

Aplicación de ondas ultrasónicas sobre la lixiviación ácida de mineral de níquel con alto contenido de magnesio



Application of ultrasonic waves on the acid leaching of nickel ore with high magnesium content

<http://opn.to/a/5K9YI>

Osniel Reyes Padilla ^{1*}, José Castellanos Suárez ¹, Alejandra Naida Hernández Martínez ¹, Maritza Cortés Miranda ¹

RESUMEN: El uso de las ondas ultrasónicas (OU) ha tenido éxitos en campos como: la medicina, tratamiento de alimentos y en catalizadores. El objetivo de este trabajo es evaluar la aplicación de ondas ultrasónicas en el proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica de mineral de níquel con alto contenido de magnesio. En el proceso de lixiviación ácida con H_2SO_4 , la aplicación de OU produjo un incremento en la disolución de níquel entre un 2 y 5 %. La cinética de disolución de Co fue más rápida que la del níquel. El uso de OU no incrementa de forma significativa la disolución del hierro, haciendo que el proceso sea selectivo. La recuperación máxima reportada de Ni y Co fue: 56 % Ni y 33 % Co. El consumo de ácido fue solo de 15 toneladas de ácido/ tonelada de mineral lixiviado, siendo más bajo que el consumo típico reportado en la planta industrial (26 toneladas de ácido/ toneladas de mineral).

Palabras clave: pulpa de mineral, ondas ultrasónicas, lixiviación ácida, porcentaje de sólido.

ABSTRACT: The use of ultrasonic waves (OU) has had successful in fields such as: medicine, food processing and catalysts. The objective of this work is to evaluate the application of ultrasonic waves in the process of acid leaching at atmospheric pressure of nickel ores. In the acid leaching process with H_2SO_4 , the application of OU produced an increase in nickel dissolution between 2 and 5%. The dissolution kinetics of Co was faster than that of nickel. The use of OU does not significantly increase the dissolution of iron, making the process selective. The maximum reported recovery of Ni and Co was: 56% Ni and 33% Co. The acid consumption was only 15 tons of acid/ton of leached ore, being lower than the typical consumption reported in the industrial plant (26 t / t ores).

Key words: ore pulp, ultrasonic waves, acid leaching, percent solid.

INTRODUCCIÓN

La industria minera cubana ha alcanzado un desarrollo grande en la explotación de los yacimientos de níquel y cobalto.

Cuba hoy cuenta con una Empresa Mixta que opera una planta de beneficio en el municipio Santa Lucía, provincia de Pinar del Río, donde se obtienen concentrados de sulfuro de plomo y concentrados de sulfuro de zinc con destino a la exportación. En la parte oriental, en el Municipio Moa, de la provincia de Holguín el país cuenta

con dos plantas de procesamiento de minerales de níquel y cobalto, (una empresa mixta y otra 100 % cubana) que están en explotación desde hace varias décadas y producen sulfuro de níquel + cobalto y óxido de níquel también para la exportación.

Las plantas de níquel en operación en la actualidad son: Moa Nickel S.A que emplea el proceso ácido a presión y la planta Comandante Ernesto Che Guevara que utiliza el proceso Caron.

Recibido: 31/05/2019

Aprobado en su forma original: 31/10/2019

¹Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM), La Habana, Cuba

*Autor para correspondencia: *Osniel Reyes Padilla*. E-mail: osniel@cipimm.minem.cu

La planta Pedro Soto Alba de Moa, que trabaja el proceso de lixiviación ácida en autoclave a altas temperaturas y bajas presiones, es un método muy eficiente e insustituible debido a las altas recuperaciones de níquel y cobalto, siempre que entre al sistema una pulpa con alto por ciento de sólido. Debido a que los yacimientos de minerales de níquel de más alta ley y mejores propiedades de sedimentación están en la fase de agotamiento, la pulpa que entra al sistema de lixiviación no contiene el por ciento de sólidos deseado y menor contenido de níquel. Por tal motivo, el Centro de Investigaciones para la Industria Minero Metalúrgica (CIPIMM) se dio a la tarea de comenzar estudios alternativos para la lixiviación de estos minerales de propiedades diferentes, seleccionando la lixiviación ácida con aplicación de las ondas ultrasónicas a presión atmosférica, lo que representa una nueva alternativa con posibilidad de aplicación en la industria minera para minerales de níquel con alto contenido de magnesio lo cual podría permitir el aprovechamiento de estos minerales.

