involved in the bioleaching of sulfide minerals. The objective of this study was to evaluate the effect of temperature on redox potential (Eh), iron speciation, and microbial population during the bioleaching of low-grade chalcopyrite (0.52% Cu) in columns. Three operating temperatures (22, 32, and 42 °C) were evaluated, with four treatments at each temperature, using a Box-Behnken design. The process was conducted for 105 days, corresponding to seven irrigation and resting cycles. Redox potential, total iron, Fe²⁺, Fe³⁺, and the microbial population of the *Acidithiobacillus ferrooxidans*–*Leptospirillum ferriphilum* consortium were determined. The final average redox potential was 575.3, 584.3, and 565.3 mV at 22, 32, and 42 °C, respectively. Total iron concentrations were 1300.0, 1525.0, and 1002.5 mg/L, while the microbial population reached 5.35×10^8 , 7.77×10^8 , and 5.98×10^8 cells/mL. The Fe³⁺/Fe²⁺ ratio was highest at 32 °C (405.2), as was copper concentration recovery (4601.5 mg/L). The results indicate that 32 °C showed the most favorable response, suggesting that increasing the temperature to 42 °C does not necessarily improve the activity of the mesophilic consortium.

Keywords: bioleaching; chalcopyrite; iron; redox potential; temperature.

1. Introducción

La biolixiviación constituye una alternativa biotecnológica para la recuperación de metales a partir de minerales sulfurados mediante la actividad de microorganismos acidófilos capaces de catalizar reacciones de oxidación que favorecen la solubilización de los metales (Johnson, 2014; Brierley y Brierley, 2013). En el caso de la calcopirita (CuFeS_2), su aplicación presenta especial interés debido a la abundancia de este mineral en los recursos de cobre y a la dificultad de su disolución, asociada, entre otros factores, a la formación de productos secundarios y capas pasivantes sobre su superficie (Zhao et al., 2019; Hong et al., 2021).

En este proceso, los microorganismos ferrooxidantes, entre ellos *Acidithiobacillus ferrooxidans* y especies del género *Leptospirillum*, participan en la regeneración del Fe^{3+} mediante la oxidación de Fe^{2+} (Farías et al., 2021). De este modo, la interacción entre las reacciones biológicas y químicas constituye uno de los mecanismos fundamentales de la biolixiviación de calcopirita (Liu et al., 2018; Ma et al., 2021). En relación con estos mecanismos, el potencial redox constituye un indicador útil del estado oxidante de las soluciones de biolixiviación y está relacionado con el equilibrio entre las especies Fe^{3+} y Fe^{2+} (Ahmadi, 2012; Santos et al., 2017). Por ello, el seguimiento simultáneo del Eh y de la especiación del hierro permite evaluar la capacidad oxidativa del sistema (Yang et al., 2013; Watling et al., 2020).

Además del potencial redox y de la especiación del hierro, la temperatura es otro factor fundamental debido a su influencia sobre la velocidad de crecimiento microbiano, la oxidación del Fe^{2+} y las reacciones químicas asociadas a la disolución del mineral (Vera et al., 2020; Kupka et al., 2023). Los mesófilos *A. ferrooxidans* y *L. ferriphilum* presentan un rango de crecimiento óptimo entre 25 y 38 °C, con una rápida disminución de su actividad por encima de los 40 °C (Rawlings y Johnson, 2007; Kupka et al., 2023). Considerando estos factores, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de tres temperaturas de operación (22, 32 y 42 °C) sobre la evolución del potencial redox, la especiación del hierro y la población microbiana

durante la biolixiviación en columnas de calcopirita, utilizando un consorcio de *A. ferrooxidans* y *L. ferriphilum*.

2. Metodología

2.1. Materiales, reactivos y equipos

El mineral de calcopirita (CuFeS_2) utilizado en el estudio procedió de una operación minera ubicada en Tacna, al sur del Perú, y presentó una ley de 0,52 % Cu y 3,55 % Fe. Los reactivos químicos empleados fueron ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado al 95-97 % p.a. (EMSURE® ISO), sulfato de hierro (II) heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ≥ 99 %, sulfato de magnesio heptahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) p.a., sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) p.a. y fosfato dipotásico (K_2HPO_4) p.a. Todos los reactivos fueron de grado analítico.

Los equipos utilizados para la preparación y el desarrollo experimental incluyeron un agitador magnético (VELP ARES), autoclave (ALP CL-40LDP), cabina de bioseguridad (CLASS II, TYPE A2), incubadora con agitación (BENCHMARK), estufa de laboratorio (VENTICELL-111), tamizador Ro-Tap (RX-30-16), equipo de valoración ácido-base y un sistema de calefacción semiautomatizado de construcción propia para el control de la temperatura en las columnas. Para las mediciones y observaciones se emplearon un pH-metro multiparámetro (HANNA HI 322), conductímetro (BT WATER TESTER BT789), microscopio óptico (LEICA ICC50 E), cámara de conteo Petroff-Hausser, balanza electrónica (CAS ER-JR) y termómetro digital.

