



Vigilada Mineducación

**CARACTERIZACIÓN DE ESCORIA DE FERRONIQUEL PARA LA CAPTURA DE
CO2 ATMOSFÉRICO**

**CHARACTERIZATION OF FERRONICKEL SLAG FOR ATMOSPHERIC CO2
CAPTURE**

SANTIAGO MARTINEZ LEIVA

Monografía investigativa presentada como requisito de grado para optar por el título de Geólogo

Asesor:

PhD. Diego Felipe Gómez Gutierrez

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS
GEOLOGÍA
MEDELLÍN
2024

CONTENIDO

1. Resumen.....	4
2. Abstract	5
3. Introducción	6
4. Objetivos.....	7
4.1 General.....	7
4.2 Específicos	7
5. Lateritas níquelíferas.....	7
5.2. Procesamiento Mineral	9
5.3. Procesamiento metalúrgico	9
5.4 Geoquímica de escorias en depósitos lateríticos.....	12
6. Carbonatación mineral	13
7. Mecanismos de carbonatación mineral.....	14
7.1. Carbonatación directa gas-sólido.....	14
7.2. Carbonatación directa acuosa	15
7.3. Carbonatación indirecta	15
8. Carbonatación pasiva en relaves mineros	16
9. Carbonatación mineral ¿una alternativa para una minería sostenible?.....	16
10. Conclusión	17
11. Referencias bibliográficas.....	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Perfil típico de una laterita de Níquel.....	8
Figura 2. Cadena de procesamiento de mina a residuos.....	9
Figura 3. Proceso metalúrgico de níquel.....	10
Figura.3.1 Procesamiento de ferroníquel en Cerromatoso.....	12

1. Resumen

La carbonatación mineral es el proceso que involucra la reacción de silicatos de calcio, magnesio y hierro, que en presencia de CO₂ forma carbonatos estables y representa una estrategia clave para garantizar la captura de CO₂. Esta alternativa dentro del contexto minero presenta un gran potencial para mitigar los impactos ambientales, y así lograr una minería sostenible. Este estudio se centra en evaluar las características de la escoria producto de la industria minera en depósitos lateríticos de ferroníquel. Se llevó a cabo recopilación bibliográfica de información existente, cuyos criterios de selección se centraron en la mineralogía, geoquímica de relaves, su composición y métodos de captura de CO₂. Los resultados obtenidos indican la viabilidad de plantear esta estrategia como alternativa para reducir mitigar los impactos ambientales. La comprensión detallada de la geoquímica, y mineralogía de estos residuos generados por la extracción de metales, pueden ser brindar una visión y una opción para compensar la producción de enormes cantidades de residuos y emisiones al medio ambiente, y así garantizar una minería sostenible.

Palabras clave: Minería sostenible – Carbonatación mineral – Captura de CO₂ – Escoria – Relaves.

2. Abstract

Mineral carbonation is the process that involves the reaction of calcium, magnesium and iron silicates, which in the presence of CO₂ forms stable carbonates and represents a key strategy to guarantee the capture of CO₂. This alternative within the mining context presents great potential to mitigate environmental impacts, and thus achieve sustainable mining. This study focuses on evaluating the characteristics of slag produced by the mining industry in lateritic ferronickel deposits. A bibliographic compilation of existing information was carried out, whose selection criteria focused on mineralogy, geochemistry of tailings, their composition and CO₂ capture methods. The results obtained indicate the viability of considering this strategy as an alternative to reduce and mitigate environmental impacts. Detailed understanding of the geochemistry and mineralogy of these wastes generated by metal extraction can provide insight and an option to offset the production of huge amounts of waste and emissions to the environment, and thus ensure sustainable mining.

Keywords: Sustainable Mining - Mineral carbonation -Capture CO₂ - Slag - Tailings.

3. Introducción

La industria minera es considerada una industria intensiva generadora de emisiones de CO₂ (Molahid et al., 2023). Según Dino (2020) los principales impactos asociados a la industria se hayan relacionadas en el manejo de relaves y rocas estériles. No obstante, con el propósito de reducir las emisiones de CO₂ estudios indican que se puede reducir estas emisiones a través de sumideros de carbono terrestre (Yi et al., 2020). La carbonatación mineral involucra la reacción de óxidos silicatos que contienen hierro, calcio y magnesio que en presencia CO₂ forma carbonatos estables. (Kusin et al., 2023).

A nivel global la industria minera genera múltiples impactos ambientales significativos, incluyendo la degradación de suelos, contaminación del agua y emisiones al aire (Choi, 2023). Durante las operaciones mineras y metalúrgicas se producen grandes cantidades de residuos junto con metales, que se disponen principalmente en sitios de desechos, estos desechos son usualmente residuos sólidos en forma de lodos, escorias y roca estéril (Makhathini et al., 2023). Sin embargo, investigaciones indican que los residuos provenientes de depósitos ultramáficos presentan componentes alcalinos que pueden ser usados para la captura de CO₂ (Meyer et al., 2014; Stokreef et al., 2022).

Por tanto, el uso de residuos mineros para la captura de CO₂, se considera un enfoque beneficioso que puede ayudar a resolver el aumento de las emisiones provenientes de las actividades extractivas y productivas, así como el incremento en la cantidad de residuos acumulados en muchos de los terrenos mineros (Veetil & Hitch, 2020; Molahid et al., 2023). Además, el empleo de estos residuos, proporciona una manera segura, permanente y ambientalmente inofensivo comparado con otros métodos de almacenamiento de CO₂ (Lackner et al., 1995; Sanna et al., 2014; Kusin et al., 2023).

Por ende, el presente estudio se centra analizar la escoria generada como residuo en la industria minera en depósitos lateríticos de níquel, por lo que se identificaran sus características mineralógicas sus procesos físicos y metalúrgicos para entender su generación y su composición que representa una alternativa para la captura de CO₂, además se busca plantear la carbonatación mineral como una alternativa dentro del contexto de minería sostenible.

