 Minería y Geología / v.41 n.2/ abril-junio / 2025/ p. 124-133 ISSN 1993 8012

ARTÍCULO ORIGINAL

Molibilidad del escombro diferenciado con posibilidad de incorporación al proceso Caron

Grindability of differentiated overburden with incorporating possibility to the Caron process

Yunior Correa-Cala[1], Eliveydis Mosqueda-Pérez[2], Yabriel Oliveros-Silvente[2], Roger Samuel Almenares-Reyes[1], Hugo Javier Ângulo-Palma[2*]

[1]Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

[2]Centro de Investigaciones del Níquel, Holguín, Cuba.

[*]Autor para la correspondencia: hangulo@cil.moa.minem.cu

Resumen

El suministro de escombro laterítico con contenido de níquel inferior y cercano a 0,9 % -llamado escombro diferenciado- constituye una variante tecnológica posible en el proceso Caron. El propósito de esta investigación fue determinar el comportamiento cinético de la molienda del escombro diferenciado, con posibilidad de incorporación al proceso Caron en Cuba, usando para ello las instalaciones del molino convencional de Bond del Centro de Investigaciones del Níquel. Se obtuvo que en la mena prevalecen los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro y aluminio mezclados con serpentinas, con porcentajes de Ni de 0,845% y de Fe de 40,50% que permiten clasificarlo como escombro diferenciado. El análisis cinético del proceso de molienda del escombro mostró que las tasas de rotura específicas oscilaron en el intervalo de 0,89 min^{-1} a 0,20 min^{-1}, correspondiendo los valores más altos a las fracciones de tamaño mayores. Los parámetros **C** y **n** del modelo cinético acumulativo resultan en 0,056738 y 0,384293, respectivamente, con un coeficiente de determinación superior al 88%.

Palabras clave: escombro diferenciado, cinética de la molienda, proceso Caron

The supply of lateritic overburden with nickel content lower and close to 0.9% - called differentiated overburden- constitutes a possible technological variant in the Caron process. The purpose of this research is determining the kinetic behavior of the grinding of the differentiated overburden, with the possibility of incorporating to the Caron process in Cuba, using the facilities of the conventional Bond mill of the Nickel Research Center. It was obtained that

oxides and oxy-hydroxides of iron and aluminum minerals mixed with serpentines, prevail in the ore with Ni percentages of 0.845% and Fe of 40.50% that allow classifying it as differentiated overburden. The kinetic analysis of overburden milling process showed that the specific breakage rates are in the range of 0.89 min-1 to 0.20 min-1, with the highest values corresponding to the larger size fractions. The **C** and **n** parameters of the cumulative kinetic model resulted in 0.056738 and 0.384293 respectively, with a coefficient of determination higher than 88%.
Keywords: differentiated overburden, grinding kinetics, Caron process

1. INTRODUCCIÓN

El níquel (Ni) es un elemento crítico y estratégico que presenta actualmente una elevada demanda en la producción de aceros especiales, aleaciones aeroespaciales y baterías de iones de litio para vehículos eléctricos debido a que genera mejoras en las propiedades de los materiales tales como durabilidad, resistencia a la corrosión, ductilidad y conductividad térmica y eléctrica (Bartzas *et al*., 2021; Mitterecker *et al*., 2022).

Las principales reservas de este metal se encuentran en la mena laterítica y en la sulfurosa; la primera contiene el 72,2 % de las reservas del Ni del mundo, con un incremento de la producción anual, desde el 2004 hasta la actualidad, de 42% a 69%, debido al agotamiento gradual en los últimos años de las menas sulfurosas con altos contenidos (Zevgolis & Daskalakis, 2022).

Generalmente se reconoce que las lateritas se clasifican según su contenido de hierro (Fe) y magnesio (Mg) en limonitas y saprolitas; la capa más superficial y la base del depósito no se procesan debido a que los contenidos de Ni son los más bajos. Las zonas que presentan mayor potencial para la extracción son la limoníticas, saprolíticas y de transición, con contenidos de Ni superiores a 1,5 % para las saprolitas e inferiores a este valor en las limonitas (Díaz-Bello, 2016).

