

Caracterización de un conglomerado pegmatítico: Posible fuente extractiva de litio Characterization of a Pegmatitic Conglomerate: A Possible Lithium Extraction Source

C. S. Vargas-Delgado^a, A. M. Teja-Ruiz^{b,*}, G. Cisneros-Flores^a, O. Rosales-González^b, J. C. Juárez-Tapia^a, K. Flores-Castro^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca- Hidalgo Km 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 42184, México.

^b Dirección de Laboratorios, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca- Hidalgo Km 4.5, Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, 42184, México.

Resumen

El litio es un elemento estratégico en la industria tecnológica y energética, especialmente en el desarrollo de la electromovilidad. El presente artículo evalúa la viabilidad de la extracción de litio a partir de un conglomerado pegmatítico de Ensenada, Baja California, México, mediante una caracterización química y mineralógica. Para ello, se emplearon técnicas avanzadas como Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectroscopia de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP), Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopia Digital (MD). El análisis identificó dos minerales principales: elbaíta y polilitionita. Los resultados indican que ambos minerales poseen litio, siendo la polilitionita la que posee una mayor concentración de este siendo viable la conminución total del agregado pegmatítico este para maximizar la recuperación. Además, los índices de geoacumulación y los factores de enriquecimiento confirmaron que el litio presente en estas pegmatitas alcanza concentraciones suficientes para considerar a los depósitos de Ensenada como una fuente extractiva viable, tomando en cuenta un correcto procesamiento para evitar que los contenidos de boro, flúor y manganeso formen complejos con potencial daño ambiental, aumentando así su bioaccesibilidad.

Palabras Clave: Litio, caracterización, pegmatitas, factor de enriquecimiento.

Abstract

Lithium is a strategic element in the technological and energy industries, especially in the development of electromobility. This article evaluates the feasibility of lithium extraction from a pegmatitic conglomerate in Ensenada, Baja California, Mexico, through chemical and mineralogical characterization. Advanced techniques such as X-Ray Fluorescence (XRF), Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-Ray Diffraction (XRD), and Digital Microscopy (DM) were employed. The analysis identified two main minerals: elbaite and polylithionite. The results indicate that both minerals contain lithium, with polylithionite having the higher concentration. Therefore, the complete comminution of the pegmatitic aggregate is considered viable to maximize recovery. Additionally, the geoaccumulation indices and enrichment factors confirmed that the lithium present in these pegmatites reaches concentrations sufficient to consider the Ensenada deposits as a viable extractive source, provided that proper processing is carried out to prevent the boron, fluorine, and manganese contents from forming complexes with potential environmental harm by increasing their bioaccessibility.

Keywords: Lithium, characterization, pegmatites, enrichment factor.

1. Introducción

Al ser el litio un elemento sumamente ligero, cuya baja densidad atómica involucra la poca emisión de electrones secundarios, cuando este es bombardeado por electrones de mayor energía, la detección de su señal a partir de técnicas como la Fluorescencia de Rayos X (FRX) y la Microscopía

Electrónica de Barrido (MEB) resulta complicada, al grado de no lograr su correcta evaluación (Vargas et al., 2014). Debido a ello, el análisis de especies minerales relacionadas al contenido de litio presenta una serie de desafíos que deben ser atendidos mediante la aplicación de técnicas de caracterización complementarias que permitan establecer el contenido

*Autor para la correspondencia: aislinn_teja@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: va355693@uaeh.edu.mx (Cristopher Sebastian Vargas Delgado), aislinn_teja@uaeh.edu.mx (Aislinn Michelle Teja Ruiz), ci336682@uaeh.edu.mx (Gabriel Cisneros Flores), omar_rosales@uaeh.edu.mx (Omar Rosales-González), jcuarez@uaeh.edu.mx (Julio Juárez Tapia), floresk@uaeh.edu.mx (Kinardo Flores-Castro).

elemental y la asociación mineralógica de este tipo de muestras (Callister y Rethwisch, 2020).

Siendo el litio el más liviano de todos los metales, sus electrones libres se desplazan dentro de la red cristalina con gran facilidad, permitiendo transferir cargas negativas a través de su estructura con muy poca resistencia, lo cual le confiere la propiedad de ser un excelente conductor de electricidad en dispositivos de tamaño reducido, que promueven toda una gama de aplicaciones industriales y detonan el interés económico por la explotación de este metal (Millas, 2005). Su principal uso es la fabricación de baterías recargables, representando el 39% del consumo mundial, seguido de aplicaciones en cerámica, vidrio, grasas lubricantes y tratamientos del aire. Su importancia radica en su papel clave en la transición hacia energías limpias y el desarrollo de la electromovilidad (Batterman y Walther, 2022; Chan y Chan, 2017; Zhang y Zhao, 2020).

Según el British Geological Survey (2021), el litio del mundo proviene actualmente de dos fuentes geológicas principales, salmueras enriquecidas con litio y pegmatitas de litio, las cuales son un tipo inusual de rocas graníticas enriquecidas con diversos metales raros. La pegmatita es una roca ígnea intrusiva de grano grueso formada a partir de magma cristalizado en el interior de la corteza terrestre, la cual contiene cantidades extraíbles de diversos elementos, incluyendo el litio, representando el 26% de los recursos mundiales conocidos de este. Dentro de estos depósitos el litio se encuentra en minerales como la espodumena y en su variación conocida como kunzita, además de minerales asociados como la petalita, lepidolita y eucryptita (Secretaría de Economía de México, 2018).

Los principales depósitos se encuentran en distintas localidades de Australia, Canadá, China y Zimbabue, sin embargo, se pueden encontrar en otras regiones, como es el caso de aquellos localizados en Ensenada, Baja California, México (BGS, 2021). La provincia de Ensenada, es mundialmente conocida por la extracción de turmalinas y danburitas de alta calidad, operó durante la época de los setentas y ochentas como una de las regiones gemológicas más representativas de México. Sin embargo, actualmente la escasez de cristales grado gema ha descartado la inversión operativa de mina Verde, pese a su clasificación como depósitos pegmatíticos de litio (Paczner, 1987; Jolyon e Ida, 2006). Actualmente se busca aprovechar el potencial para la extracción de litio ya que representa un elemento estratégico con potencial aplicación en el sector tecnológico. De lograrse una correcta caracterización y operación en estos yacimientos puede abrir la puerta a la explotación minera como una nueva actividad integrada a su cultura minera fungiendo como un punto estratégico para el desarrollo de la provincia minera y del país. Para asegurar una concentración de litio o de metales de interés es necesaria una minuciosa caracterización mineralógica.