4. Objetivos

4.1 General

- Investigar y proponer análisis geoquímicos, y mineralógicos de la escoria en contexto de caracterización como una solución para la captura y almacenamiento de CO₂ en la industria minera, con el fin de contribuir a la mitigación del cambio climático y de los impactos ambientales asociados para promover una minería sostenible.

4.2 Específicos

- Comprender la generación de depósitos lateríticos y su mineralogía.
- Entender los procesos de generación la escoria y su geoquímica.
- A partir de información disponible identificar los mecanismos para la captura de CO₂.
- Explorar las técnicas utilizadas para capturar y almacenar CO₂ en relaves mineros.
- Plantear la carbonatación mineral dentro de un contexto de minería sostenible.

5. Lateritas níquelíferas

Las lateritas se localizan en regiones tropicales (Crundwell et al., 2011) y son producto de la meteorización química y mecánica prolongada de rocas ultramáficas a un clima tropical (Loveday, 2008). Estos depósitos presentan mayor contenido de Níquel a profundidad (Girgin et al., 2011). Estas lateritas se clasifican según su contenido de hierro y magnesio en dos tipos: limonita y saprolito. La capa superficial presenta altos contenidos de hierro y bajos contenidos de Níquel <0.8 %, como se ilustra en la Figura 1. En comparación a la capa limonita y saprolita, estas presentan mayor concentración de níquel por su contenido entre 0.8 a 1.5% para limonitas, y superior al 1.5% en suelo saprolítico.

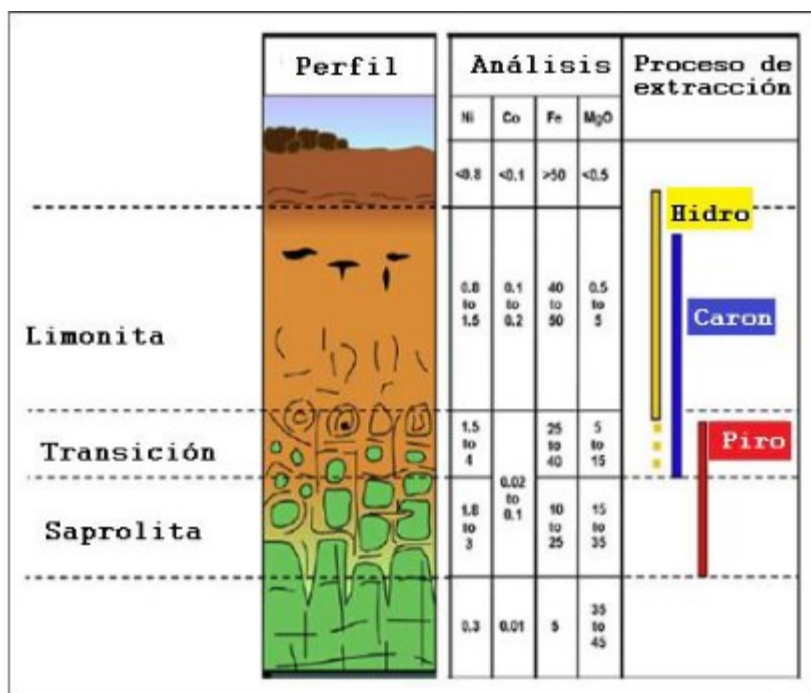


Figura 1. Perfil típico de una laterita de Níquel. Tomado de (Consuelo & Bello, 2016)

Estos depósitos pueden presentar diferentes capas debido a las condiciones climáticas como una capa rica en sílice, una capa de limonita dominada por goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) y hematita (Fe_2O_3] y una saprolita ($\text{Ni,MgSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) capa rica en magnesio y elementos basales (Consuelo & Bello, 2016). Entre la capa de saprolita y limonita existe una capa de transición rica en magnesio (10-20% Mg) con hierro, llamada serpentina ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (Meshram et al., 2019).

La composición química de las lateritas depende de la meteorización del tipo de roca ultramáfica y sus minerales ferromagnesianos (olivinos, piroxenos y anfíboles). Estas rocas son principalmente dunitas, peridotitas (Lopez Rendón, 1989; Villanova-de-Benavent et al., 2014), y serpentinas (Consuelo & Bello, 2016b). Las peridotitas generan conjuntos de óxidos y silicatos de magnesio hidratado o silicato de arcilla, mientras que las dunitas forman principalmente depósitos de óxido que presentan abundante sílice para diluir el mineral (Butt & Cluzel, 2013). El grado de serpentinización influye en la naturaleza y abundancia de silicatos de Mg hidratados que se forman en perfiles desarrollados en ambientes libres de drenaje (Butt & Cluzel, 2013).

5.2. Procesamiento Mineral

Las actividades de la industria minera comprenden tres etapas principales: la minería, el procesamiento de minerales y la extracción metalúrgica. Según Lottermoser (2010) la minería es el primer paso en el aprovechamiento comercial de un recurso mineral o energético, y consiste en la extracción de material del subsuelo para recuperar uno o más componentes del material extraído. Adicionalmente, el procesamiento o beneficio de minerales tiene como objetivo separar y concentrar físicamente los minerales valiosos, por último, la extracción metalúrgica busca romper los enlaces cristalográficos en el mineral para obtener el elemento o compuesto deseado (Lottermoser, 2010). La Figura 2 ilustra la cadena de procesamiento de mina a residuos. La generación de residuos mineros son producto de actividades como la extracción del mineral, la refinación, y el procesamiento de recurso mineral. Estos residuos generalmente suelen ser rocas de sobre carga, roca estéril, relaves, escorias, lodos y otros materiales de desecho (Whitworth et al., 2022).