Para el montaje de las columnas y la operación del sistema experimental se utilizaron tubos de PVC de 3 pulgadas de diámetro, bombas de acuario (SOBO Wp-3500) para la recirculación y mangueras de polipropileno. Asimismo, se emplearon embudos, baldes de 20 y 5 L, papel filtro, papel Kraft, algodón hidrófilo y material de vidrio estándar de laboratorio, que comprendió vasos de precipitado, fioles, matraces Erlenmeyer, buretas, pipetas y probetas.

2.2. Mineral y preparación de las muestras

El mineral se caracterizó físicamente mediante la determinación de su densidad real (4,2 g/mL),



densidad aparente (1,7–1,9 kg/L), humedad (5,0 %) y gravedad específica (2,75). Su composición química se determinó mediante espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y espectrometría de absorción atómica (AAS), obteniéndose leyes de 0,52 % Cu y 3,55 % Fe.

A partir del mineral chancado y tamizado, se prepararon tres distribuciones granulométricas con valores de P80 (tamaño de abertura por el que pasa el 80 % de las partículas) de 5,2, 6,8 y 8,3 mm. Cada columna se cargó con 4 kg de mineral. Previamente, el mineral se sometió a un proceso de curado y aglomeración mediante la adición de 60 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y 100 mL de agua destilada por cada 4 kg de mineral. Finalmente, se dejó reposar durante 48 h.

2.3. Microorganismos y preparación del inóculo

Se utilizó un consorcio bacteriano constituido por *Acidithiobacillus ferrooxidans* DSM 14882 y *Leptospirillum ferriphilum* M1D. El inóculo se preparó en medio 9K modificado (Silverman y Lundgren, 1959), con las siguientes concentraciones de nutrientes y sales, expresadas en g/L: $(NH_4)_2SO_4$ (0,4), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0,4), KH_2PO_4 (0,04) y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (33,3). La preparación se incubó durante 10 días a 32 °C, con agitación y a un pH de 2,0.

2.4. Diseño experimental y selección de tratamientos

El experimento original comprendió 15 tratamientos correspondientes a un diseño Box-Behnken con tres factores: temperatura, tamaño de partícula P80 y pH de la solución biolixivante. Para el presente estudio, se seleccionaron 12 tratamientos representativos, distribuidos en tres niveles de temperatura (22, 32 y 42 °C), con cuatro tratamientos por nivel (Tabla 1). Debido a que los tratamientos seleccionados presentan variaciones en el tamaño de partícula y el pH, los resultados se interpretaron considerando estas diferencias experimentales, sin atribuir exclusivamente a la temperatura todas las variaciones observadas. Para el nivel de 32 °C, los resultados de las columnas C-3, C-5 y C-8, correspondientes a una misma combinación

experimental, se integraron mediante un promedio aritmético y se consideraron como un único tratamiento representativo (T32-4).

Tabla 1

Tratamientos considerados para el análisis según temperatura

Código	Columna	T (°C)	P80 (mm)	pH
T22-1	C-1	22	5,2	2,2
T22-2	C-4	22	8,3	2,2
T22-3	C-9	22	6,8	2,8
T22-4	C-10	22	6,8	1,6
T32-1	C-2	32	5,2	2,8
T32-2	C-7	32	8,3	2,8
T32-3	C-13	32	5,2	1,6
T32-4 (prom)	C-3 C-5 C-8	32	6,8	2,2
T42-1	C-6	42	5,2	2,2
T42-2	C-11	42	6,8	1,6
T42-3	C-12	42	6,8	2,8
T42-4	C-14	42	8,3	2,2

Nota. T32-4 corresponde al promedio aritmético de las columnas C-3, C-5 y C-8.

2.5. Montaje y operación de las columnas

Se construyeron columnas de PVC de 3 pulgadas de diámetro y 1 m de altura, con un lecho de mineral de 0,75 m. La solución lixivante se recirculó a un caudal de 2,5 mL/min, equivalente a una tasa de riego de 20 L/m²·h. Las columnas se distribuyeron en tres cabinas con control semiautomático de temperatura, operadas a 22, 32 y 42 °C (± 2 °C). Al inicio del proceso, cada columna recibió 150 mL de inóculo bacteriano, compuesto por 75 mL de cada cepa, y posteriormente se realizó una reinoculación durante el desarrollo experimental. La operación comprendió siete ciclos de riego y reposo, cada uno con 15 días de riego continuo seguidos de 7 días de reposo, durante un periodo experimental total de 105 días. Para cada ciclo se prepararon 1,5 L de solución de riego, cuyo pH se ajustó con H_2SO_4 10 N a los valores establecidos de 1,6, 2,2 y 2,8.

