

Recuperación de solubles de cobre mediante el control de la crisocola durante el proceso de flotación en la actividad minera

Recovering copper soluble by chrysocolla control during flotation process in mining

Renzo Alejandro Diaz-Privat^{1*}, Piero Jhon Waidhofer-Huaman¹, Joel Rojas-Pérez¹,
Nelida Tantavilca-Martínez¹

¹Universidad Continental, Huancayo, Perú.

*Autor para correspondencia: 70229175@continental.edu.pe

Resumen

La presencia de minerales como la crisocola en las menas dificulta la eficiente extracción del cobre soluble. En este trabajo se analizaron muestras de minerales mixtos de cobre, variando las dosis de reactivos en pruebas de flotación para maximizar la extracción de cobre soluble en la unidad minera La Bonita, en el departamento de Arequipa, Perú. Se determinó que a menor contenido de crisocola, la recuperación de cobre soluble aumentó significativamente. Los resultados permiten establecer estrategias enfocadas en la selección y mezcla de menas para reducir los niveles de crisocola, liberando minerales de cobre soluble y mejorando su flotabilidad.

Palabras clave: extracción de cobre, proceso de flotación, cobre soluble, crisocola, xantatos, menas de cobre

Abstract

Associated minerals such as chrysocolla in ores, makes it difficult to extract soluble copper efficiently. This work analyzed samples of mixed copper minerals, varying the doses of reagents in flotation tests to maximize the extraction of soluble copper at La Bonita mining unit, in Arequipa, Peru. It was found that the lower chrysocolla content, the recovery of soluble copper increases significantly. Results allow strategies to be established focused on ore selection and mixing for reducing chrysocolla levels, releasing soluble copper minerals and improving their buoyancy.

Keywords: copper extraction, flotation process, soluble copper, chrysocolla, xanthates, copper ores

1. INTRODUCCIÓN

En la actividad minera el cobre soluble representa una fracción crítica del cobre total que se extrae durante el proceso de flotación a partir de menas de cobre. La demanda global de cobre ha aumentado sostenidamente en las últimas décadas, impulsada por sectores como la construcción, la electrónica y las energías renovables (Gorlova *et al.*, 2021). Esto ha llevado a la necesidad de desarrollar métodos mejorados para la recuperación de cobre soluble (Medyanik *et al.*, 2012). Sin embargo, la presencia de minerales como la crisocola en las menas dificulta la eficiente extracción del cobre soluble (Yin, 2018).

La crisocola $(\text{Cu,Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ es un silicato de cobre que exhibe propiedades depresivas durante la flotación, inhibiendo la recuperación de otros minerales de cobre solubles como la calcocita, covellita y cuprite (Wang *et al.*, 2022). Esta recuperación se da mediante el uso de técnicas avanzadas de caracterización mineralógica y el diseño de estrategias de flotación específicas con el objetivo de maximizar la recuperación del cobre soluble, optimizando así los ejes económicos y ambientales de las operaciones mineras (Lusambo & Mulenga, 2018; Ryaboy & Shepeta, 2020; Pereira *et al.*, 2023).

La matriz mineralógica de ciertos yacimientos contiene niveles variables de crisocola, influyendo negativamente en las tasas de recuperación de cobre soluble (Flöter, 1980; Zhu *et al.*, 2020). Por ello, este estudio analiza estrategias para controlar el contenido de crisocola durante el proceso de flotación para maximizar la extracción de cobre soluble en la Unidad Minera La Bonita.

Asimismo, a través de pruebas metalúrgicas sobre menas con 15-95 % de crisocola y la optimización de parámetros como molienda y reactivos (Ahmadi *et al.*, 2021), se evalúa el efecto del contenido de crisocola sobre la recuperación de cobre soluble. Los resultados permiten determinar estrategias enfocadas en la selección y mezcla de menas para reducir los niveles de crisocola, liberando así minerales de cobre soluble y mejorando su flotabilidad (Cai *et al.*, 2022). Este análisis puede guiar el diseño de procesos más eficientes para yacimientos complejos de cobre soluble y crisocola (Feng *et al.*, 2022).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación y descripción del área de estudio

La Unidad Minera La Bonita está ubicada en el sur del Perú, en el departamento de Arequipa, provincia de Caravelí, Distrito de Bella Unión con una altitud de 1 715 m.s.n.m. (Figura 1).