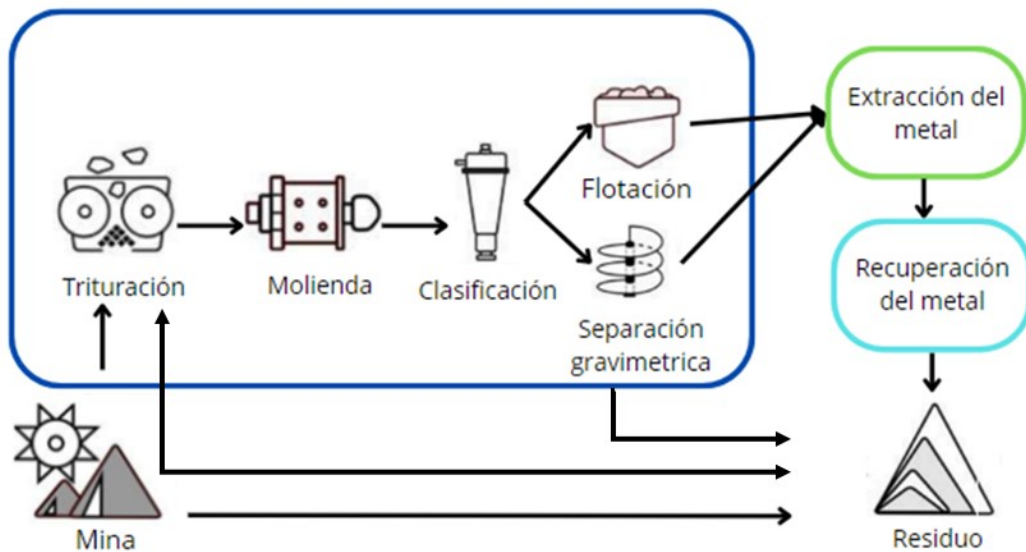


Figura 2. Cadena de procesamiento de mina a residuos. Adaptado de (Whitworth et al., 2022)

5.3. Procesamiento metalúrgico

El procesamiento metalúrgico en depósitos laterítico de níquel varía de acuerdo con su composición. Esta selección depende principalmente de la composición mineral, y la relación entre el Fe/Ni y SiO₂/MgO (Consuelo & Bello, 2016; Keskinilic, 2019). Los depósitos lateríticos compuestos principalmente por saprolito, son los más adecuados para procesos pirometalúrgicos

por su alto contenido de magnesio, en contraste con las limonitas, dado su alto contenido de hierro se emplea por medio de procesos hidrometalúrgicos (Meshram et al., 2019). Según Crundwell (2011) el saprolito al contener bajo contenido de hierro se funde y genera ferroníquel rico en níquel. Por el contrario, la limonita se lixivia en ácido sulfúrico, debido a la goethita, esta se disuelve y al emplear las altas temperaturas el hierro que constituye alrededor del 40% del mineral precipita como hematita o jarosita. Además, el contener bajo contenido de MgO alrededor del 3% evita el consumo del ácido sulfúrico (Crundwell et al., 2011).

Las técnicas pirometalúrgicas involucran secado, calcinación o reducción y fundición en horno eléctrico, seguido de refinación para producir ferroníquel (Oxley & Barcza, 2013) como se ilustra en la Figura 3. Por otro lado, las técnicas hidrometalúrgicas se desarrollan mediante procesos de lixiviación (lixiviación ácida a presión atmosférica o lixiviación a alta presión) a través de la adición carbonatos de sodios o hidróxidos de sodio como fundente para convertir los componentes activos del mineral en sal de sodio soluble a fin de extraer el metal y eliminar las impurezas solubles (Cao et al., 2022).

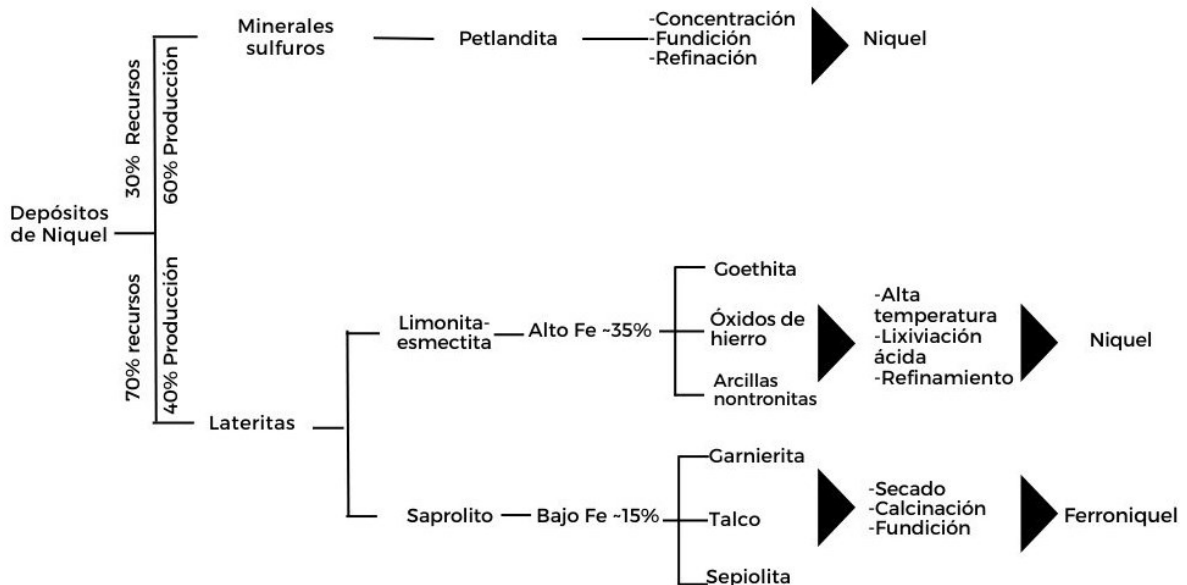


Figura 3. Proceso metalúrgico de níquel. Adaptado de (Crundwell et al., 2011).