Para procesar las menas lateríticas se recomienda utilizar procesos químicos como la hidrometalurgia y la pirometalurgia con el fin de generar cambios en su mineralogía inicial, siendo el proceso Caron uno de los más importantes (Oxley & Barcza, 2013; Pintowantoro *et al*., 2021).

La tecnología Caron combina los procesos piro e hidrometalúrgico (Angulo-Palma *et al*., 2022). Entre sus secciones básicas se encuentra el proceso de molienda, con incidencias significativas en sus índices técnico-económicos debido al elevado consumo energético que genera la operación de conminución (Coello-Velázquez 2015). Laborde-Brown *et al*. (2004) identifican a la molienda como uno de los principales consumidores

energéticos entre el resto de los procesos de la tecnología carbonato amoniacal, razón que justifica la ejecución de acciones encaminadas a lograr indicadores energéticos cada vez más favorables.

La mena laterítica cubana es multicomponente, cuyos minerales principales pertenecen al grupo de las serpentinitas y limonitas; sus índices de molienda están determinados por el contenido de cada mineral en la mena inicial y cada componente se muele, solo o en la mezcla, según sus propias regularidades individuales sin considerar interacción alguna entre ellos (Coello-Velázquez *et al*., 2008).

Actualmente la mena limonítica presenta un elevado grado de agotamiento, provocado por la explotación minera irracional por parte de las empresas productoras durante más de 30 años, lo cual ha ocasionado algunos problemas como el aumento de la distancia de transportación, la disminución del contenido de mineral útil, aumento del contenido de minerales nocivos para los procesos metalúrgicos e incremento continuo del costo de minería (Sariol-López *et al*., 2011)

Una de las soluciones propuestas para resolver esta problemática es formular mezclas a partir de los minerales de serpentina y el escombro diferenciado, entendiéndose por este último la capa superior al mineral limonítico con contenido de níquel inferior y cercano a 0,9% (Véliz-Jardinez & Miranda-López, 2022). La propuesta se fundamenta en la sinergia que se establecería al formular mezclas que garanticen la estabilidad del contenido de hierro, uno de los parámetros que interviene en la eficiencia de extracción recomendados por Caron (1950).

Debido a que existe la posibilidad de incorporar el escombro diferenciado como materia prima en el proceso Caron, resulta necesario determinar el comportamiento cinético de la molienda de estos recursos, razón que justifica esta investigación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar el estudio experimental se utilizó una muestra de escombro diferenciado del perfil laterítico típico de óxidos. A partir de una muestra inicial de 20 t del yacimiento Camarioca Este se conformó, mediante el muestreo probabilístico aleatorio simple, una muestra de 500 kg. Al preparar la muestra se garantizó que estuvieran secas, con un tamaño máximo de partícula menor a 3,15 mm y un grado de homogeneización superior al 95%.

La investigación se realizó en un molino de Bond estándar de 305 mm de longitud y 305 mm de diámetro, a 70 rpm y con una carga de bolas de acero de 20,276 kg (Figura 1). La mena adicionada al molino corresponde a un peso

de 700 cm^3, con ciclos de molienda que oscilaron en el intervalo de 0,5 a 5. El molino simuló el equilibrio de una operación continua con una recirculación del 250%.

Para determinar los elementos químicos de la mena suministrada al molino, se utilizó el método de espectrofotometría de absorción atómica (EAA) modelo SOLAR 929 y llama-generador de hidruros. Las fases mineralógicas se identificaron por difracción de rayos X en polvo (DRX) con un difractómetro PANalytical X'PERT3 con barrido de Gonio a [°2θ] registro angular desde 4,0042 hasta 79,9962°, distancia de paso en °2θ de 0,0080°, diferencia de potencial de 40 kV, corriente de 30 mA y una calibración comprobada con un estándar de silicio externo.