Un importante factor a considerar, además de la concentración de litio, para la explotación de yacimientos pegmatíticos es la bioaccesibilidad, debido a la importancia de una explotación sustentable que no dañe al ambiente. Generalmente la extracción de litio a partir de las pegmatitas, especialmente de minerales como la espodumena, implica procesos térmicos,

químicos y mecánicos. Inicialmente, debe someterse a un proceso térmico superior a los 1000 °C con la finalidad de hacer a la especie más reactiva, para después utilizar métodos como la lixiviación ácida empleando ácido sulfúrico o fluorhídrico, lo que permite la conversión del litio en especies solubles como el cloruro de litio, bromuro de litio o hidróxido de litio (Karrech, 2020). Estos complejos pueden reaccionar con el ambiente representando un potencial daño al entorno y a la salud de los habitantes que se encuentren en áreas circundantes.

Por lo cual el presente trabajo muestra el desarrollo de una minuciosa caracterización química y mineralógica abriendo una nueva área de oportunidad en la clasificación de estos depósitos como una fuente extractiva primaria de litio a través del cálculo de índices de geoacumulación y factores de enriquecimiento para su posible operación minera.

2. Metodología

El conglomerado pegmatítico fue obtenido de la región minera de Ensenada en Baja California Norte (Antigua operación de Mina Verde). Para el análisis de dicha muestra se realizó una separación física de los cristales correspondientes a la familia de la turmalina y las micas que conforman la roca encajonante, esto con la finalidad de caracterizar de manera mayoritaria cada uno de los componentes de la roca pegmatítica. Una vez separadas las especies minerales, fueron pulverizadas en un rango de 53 a 74 micras, dicho tamaño de partícula se ha reportado como idóneo para el procesamiento de minerales de litio por vías hidrometalúrgicas (Gao et al., 2023), además de favorecer la preparación de las muestras a analizar, mediante las distintas técnicas de caracterización consideradas en el presente estudio (Joan Carles Melgarejo et al., 2010; Ostrooumov, 2009; Torre Antay et al., 2019). El proceso de conminución se realizó mediante un mortero de ágata automatizado marca Fritsch modelo Pulverisette 2, con el objetivo de asegurar la mayor área de contacto de los polvos minerales en el proceso de digestión y facilitar la identificación de fases minerales mediante la técnica de difracción de Rayos X, utilizando un difractómetro equipo Inel Equinox 2000 con radiación $\text{CoK}\alpha$ (1.78901 Å), 40 kV y 25 mA. El ataque ácido de los polvos minerales fue realizado empleando una solución concentrada de ácido fluorhídrico a 65 °C durante 20 min. Las soluciones resultantes fueron analizadas mediante un espectrómetro Perkin Elmer 8300. Posteriormente, se corroboró el contenido elemental de las muestras mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X usando un equipo marca Bruker, Modelo Titan S1, el cual utiliza espectro-membranas de la marca Chemplex. Los resultados obtenidos de ambas técnicas permitieron corroborar el contenido elemental de ambas muestras y posteriormente establecer la ley de corte del compuesto pegmatítico para realizar el cálculo de los índices de geoacumulación y factores de enriquecimiento correspondientes.

Con la finalidad de corroborar la asociación mineralógica establecida por DRX, observar la morfología y obtener un reporte semicuantitativo de la composición de la muestra se aplicaron las técnicas de Microscopia Electrónica de Barrido con Análisis de Energías dispersivas y Microscopia Digital con Espectroscopia de Descomposición Inducida por Láser (MD-LIBS), usando un microscopio JEOL modelo JSM 6300 de 30

KV a diferentes ampliaciones y un microscopio óptico digital marca Keyence modelo VHX 7000 con analizador elemental marca Keyence modelo EA-300, respectivamente.

Finalmente, mediante los resultados obtenidos de la caracterización, se estableció la importancia de tratar la muestra como un compuesto mineral con el objetivo de aprovechar el contenido de litio presente en la roca encajonante. El cálculo de los índices de Geoacumulación se realizó mediante la siguiente expresión:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{Cn}{1.5 * Bn} \quad (1)$$

Donde Cn se refiere a concentración del elemento de interés en la muestra analizada y Bn corresponde a la concentración geoquímica del elemento en la corteza terrestre. Este intervalo permite informar sobre un valor numérico que representa un parámetro de contaminación en suelos o sedimentos asociado al impacto ambiental (Kim et al., 2018).

Por otra parte, el cálculo de factores de enriquecimiento expresado en la ecuación 2, establece la concentración mínima que debe cumplir un depósito mineral para considerarse como fuente extractiva de cierto elemento.

$$FE = \frac{\left(\frac{x}{Fe}\right)_{Muestra}}{\left(\frac{x}{Fe}\right)_{Corteza}} \quad (2)$$

Donde $(X/Fe)_{muestra}$, representa la relación entre la concentración del elemento de interés y la concentración de hierro en la muestra. El término $(X/Fe)_{corteza}$, plantea la relación entre la concentración del elemento de interés y la concentración de hierro en la corteza terrestre. Se usa al hierro como referencia, siendo este el elemento base de interés económico más abundante en la roca madre (Del Aguila Juárez et al., 2005). El cálculo de ambos parámetros arroja indicios sobre el beneficio de este tipo de especies pegmatíticas como una potencial fuente extractiva de litio.

3. Obtención de la muestra pegmatítica de litio

La muestra presenta una asociación mineralógica de cristales de borosilicato en tonalidades verdes y rosadas dentro del mismo cristal, estas últimas comúnmente asociadas a la presencia de impurezas de litio y manganeso, y una especie encajonante de filosilicatos en tonalidades ligeramente

violáceas y perladas (ver figura 1) que, pese a su abundancia mineralógica, no cumple con las características necesarias para ser explotada con fines gemológicos. Este tipo de yacimientos se asocia a la formación de rocas pegmatíticas alcalinas que se forman al disminuir la temperatura y que, a su vez, se asocian a flujos hidrotermales que contribuyen a la variabilidad de elementos que conforman la asociación mineralógica (Smith et al., 2019).

Figura 1. Muestra pegmatítica obtenida del distrito minero de Ensenada, Baja California Norte, México.