La unidad de AGROMIN La Bonita corresponde a un yacimiento cuprífero. La actividad principal es la exploración, desarrollo, preparación, explotación y beneficio de mineral de cobre y, en menor proporción, oro y plata, mediante el método de corte y relleno ascendente convencional (Legua & Acuña, 2023). Es una mina convencional subterránea que presenta un yacimiento tipo vetas de Cu en forma de rosario y contiene sulfuros primarios, secundarios y los óxidos, en menor cantidad. Los minerales económicos presentes son la calcosina, calcopirita y la covelina (Huanacuni & Sanca, 2024).

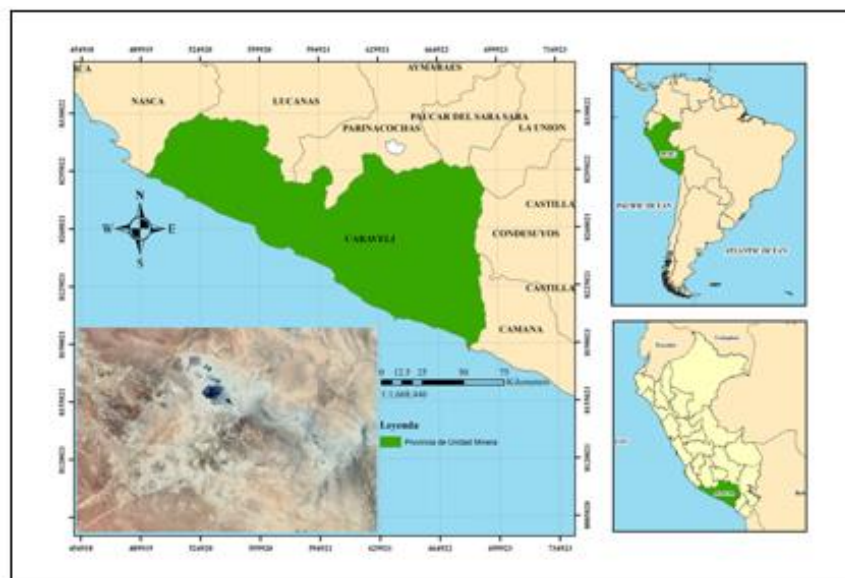


Figura 1. Área de estudio Unidad Minera La Bonita.

2.2. Proceso receptor de metodología

La Figura 2 muestra las etapas principales de un proceso de recuperación de cobre soluble. Este proceso abarca desde el chancado, molienda (que permite la liberación del mineral valioso) y el acondicionamiento de la pulpa (proceso subsecuente a la etapa de flotación), donde se aprovecha la propiedad de hidrofobicidad para separar el mineral valioso de la ganga. Posteriormente, se lleva a cabo el proceso de filtrado, que permite la separación del concentrado de cobre y el agua para su reutilización. Finalmente, se completó el ciclo con el manejo y la disposición adecuada de los relaves, cerrando así el ciclo del proceso de recuperación de cobre soluble. Por otra parte, para la

determinación de leyes se desarrollaron dos métodos: instrumental para muestras de mineral y relave; y clásico para muestras de concentrado.