Figura 1. Instalación experimental del molino de Bond.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características química-mineralógicas de la muestra inicial

Las características químicas de la muestra inicial (Tabla 1) confirman que el escombro utilizado en el estudio cumple con las exigencias establecidas para ser clasificado como diferenciado, al presentar un porcentaje de Ni inferior y cercano a 0,9 %, punto de corte que exige el proceso Caron (Angulo *et al*., 2024), valores de Fe superiores al 40% y contenidos bajos de SiO_2 y MgO. Además; los altos contenidos de Al_2O_3 (12,29%) constituyen un rasgo característico del yacimiento del que se toma la muestra, de acuerdo con los resultados reportados por Véliz-Jardinez & Miranda-López (2022).

Tabla 1. Composición química del escombro inicial

Elementos	**Ni**	**Co**	**Fe**	**MgO**	**Mn**	**Al_2O_3**	**Cr**	**SiO_2**
Contenido, %	0,845	0,107	40,50	2,30	0,973	12,29	1,35	6,79

Las fases mineralógicas del escombro diferenciado inicial aparecen en la Figura 1. Se observa que la mena se caracteriza por el predominio de los

óxidos y oxihidróxidos de hierro; entre los que destacan la goethita [$Fe^{+3}O(OH)$], la maghemita [$Fe_{21.16}O_{31.92}$] y la hematita [Fe_2O_3], así como el aluminio en forma de gibbsita [$Al(OH)_3$]. Los contenidos de silicio y magnesio se expresaron en las fases secundarias de silicato en forma de lizardita [$(MgFe)_3Si_2O_5(OH)_4$], talco [$Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$] y cuarzo [SiO_2]. Diferentes investigaciones (Domènech *et al*., 2017; Tauler *et al*., 2023; Toirac-Leyva & Rojas-Purón, 2021) coinciden con las fases identificadas en este estudio.

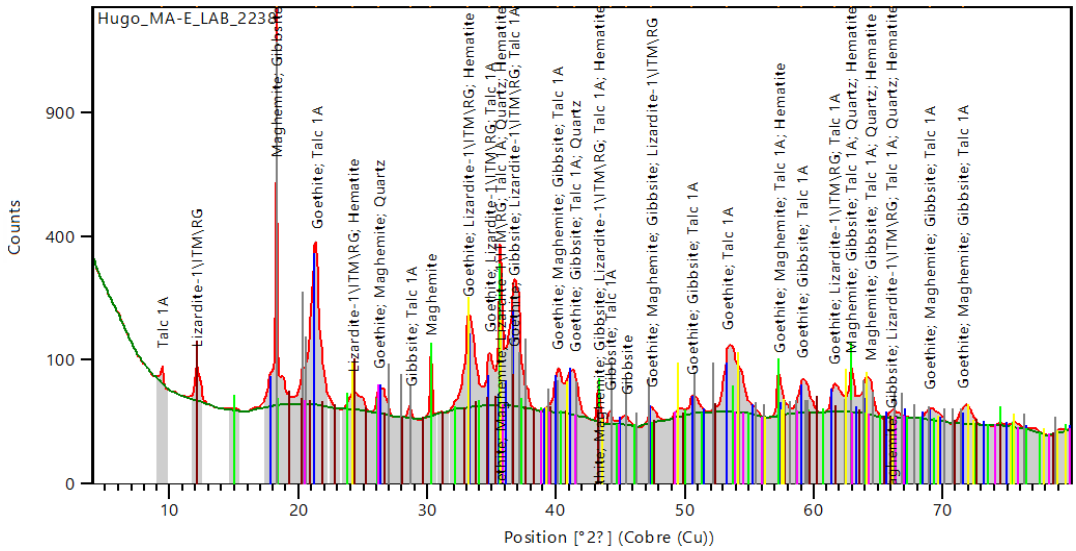

Figura 2. Fases mineralógicas identificadas en el escombro.

3.2. Cinética del proceso de molienda del escombro diferenciado

El comportamiento granulométrico de los ocho tiempos de molienda evaluados en la investigación se presenta en la Figura 3.

La forma de las curvas confirma que predominan las partículas finas en todas las muestras, independientemente del tiempo de molienda bajo análisis. Se observa como regularidad que a medida que se incrementa el período de molienda los porcentajes de Pasantes Acumulativos (% P_A) aumentan en cada una de las fracciones de tamaños, comportamiento característico de un adecuado proceso de conminución.