El conglomerado pegmatítico fue separado manualmente con la finalidad de caracterizar los minerales mayoritarios. En ambos casos, los minerales muestran una raya de color blanco y resistencia química al ataque ácido.

4. Caracterización química

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la caracterización química de la muestra de borosilicato establecida como mineral de mena tentativo y la muestra de filosilicatos que representa la roca encajonante. Para ello se utilizaron las técnicas de Espectroscopía de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP) y Fluorescencia de Rayos X (FRX) con la finalidad de determinar el contenido elemental de las muestras minerales. Las soluciones resultantes de la digestión de polvos del mineral de mena establecen la concentración mayoritaria de silicio y aluminio, sin embargo, se destaca a su vez la concentración de elementos como el Mn (3.271 w%), Fe (2.569 w%), B (3.864 w%) y Li (0.781 w%), que pueden llegar a ser de interés como minerales industriales o componentes metálicos (Kuai et al., 2021).

Con la finalidad de descartar el contenido de litio en el mineral ganga, se realizó la digestión y análisis de la roca encajonante conformada principalmente por filosilicatos. Sin embargo, el análisis químico por ICP confirmó la presencia de este elemento con una concentración de 3.061 w%, superando el contenido de litio del borosilicato.

Tabla 1. Contenido elemental del mineral de mena

Análisis Elemental	FRX (w%)	ICP (w%)
Al	3.871	4.120
B	4.023	3.864
Ca	0.748	0.741
F	1.270	1.457
Fe	2.297	2.569
K	0.049	0.053
Mn	3.271	3.822
Na	2.041	2.004
Ti	0.735	0.796
Si	21.877	21.618
Li	-	0.781

El análisis realizado mediante FRX se realizó por triplicado, el promedio de las concentraciones obtenidas se presenta en la tabla 1 y 2, en las cuales se observan valores coincidentes con respecto a lo reportado por la técnica de ICP.

Tabla 2. Contenido elemental de la roca encajonante



Análisis Elemental	FRX (w%)	ICP (w%)
Al	11.236	12.274
F	6.428	7.815
Fe	0.153	0.152
Mg	0.869	0.789
Si	30.780	30.405
Li	-	3.061

5. Caracterización mineralógica

5.1 Difracción de rayos X (DRX)

En la figura 2 se observa el difractograma obtenido a partir de la muestra de polvo del tentativo mineral mena acotado a 74 micras, en el cual se identificó a la especie mineral elbaíta con PDF [96-900-4278] con fórmula: $\text{Al}_{6.96}\text{B}_3\text{Ca}_{0.15}\text{F}_{0.54}\text{Fe}_{0.66}\text{H}_{3.42}\text{K}_{0.01}\text{Li}_{0.9}\text{Mn}_{0.48}\text{Na}_{0.69}\text{Ti}_{0.12}\text{Si}_{5.88}\text{O}_3$. La elbaíta es un borosilicato de litio, boro y sodio que pertenece al grupo de las turmalinas. La unidad estructural del mineral permite su clasificación como un ciclosilicato que se encuentra comúnmente relacionado con minerales como el cuarzo ahumado, la estibinita, feldespatos y una gran variedad de filosilicatos, todas ellas características de pegmatitas graníticas cuya variedad elemental es promovida por la sustitución hidrotermal (Turner, 2020; Williams y Thompson, 2018).

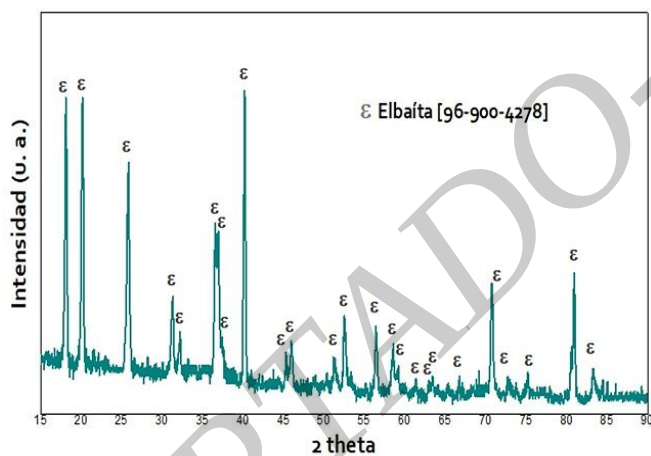


Figura 2. Difractograma de la muestra de mineral de mena (elbaíta)

La turmalina, el mineral portador de boro más común en pegmatitas graníticas con elementos raros, presenta una composición que varía según el subtipo de pegmatita y la roca huésped. En pegmatitas del subtipo lepidolita predominan la foitita y la rossmanita, con bajos niveles de sodio (Na), manganeso (Mn) y calcio (Ca); en el subtipo petalita es común el schorl rico en Na y bajo en Mn y Ca, mientras que en el subtipo elbaíta se encuentran la schorl rica en Na, elbaíta rica en Mn y liddicoatita rica en Al. La turmalina de contacto, por su parte, está más influenciada por la roca preexistente en la que se introduce un cuerpo magmático que por el tipo de pegmatita, mostrando variaciones en magnesio (Mg) y calcio (Ca) según el entorno. Además, fluidos ricos en Fe provenientes de la roca huésped pueden alterar la composición

de la turmalina en etapas tardías, generando bordes o zonas con elbaíta o foitita (Dumańska-Słowik et al., 2015).

El análisis por DRX realizado a la roca encajonante sometida al proceso de conminución permitió identificar como matriz mineral de la muestra a la polilitionita con PDF [96-900-9230] y fórmula: $\text{Al}_{1.16}\text{F}_{1.52}\text{H}_{0.48}\text{Li}_{1.63}\text{Mg}_{0.12}\text{Si}_4\text{O}_{10.48}$, la cual es catalogada como un filosilicato de litio y aluminio (ver figura 3). Esta especie es comúnmente relacionada con rocas pegmatíticas alcalinas. La turmalina es un mineral perteneciente al grupo de los ciclosilicatos, caracterizado por una estructura de anillos de seis tetraedros de silicio, que puede encontrarse geológicamente asociada a los filosilicatos, especialmente en ambientes como pegmatitas, rocas metamórficas y zonas de alteración hidrotermal.