En Colombia, según (López E, 2018), la producción de ferroníquel consta principalmente de 4 fases: Fases de secado y almacenamiento mineral parcialmente seco, fase de calcinación (hornos

calcinadores), fase de fundición (hornos eléctricos) y fase de refinación. En primer lugar, el material extraído del depósito laterítico a traviesa una reducción granulométrica menor de 6.35mm de diámetro, luego se deposita en dos super pilas, dando como resultado un material homogéneo y húmedo para la fase de secado. En esta fase, el mineral es secado parcialmente (10%-12% humedad) en hornos de secado y se almacena en silos como reserva de material semiseco, y es llevado a las fases de calcinación. Esta reserva se calcina y sufre una reducción parcial generando calcina pre reducida a las fases de fundición.

Posteriormente esta mezcla, junto con el carbón y finos producidos previamente, reaccionan con la atmosfera del horno rotatorio produciendo una calcina caliente, después de haber sufrido cambios químicos físicos (López E, 2018). Esta calcina se lleva a hornos eléctricos donde es fundida lo que permite que se completen las reacciones de reducción de óxidos de hierro y níquel, producto del carbón residual. Esto genera dos fases adicionales y claramente diferenciadas: una fase densa, el metal líquido, y una fase menos densa, la escoria. El metal es colado en hornos y se lleva a la sección de refinación. La escoria es granulada debido al choque térmico generado por el contacto con agua. Por último, en la etapa de reducción, el ferroníquel líquido atraviesa una disminución del porcentaje de impurezas en el metal como el Si, C, S y P, para lograr un producto con la composición química deseada y alcanzar la temperatura ideal para granularla. Una vez se extrae el metal se obtiene un residuo denominado “escoria” (Hernandez & Almanza, 2014). Lo anteriormente descrito se ilustra en la Figura 3.1.

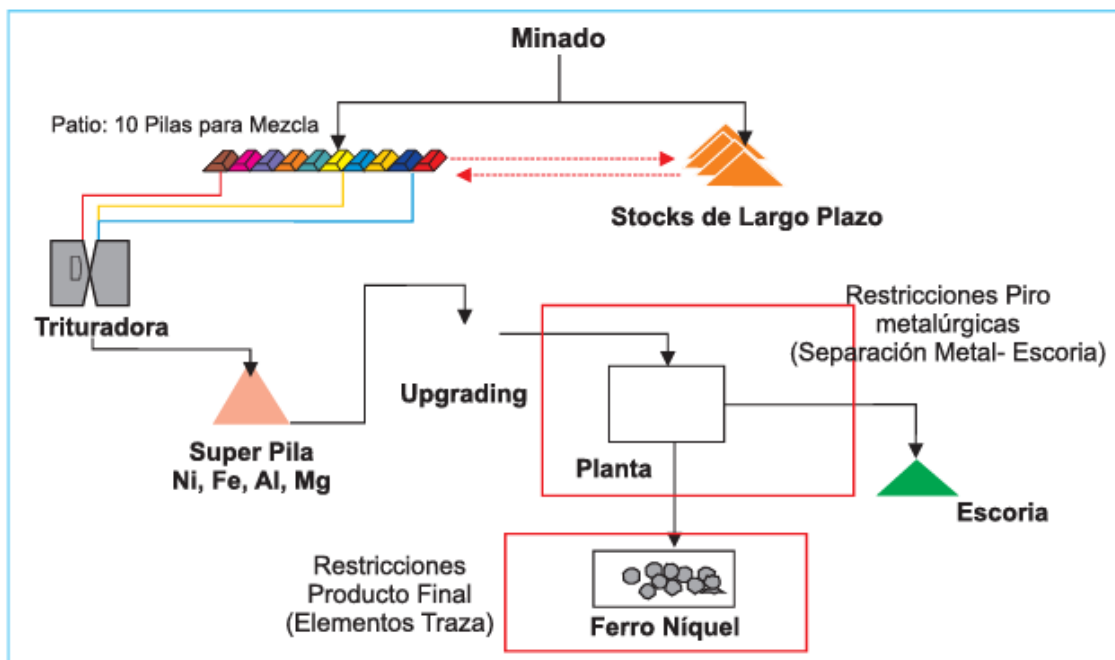


Figura 3.1. Procesamiento de ferroníquel en Cerromatoso. Tomado de (López Púlido, 2018).

5.4 Geoquímica de escorias en depósitos lateríticos

La escoria de ferroníquel es un subproducto que se obtiene a partir de la fundición de níquel y proporciona una fuente abundante de sílice (Ulum et al., 2023). Este es un residuo común generado en la industria extractiva y contiene principalmente SiO₂, MgO y FeO (Maragkos et al., 2009; Sagadin et al., 2016). Según Sagadin (2016), esto ocurre a través de la teoría molecular, donde se asume que los óxidos son moléculas sin carga, pero tiene limitaciones en la resistencia eléctrica a las escorias líquidas, por lo cual, durante el punto de fusión de las escorias, la conductividad eléctrica aumenta generando abundancia de cationes y aniones.

No obstante, los compuestos como el SiO₂ forman sistemas cristalinos estables, tanto en sólido como en estado fundido, y se componen de tetraedros SiO₄⁴⁻ (Sagadin et al., 2016). Adicionalmente, la alta energía de estos enlaces les permite estar unidos covalentemente, y, por tanto, evitan que se descompongan fácilmente. Esto puede explicarse a través de la ecuación 1 donde se observa la reacción de las moléculas de SiO₂ que absorben iones O²⁻ que les permite actuar como receptores en la reacción ácido/base (Sagadin et al., 2016).



Por otro lado, los óxidos básicos como CaO o MgO forman compuestos iónicos que al fundirse su estructura interna se destruye y genera un fundido rico en cationes, esto se ilustra en la ecuación 2 (Sagadin et al., 2016).



Además, la incorporación de grupos alcalinos y alcalinotérreos pueden romper la estructura cristalina de Si-O-Si. Por ejemplo, la adición de Mg acorta las cadenas de silicato hasta que aparecen como Ortosilicatos. Ecuación 3 (Sagadin et al., 2016).