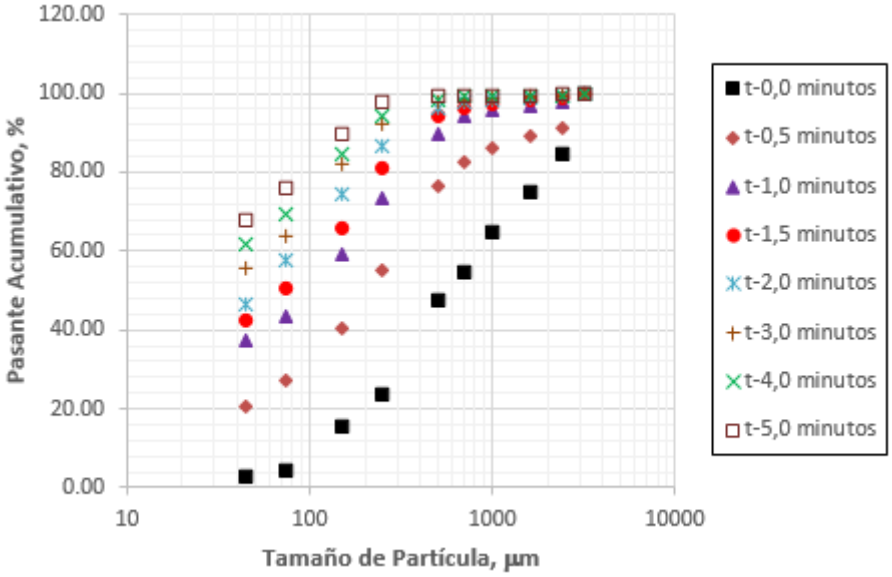

Figura 3. Comportamiento granulométrico del escombro en diferentes tiempos de molienda.

A partir de los resultados de la Figura 3 se determinan las tasas de rotura específica correspondiente a cada fracción granulométrica, al considerar que la velocidad de rompimiento de los materiales se ajusta a un modelo de primer orden (Tabla 2).

Tabla 2. Tasas de rotura específica para cada tamaño

Tamiz, µm	2380	1600	1000	710	500	250	150	75	45
k, min^{-1}	0,883409	0,842915	0,827518	0,808877	0,765676	0,651310	0,397009	0,252789	0,207122

El análisis del comportamiento de las tasas de rotura específica en los diferentes tamaños muestra que oscilaron en el intervalo de 0,89 min^{-1} a 0,20 min^{-1}, donde los valores más elevados se encuentran en las fracciones de mayor tamaño, observándose como regularidad una disminución a medida que se aproxima a los tamaños de partícula más bajos. Este comportamiento indica que las fracciones de menor tamaño resultan más difícil de moler, lo cual es congruente con las deducciones establecidas por Menéndez-Aguado, Coello-Velázquez & Dzioba-Blanca (2006) para la molienda del clinquer.

Los parámetros **C** y **n** del modelo cinético acumulativo (Figura 4) se obtienen a partir de los valores de la Tabla 2. Resultaron en 0,056738 y 0,384293 respectivamente, cercanos a los reportados por Namindo (2015) al investigar la molienda del carbón bituminoso. La linealización de la curva refleja un ajuste con un coeficiente de determinación superior a 0,88.