La variabilidad composicional de la elbaíta en yacimientos pegmatíticos refleja cambios en la química del sistema debido a la evolución del fluido pegmatítico. La zonación interna del cuerpo mineral y condiciones locales como temperatura, presión y disponibilidad de elementos. Estos cambios se manifiestan en la zonación de los cristales, visible tanto en el color como en el contenido de elementos como litio (Li), hierro (Fe) atribuyendo tonalidades verdes y manganeso (Mn) dando tonalidades rosadas. Esta variabilidad permite entender la evolución del sistema pegmatítico, identificar zonas con potencial gemífero, además de aportar información útil para la exploración mineral (Andersen & Grorud, 1998; De La Cruz et al., 2024).

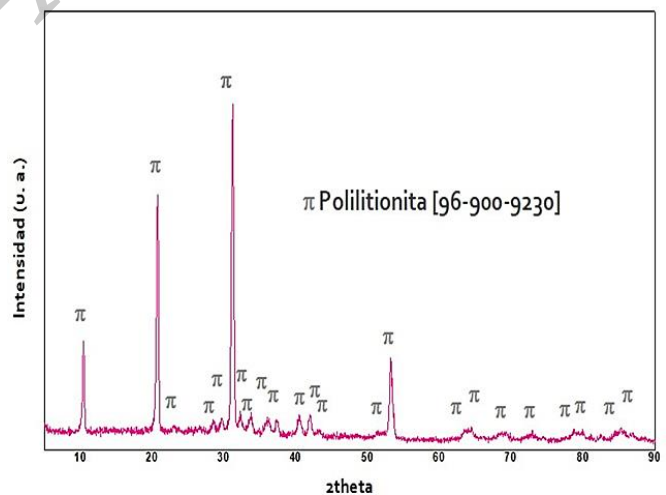


Figura 3. Difractograma de la muestra de la roca encajonante (polilitionita)

5.2 Microscopía electrónica de Barrido y Análisis de Energías Dispersivas (MEB-EDS)

Las micrografías obtenidas con electrones secundarios permitieron identificar la morfología característica de las especies minerales reportadas mediante el análisis de DRX. En el caso de la elbaíta, se observan cristales prismáticos y estriados que tienden a la formación de columnas con fractura desigual (ver figura 4A). En el caso de la polilitionita, se observa en la micrografía 4B, la presencia de tablillas o escamas propias de los filosilicatos. La irregularidad en cuanto al tamaño de los cristales se atribuye al proceso de

conminución al que fueron sometidas ambas muestras para su adecuada caracterización.

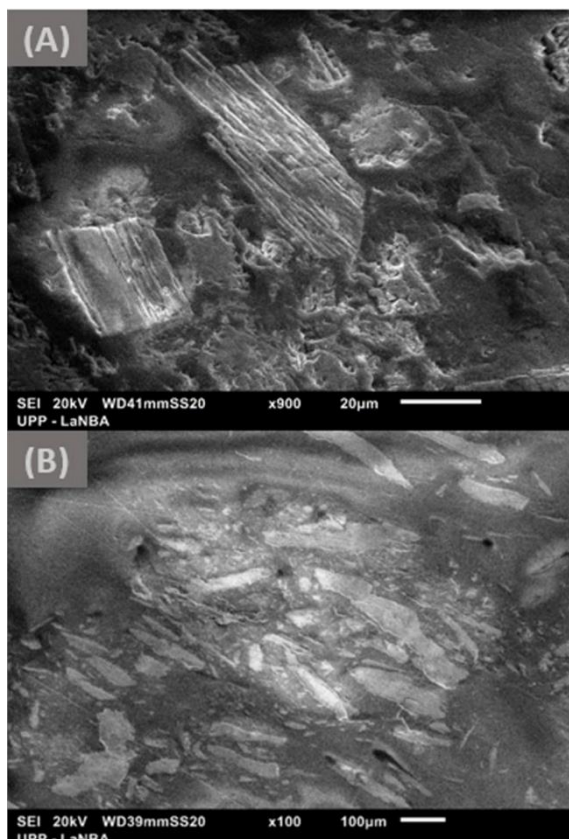


Figura 4. Micrografías de las muestras pegmatíticas obtenidas con electrones secundarios. (A) Elbaíta (B) Polilitionita.

Debido a que ambas especies pertenecen a familias de los silicatos los cuales presentan una menor densidad, el uso de la técnica de MEB mediante electrones retrodispersados no favorece su distinción, con respecto a otras partículas, a través de la escala de grises.

Sin embargo, las micrografías presentadas en la figura 5, contribuyen a la identificación morfológica de ambas especies. En el caso de la elbaíta (ver figura 5A) se muestra la presencia de cristales prismáticos alargados y de fractura irregular. Mientras que, en el caso de los filosilicatos se diferencian hojuelas irregulares (Joan Carles Melgarejo et al., 2010; Klein & Cornelius Jr, 2018) a lo largo de la micrografía que se presentan en la figura 5B. Ambas especies se observan en tonalidades oscuras características de los silicatos.

La identificación de la asociación elemental realizada mediante la técnica de mapeo permitió corroborar la asociación mineralógica de las especies mayoritarias. En la figura 6, se observa mayor intensidad en el mapeo realizado para los elementos Al, O y Si. Sin embargo, también se confirma la presencia de B, Fe y Mn en las mismas zonas de barrido (Dumańska-Słowik et al., 2015). En el caso del flúor, la presencia del elemento volátil se muestra de manera escasa y dispersa en la partícula mineral.

En el caso del mapeo realizado a la muestra filosilicato, se observa la presencia mayoritaria del oxígeno asociada a zonas

de barrido correspondientes a los elementos Si y Al. De manera minoritaria, también se observa la presencia de F, Fe y Mg (ver figura 7).