2.6. Determinación de las variables de respuesta

El potencial redox (Eh) y el pH se midieron con un multiparámetro HANNA HI 322, calibrado con soluciones estándar de 240 y 475 mV para Eh, y

soluciones tampón de pH 4,01 y 6,87 para pH. El hierro total, Fe^{2+} y Fe^{3+} se determinaron mediante espectroscopia de absorción atómica (ISO 22036:2024) y titulación volumétrica con permanganato de potasio (UNE 22144:1990). La población microbiana se cuantificó mediante conteo directo en una cámara de Petroff-Hausser, utilizando muestras diluidas en una proporción de 1:10 con solución salina al 0,85 %. La conductividad eléctrica se midió con un conductímetro calibrado con soluciones estándar de 12 880 y 1 413 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como valores promedio.

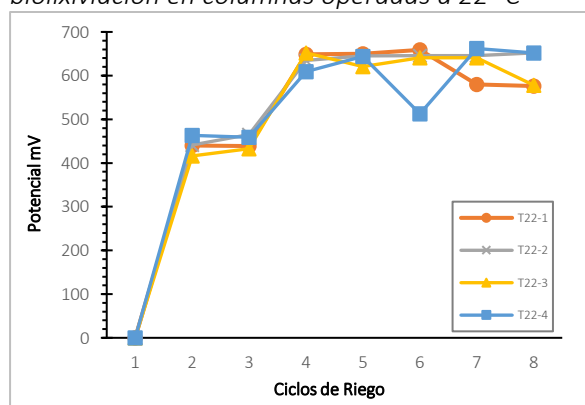
3. Resultados

3.1. Evolución del potencial redox

La evolución temporal del potencial redox (Eh) mostró diferencias entre las temperaturas evaluadas. A 22 °C (Figura 1), el Eh aumentó gradualmente desde aproximadamente 440 mV hasta valores de 570–590 mV al final del proceso. La columna T22-4 (pH 1,6) alcanzó los valores más elevados en las etapas iniciales, mientras que T22-3 (pH 2,8) presentó los valores más bajos. Esta evolución gradual sugiere un desarrollo más lento de las condiciones oxidantes a esta temperatura.

Figura 1

Potencial redox (mV) durante los siete ciclos de biolixiviación en columnas operadas a 22 °C



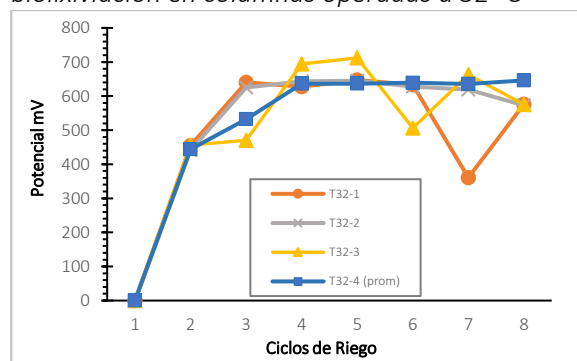
Nota. La línea vertical discontinua separa los periodos de riego de 15 días de los periodos de reposo de 7 días.

A 32 °C (Figura 2), se observó una evolución del Eh hacia valores de 560–600 mV

durante la mayor parte del proceso. El promedio de las columnas correspondientes al punto central (T32-4) alcanzó un valor de 595,7 mV, mientras que T32-3 (pH 1,6; P80 de 5,2 mm) registró un valor de 582,3 mV. Estos resultados sugieren el establecimiento de condiciones oxidantes favorables para la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} bajo las condiciones evaluadas.

Figura 2

Potencial redox (mV) durante los siete ciclos de biolixiviación en columnas operadas a 32 °C

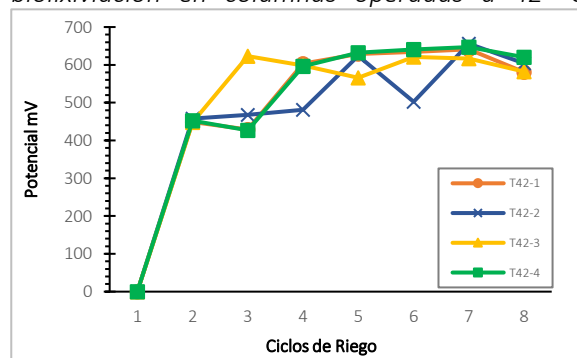


Nota. La línea vertical discontinua separa los periodos de riego de 15 días de los periodos de reposo de 7 días.

A 42 °C (Figura 3), la evolución del Eh presentó un comportamiento heterogéneo entre las columnas. T42-3 (pH 2,8) mostró el incremento más gradual y alcanzó 579,3 mV al final del proceso, mientras que T42-2 (pH 1,6) registró el valor más bajo, de 541,9 mV. Este comportamiento sugiere que la combinación de temperatura elevada y pH bajo podría asociarse con una menor capacidad de oxidación del Fe^{2+} en las condiciones experimentales estudiadas.