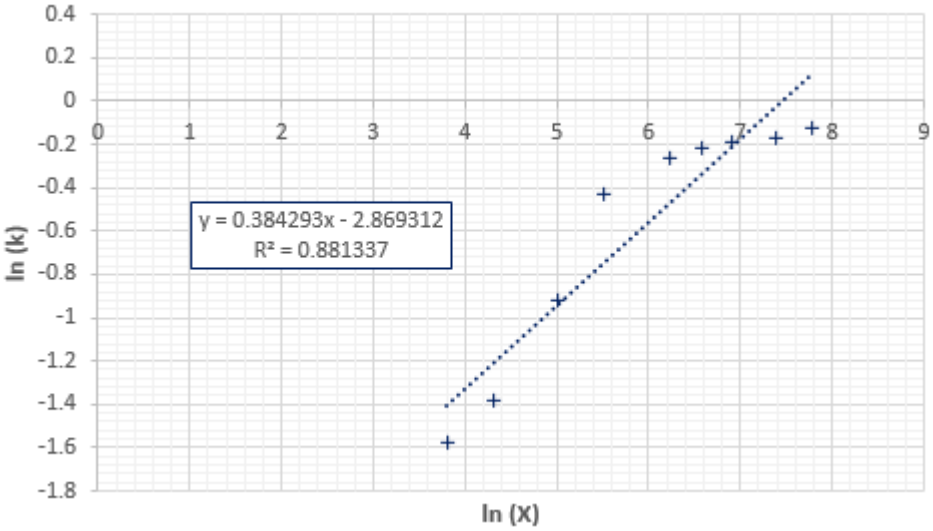

Figura 4. Determinación de los parámetros **C** y **n** del modelo cinético acumulativo.

Finalmente, el modelo cinético acumulativo resulta según la expresión 1, con forma similar a la descrita por otros autores (Menéndez *et al*., 2006; Namindo, 2015) y constituye la principal novedad del presente estudio ya que no existen reportes de determinación del comportamiento cinético acumulativo de la molienda del escombro diferenciado en molinos de bolas, por vía seca. Vale señalar, además, que el modelo cinético acumulativo obtenido permite la estimación directa de la masa de escombro retenida y acumulada a escala industrial, en función de diferentes tamaños de partícula y tiempos de molienda, lo cual cobra importancia como herramienta de control energético durante la preparación previa de esta mena para el proceso Caron.

$$W(x,t) = W(x,0)\exp(-0.05673795x^{0.384293}t) \quad (1)$$

Donde:

x es el tamaño de partícula, μm.

t es el tiempo de molienda, minutos.

W(x, 0) es la masa acumulada de escombro diferenciado rechazado para cada tamaño de partícula (x) antes de la molienda, kg o toneladas.

W(x, t) es la masa acumulada de escombro diferenciado rechazado en el tamaño (x), en el tiempo (t) de molienda, kg o toneladas.

Es importante resaltar que el modelo cinético acumulativo del proceso de molienda del escombro diferenciado (expresión 1), permite la estimación de la masa.

4. CONCLUSIONES

- El escombro diferenciado se caracteriza por el predominio de las fases de los óxidos y oxi-hidróxidos de minerales de hierro y aluminio mezclados, con porcentajes de Ni y Fe de 0,845 % y 40,50 %, respectivamente.
- La cinética de la molienda del escombro diferenciado se desarrolla por una ecuación de primer orden, donde los parámetros **C** y **n** del modelo cinético acumulativo resultan en 0,056738 y 0,384293 respectivamente, con un coeficiente de determinación superior a 0,88.

5. REFERENCIAS

Angulo-Palma, H. J., Legrá, Á. L., Urgellés, A. L., Pedrera, C. H., Gallegos, S., Galleguillos, M. F. M., & Toro, N. (2024). Use of a mixture of coal and oil as an additive for selective reduction of lateritic ore by the Caron process. *Hemijska industrija*, *78*(1), 17-27. https://doi.org/10.2298/HEMIND230118017A.

Angulo-Palma, H. J., Legrá, A. L., Urgellés, A. L., Gálvez, E., & Castillo, J. (2022). Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. In: Bindhu V., R. S. Tavares J. M., Ţălu Ş. (eds), *Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology.* Springer, Singapore, 515-527. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43.

Bartzas, G., Tsakiridis, P. E., & Komnitsas, K. (2021). Nickel industry: Heavy metal (loid) s contamination-sources, environmental impacts and recent advances on waste valorization. *Current Opinion in Environmental Science & Health, 21*(100253), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100253.

Caron, M. H. (1950). Fundamental and practical factors in ammonia leaching of nickel and cobalt ores. *JOM-Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 2*, 67-90. http://dx.doi.org/10.1007/BF03398981.

Coello-Velázquez, A. L. (2015). Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda. *Minería & Geología, 31*(2), 66-79.

Coello-Velázquez, A. L., Menéndez-Aguado, J. M., & Laborde-Brown, R. (2008). Grindability of lateritic nickel ores in Cuba. *Powder technology, 182*(1), 113-115. https://doi.org/10.1016/J.Powtec.2007.05.027.