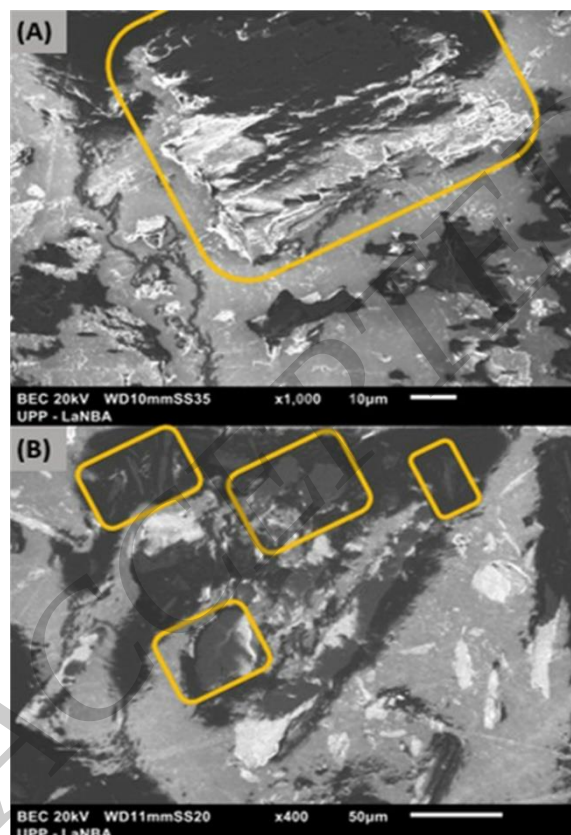


Figura 5. Micrografías de las muestras pegmatíticas obtenidas con electrones retrodispersados. (A) Elbaíta (B) Polilitionita.

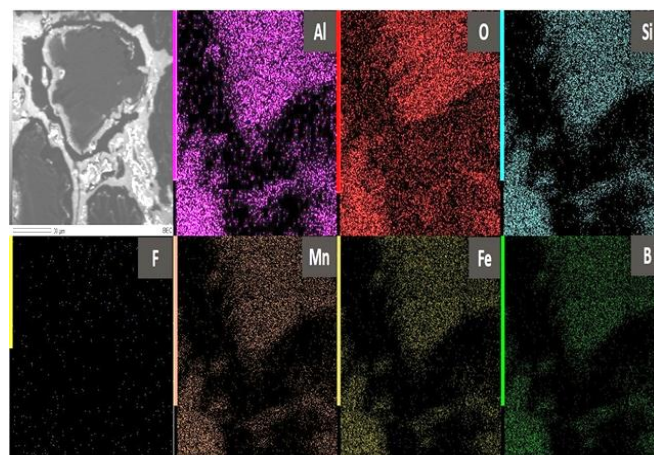


Figura 6. Técnica de mapeo aplicada a la muestra de elbaíta.

Es importante considerar que, aunque esta técnica confirma la composición elemental de las especies identificadas por DRX, no es adecuada para la identificación de litio, debido a la baja energía de los rayos X que emite este elemento ($L\alpha$, $K\alpha$), los cuales pueden ser fácilmente absorbidos por la atmósfera o la capa superficial de la muestra, lo que dificulta la detección precisa, al igual que en el caso de la caracterización por FRX (Abd Halim et al., 2023); (Goldstein et al., 2017).

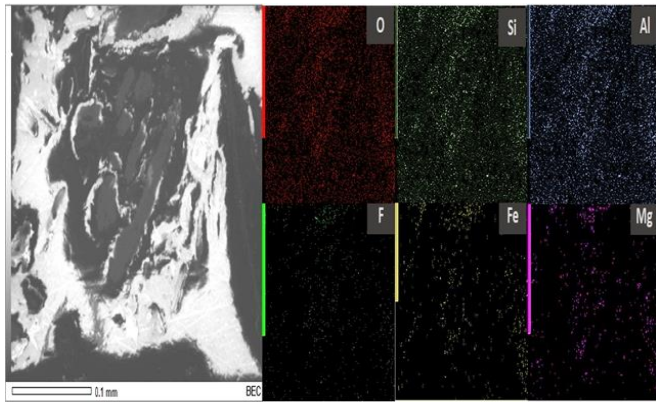


Figura 7. Técnica de mapeo aplicada a la muestra de polilitionita.



EA	Al	F	Fe	Mg	Si	Li	Presumed material
w%	11.236	6.428	0.453	0.869	35.780	2.84	Silicon compound

Figura 9. Micrografía de la polilitionita obtenida con luz lateral.

5.3 Microscopia digital con análisis elemental

Como se observa en las micrografías obtenidas por MEB, el microscopio digital permitió identificar la presencia de cristales alargados y estriados de manera vertical cuya fractura tiende a lo conoidal para el caso de la elbaíta (ver figura 8). El análisis elemental realizado mediante espectroscopia de plasma inducido por láser (LIBS) identificó a la muestra de turmalina como un compuesto de boro y reportó un contenido de litio promedio de 0.85 w%, además de confirmar el resto de contenido elemental reportado por FRX e ICP, destacando a su vez la presencia de manganeso (3.82 w%) con un contenido semejante a la concentración del metal ligero.

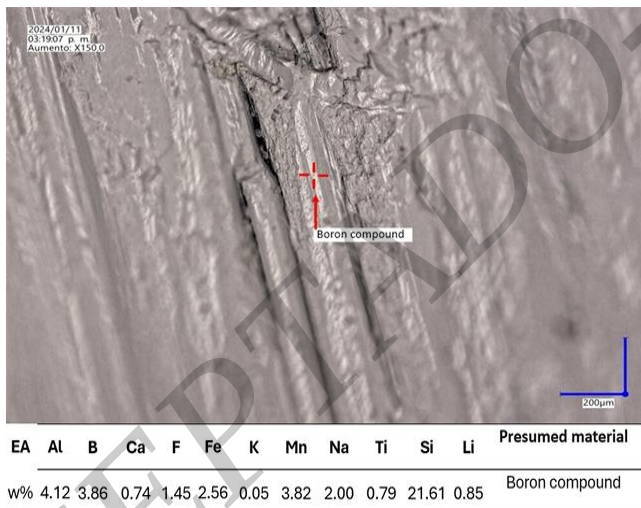


Figura 8. Micrografía de la elbaíta obtenida con luz lateral.

En la figura 9, se presenta una micrografía obtenida a partir de luz lateral donde se observa un agregado escamoso correspondiente a la especie mineral polilitionita, la cual fue reportada por la técnica de LIBS como un compuesto de silicio cuyo contenido de litio supera en 2 w% la concentración reportada para la elbaíta.

6. Cálculo de índices de geoacumulación y factores de enriquecimiento del conglomerado pegmatítico

Aunque la sección de la región minera de Ensenada ya no cuenta con un interés de extracción gemológica, el alto contenido de litio de las especies minerales que conforman sus depósitos abre la posibilidad de estudiar el conglomerado pegmatítico como una fuente primaria capaz de renovar el interés económico a partir de la extracción del metal ligero (Kesler, 2018; Sillitoe, 2010).