Figura 3

Potencial redox (mV) durante los siete ciclos de biolixiviación en columnas operadas a 42 °C



Nota. La línea vertical discontinua separa los periodos de riego (15 días) y reposo (7 días).



El potencial redox promedio final fue de 575,3 mV a 22 °C, 584,3 mV a 32 °C y 565,3 mV a 42 °C. El valor más elevado correspondió a 32 °C, lo que indica que esta temperatura se asoció con las condiciones más oxidantes entre las evaluadas.

3.2. Recuperación de cobre y especiación del hierro

La Tabla 2 resume los valores promedio de recuperación de cobre, hierro total, Fe^{2+} , Fe^{3+} , relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, conductividad eléctrica y población microbiana para cada temperatura. A 32 °C se registraron los mayores valores de cobre, hierro total, Fe^{3+} , relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, conductividad eléctrica y población microbiana. En contraste, a 42 °C se obtuvo la mayor concentración de Fe^{2+} y los menores valores de hierro total, Fe^{3+} , relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ y conductividad eléctrica. Estas diferencias reflejan el comportamiento de las variables de respuesta bajo las temperaturas evaluadas.

Tabla 2

Resumen de parámetros por temperatura

Parámetro	22 °C	32 °C	42 °C
Cu (mg/L)	3327,9	4601,5	3964,6
Fe total (mg/L)	1300,0	1525,0	1002,5
Fe^{2+} (mg/L)	3,9	3,9	50,2
Fe^{3+} (mg/L)	1296,1	1521,2	952,4
$\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$	351,2	405,2	231,0
Conductividad (mS/cm)	31,1	32,4	28,7
Población (Células/mL)	$5,35 \times 10^8$	$7,77 \times 10^8$	$5,98 \times 10^8$

Nota. Los valores en negrita indican el máximo registrado, excepto para Fe^{2+} , cuyo mínimo se registró a 22 y 32 °C.

3.2.1. Recuperación de cobre

La concentración de cobre en las soluciones varió entre 2967,8 mg/L, registrada en la columna T22-3, y 5088,8 mg/L, correspondiente a T32-3, lo que evidencia diferencias entre las condiciones experimentales evaluadas.

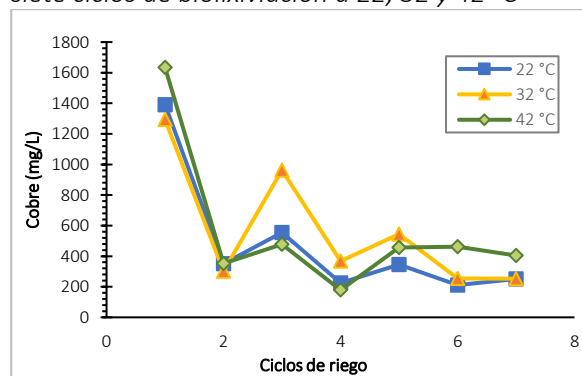
Al agrupar los resultados por temperatura, las concentraciones promedio de cobre fueron de 3327,9 mg/L a 22 °C, 4601,5

mg/L a 32 °C y 3964,6 mg/L a 42 °C (Figura 4). El mayor promedio se obtuvo a 32 °C, con valores superiores en 38,3 % respecto a 22 °C y en 16,1 % respecto a 42 °C.

Dentro del grupo operado a 32 °C, la columna T32-3 (pH 1,6; P80 de 5,2 mm) alcanzó la mayor concentración de cobre (5088,8 mg/L), mientras que T32-2 (pH 2,8; P80 de 8,3 mm) presentó la menor (3957,0 mg/L). Esta diferencia sugiere que, además de la temperatura, las condiciones de pH y tamaño de partícula podrían influir en la extracción de cobre.

Figura 4

Concentración promedio de cobre durante los siete ciclos de biolixiviación a 22, 32 y 42 °C



Nota. Las curvas representan el promedio de cuatro columnas para 22 °C (T22-1 a T22-4) y 42 °C (T42-1 a T42-4), y de cuatro columnas para 32 °C (T32-1 a T32-4 prom, incluyendo el promedio de las réplicas del punto central T32-4).

3.2.2. Especiación del hierro

A 32 °C se registraron la mayor concentración promedio de hierro total (1525,0 mg/L) y la mayor relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (405,2), lo que indica una mayor proporción de hierro en estado férrico (Fe^{3+}). Este comportamiento es consistente con una mayor actividad oxidativa del consorcio microbiano, que favorece la regeneración de Fe^{3+} , considerado uno de los principales agentes oxidantes de la calcopirita (Rohwerder et al., 2003).