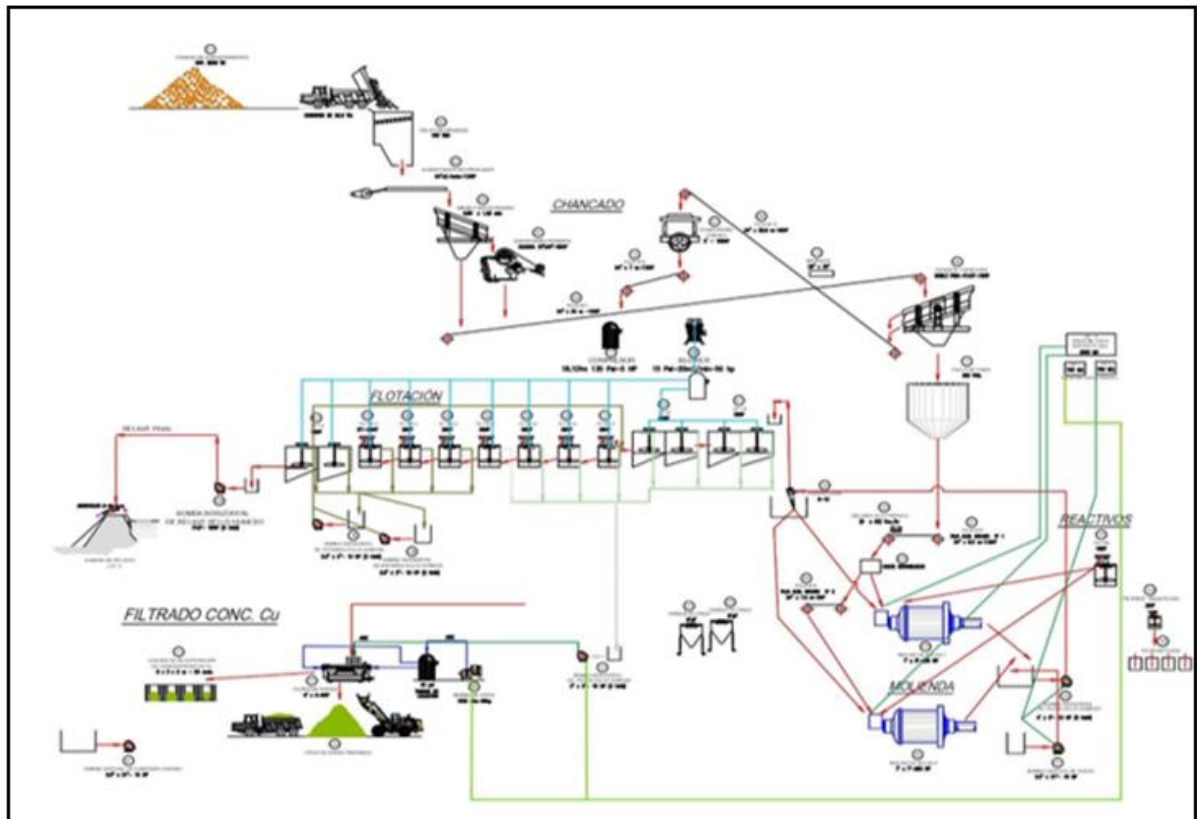


Figura 2. Flujograma del proceso en relación a la recuperación de cobre soluble.

2.3. Materiales

Se obtuvieron muestras representativas de minerales de cobre mixtos (sulfuro y solubles de cobre) de la mina, siguiendo los protocolos estándares de muestreo sistemático. Se seleccionaron cuatro muestras con contenidos mineralógicos variables, como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición mineralógica de las muestras

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4
Malaquita	3 %	20 %	30 %	35 %
Cuprita	1 %	10 %	10 %	20 %
Tenorita	1 %	5 %	0 %	5 %
Crisocola	95 %	40 %	35 %	15 %
Sulfuro primario	0 %	10 %	10 %	10 %
Sulfuro secundario	0 %	15 %	15 %	15 %

Se tuvo en cuenta como variable mineralógica el contenido de la crisocola, de 95 %, 40 %, 35 % y 15 %, respectivamente. Las muestras de mineral se

trasladaron a un laboratorio metalúrgico, donde se sometieron a un proceso de preparación que incluyó molienda, utilizando un molino de bolas, hasta obtener la granulometría menor a malla -200 en 80 % en promedio. Posteriormente, se formó pulpa de mineral y agua; ajustando el pH de esta con adición controlada de cal, hasta alcanzar el rango óptimo para flotación entre 11,5 a 12,5 de pH; luego la pulpa pasó a un proceso de flotación en dos etapas para cada muestra, adquiriendo muestras para su análisis químico respectivo. Se obtuvieron resultados variables en cada prueba, mediante el control de contenido porcentual de crisocola en cada muestra.