Para ello, se realizó el análisis químico del compuesto generado a partir de la mezcla de los polvos minerales estudiados. Como se observa en la figura 10, el compuesto funge como una muestra representativa del conglomerado sometido a un proceso de conminución, lo que permite una mayor interacción de la muestra con el medio extractivo. El análisis elemental realizado por ICP reporta un contenido mayoritario de silicio (5.23 w%), lo que corresponde a la matriz silícea de ambos componentes minerales, además de la presencia de elementos compatibles con los silicatos, como magnesio, calcio, sodio y potasio. En cuanto al contenido metálico de la muestra representativa, destaca la presencia de aluminio, manganeso, hierro, titanio y litio, este último con una ley de corte de 0.64 w%, lo que equivale a ~ 6400 ppm, posicionando al compuesto dentro del rango justificable para una explotación rentable.

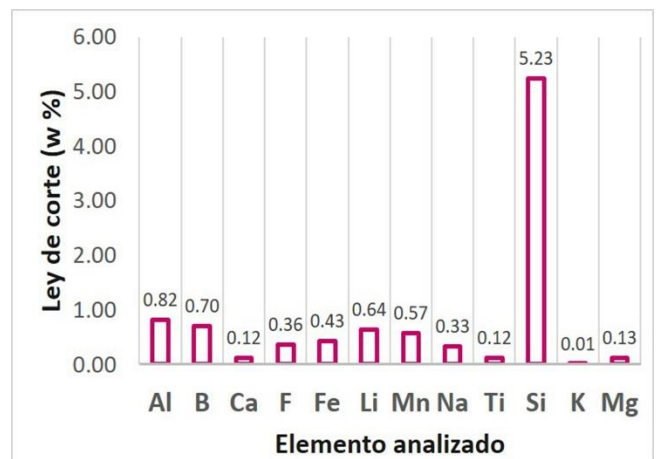


Figura 10. Análisis elemental del compuesto pegmatítico.

Mediante el análisis químico presentado en la figura 10, se calcularon los índices de geoacumulación correspondientes para establecer el grado de contaminación que representa cada uno de estos elementos en el medio ambiente (Reiman y Caritat, 2000; Giusquiani et al., 1992).

En la figura 11 se observa que elementos como Al, Ca, Fe, Na, Ti, Si, K y Mg no representan ningún factor contaminante. Por otra parte, en el caso del boro, el flúor y el manganeso, pese a considerarse oligoelementos (Lawson y Winchester, 1979; INEGI, 1981), estos superan los límites permisibles de geoacumulación y se catalogan como elementos de un suelo fuertemente contaminado. El boro, manganeso, flúor y litio son elementos que, aunque en pequeñas cantidades pueden ser beneficiosos o esenciales para plantas y microorganismos, presentan riesgos ambientales significativos cuando se encuentran en concentraciones elevadas en el suelo. El boro es un micronutriente esencial cuyo límite permisible en agua de servicio poblacional es de 5 mg L^{-1} , según NOM-201-SSA1-2015 (Secretaría de Salud, 2015). Concentraciones por encima de este parámetro pueden causar toxicidad vegetal, afectar la microbiota beneficiosa y contaminar aguas subterráneas debido a su alta solubilidad, siendo común su exceso por el uso indiscriminado de fertilizantes y licores residuales de diversos rubros industriales (Liu et al., 2020). De manera similar, el manganeso, también considerado como oligoelemento, sugiere un límite permisible en agua potable de 0.4 mg L^{-1} , según la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017), convirtiéndolo en un agente tóxico para plantas en suelos ácidos, afectando su crecimiento, provocando clorosis y necrosis, además de alterar la actividad microbiana que regula la descomposición de materia orgánica y los ciclos de nutrientes. El manganeso puede acumularse en cuerpos de agua, afectando la fauna acuática y representando un riesgo para la salud humana, especialmente cuando su presencia elevada está vinculada a actividades industriales, mineras o uso excesivo de fertilizantes (Abbas et al., 2025).

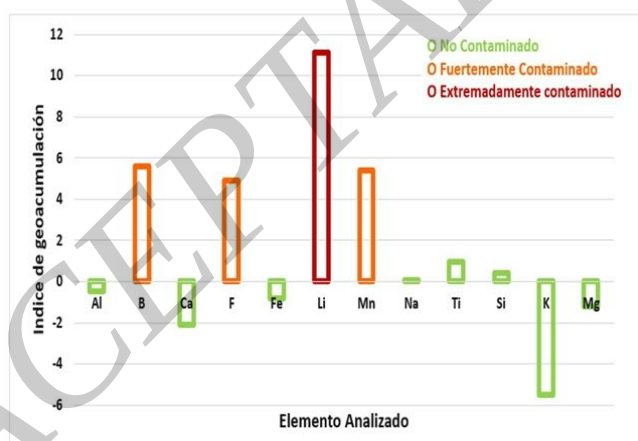


Figura 11. Índices de geoacumulación del compuesto pegmatítico

Por otro lado, el flúor (que cuenta con un límite permisible en agua potable de 1.5 mg L^{-1} , según la NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2021), llega al suelo tanto por fuentes naturales como antropogénicas que incluyen

emisiones industriales, pesticidas y aguas de riego contaminadas. Este elemento se adsorbe fuertemente en partículas minerales, pero en suelos ácidos se vuelve más biodisponible y tóxico, causando daños en raíces, necrosis foliar y alteraciones en la absorción de nutrientes como calcio y magnesio; también afecta la microbiota del suelo y puede bioacumularse en cultivos, poniendo en riesgo la salud humana y animal a través de la cadena alimentaria (Hossein et al., 2024). Finalmente, concentraciones de litio superiores a 0.1 mg L^{-1} podrían tener efectos adversos en la salud humana y en organismos acuáticos. La extracción de este metal se concentra en ecosistemas frágiles como salares, impacta negativamente la química y fertilidad del suelo. Las operaciones mineras requeridas para su disolución a partir de rocas pegmatíticas implica riesgos adicionales derivados del manejo inadecuado de residuos industriales y licores residuales (Rosales et al., 2014). En conjunto, estos elementos requieren un manejo ambiental cuidadoso, monitoreo constante y regulación adecuada para minimizar sus impactos negativos en la salud de los ecosistemas y la población humana cuando se dispone de ellos a través de procesos mineros (Souza et al., 2025).