Hoy en el mundo aparecen trabajos, publicaciones y proveedores de esta tecnología e incluso productores que practican esta técnica con resultados positivos. El CIPIMM ha aplicado esta técnica en el procesamiento de minerales de oro alcanzando incrementos en la eficiencia debido al efecto molienda que tienen las ondas ultrasónicas en las pulpas de estos minerales auríferos (Martínez *et al.*, 2014). Por lo cual el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de ondas ultrasónicas en el proceso de lixiviación ácida a presión atmosférica y temperatura ambiente de mineral de níquel con alto contenido de magnesio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó con un mineral de Serpentina con la siguiente composición química:

La muestra utilizada está constituida fundamentalmente por: Goethita - 33 %, Magnetita - maghemita - 20 %, Hematita 7 %, Gibbsita - 6 %, Serpentina - 22 %, Clorita - 12 %.

La velocidad de sedimentación del mineral fue 120mm/2 horas

La aplicación de OU se realizó según la instrucción de operación del CIPIMM del baño de OU, marca Bandelin Sonorex con capacidad de 8 L de agua destilada. La determinación de la humedad (% de sólidos) se realizó en el equipo marca Denver Instrument, de acuerdo a los manuales del centro.

Caracterización química

Los análisis químicos se ejecutaron según los procedimientos establecidos del Departamento de Caracterización de Materiales del CIPIMM para este tipo de minerales ([DCM-PT-09-001](#) y [DCM-PT-09-002](#)).

Análisis mineralógico

Las muestras se caracterizaron por difracción de Rayos X por medio de un equipo de difracción de rayos X para polvos marca Philips modelo PW 1710. Para ello el mineral se molió, se pulverizó en un pulverizador de anillo y se envió para su análisis.

Selección de variables independientes

Para la realización de los experimentos se empleó un diseño de experimentos. La revisión bibliográfica del tema indicó ciertos parámetros a tener en cuenta por diferentes autores, pero, después de una cuidadosa revisión de estos, se llegó a la conclusión que las más influyentes son:

- Tiempo de exposición al ultrasonido.
- Concentración de ácido sulfúrico.
- Porcentaje de sólido.
- Temperatura de la pulpa.
- Tiempo de lixiviación del mineral.

Se seleccionó un diseño de experimento (Diseño de Cribado de un cuarto de fracción 2^{4-1} , con 11 corridas incluyendo 3 repeticiones del punto central para la evaluación de la precisión de las mediciones). Para realizar los cálculos estadísticos del efecto de las variables se utilizó el Statgrafic. El rango de las variables seleccionadas se estableció sobre la base de experiencias anteriores.

Tabla 1. Composición química

Componentes	Ni	Co	Fe	Mg	SiO ₂	Al ₂ O ₃
%	1.62	0.047	15.54	8.23	23.08	1.4

Tabla 2. Matriz experimental para la lixiviación ácida a presión atmosférica.

Experimentos	Matriz experimental				
	Concentración de ácido sulfúrico	Porcentaje Sólido	Temperatura	Tiempo de lixiviación	Tiempo de ultrasonido
	g/L	%	° C	min	min
1	120	45	50	180	30
2	80	35	80	180	30
3	80	45	50	60	90
4	80	45	80	60	30
5	80	35	50	180	90
6	120	35	80	60	90
7	120	35	50	60	30
8	120	45	80	180	90
9	100	40	65	120	60
10	100	40	65	120	60
11	100	40	65	120	60

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lixiviación atmosférica con ácido sulfúrico en pulpas de mineral de serpentina con aplicación de ultrasonido

Los estudios del efecto de OU sobre la pulpa durante el proceso de lixiviación se realizaron con mineral serpentínico, usando el esquema de la tecnología de cura ácida-lixiviación, desarrollada por el CIPIMM.