En estas pruebas se variaron metódicamente las dosis de los distintos reactivos, como colectores (xantato amílico de potasio Z-6 y xantato isopropílico de sodio Z-11), el espumante (Dowfroth-250), sulfuro de sodio y aero promotores (A-208, A-242). Se realizaron cuatro pruebas de flotación, una para cada muestra, combinando diferentes niveles de dosificación. Finalmente, se determinaron cuantitativamente las leyes de cobre en concentrados y relaves, obteniendo recuperaciones de cobre total y cobre soluble.

3. RESULTADOS

La Tabla 2 describe las condiciones físicas del mineral y la pulpa, incluyendo el porcentaje de molienda (malla -200), el pH del mineral y de la pulpa para la flotación, el consumo de cal y la densidad de la pulpa.

Tabla 2. Condiciones físicas de mineral y pulpa

	Molienda Malla -200	Ph de mineral	Ph de Pulpa para flotación	Consumo de cal	Densidad de pulpa
Prueba N°1 (Muestra 1)	81 %	4,5	12	24 kg/t	1 285 g/cm ³
Prueba N°2 (Muestra 2)	65 %	4,5	12	15 kg/t	1 285 g/cm ³
Prueba N°3 (Muestra 3)	70 %	4,5	12	10 kg/t	1 250 g/cm ³
Prueba N°4 (Muestra 4)	70 %	4,5	12	5 kg/t	1 250 g/cm ³

La Tabla 3 detalla la dosificación de reactivos químicos de flotación: colectores como xantato amílico de potasio y xantato isopropílico de sodio; espumante Dowfroth-250, aeropromotores A-208, A-242 y sulfuro de sodio en las diferentes pruebas realizadas para cada muestra.

Al analizar la Tabla 4 se observa una mejor recuperación de cobre soluble con un contenido menor de crisocola, siendo esta inversamente proporcional.

Tabla 3. Dosificación de reactivos

	Xantato Amilico de Potasio - Z-6	Xantato Isopropilico de Sodio - Z-11	Dowfroth - 250	Aero Promotor -208	Aero Promotor -242	Sulfuro de Sodio
Prueba N°1 (Muestra 1)	250 g/t	55 g/t	50 g/t	30 g/t	45 g/t	650 g/t
Prueba N°2 (Muestra 2)	240 g/t	40 g/t	60 g/t	25 g/t	35 g/t	850 g/t
Prueba N°3 (Muestra 3)	180 g/t	40 g/t	60 g/t	15 g/t	35 g/t	750 g/t
Prueba N°4 (Muestra 4)	325 g/t	35 g/t	50 g/t	20 g/t	40 g/t	650 g/t

Tabla 4. Resultados de la recuperación bajo el control de la crisocola

	Leyes de Mineral		Ley Concentrado	Ley de Relave		Composición Mineralógica de Mineral	Recuperaciones	
	%Cu Total	%Cu Soluble	%de Cu Total	%Cu Total	%Cu Soluble	%Crisocola (Cu,Al) ₄ H ₄ (OH) ₈ Si ₄ O ₁₀ ·nH ₂ O	Cu Soluble	Cu Total
Prueba N°1 (Muestra 1)	3,55%	3,47%	7,80%	3,25%	3,20%	95%	13,19%	14,49%
Prueba N°2 (Muestra 2)	3,42%	1,84%	22,76%	1,20%	0,80%	40%	58,58%	68,53%
Prueba N°3 (Muestra 3)	3,31%	2,32%	21,00%	1,10%	0,85%	35%	66,03%	70,46%
Prueba N°4 (Muestra 4)	5,91%	5,80%	26,26%	1,29%	1,27%	15%	82,39%	82,19%