Finalmente, el litio, también considerado un oligoelemento, se presenta como un elemento extremadamente contaminante, lo que potencia la ruta extractiva como un medio regulatorio del metal ligero.

En la figura 12 se muestra la representación gráfica de factores de enriquecimiento, donde la mayoría de los elementos anteriormente mencionados como elementos sin impacto ambiental coinciden con la clasificación de componentes de la roca madre. En el caso del B, F y Mn, se establece la clasificación de elementos moderadamente enriquecidos que no justifican la operación minera, pero pueden considerarse como subproductos mineros en caso de adaptar una etapa de beneficio a la actividad extractiva principal (Zhang et al., 2022), la cual estaría dirigida a la disolución de litio, elemento que presenta un alto factor de enriquecimiento.



Figura 12. Factores de enriquecimiento del compuesto pegmatítico

La ley de litio en yacimientos pegmatíticos de interés económico suele encontrarse en un rango de 4,300 a 7,500 ppm, lo que corresponde a un factor Clarke entre 135 y 230,

aproximadamente. En el caso del compósito pegmatítico analizado mediante ICP (ver figura X), se reporta una ley de corte equivalente a un factor Clarke de 200 (Tyumentseva et al., 2024). Esto indica que el contenido de litio presente en los polvos minerales alcanza niveles considerados económicamente explotables, siempre que se aplique una vía extractiva adecuada en función de las características mineralógicas y tecnológicas del depósito (Dessemond et al., 2019).

Lo anterior abre pauta a la clasificación de este tipo de muestra como una fuente extractiva primaria del metal ligero mediante metodologías tradicionales como la calcinación, que promueve el cambio estructural de las especies minerales a partir de la pérdida de volátiles, como es el caso del flúor y el hidrógeno identificados en las muestras. Por otra parte, la aplicación de una posterior etapa de lixiviación dinámica en medio ácido, semejante a la vía de digestión de los polvos utilizada en este estudio, suele utilizarse para el procesamiento de otro tipo de filosilicatos de litio como la lepidolita, lo que podría ser factible como ruta extractiva (Gao et al., 2023).

7. Conclusiones

La adecuada caracterización de la muestra de elbaíta y polilitionita implicó el uso de distintas técnicas, tanto de carácter químico como mineralógico, para establecer la asociación del contenido elemental y definir las especies minerales que conforman el conglomerado pegmatítico. La mayoría de los elementos identificados son componentes de la roca madre, que no representan un riesgo ambiental. Sin embargo, el alto contenido de litio y el moderado enriquecimiento de manganeso, permiten ahondar en el beneficio de estas muestras minerales como un área de oportunidad en la metalurgia extractiva del país.

Pese a que el objetivo del presente estudio se centró en la evaluación de la elbaíta como una fuente extractiva de litio, el minucioso proceso de caracterización tanto del mineral tentativamente considerado mena como de la roca encajonante, permitieron establecer un mayor contenido de litio en la especie mineral identificada como polilitionita, roca encajonante y matriz mineral de la muestra analizada por DRX. Debido a que, tanto la elbaíta como la polilitionita conforman un compósito mineral que se asocia al contenido de metal ligero, resulta irrelevante la separación gravimétrica de los componentes minerales y se propone la conminución total del conglomerado pegmatítico, para aprovechar, en su mayoría, este tipo de rocas relacionadas un alto contenido elemental de interés económico.

Es fundamental considerar que, si bien este tipo de estudios orienta el interés científico hacia nuevas fuentes extractivas, para que un mineral sea incorporado a una operación minera viable, debe cumplir con diversos criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales. Además de presentar un alto factor de enriquecimiento, como es el caso del litio en este conglomerado pegmatítico, el mineral debe encontrarse en un yacimiento cuyas dimensiones y continuidad geológica justifiquen su explotación. La extracción, a su vez, debe ser técnicamente factible mediante el uso de métodos, tecnologías

e infraestructura apropiados, resultando económicamente rentable al considerar costos operativos y las condiciones del mercado. De igual forma, es indispensable realizar una evaluación rigurosa del impacto ambiental potencial y garantizar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. Lo anterior implica relevancia si se considera que el contenido elemental de boro, flúor y manganeso en este compósito pegmatítico ha sido clasificado como fuertemente contaminante, superando ampliamente los límites permisibles establecidos por la normativa mexicana y por la Organización Mundial de la Salud. En este contexto, la inclusión del cálculo de índices de geoacumulación a partir de estos minerales permite alinear la posible propuesta extractiva con los estándares ambientales aplicables, al tiempo que favorece el establecimiento de mecanismos de diálogo y consentimiento con las comunidades locales. En conjunto, este tipo de estudios representa un primer paso hacia la evaluación integral de la viabilidad de un proyecto minero.

8. Agradecimientos

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) por las facilidades para realizar el presente proyecto.

Referencias

- Abbas, A., Hameed, R., Balooch, S., Khattak, W. A., Raza, M. M., Zulfiqar, U., Akbar, R., Malik, U., & Huang, P. (2025). Manganese dynamics: Effects of pollution and its impact on soil chemistry. In *Beneficial Elements for Remediation of Heavy Metals in Polluted Soil* (pp. 241–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-26522-8.00009-X>
- Abd-Halim, M. H., Mokhtar, N. A. M., Masnan, S. S. K., Talib, N. K., Jusoh, A. F., & Saidin, M. (2023). X-ray fluorescence (XRF) analysis of iron ore at ancient Kedah iron smelting site, Sungai Batu archaeological complex, Bujang Valley, Kedah, Malaysia. *Heliyon*, 9(4), e14850. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14850>
- Andersen, T., & Grorud, H.-F. (1998). Age and lead isotope systematics of uranium-enriched cobalt mineralization in the Modum Complex, South Norway. *Precambrian Research*, 91(3–4), 419–432. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00061-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00061-8)
- Batterman, S. A., & Walther, C. (2022). Circular economy approaches in lithium-ion battery recycling: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106073. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106073>
- British Geological Survey (BGS). (2021). *Lithium: A critical raw material for our journey to net*