En contraste, a 42 °C se obtuvieron la menor concentración promedio de hierro total (1002,5 mg/L) y una relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ inferior (231,0). Este resultado estuvo influenciado particularmente por la columna T42-2 (42 °C; pH 1,6), que presentó una concentración de Fe^{2+} de

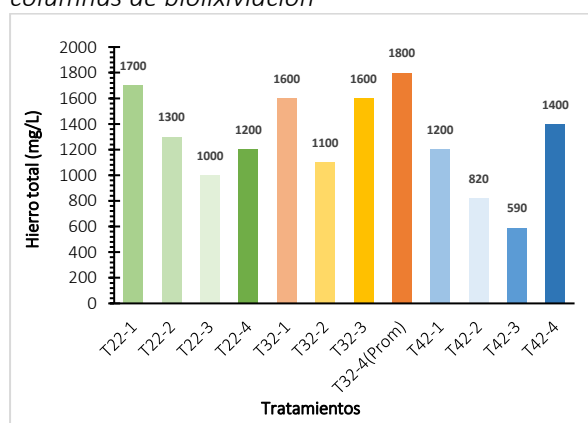
190,0 mg/L y una relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ de 3,3, lo que evidencia una menor oxidación del hierro ferroso en esta columna. Estos resultados sugieren que la combinación de temperatura elevada y pH bajo se asoció con una menor oxidación de Fe^{2+} bajo las condiciones experimentales evaluadas (De Barros et al., 2012).

3.2.3. Distribución del hierro total por columna

La Figura 5 muestra la distribución de la concentración de hierro total en las columnas individuales, agrupadas por temperatura. Las columnas operadas a 32 °C (T32-1 a T32-4) presentaron las concentraciones más elevadas, con un máximo de 1900 mg/L en T32-4, correspondiente al promedio de las réplicas del punto central. En contraste, las columnas operadas a 42 °C registraron las concentraciones más bajas, particularmente T42-3, con 590 mg/L. Este comportamiento sugiere una menor presencia de hierro en solución a 42 °C, posiblemente asociada con la precipitación de especies férricas secundarias (Panda et al., 2015).

Figura 5

Concentración de hierro total (mg/L) en las columnas de biolixiviación



Nota. Las barras se agrupan por temperatura: 22 °C (T22-1 a T22-4), 32 °C (T32-1 a T32-3 y T32-4 [prom]) y 42 °C (T42-1 a T42-4). T32-4 (prom) corresponde al promedio aritmético de las columnas C-3, C-5 y C-8, correspondientes al punto central del diseño experimental.

3.2.4. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, que refleja la concentración de especies iónicas disueltas en la solución (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} y SO_4^{2-}), presentó su

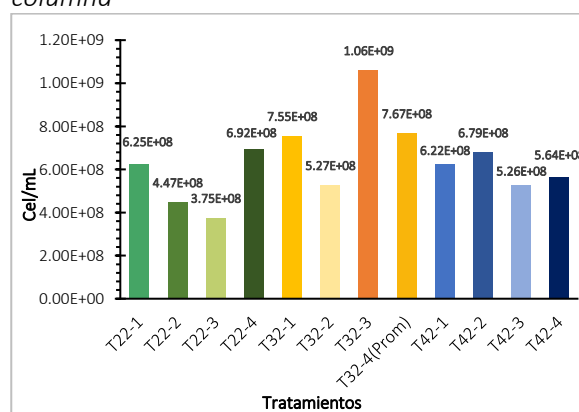
valor más elevado a 32 °C (32,4 mS/cm), seguido de 22 °C (31,1 mS/cm) y 42 °C (28,7 mS/cm). Este comportamiento es consistente con una mayor concentración de especies iónicas en solución a 32 °C. En contraste, la disminución registrada a 42 °C podría estar asociada con la precipitación de sales, como las jarositas, que reduce la concentración de iones disueltos (Bravo, 2016).

3.2.5. Población microbiana

La población microbiana promedio más elevada se obtuvo a 32 °C ($7,77 \times 10^8$ células/mL), seguida de 42 °C ($5,98 \times 10^8$ células/mL) y 22 °C ($5,35 \times 10^8$ células/mL). La columna T32-3 (32 °C, pH 1,6 y P80 de 5,2 mm) alcanzó la población máxima ($1,06 \times 10^9$ células/mL), coincidente con la mayor concentración de cobre registrada (5088,8 mg/L). Estos resultados sugieren una respuesta favorable bajo la combinación de 32 °C, pH 1,6 y P80 de 5,2 mm. La distribución de la población microbiana en las columnas individuales y los promedios correspondientes a cada temperatura se presentan en la Figura 6.

Figura 6

Población del consorcio bacteriano en cada columna



Nota. La barra T32-4 (prom) corresponde al promedio de las columnas C-3, C-5 y C-8, correspondientes al punto central del diseño experimental. Las barras con borde grueso representan el promedio de cada temperatura.