Los resultados de las pruebas metalúrgicas de las muestras (Tablas 2, 3 y 4) ofrecen una visión detallada de las condiciones operativas, la dosificación de reactivos y los resultados de recuperación de cobre total y cobre soluble. La prueba con el contenido de crisocola más alto (95 %) registró la recuperación de cobre soluble más baja, con un 13,19 %. En contraste, a medida que el contenido de crisocola disminuyó en las pruebas subsiguientes (40 %, 35 % y 15 %), la recuperación de cobre soluble aumentó significativamente, alcanzando valores de 58,58 %, 66,03 % y 82,39 %, respectivamente. Esto

demuestra que el control mineralógico de la crisocola tiene un impacto importante en la recuperación del cobre soluble y cobre total.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La clave para una mayor recuperación de cobre soluble y, por ende, de cobre total, se basa principalmente en el control mineralógico de la crisocola en mineral a tratar. Además, Gorlova *et al.* (2021) mencionan que, debido a que el xantato actuó como colector, se genera mayor hidrofobicidad en las superficies de dichos minerales y mejorando así su flotabilidad.

Por otro lado, Herwer *et al.* (2020) manifiestan que es relevante el control de variables tales como el pH, tamaño de partículas, porcentaje de sólidos, flujo de agua y aire, siendo esto beneficioso para el concentrado final que se obtiene durante el proceso de flotación. Sin embargo, el presente estudio indica que estas variables son importantes mas no determinante en la recuperación del cobre soluble.

Desde una perspectiva operativa, es importante implementar técnicas selectivas de procesamiento mineral para controlar los niveles de crisocola previo a la flotación. Sibanda *et al.*, (2020) señalan que reducir el tamaño de partícula mediante molienda mejorada y el uso de reactivos específicos aumenta la recuperación de cobre finamente diseminado.

Esto concuerda con la experiencia práctica en la unidad minera La Bonita donde la recuperación de cobre soluble del año 2021 y 2022 en promedio es de 59 %, a comparación del año 2023 donde la recuperación del cobre soluble mediante el control mineralógico de la crisocola fue de 68-77 %, demostrando así que el presente estudio brindó una eficaz mejora en el proceso de recuperación de cobre soluble.

Se concuerda con Ahmadi *et al.* (2021), en relación a la importancia de controlar reactivos para mejorar la recuperación de cobre dado, que en el presente estudio la dosificación de colectores es directamente proporcional a la ley del mineral a tratar como muestra en la Tabla 3 y 4 en su prueba N°4.

5. CONCLUSIONES

- Es importante minimizar el contenido de crisocola para mejorar la recuperación de cobre soluble durante la flotación. A medida que la crisocola se reduce del 95 % al 15 % en las pruebas, la recuperación de cobre soluble aumenta significativamente del 13,19 % al 82,39 %.
- Se evidencia una mejora en la recuperación de cobre solubles cuando se controla la crisocola en las operaciones mineras, muestreos geológicos y la alimentación de mineral al proceso de flotación. Estos

procesos de control permiten que la flotación de minerales como cobre soluble sean rentables dado a su alta recuperación.

- Las etapas más relevantes de un proceso de flotación de cobre optimizado pueden reutilizar el 100 % de agua industrial, teniendo así un manejo responsable de relaves evitando impactos ambientales en comparación al proceso de lixiviación ácida de los cobres solubles.
- Finalmente, es preciso evaluar la efectividad de estas técnicas bajo distintas condiciones operativas y en diferentes yacimientos de cobre, mediante pruebas metalúrgicas, siendo medidas fundamentales para mejorar la recuperación de cobres solubles. Esto permitiría examinar su aplicabilidad a nivel industrial para el control enfocado de la crisocola y la consecuente mejora en la flotación de cobre soluble, enfatizando el aspecto ambiental.

6. REFERENCIAS

- Ahmadi, A., Rezaei, M., & Sadeghieh, S. M. (2021). Interaction effects of flotation reagents for SAG mill reject of copper sulphide ore using response surface methodology. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(3), 792-806. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65539-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65539-5)
- Cai, J., Su, C., Ma, Y., Yu, X., Peng, R., Li, J., Zhang, X., Fang, J., Shen, P., & Liu, D. (2022). Role of ammonium sulfate in sulfurization flotation of azurite: Inhibiting the formation of copper sulfide colloid and its mechanism. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(3), 575-584. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.01.007>
- Feng, Q., Yang, W., Wen, S., Wang, H., Zhao, W., & Han, G. (2022). Flotation of copper oxide minerals: A review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 32(6), 1351-1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.09.011>
- Flöter, W. (1980). Aufbereitung von Uranerzen und Gewinnung eines verkaufsfähigen Produkts. U Uran, 1-89. 1
- Gorlova, O. E., Medyanik, N. L., Mishurina, O. A., & Mullina, E. R. (2021). Mixed-Type Flotation-Hydrometallurgical Processing Technology for Complex Copper-Bearing Ore. *Journal of Mining Science*, 57(5), 834-841. <https://doi.org/10.1134/S1062739121050136/METRICS>