Múltiples investigaciones en Colombia como Díaz Bello (2019), han estudiado la escoria de ferroníquel para emplear este residuo como material de construcción. Por tanto, caracterizó este residuo a partir de sus propiedades fisicoquímicas y mineralógicas, donde obtuvieron que estas escorias contenían óxidos de Si, Mg y Fe, y representaba el 86% del total de la muestra. Conrado (2018) desarrolló un estudio en escorias blancas y negras para la industria del cemento, por lo que encontró que las escorias blancas (saturadas en sílice) en comparación con la escoria negra (rica en óxidos Fe-Ca) son menos efectivas para la industria del cemento por sus propiedades puzolánicas. Por otra parte (Hernandez & Almanza, 2014) caracterizaron los “materiales arcillosos” entre ellos, la escoria, y evidenciaron altos contenidos de óxidos de sílice, hierro y magnesio.

6. Carbonatación mineral

La carbonatación mineral es el proceso que involucra la reacción de silicatos de calcio, magnesio y hierro, que en presencia de CO₂ forma carbonatos estables (Sanna et al., 2014; Kusin et al., 2023). La ecuación (4) muestra el proceso de carbonatación mineral simplificado (Li et al., 2018).



Esta reacción puede ocurrir tanto in situ como ex situ (Sanna et al., 2014; Lin et al., 2024). La carbonatación mineral in situ alude a la producción de carbonatos estables a través de la inyección de CO₂ en formaciones geológicas (Romanov et al., 2015; Kashim et al., 2020). Por el contrario, la carbonatación mineral ex situ consiste en el procesamiento de minerales naturales y desechos industriales a través de plantas de carbonatación mineral o procesamiento industrial en superficie, a

través de métodos carbonatación directa o indirecta (Geerlings & Zevenhoven, 2013; Li et al., 2018; Veetil & Hitch, 2020).

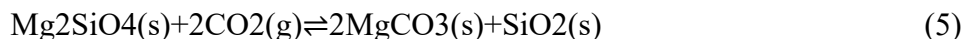
Los minerales naturales incluyen principalmente silicatos de calcio y magnesio, como Olivino ($MgSiO_4$), wollastonita ($CaSiO_3$) y serpentina ($(Mg_3Si_2O_5)(OH)_4$), y los residuos industriales escorias, yeso residual, lodo rojo, cenizas volátiles de carbón, que contienen componentes alcalinos como óxidos de calcio o magnesio (Lin et al., 2024). La carbonatación mineral ex situ involucra procesos de pretratamiento como: activación térmica, química o mecánica (trititación, molienda y separación magnética) (Li et al., 2018).

7. Mecanismos de carbonatación mineral

La carbonatación mineral ex situ puede lograrse a través de métodos directos o indirectos (Sanna et al., 2014; Ho et al., 2023). No obstante, la carbonatación directa tiene lugar cuando la carbonatación y la disolución del mineral ocurren en un solo paso para producir un producto de carbonato. Esta reacción puede ser líquido-sólido o directa acuosa (Bobicki et al., 2012). En comparación con la carbonatación indirecta, esta implica múltiples pasos donde el metal divalente es extraído de la fuente mineral, y se convierte en un óxido o hidróxido reactivo mediante procesos químicos, posteriormente este reacciona con el CO_2 en un paso por separado (Stokreef et al., 2022).

7.1. Carbonatación directa gas-sólido

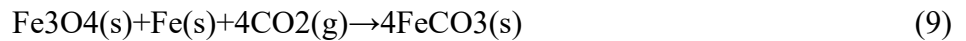
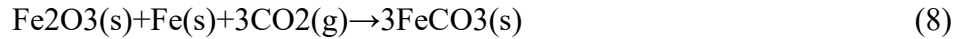
La carbonatación directa gas-sólido se emplea cuando el CO_2 en estado gaseoso reacciona con óxidos metálicos a temperaturas y presiones adecuadas. Para este proceso se requiere la molienda fina del mineral previo al proceso de carbonatación. Este método es adecuado en óxidos o hidróxidos que contienen calcio y magnesio (Metz B et al., 2005). En comparación con silicatos de calcio y magnesio, estas reacciones suelen ser muy lentas (Bobicki et al., 2012). Este mecanismo de reacción es el más simple, y se ilustra en la ecuación 5 para la carbonatación del olivino-fosterita (Stokreef et al., 2022). Para la eficiencia del proceso depende de la superficie de área (Bodénan et al., 2014)



En esta reacción gas-sólido el metal divalente reactivo está unido con un hidróxido, por lo que, el mineral que posee el metal primero se debe deshidroxilar antes de la carbonatación (Fagerlund et al., 2012). Este mecanismo se indica a continuación en la Ecuación 6 – 7.



Algunos estudios, han empleado estas reacciones en óxidos de hierro (hematita) y CO₂ para dar como resultado carbonatos de hierro (Siderita). Esta reacción se ilustra en la ecuación 8-9 (Kusin et al., 2023).



El mecanismo de reacción gas - sólido puede ocurrir en condiciones secas o húmedas, y pueden depender de condiciones de alta presión, temperatura y vapor para lograr velocidades de reacción razonables (Stokreef et al., 2022).

7.2. Carbonatación directa acuosa

La carbonatación directa acuosa implica tres pasos: Disolución del CO₂ en agua, la filtración o disolución y liberación del catión metálico divalente, y por último la precipitación del carbonato estable (Huijgen et al., 2006; Kemache et al., 2017). Este proceso involucra la reacción de CO₂ líquido con minerales o residuos industriales (Lin et al., 2024). Este mecanismo es el más efectivo y empleado para la captura de CO₂ (Gerdemann et al., 2007; Lin et al., 2024). La ecuación 10-12 describe el proceso de carbonatación acuosa (Lin et al., 2024).