4. Discusión

4.1. Influencia de la temperatura sobre el potencial redox



El potencial redox constituye un indicador del estado oxidante del sistema y se relaciona con el equilibrio entre las especies Fe^{3+} y Fe^{2+} . En el presente estudio, el mayor valor promedio final de Eh se registró a 32 °C (584,3 mV), mientras que el menor correspondió a 42 °C (565,3 mV). Esta respuesta no muestra una relación lineal entre la temperatura y el Eh. El incremento de la temperatura de 22 a 32 °C favoreció el desarrollo de condiciones más oxidantes; sin embargo, su aumento posterior hasta 42 °C se asoció con una disminución del Eh promedio.

Este comportamiento es compatible con la respuesta esperada de un consorcio mesófilo, aunque las diferencias observadas también pueden estar influenciadas por las condiciones de pH y el tamaño de partícula (Schippers et al., 2013; Rawlings y Johnson, 2007).

La evolución temporal del Eh mostró que, a 32 °C, el incremento fue más rápido y pronunciado, con valores relativamente estables a partir de los ciclos 3 y 4. A 22 °C, el aumento fue más gradual, mientras que a 42 °C se observó un comportamiento más heterogéneo. La columna T42-2 (42 °C, pH 1,6) presentó el menor Eh (541,9 mV), pese a registrar una población microbiana de $6,79 \times 10^8$ células/mL. Este resultado sugiere que la combinación de una temperatura elevada y un pH bajo pudo afectar la oxidación de Fe^{2+} , posiblemente mediante una alteración de la actividad enzimática del consorcio microbiano (De Barros et al., 2012).

En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores promedio más elevados se registraron a 32 °C (32,4 mS/cm), seguidos de 22 °C (31,1 mS/cm) y 42 °C (28,7 mS/cm). Estos resultados son compatibles con una mayor concentración de especies iónicas disueltas, como Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} y SO_4^{2-} , a 32 °C. En contraste, la disminución de la conductividad a 42 °C podría estar asociada con la precipitación de sales, como las jarositas, que reduce la concentración de iones en solución.

4.2. Influencia de la temperatura sobre la especiación del hierro

El comportamiento del hierro proporciona evidencia adicional sobre la respuesta oxidativa del sistema. A 32 °C se registraron la mayor

concentración promedio de hierro total (1525,0 mg/L) y la mayor relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (405,2), lo que indica una elevada proporción de hierro en estado oxidado. La importancia del Fe^{3+} en la biolixiviación de calcopirita radica en su capacidad para participar en la oxidación del sulfuro mineral (Vera et al., 2022; Jones y Santini, 2023).

A 42 °C, la respuesta fue diferente. Aunque varios tratamientos mantuvieron concentraciones elevadas de Fe^{3+} , T42-2 presentó una concentración de Fe^{2+} considerablemente superior (190,0 mg/L) a la observada en los demás tratamientos, con una relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ de solo 3,3. Este comportamiento evidencia que la respuesta del sistema a la temperatura no puede interpretarse de manera aislada, sino que debe considerar las condiciones químicas específicas de cada columna (Bravo, 2016; Yu et al., 2017). Asimismo, la literatura señala que la precipitación de especies férricas secundarias, como las jarositas, puede disminuir la concentración de hierro soluble y contribuir a la pasivación durante la biolixiviación de calcopirita (Panda et al., 2015; Vakylabad et al., 2022).

4.3. Población microbiana

La mayor población microbiana promedio se registró a 32 °C, con $7,77 \times 10^8$ células/mL. Este resultado coincidió con la mayor relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ y el mayor Eh promedio, lo que sugiere una posible relación entre el desarrollo microbiano y la capacidad de regeneración del hierro férrico (Schippers et al., 2013; Johnson, 2014).

A 22 °C, la población promedio fue menor ($5,35 \times 10^8$ células/mL) y el incremento del Eh fue más gradual. Este comportamiento podría asociarse con una menor velocidad metabólica del consorcio bajo una condición térmica inferior a su rango más favorable (Yang et al., 2013; Watling et al., 2020).

A 42 °C, la población microbiana promedio se mantuvo en $5,98 \times 10^8$ células/mL; sin embargo, la respuesta oxidativa fue inferior a la registrada a 32 °C. Este resultado sugiere que una mayor población microbiana no implica necesariamente una mayor capacidad oxidativa

del sistema. La presencia de microorganismos no garantiza que su actividad metabólica de oxidación de Fe^{2+} sea equivalente bajo distintas condiciones experimentales (Johnson, 2014).

4.4. Respuesta integrada del sistema

El análisis conjunto del Eh, la especiación del hierro y la población microbiana permite identificar a 32 °C como la condición que presentó la respuesta más favorable del sistema estudiado. La coincidencia de la mayor población microbiana, la mayor concentración de hierro total, la mayor relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ y el mayor Eh promedio sugiere una interacción favorable entre el desarrollo microbiano y la regeneración del agente oxidante. Este comportamiento es consistente con los rangos de temperatura favorables para el crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* (28–30 °C) y *Leptospirillum ferriphilum* (35–38 °C) (Schippers et al., 2013; Rawlings y Johnson, 2007).