- Herwer, G., Pineda, S., Javier, P., & Taco, V. (2020). Análisis del control de las principales variables del proceso de flotación del cobre. Universidad Católica San Pablo. <https://hdl.handle.net/20.500.12590/16484>
- Huanacuni, E. R. & Sanca, P. A. P. (2024). *Influencia de la seguridad basada en el comportamiento para la prevención de accidentes e incidentes en la unidad minera Agromin La Bonita*. (Trabajo de Diploma, Universidad Continental, Perú).
<https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/14719>
- Legua, F. S. & Acuña, E. J. (2023). *Diseño y ejecución de la profundización de un pique de doble compartimento para el incremento de reservas minerales en la Unidad Minera AGROMIN La Bonita S.A.C.* (Trabajo de Diploma, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, UPC).
<http://hdl.handle.net/10757/670715>
- Lusambo, M., & Mulenga, F. K. (2018). Empirical model of recovery response of copper sulphide circuit at Kansanshi Mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 118(11), 1179-1184.
<https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n11a8>
- Medyanik, N. L., Chanturia, V. A., & Shadrunkova, I. V. (2012). Quantum-chemical method for selection of a collecting agent to recover zinc and copper(II) cations in flotation of mine waste waters. *Journal of Mining Science*, 48(1), 167-176.
<https://doi.org/10.1134/S1062739148010182/METRICS>
- Pereira, L., Kupka, N., Huu-Hoang, D., Michaux, B., Saquran, S., Ebert, D., & Rudolph, M. (2023). On the impact of grinding conditions in the flotation of semi-soluble salt-type mineral-containing ores driven by surface or particle geometry effects? *International Journal of Mining Science and Technology*, 33(7), 855-872.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.03.007>
- Ryaboy, V. I., & Shepeta, E. D. (2020). Collector for copper-arsenic ore flotation. *Mining Science and Technology (Russian Federation)*, 5(4), 297-306. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-4-297-306>
- Sibanda, V., Sipunga, E., Danha, G., & Mamvura, T. A. (2020). Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal. *Heliyon*, 6(1).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03135>
- Wang, H., Wen, S., Han, G., He, Y., & Feng, Q. (2022). Adsorption behavior and mechanism of copper ions in the sulfidization flotation of malachite.

International Journal of Mining Science and Technology, 32(4), 897-906.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2022.06.006>

Yin, Z., Sun, W., Hu, Y., Zhang, C., Guan, Q., & Wu, K. (2018). Evaluation of the possibility of copper recovery from tailings by flotation through bench-scale, commissioning, and industrial tests. *Journal of Cleaner Production*, 171, 1039-1048. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.020>

Zhu, X., Cui, T., Li, B., Nie, C. C., Zhang, H., Lyu, X. J., Tao, Y., Qiu, J., Li, L., & Zhang, G. W. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards by flotation technology with non-ionic renewable collector. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120289. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120289>

Información adicional

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen

Contribución de autores:

RADP y PJWH: elaboración de introducción, marco teórico, análisis de datos, resultados, discusiones y conclusiones. JRP: Análisis de datos, análisis de laboratorio y permisos para la extracción de información de la minera. NTM: Revisión metodológica y revisión en general.

ORCID

RADP, <https://orcid.org/0000-0002-3038-1321>

PJWH, <https://orcid.org/0009-0006-1159-669X>

JRP, <https://orcid.org/0009-0006-3816-4897>

NTM, <https://orcid.org/0000-0002-9988-2941>

Recibido: 06/05/2024

Aceptado: 30/06/2024