7.3. Carbonatación indirecta

La carbonatación indirecta involucra principalmente dos etapas de lixiviación de Ca⁺² y Mg⁺² y carbonatación (Romanov et al., 2015). Primero, el uso de reactivos ácidos es necesario para la extracción de los metales Ca⁺² y Mg⁺². Luego las soluciones ricas en Ca y Mg reaccionan con el CO₂ en ambientes alcalinos, y por último el CO₂ precipita en forma de calcita CaCO₃ o magnesita MgCO₃ (Lin et al., 2024).

8. Carbonatación pasiva en relaves mineros

La carbonatación pasiva en relaves mineros presenta gran potencial para mitigar y compensar el CO₂ generado por la extracción de metales del grupo del platino (Hamilton et al., 2020). Esto se debe a la alta reactividad que resulta de la superficie mineral a través de procesos de trituración durante el procesamiento mineral (Hamilton et al., 2018). Algunos estudios desarrollados en relaves son presentados en la Mina de Níquel Mt Keith en Australia Occidental, donde alrededor de 40.000 toneladas de CO₂ atmosférico es captado a través de la reacción natural de estos relaves (Wilson et al., 2014). Por otro lado, en la mina Woodsreef Asbestos localizada en Nueva Gales del sur, en Australia se han encontrado enormes cantidades de carbonatos que son producto de la erosión del material fino en superficie sobre pila de relaves, este material consiste principalmente de hidromagnesita que ha precipitado al evaporarse por aguas meteóricas que incorporan el CO₂ atmosférico. (Nowamooz et al., 2018). Por otra parte, la tasa de carbonatación pasiva puede ser significativa en relación con las emisiones de gases de efecto invernadero (Hamilton et al., 2020). Adicionalmente, se requieren tratamientos como la lixiviación ácida y reacción de relaves con elevadas concentraciones para aumentar la eficacia de esta captura. (Hamilton et al., 2020). Según Hamilton (2016) los carbonatos de Mg e hidróxidos de Fe en estos relaves generan una rápida inmovilización de los metales traza (Ni, Mn, Cr, Co, Cu).

9. Carbonatación mineral ¿una alternativa para una minería sostenible?

La carbonatación mineral es una alternativa dentro del contexto de minería sostenible. Por los múltiples beneficios ambientales, que presenta y el valor agregado que genera a estos residuos. Además, el empleo de este mecanismo en residuos industriales carbonatados permite el uso de estos como materia prima para el reemplazo parcial del Clinker (caliza calcinada) o agregados del concreto por lo que ayudará a reducir las emisiones de CO₂ (Park et al., 2020).

Así mismo, esta reacción funciona como regulador de drenajes ácidos en relaves mineros (Hamilton et al., 2016), o en materiales de construcción de acuerdo sus propiedades puzolánicas entre otras (Conrado Suárez, 2018). Por tanto, es necesario resaltar que su uso puede variar de acuerdo con su composición química y mineralógica. No obstante, se ha encontrado que, el empleo de residuos mineros puede limitar una cantidad creciente de residuos acumulados en muchos de

los terrenos baldíos mineros, (Veetil & Hitch, 2020; Molahid et al., 2023), o también catalogados como depósitos de estériles.

Algunas investigaciones apuntan a los residuos provenientes de depósitos ultramáficos dado que presentan componentes alcalinos que pueden ser usados para la captura de CO₂ (Meyer et al., 2014; Stokreef et al., 2022). Pese a los múltiples estudios en estos residuos, se hace necesario seguir investigando estos materiales residuos, como la escoria producto de la extracción de ferroníquel.

Si bien en Colombia, se generan grandes cantidades de residuo de escoria principalmente en el departamento de Córdoba, sus propiedades químicas y mineralógicas son muy poco estudiadas dentro de la industria, y comúnmente son apiladas en depósitos de relaves. Por lo que plantear este mecanismo puede tener un gran potencial dentro del contexto minero y puede considerarse no solo una alternativa, sino también una estrategia que conduce hacia una minería sostenible.

10. Conclusión

La carbonatación mineral empleada relaves representa una estrategia sostenible en la industria minera, por lo que puede ayudar a mitigar los múltiples impactos ambientales, para así garantizar una minería sostenible. Este estudio se centró en plantear la carbonatación mineral como una alternativa que es viable y amigable ambientalmente, que puede ayudar a reducir enormes cantidades de residuos de “estériles” producto de la industria extractiva, con un enfoque específico en Colombia. El proceso involucró una búsqueda exhaustiva de información relacionada a los depósitos lateríticos de níquel, sus procesos físicos metalúrgicos, las características químicas de estos residuos, la carbonatación mineral y sus mecanismos de captura y estudios centrados en estos residuos.

El entendimiento, de la composición química mineralógica de los depósitos lateríticos dan una visión de su potencial dentro del proceso de captura de CO₂. Así mismo, sus procesos tanto físicos como metalúrgicos, proporcionan ideas alternas que permiten la eficiencia de esta reacción para el secuestro del dióxido de carbono. Por lo que, los residuos que han sido tratados de manera térmica(escoria), química o mecánica puede facilitar la liberación de estos cationes. Estos procesos pueden ser a través del incremento del área de superficie a través de procesos de trituración-molienda, procesos de altas temperaturas en hornos y tratamientos químicos como lixiviación pueden catalizar

la velocidad de reacción. Se encontró que son múltiples los usos que se pueden obtener con este proceso.

Estos usos pueden involucrar la remediación de suelos y aguas, esto ocurre dado que la reacción inicia en condiciones ácidas y una vez precipita el carbonato este regula el PH en condiciones básicas, también para la captura de CO₂, producción de materiales de construcción, usos agrícolas entre otros. A pesar de sus múltiples beneficios, es necesario seguir promoviendo estudios de estos residuos en Colombia para garantizar y asegurar la eficacia de este proceso a largo plazo. La búsqueda de alternativas sostenibles en la industria minera se hace necesaria y requiere una colaboración efectiva entre las diferentes autoridades gubernamentales, científicos y comunidad en general.