4.5. Limitaciones y perspectivas futuras

El estudio presenta algunas limitaciones. Aunque el análisis se centró en la temperatura, los tratamientos del diseño Box-Behnken también variaron en pH y tamaño de partícula, por lo que las diferencias observadas no pueden atribuirse exclusivamente a la temperatura. Además, el conteo microbiano mediante la cámara de Petroff-Hausser cuantifica la población celular total, pero no distingue entre células activas y no activas. Esta limitación es relevante a 42 °C, donde se registró una población microbiana relativamente elevada, pese a la menor respuesta oxidativa. Asimismo, no se realizaron análisis moleculares ni caracterizaciones de los productos de precipitación que permitieran explicar la disminución de la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ a esta temperatura.

Como perspectivas futuras, se propone evaluar la interacción de la temperatura con otros factores operativos, incorporar técnicas moleculares y bioquímicas para caracterizar la actividad del consorcio microbiano y analizar la formación de capas pasivantes mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva (SEM-EDS). También se recomienda ampliar el tiempo de operación,

evaluar el escalamiento del proceso a nivel piloto y explorar consorcios termófilos para operar a temperaturas superiores a 40 °C.

5. Conclusiones

Dentro de los niveles de temperatura evaluados, 32 °C presentó la respuesta más favorable, con un potencial redox final promedio de 584,3 mV, una concentración promedio de hierro total de 1525,0 mg/L, una relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ promedio de 405,2, una concentración promedio de cobre de 4601,5 mg/L y una población microbiana promedio de $7,77 \times 10^8$ células/mL.

A 22 °C, el sistema mostró una respuesta más gradual, con un Eh promedio de 575,3 mV, una concentración promedio de hierro total de 1300,0 mg/L, una concentración promedio de cobre de 3327,9 mg/L y una población microbiana de $5,35 \times 10^8$ células/mL. Estos resultados indican que el consorcio mantuvo actividad oxidativa, aunque su respuesta fue menos favorable que a 32 °C dentro del diseño experimental.

A 42 °C, el Eh promedio disminuyó hasta 565,3 mV y la concentración promedio de hierro total fue de 1002,5 mg/L. Aunque la población microbiana alcanzó $5,98 \times 10^8$ células/mL, la relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ promedio disminuyó a 231,0. Esto evidencia que una población celular relativamente elevada no necesariamente se traduce en una mayor respuesta oxidativa. La columna T42-2 (42 °C, pH 1,6) presentó el comportamiento más extremo, con 190,0 mg/L de Fe^{2+} y una relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ de 3,3.

El comportamiento de las variables evaluadas sugiere una respuesta térmica no lineal del sistema. Dentro del dominio experimental estudiado, 32 °C representó la condición más favorable, mientras que el incremento hasta 42 °C no mejoró la respuesta oxidativa del consorcio mesófilo bajo las condiciones evaluadas.

El monitoreo del potencial redox, la especiación del hierro, la concentración de cobre y la población microbiana constituye una herramienta útil para interpretar la dinámica de la biolixiviación de calcopirita e identificar las condiciones térmicas asociadas con una mayor regeneración de Fe^{3+} durante el proceso.



Contribución de los autores

B. R. Vega: Conceptualización, investigación, metodología, administración del proyecto, recursos, visualización y redacción del borrador original. **W. D. Florez:** Conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, administración del proyecto, recursos, supervisión, validación, redacción del borrador original, revisión y edición. **L. S. Vega:** Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, validación, visualización, redacción del borrador original, revisión y edición.

Conflictos de interés

Los autores manifiestan no tener conflictos de interés.

6. Referencias bibliográficas

- Ahmadi, A. (2012). Influence of ferric and ferrous iron on chemical and bacterial leaching of copper flotation concentrates. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*, 1(3), 42–48. <https://doi.org/10.4236/ijnm.2012.13006>
- Bravo, D. A. (2016). *Biolixiviación de calcopirita por Sulfobacillus acidophilus* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138434>
- Brierley, C. L., y Brierley, J. A. (2013). Progress in bioleaching: part B: applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(17), 7543–7552. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5095-3>
- De Barros, R., Gomes, S., Silva, G., Cesario, I., y Gonzada, L. (2012). Bioleaching of copper sulphide flotation concentrate in batch reaction system using mesophile and thermophile microorganisms. *Dyna*, 79(171), 23–31.
- Farías, R., Norambuena, J., Ferrer, A., Camejo, P., Zapata, C., Chávez, R., Orellana, O., y Levicán, G. (2021). Redox stress response and UV tolerance in the acidophilic iron-oxidizing bacteria *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Research in Microbiology*, 172(3), 103833. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2021.103833>
- Hong, M., Huang, X., Gan, X., Qiu, G., y Wang, J. (2021). The use of pyrite to control redox potential to enhance chalcopyrite bioleaching in the presence of *Leptospirillum ferriphilum*. *Minerals Engineering*, 172(107145), 107145. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107145>
- Johnson, D. B. (2014). Biomining-biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials. *Current Opinion in Biotechnology*, 30, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.04.008>
- Jones, S., y Santini, J. M. (2023). Mechanisms of bioleaching: iron and sulfur oxidation by acidophilic microorganisms. *Essays in Biochemistry*, 67(4), 685–699. <https://doi.org/10.1042/EBC20220257>
- Kupka, D., Bártová, Z., y Hagarová, L. (2023). Kinetics study comparing bacterial growth and iron oxidation kinetics over a range of temperatures 5–45 °C. *Hydrometallurgy*, 222(106181), 106181. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106181>
- Liu, H., Lu, X., Zhang, L., Xiang, W., Zhu, X., Li, J., Wang, X., Lu, J., y Wang, R. (2018). Collaborative effects of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and ferrous ions on the oxidation of chalcopyrite. *Chemical Geology*, 493, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.032>
- Ma, L., Huang, S., Wu, P., Xiong, J., Wang, H., Liao, H., y Liu, X. (2021). The interaction of