Díaz-Bello, S. C. (2016). *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica.* (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia). 121 p.

Domènech, C., Galí, S., Villanova-de-Benavent, C., Soler, J. M., & Proenza, J. A. (2017). Reactive transport model of the formation of oxide-type Ni-laterite profiles (Punta Gorda, Moa Bay, Cuba). *Mineralium Deposita, 52*(7), 993-1010. https://doi.org/10.1007/s00126-017-0713-0.

Laborde-Brown, R. (2004). Diagnóstico energético en el proceso de molienda de la laterita. *Minería & Geología, 20*(3-4), 107-113.

Menéndez-Aguado, J. M., Coello-Velázquez, A. L. & Dzioba-Blanca, R. (2006). Process models for simulation of Bond tests. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min Metall. C), 115*(2), 1-7. https://doi.org/10.1179/174328506X99925.

Mitterecker, J., Košević, M., Stopic, S., Friedrich, B., Panić, V., Stevanović, J., & Mihailović, M. (2022). Electrochemical investigation of lateritic ore leaching solutions for Ni and Co ions extraction. *Metals, 12*(2), 325. https://doi.org/10.3390/met12020325.

Namindo, M. N. (2015). *Cinética de la molienda del carbón bituminoso.* (Trabajo de Diploma, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa). 100 p.

Oxley, A., & Barcza, N. (2013). Hydro–pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering, 54*, 2-13. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.012.

Pintowantoro, S., Widyartha, A. B., Setiyorini, Y., & Abdul, F. (2021). Sodium thiosulfate and natural sulfur: novel potential additives for selective reduction of limonitic laterite ore. *Journal of Sustainable Metallurgy, 7*(2), 481-494. https://doi.org/10.1007/s40831-021-00352-4.

Sariol-López, E., Otaño-Noguel, J., & Belete-Fuentes, O. (2011). Procedimiento para estabilizar la calidad del mineral que se suministra al proceso metalúrgico en la planta niquelífera Pedro Soto Alba, Moa Nickel, SA. *V Simposio Geología, Exploración y Explotación de las Lateritas Niquelíferas*.

Tauler, E., Galí, S., Villanova-de-Benavent, C., Chang-Rodríguez, A., Núñez-Cambra, K., Khazaradze, G., & Proenza, J. A. (2023). Geochemistry and Mineralogy of the Clay-Type Ni-Laterite Deposit of San Felipe (Camagüey,

Cuba). *Minerals*, *13*(10), 1281. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/min13101281.

Toirac-Leyva, V., & Rojas-Purón, A. (2021). Caracterización mineralógica de perfiles lateríticos del sector 048 en el yacimiento Punta Gorda, Holguín, Cuba. *Ciencia & Futuro*, *11*(4), 23-37.

Véliz-Jardines, A. I., & Miranda-López, J. (2022). Desarrollo de investigaciones sobre la tecnología Caron durante el procesamiento de las lateritas de baja ley de níquel y de los escombros lateríticos, clasificados como: menas o minerales no industriales. *Tecnología Química*, *42*(2), 361-383.

Zevgolis, E. N., & Daskalakis, K. A. (2022). The Nickel Production Methods from Laterites and the Greek Ferronickel Production among Them. *Materials Proceedings, 5*(1), 104. https://doi.org/10.3390/materproc202100510.

Información adicional

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Contribución de los autores

YCC: gestión y preparación de la muestra, experimentación, valoración de los resultados y escritura del artículo; revisión y aceptación de la versión final. **EMP** y **YOS**: experimentación; elaboración del artículo y revisión y aceptación de la versión final. **RSAR** y **HJAP**: gestión de la investigación, experimentación, valoración de los resultados y escritura del artículo; revisión y aceptación de la versión final.

ORCID

YCC, https://orcid.org/0000-0003-2934-0001

EMP, https://orcid.org/0009-0009-5535-9532

YOS, https://orcid.org/0009-0001-4873-9299

RSAR, https://orcid.org/0000-0002-7185-7330

HJAP, https://orcid.org/0000-0002-5012-0348

Recibido: 11/01/2025

Aprobado: 28/02/2025