Los resultados del diseño de experimento de la lixiviación con el uso de OU, se reportan en la [tabla 3](#). Los resultados indicaron que la concentración de ácido fue la variable más significativa, obteniéndose los mejores resultados de extracción en su nivel más alto: 120 g/L. El experimento 6 fue el que aportó los mejores resultados y al que corresponden: concentración de ácido sulfúrico -120 g/L, contenido de sólidos en la pulpa - 35 %, temperatura - 80 °C, tiempo de lixiviación - 60 min y tiempo de tratamiento ultrasónico - 90 min, con lo que se obtienen recuperaciones de níquel y cobalto de 56.1 y 33.6 % respectivamente. En el rango de tiempo empleado no se observó una diferencia significativa entre los dos niveles estudiados para el tiempo de aplicación de las ondas ultrasónicas.

Diseño de Experimentos

Para poder definir la influencia de las ondas ultrasónicas se corrieron los 8 experimentos básicos del diseño sin el empleo de estas. La [Tabla 4](#) muestra los resultados obtenidos.

Comparando las recuperaciones de las [tablas 3](#) y [4](#) se puede ver que, en casi la totalidad de los casos, los resultados obtenidos con las ondas ultrasónicas, independientemente de los valores de las otras variables, son siempre superiores, lo que corrobora la influencia positiva del empleo de las mismas en estos procesos.

Estos resultados pueden verse en forma gráfica en las [figuras 1, 2](#) y [3](#) para los elementos Ni, Co y Fe respectivamente.

A pesar de estas mejoras es necesario destacar que los valores de recuperación obtenidos por esta vía son bajos, aun con el empleo de ondas ultrasónicas, si estos se comparan con los obtenidos en la actualidad por Moa Nickel SA, pero con el empleo de la lixiviación ácida a presión, donde se alcanzan recuperaciones de hasta 90 %.

De todo lo anterior podemos observar algunos aspectos de interés, los que se relacionan a continuación.

- La tecnología de cura ácida, reportó ser un proceso de lixiviación selectiva con respecto al hierro, presentando en general una baja disolución de este metal con y sin aplicación de ondas ultrasónicas.
- La lixiviación de la serpentina de Moa Oriental reportó resultados interesantes, variando la extracción de Ni (mejores resultados) entre 54 y 56 % con aplicación de OU, lo que representa un consumo de ácido

Tabla 3. Resultados de lixiviación con la aplicación de ondas ultrasónicas

Matriz experimental								
Experimentos	Concentración de ácido sulfúrico	Porcentaje Sólido	Temperatura	Tiempo lixiviación	Tiempo ultrasonido	% Recuperación		
	g/L					%	° C	min
1	120	45	50	180	30	54.27	30.95	13.29
2	80	35	80	180	30	36.49	15.8	0.26
3	80	45	50	60	90	45.6	25.0	0.72
4	80	45	80	60	30	44.48	20.81	0.85
5	80	35	50	180	90	38.85	17.84	1.86
6	120	35	80	60	90	56.16	33.62	14.35
7	120	35	50	60	30	42.67	19.84	1.41
8	120	45	80	180	90	42.83	17.06	2.66
9	100	40	65	120	60	44.80	22.50	4.39
10	100	40	65	120	60	45.70	22.95	4.48
11	100	40	65	120	60	44.70	22.45	5.38

Nota: Los ensayos 9, 10 y 11 se realizaron en el nivel medio del diseño de experimentos para determinar el error de los ensayos

Tabla 4. Recuperación de Ni, Co y Fe sin aplicación de ondas ultrasónicas

Experimento No.	Concentración H ₂ SO ₄ g/l	% Sólidos	Temperatura °C	Tiempo de lixiviación min	Tiempo de Ultrasonido min	Recuperación sin ultrasonido %		
						Ni	Co	Fe
1	120	45	50	180	30	54.27	30.95	13.29
2	80	35	80	180	30	36.49	15.8	0.26
3	80	45	50	60	90	45.6	25.0	0.72
4	80	45	80	60	30	44.48	20.81	0.85
5	80	35	50	180	90	38.85	17.84	1.86
6	120	35	80	60	90	56.16	33.62	14.35
7	120	35	50	60	30	42.67	19.84	1.41
8	120	45	80	180	90	42.83	17.06	2.66