- acidophiles driving community functional responses to the re-inoculated chalcopyrite bioleaching process. *The Science of the Total Environment*, 798(149186), 149186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149186>
- Panda, S., Akcil, A., Pradhan, N., y Deveci, H. (2015). Current scenario of chalcopyrite bioleaching: a review on the recent advances to its heap-leach technology. *Bioresource Technology*, 196, 694–706. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.064>
- Rawlings, D. E., y Johnson, D. B. (2007). The microbiology of biomining: development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia. *Microbiology (Reading, England)*, 153(Pt 2), 315–324. <https://doi.org/10.1099/mic.0.2006/001206-0>
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., y Sand, W. (2003). Bioleaching review part A: progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(3), 239–248. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1448-7>
- Santos, A. L. A., Arena, F. A., Benedetti, A. V., y Bevilacqua, D. (2017). Effect of redox potential on chalcopyrite dissolution imposed by addition of ferrous ions. *Eclética Química Journal*, 42(1), 40. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v42.1.2017.p40-50>
- Schippers, A., Hedrich, S., Vasters, J., Drobe, M., Sand, W. y Willscher, S. (2013). Biomining: Metal Recovery from Ores with Microorganisms. En A. Schippers, F. Glombitza y W. Sand (Eds.), *Geobiotechnology I. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology* (Vol. 141). Springer. https://doi.org/10.1007/10_2013_216
- Silverman, M. P. y Lundgren, D. G. (1959). Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. I. An improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields. *Journal of Bacteriology*, 77(5), 642–647. <https://doi.org/10.1128/jb.77.5.642-647.1959>
- Vakylabad, A. B., Nazari, S. y Darezereshki, E. (2022). Bioleaching of copper from chalcopyrite ore at higher NaCl concentrations. *Minerals Engineering*, 178, 107281. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107281>
- Vega Baca, B. R. (2025). *Optimización de la temperatura, tamaño de partícula y pH de la solución ácida en columnas con calcopirita para maximizar la recuperación de cobre por biolixiviación, Tacna-2022* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/1193e0bb-a1fe-4c72-98e0-41e59bbcdab3>
- Vera, M., Schippers, A., Hedrich, S. y Sand, W. (2022). Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation – Part A. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(21), 6933–6952. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12168-7>
- Watling, H. R., Johnson, J. J., Shiers, D. W., Gibson, J. A. E., Nichols, P. D., Franzmann, P. D., y Plumb, J. J. (2016). Effect of temperature and inoculation strategy on Cu recovery and microbial activity in column bioleaching. *Hydrometallurgy*, 164, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.05.017>
- Yang, Y., Diao, M., Liu, K., Qian, L., Nguyen, A. V., y Qiu, G. (2013). Column bioleaching of low-grade copper ore by *Acidithiobacillus ferrooxidans* in pure and mixed cultures with a heterotrophic acidophile *Acidiphilium* sp. *Hydrometallurgy*, 131–132, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.09.003>



- Yu, Z.-J., Yu, R.-L., Liu, A.-J., Liu, J., Zeng, W.-M., Liu, X.-D., y Qiu, G.-Z. (2017). Effect of pH values on extracellular protein and polysaccharide secretions of *Acidithiobacillus ferrooxidans* during chalcopryrite bioleaching. *Transactions of the Nonferrous Metals Society of China*, 27(2), 406–412. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(17\)60046-3](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(17)60046-3)
- Zhao, H., Zhang, Y., Zhang, X., Qian, L., Sun, M., Yang, Y., Zhang, Y., Wang, J., Kim, H., y Qiu, G. (2019). The dissolution and passivation mechanism of chalcopryrite in bioleaching: An overview. *Minerals Engineering*, 136, 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.03.014>