11. Referencias bibliográficas

- Bobicki, E. R., Liu, Q., Xu, Z., & Zeng, H. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. In *Progress in Energy and Combustion Science* (Vol. 38, Issue 2, pp. 302–320). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.11.002>
- Bodénan, F., Bourgeois, F., Petiot, C., Augé, T., Bonfils, B., Julcour-Lebigue, C., Guyot, F., Boukary, A., Tremosa, J., Lassin, A., Gaucher, E. C., & Chiquet, P. (2014). Ex situ mineral carbonation for CO₂ mitigation: Evaluation of mining waste resources, aqueous carbonation processability and life cycle assessment (Carmex project). *Minerals Engineering*, 59, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.011>
- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*, 9(2), 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Cao, S., Chang, L., Bi, X., Luo, S., & Liu, J. (2022). The Extraction of Silica from Nickel Laterite Ore by Alkaline Hydrothermal Process. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 39(3), 1245–1253. <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00597-x>
- Choi, Y. (2023). Interdisciplinary Studies for Sustainable Mining. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 7). MDPI. <https://doi.org/10.3390/app13074621>
- Conrado Suárez, L. (2018). Evaluación de escorias siderúrgicas de horno de arco eléctrico en mezclas de concreto estructural. [Trabajo de grado magister, universidad de los Andes] Repositorio institucional de Universidad de los Andes. <http://hdl.handle.net/1992/35091>
- Consuelo, S., & Bello, D. (2016a). *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. [Trabajo de grado doctorado, Universidad Nacional de Colombia] Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57494>

- Consuelo, S., & Bello, D. (2016b). *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. [Trabajo de grado doctorado, Universidad Nacional de Colombia] Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57494>
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (2011a). Overview. In *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals* (pp. 1–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096809-4.10001-2>
- Crundwell, F. K., Moats, M. S., Ramachandran, V., Robinson, T. G., & Davenport, W. G. (2011b). Overview. In *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals* (pp. 1–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-096809-4.10001-2>
- Fagerlund, J., Highfield, J., & Zevenhoven, R. (2012). Kinetics studies on wet and dry gas-solid carbonation of MgO and Mg(OH)₂ for CO₂ sequestration. *RSC Advances*, 2(27), 10380–10393. <https://doi.org/10.1039/c2ra21428h>
- Geerlings, H., & Zevenhoven, R. (2013). CO₂ mineralization - Bridge between storage and utilization of CO₂. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*, 4, 103–117. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-062011-080951>
- Gerdemann, S. J., O'Connor, W. K., Dahlin, D. C., Penner, L. R., & Rush, H. (2007). Ex situ aqueous mineral carbonation. *Environmental Science and Technology*, 41(7), 2587–2593. <https://doi.org/10.1021/es0619253>
- Girgin, I., Obut, A., & Üçyıldız, A. (2011). Dissolution behaviour of a Turkish lateritic nickel ore. *Minerals Engineering*, 24(7), 603–609. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.10.009>
- Hamilton, J. L., Wilson, S., Morgan, B., Harrison, A. L., Turvey, C. C., Paterson, D. J., Dipple, G. M., & Southam, G. (2020). Accelerating mineral carbonation in ultramafic mine tailings via direct CO₂ reaction and heap leaching with potential for base metal enrichment and recovery. *Economic Geology*, 115(2), 303–323. <https://doi.org/10.5382/ECONGEO.4710>
- Hamilton, J. L., Wilson, S., Morgan, B., Turvey, C. C., Paterson, D. J., Jowitt, S. M., McCutcheon, J., & Southam, G. (2018). Fate of transition metals during passive carbonation of ultramafic mine tailings via air capture with potential for metal resource recovery. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 71, 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.02.008>
- Hamilton, J. L., Wilson, S., Morgan, B., Turvey, C. C., Paterson, D. J., MacRae, C., McCutcheon, J., & Southam, G. (2016). Nesquehonite sequesters transition metals and CO₂ during accelerated carbon mineralisation. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 55, 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.11.006>

- Hernandez, Y., & Almanza, O. (2014). *Caracterización de muestras arcillosas provenientes de la mina de níquel de Cerro Matoso (Córdoba-Colombia)*. <https://www.researchgate.net/publication/28110849>
- Ho, H. J., Iizuka, A., Lee, C. H., & Chen, W. S. (2023). Mineral carbonation using alkaline waste and byproducts to reduce CO₂ emissions in Taiwan. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 21, Issue 2, pp. 865–884). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01518-6>
- Huijgen, W. J. J., Witkamp, G. J., & Comans, R. N. J. (2006). Mechanisms of aqueous wollastonite carbonation as a possible CO₂ sequestration process. *Chemical Engineering Science*, 61(13), 4242–4251. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.01.048>
- Kashim, M. Z., Tsegab, H., Rahmani, O., Abu Bakar, Z. A., & Aminpour, S. M. (2020). Reaction Mechanism of Wollastonite in Situ Mineral Carbonation for CO₂ Sequestration: Effects of Saline Conditions, Temperature, and Pressure. *ACS Omega*, 5(45), 28942–28954. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02358>
- Kemache, N., Pasquier, L. C., Cecchi, E., Mouedhen, I., Blais, J. F., & Mercier, G. (2017). Aqueous mineral carbonation for CO₂ sequestration: From laboratory to pilot scale. *Fuel Processing Technology*, 166, 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.005>
- Keskinkilic, E. (2019). Nickel laterite smelting processes and some examples of recent possible modifications to the conventional route. In *Metals* (Vol. 9, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met9090974>
- Kusin, F. M., Hasan, S. N. M. S., Molahid, V. L. M., Yusuff, F. M., & Jusop, S. (2023). Carbon dioxide sequestration of iron ore mining waste under low-reaction condition of a direct mineral carbonation process. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(9), 22188–22210. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23677-3>
- Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce, E. L., Jr., & Sharp, D. H. (1995). Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, 20(11), 1153–1170.
- Li, J., Hitch, M., Power, I. M., & Pan, Y. (2018). Integrated mineral carbonation of ultramafic mine deposits—A review. In *Minerals* (Vol. 8, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min8040147>
- Lin, X., Zhang, Y., Liu, H., Boczkaj, G., Cao, Y., & Wang, C. (2024). Carbon dioxide sequestration by industrial wastes through mineral carbonation: Current status and perspectives. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 434). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140258>
- López Púlido, E. A. (2018). *Caracterización física y química de escorias de ferroníquel de bajo tenor para posibles usos industriales*. [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de