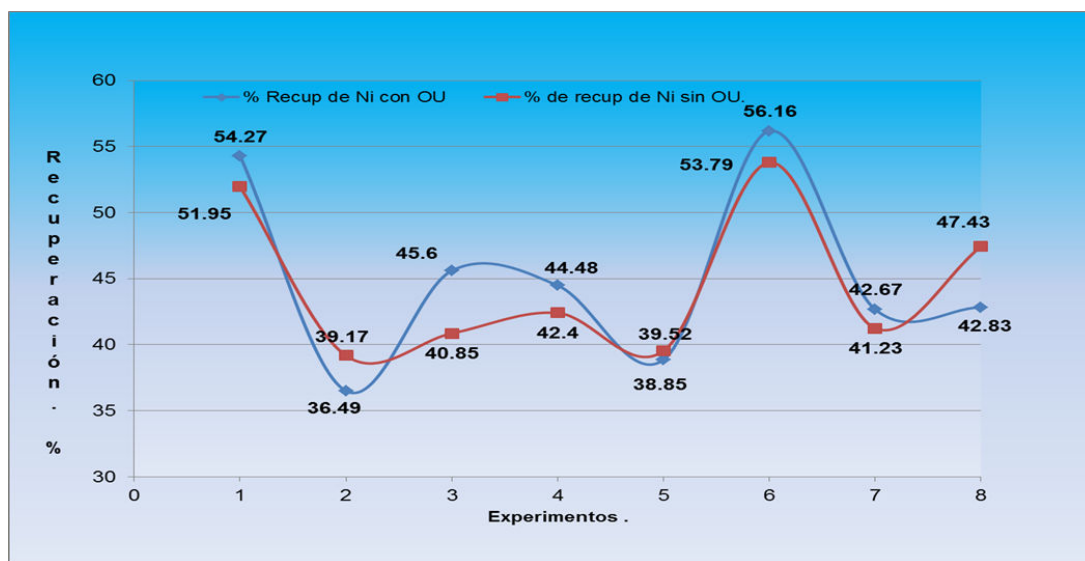


Figura 1. Recuperación de Ni con y sin aplicación de OU. Experimentos del 1 al 8

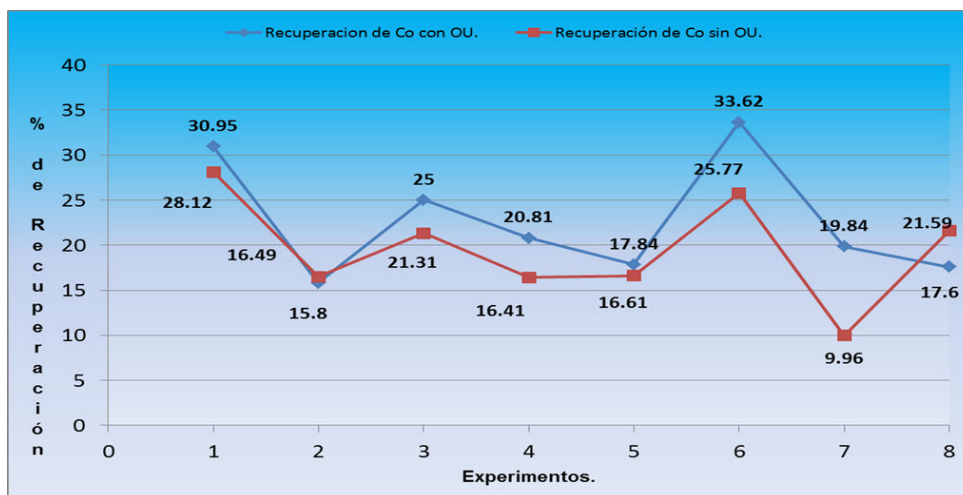


Figura 2. Recuperación de Co con y sin aplicación de OU. Experimentos del 1 al 8.

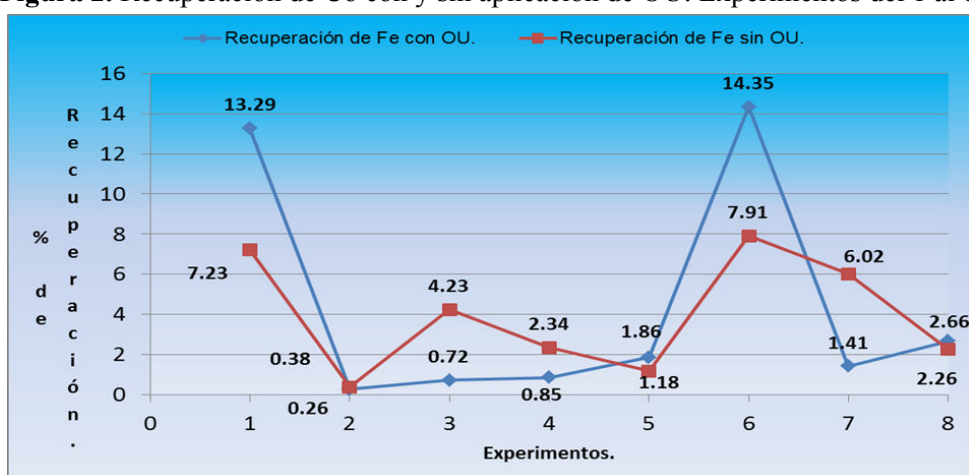


Figura 3. Recuperación de Fe con y sin aplicación de OU. Experimentos del 1 al 8.

entre 13 y 15 t de ácido/ t de mineral, menor en comparación con el consumo de Moa de 26 t de ácido/ t de mineral. Un estimado del costo de producción indicó que el costo de la producción de Ni será de un 50 a 60 % menor que en la planta de Moa, aun con una extracción más baja del orden de 54 a 56% Ni contra 90%.

- Los ensayos en general, indicaron que el consumo de ácido (en la reacción con los metales) reportó un valor típico esperado, siendo el valor del ácido libre de 20 a 25 g/L.
- Es importante realizar estudios más detallados de la lixiviación por un tiempo más prolongado, así como evaluar el ácido libre.
- La disolución del Co es más rápido que la del níquel. En el tratamiento con OU, otro aspecto importante que se debe estudiar será el efecto del incremento de la concentración de ácido hasta el orden de 250 - 300 g/L.

- Se observó que la aplicación de ondas ultrasónicas entre 30 y 90 minutos, no produce cambios significativos en la disolución de los metales, pero si se observó una mejoría de las recuperaciones con relación a las pruebas sin el uso de las ondas ultrasónicas. Es necesario evaluar tiempos menores de aplicación de OU y de esta manera valorar si es posible disminuir el consumo de energía. Los resultados alcanzados en los estudios preliminares fueron positivos, pero se requiere optimizar el proceso. Es importante establecer y estudiar el efecto de OU sobre la reología de las pulpas tratadas, la eficiencia de lavado del residuo y la separación de los metales.

CONCLUSIONES

1. En el proceso de lixiviación, la variable más significativa fue la dosis de ácido.
2. En el rango de tiempo de aplicación de OU estudiado no se observó un efecto significativo

del tiempo, pero sí pudo apreciarse una aceleración en la cinética de disolución del Ni, Co y Fe en relación con las pruebas sin empleo de OU.

3. La aplicación de OU incrementó de forma general la recuperación de Ni, Co y Fe en relación a los ensayos sin tratamiento ultrasónico.
4. Se produjo un bajo consumo de ácido y la disolución relativamente alta de los metales, reportando un ácido libre típico de este proceso.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda continuar las investigaciones de la aplicación de ondas ultrasónicas en otros minerales que generalicen su implementación.
2. Se requiere diseñar y construir equipos de OU para el uso específico en el campo de la minería, tanto a nivel de laboratorio, como a escala ampliada y planta piloto.