Colombia], Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia.
<https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3033>

- Lopez-Rendon, J. E. (1996, August 27-29). Geología y mineralogía de la laterita de Planeta Rica, Departamento de Córdoba, Colombia. VII Congreso Colombiano de Geología, Santafé de Bogotá, Colombia. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/343204937_Geologia_y_mineralogia_de_la_laterita_de_Planeta_Rica_Departamento_de_Cordoba_Colombia
- .Lottermoser, B. G. (2010). Mine Wastes (third edition): Characterization, treatment and environmental impacts. In *Mine Wastes (Third Edition): Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- Loveday, B. K. (2008). The use of oxygen in high pressure acid leaching of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 21(7), 533–538. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.11.002>
- Makhathini, T. P., Bwapwa, J. K., & Mtsweni, S. (2023). Various Options for Mining and Metallurgical Waste in the Circular Economy: A Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15032518>
- Maragkos, I., Giannopoulou, I. P., & Panias, D. (2009). Synthesis of ferronickel slag-based geopolymers. *Minerals Engineering*, 22(2), 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.07.003>
- Meshram, P., Abhilash, & Pandey, B. D. (2019). Advanced Review on Extraction of Nickel from Primary and Secondary Sources. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 40, Issue 3, pp. 157–193). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1514300>
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (Eds.). (2005). IPCC special report on carbon dioxide capture and storage. Cambridge University Press.
- Meyer, N. A., Vögeli, J. U., Becker, M., Broadhurst, J. L., Reid, D. L., & Franzidis, J. P. (2014). Mineral carbonation of PGM mine tailings for CO₂ storage in South Africa: A case study. *Minerals Engineering*, 59, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.014>
- Molahid, V. L. M., Kusin, F. M., Hasan, S. N. M. S., Ramli, N. A. A., & Abdullah, A. M. (2022). CO₂ Sequestration through Mineral Carbonation: Effect of Different Parameters on Carbonation of Fe-Rich Mine Waste Materials. *Processes*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/pr10020432>
- Molahid, V. L. M., Kusin, F. M., & Syed Hasan, S. N. M. (2023). Mineralogical and chemical characterization of mining waste and utilization for carbon sequestration through mineral

- carbonation. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(7), 4439–4460. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01513-y>
- Nowamooz, A., Dupuis, J. C., Beaudoin, G., Molson, J., Lemieux, J. M., Horswill, M., Fortier, R., Larachi, F., Maldague, X., Constantin, M., Duchesne, J., & Therrien, R. (2018). Atmospheric Carbon Mineralization in an Industrial-Scale Chrysotile Mining Waste Pile. *Environmental Science and Technology*, 52(14), 8050–8057. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01128>
- 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>
- Park, B., Moon, E. J., & Choi, Y. C. (2020). Investigation of microstructure and mechanical performance of carbon-capture binder using AOD stainless steel slag. *Construction and Building Materials*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118174>
- Romanov, V., Soong, Y., Carney, C., Rush, G. E., Nielsen, B., & O'Connor, W. (2015). Mineralization of Carbon Dioxide: A Literature Review. In *ChemBioEng Reviews* (Vol. 2, Issue 4, pp. 231–256). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/cben.201500002>
- Sagadin, C., Luidold, S., Wagner, C., & Wenzl, C. (2016). Melting Behaviour of Ferronickel Slags. *JOM*, 68(12), 3022–3028. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2140-6>
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., & Maroto-Valer, M. M. (2014). A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 43, Issue 23, pp. 8049–8080). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c4cs00035h>
- Stokreef, S., Sadri, F., Stokreef, A., & Ghahreman, A. (2022). Mineral carbonation of ultramafic tailings: A review of reaction mechanisms and kinetics, industry case studies, and modelling. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 8). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100491>
- Ulum, R. M., Natalin, Riastuti, R., Mayangsari, W., Prasetyo, A. B., Soedarsono, J. W., & Maksum, A. (2023). Pyro-Hydrometallurgy Routes to Recover Silica from Indonesian Ferronickel Slag. *Recycling*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/recycling8010013>
- Veetil, S. P., & Hitch, M. (2020). Recent developments and challenges of aqueous mineral carbonation: a review. In *International Journal of Environmental Science and Technology* (Vol. 17, Issue 10, pp. 4359–4380). Springer. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02776-z>
- Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J. A., Galí, S., García-Casco, A., Tauler, E., Lewis, J. F., & Longo, F. (2014). Garnierites and garnierites: Textures, mineralogy and geochemistry of garnierites in the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*, 58(C), 91–109. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.10.008>

- Whitworth, A. J., Forbes, E., Verster, I., Jokovic, V., Awatey, B., & Parbhakar-Fox, A. (2022a). Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>
- Whitworth, A. J., Forbes, E., Verster, I., Jokovic, V., Awatey, B., & Parbhakar-Fox, A. (2022b). Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 7). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>
- Wilson, S., Harrison, A. L., Dipple, G. M., Power, I. M., Barker, S. L. L., Ulrich Mayer, K., Fallon, S. J., Raudsepp, M., & Southam, G. (2014). Offsetting of CO₂ emissions by air capture in mine tailings at the Mount Keith Nickel Mine, Western Australia: Rates, controls and prospects for carbon neutral mining. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 25, 121–140. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.04.002>
- Yi, Z., Wang, T., & Guo, R. (2020). Sustainable building material from CO₂ mineralization slag: Aggregate for concretes and effect of CO₂ curing. *Journal of CO₂ Utilization*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101196>