BIBLIOGRAFÍA

- Arce, V. A.; Falcón, R. C.; Santibañez, L. P. & Dávila, D. L. 2005. "Refractariedad de Concentrados auríferos". *Revista del Instituto de Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 8(16): 5-14.
- Benavides, M. D. & Rojo, J. 2002. "Aplicación de Ultrasonido en CIP para minerales Auríferos". *Venezuela, Univ. Experimental Politécnica*.
- Camarena, F.; Martínez, J. A.; Molins, V.; Ibiza, S.; Picó, R.; SA, P. C.; Alameda, P. & Parcela, C. 2004. "Caracterización mediante ultrasonidos de la evolución temporal de las propiedades físicas de la piel de naranja". *Revista de Acústica*, 34(1): 2.
- Kharisov, B. I. & Ortíz Méndez, U. 1999. "Uso del ultrasonido en procesos químicos". *Ingenierías*, 2(5): 13-21.
- Martínez, A. N. H.; Figueredo, M.; La, E. M.; Pérez, M. P.; Castellanos, J.; Alonso, J. A.; Cabrera, I.; de la Cruz, A.; Hernández, I. & Salgado, I. 2014. "USO DE ONDAS ULTRASÓNICAS (OU) PARA MEJORAR LOS ÍNDICES EN EL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO".
- Martínez Martínez, G. 2009. "Aplicación de las membranas líquidas soportadas a la separación de Cobalto y Níquel".
- Ramos, A.; Gallego, J. A.; Riera, E.; San Emeterio, J. L.; Gómez, T.; González, I.; Campos, C.; Calás, H.; Sanz, P. T. & Rodríguez, G.n.d. "41º CONGRESO NACIONAL DE ACÚSTICA 6º CONGRESO IBÉRICO DE ACÚSTICA".
- Rodríguez Lambert, W. 2009. *Incremento de la recuperación de Ni y Co en el proceso carón, por vía ultrasónica*. Tesis, Departamento Metalurgia-Química, Available: <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1608> , [Consulted: May 30, 2019].
- N.d. Gallego, J.A y Rodríguez, G, 1994. *Sistema ultrasónico...* - Google Académico. Available: https://scholar.google.com/citations?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Gallego%2C+J.A+y+Rodr%C3%ADguez%2C+G%2C+1994.+Sistema+ultras%C3%B3nico+para+el+lavado+de+textiles.+%2C+A+Ircel%2C+J.A%2C+2003.+Influencia+de+los+ultrasonidos+de+potencia+en+procesos+de+transferencia+de+material+en%3A+Tesis+Doctoral.+Universidad+Polit%C3%A9cnica+de+Valencia.+75-90.&btnG= , [Consulted: May 31, 2019a].
- N.d. Hernández, A. N, 2005. *Uso de Ondas ultrasónicas...* - Google Académico. Available: https://scholar.google.com/citations?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Hern%C3%A1ndez%2C+A.+N%2C+2005.+Uso+de+Ondas+ultras%C3%B3nicas+%28OU%29+para+mejorar+los+%C3%ADndices+de+extracci%C3%B3n+de+Oro+%2B4%C2%B4%2C+CIPIMM%2C+informe.&btnG= , [Consulted: May 31, 2019b].
- N.d. Luque Gracia, J.L y Luque de Castro, M.D. 2001. *Tratamien...* - Google Académico. Available: https://scholar.google.com/citations?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Luque+Gracia%2C+J.L+y+Luque+de+Castro%2C+M.D

[+2001.+Tratamiento+con+ultrasonido%2C+Anal%2C+C+hem+p+40-58.&btnG=](#) ,

[Consulted: May 31, 2019c].

N.d. Mérida, A, 2012. *Perspectiva de aplicación de las...* - *Google Académico*. Available:

Available: https://scholar.google.com/cu/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=M

[%C3%A9rida%2C+A%2C](#)

[+2012.+Perspectiva+de+aplicaci%C3%B3n](#)

[+de+las+ondas+ultras](#)

[%C3%B3nicas.+Infomin%2C](#)

[+pp59-67.&btnG=](#) , [Consulted: May 31, 2019d].

DCM-PT-09-001.- Análisis de minerales níquelíferos y productos de su procesamiento mediante digestión ácida y determinación final por Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-AES).

DCM-PT-09-002.- Análisis de minerales níquelíferos y productos de su procesamiento mediante fundición con metaborato de litio y determinación final Espectroscopia de Emisión Atómica con Plasma Inductivamente Acoplado (ICP-AES).

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](#)