- zero. <https://www.bgs.ac.uk/news/lithium-a-critical-raw-material-for-our-journey-to-net-zero/>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
- Chan, C. C., & Chan, H. L. (2017). *Electric vehicle: Theoretical foundations and advanced applications*. Wiley.
- De La Cruz, E., Müller, A., Trumbull, R. B., Faria, P., Andersen, T., Erambert, M., & Kristoffersen, M. (2024). Boron sources of tourmaline-rich Nb-Y-F-pegmatites in South Norway: Implications for pegmatite melt origin. *Precambrian Research*, 410, 107474. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107474>
- Del Aguila-Juárez, P., Lugo-De la Fuente, J., & Vaca-Paulín, R. (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *Ciencia Ergo Sum*, 12(2), 155–161.
- Dessemond, C., Lajoie-Leroux, F., Soucy, G., Laroche, N., & Magnan, J. F. (2019). Spodumene: The lithium market, resources and processes. *Minerals*, 9(6), 334. <https://doi.org/10.3390/min9060334>
- Dumańska-Słowik, M., Heflik, W., Pieczka, A., Sikorska, M., & Dąbrowa, Ł. (2015). The transformation of nepheline and albite into sodalite in pegmatitic mariupolite of the Oktiabski Massif (SE Ukraine). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 150, 837–845. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.06.039>
- Gao, T., Fan, N., Chen, W., & Dai, T. (2023). Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology*, 6(1), 137–153. <https://doi.org/10.31035/cg2022088>
- Giusquiani, P. L., Gigliotti, G., & Businelli, D. (1992). Mobility of heavy metals in urban, organic matter and pH in temperature soils. *Journal of Environmental Quality*, 13(2), 234–245.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis* (4th ed.). Springer.
- Hosseini, M., Rwiza, M. J., Nyanza, E. C., Bakari, R., Ripanda, A., Nkrumah, S., Selemani, J. R., & Machunda, R. L. (2024). Fluoride contamination: A silent global water crisis. A case of Africa. *Scientific African*, 26, e02485. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02485>
- INEGI. (1981). *Síntesis geográfica, nomenclatura y anexo cartográfico del Estado de Hidalgo*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Jolyon, R., & Ida, C. (2006). *Mindat.org – The mineral and location database*. <http://www.mindat.org>
- Karrech, M. A. (2020). A review on methods for liberating lithium from pegmatites. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106643>
- Kesler, S. E. (2018). *Mineral resources, economics, and the environment*. Cambridge University Press.
- Kim, B. S. M., Angeli, J. L. F., Ferreira, P. A. L., De Mahiques, M. M., & Figueira, R. C. L. (2018). Critical evaluation of different methods to calculate the Geoaccumulation Index for environmental studies: A new approach for Baixada Santista – Southeastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 548–552. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.049>
- Klein, C., & Cornelius Jr, S. (2018). *Manual de mineralogía* (1.ª ed., Vol. 2). Reverté.
- Kuai, Y., Yao, W., Ma, H., Liu, M., Gao, Y., & Guo, R. (2021). Recovery lithium and potassium from lepidolite via potash calcination-leaching process. *Minerals Engineering*, 160, 106643. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106643>
- Lawson, D. R., & Winchester, J. W. (1979). A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric Environment*, 10, 925–930.
- Liu, M., Guo, Q., Luo, L., & He, T. (2020). Environmental impacts of geothermal waters with extremely high boron concentrations: Insight from a case study in Tibet, China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 397, 106887. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106887>
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, S., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62, 1–23.
- Millas, I. G. (2005). *La industria del litio en Chile*. Universidad de Antofagasta.
- Ostrooumov, M. (2009). *Mineralogía analítica avanzada* (1.ª ed., Vol. 1). Sociedad Mexicana de Mineralogía.
- Panczner, W. D. (1987). *Minerals of Mexico*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Reiman, C., & de Caritat, P. (2000). Intrinsic flaws of element enrichment factors (EFs) in environmental geochemistry. *Environmental Science & Technology*, 34, 5084–5090.

- Rosales, G. D., Ruiz, M. D. C., & Rodríguez, M. H. (2014). Novel process for the extraction of lithium from β -spodumene by leaching with HF. *Hydrometallurgy*, 147–148, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.04.009>
- Secretaría de Economía de México. (2018). *Perfil de mercado del litio*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment_data/file/419275/Perfil_Litio_2018_T.pdf
- Secretaría de Salud. (2015). *NOM-201-SSA1-2015: Productos y servicios. Agua y hielo para consumo humano, envasados y a granel. Especificaciones sanitarias*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5412857&fecha=22/01/2016
- Secretaría de Salud. (2021). *NOM-127-SSA1-2021: Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5627713&fecha=22/03/2021
- Sillitoe, R. H. (2010). Economic geology: Principles and practice. *Economic Geology*, 105(5), 927–957.
- Smith, R. W. J. M., Jones, C. L., & Richards, A. T. (2019). Pegmatites: A review of their formation, geochemistry, and economic importance. *Mineralogical Magazine*, 83(6), 1491–1509.
- Souza, R. G., Domingues, A. M., Spindlegger, A., Mair-Bauernfeind, C., & Part, F. (2025). Review of the current knowledge and identified gaps in assessing the social and environmental impacts of mining processes in the Lithium Triangle. *Sustainable Production and Consumption*, 53, 40–63. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.031>
- Torre-Antay, J., Carpio-Ronquillo, M., Fuentes-Palomino, J., & Minaya-Encarnación, I. (2019, septiembre). *Caracterización sobre ocurrencias de minerales de litio en la Cordillera Oriental y el Altiplano - Puno y Cusco, como indicios a un nuevo impulso estratégico de recursos energéticos e industrias tecnológicas*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET). <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2371>
- Turner, J. W. D. (2020). The formation and mineralogy of pegmatites. *American Journal of Science*, 320(5), 717–732.
- Tyumentseva, M. I., Akulov, N. I., & Melnikov, A. I. (2024). New genetic type of lithium mineralization. *Solid Earth Sciences*, 9(3), 100194. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2024.100194>
- Vargas-Rodríguez, Y. M., Obaya-Valdivia, A. E., & Vargas-Rodríguez, G. I. (2014). *Caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores* (1.ª ed.). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
- Williams, D. M., & Thompson, L. R. (2018). *Economic geology of pegmatites*. Springer.
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). WHO Press. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Zhang, C., & Zhao, X. (2020). Electric vehicle adoption and market penetration: A review of policies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109933.
- Zhang, X., Chen, Z., Rohani, S., He, M., Tan, X., & Liu, W. (2022). Simultaneous extraction of lithium, rubidium, cesium and potassium from lepidolite via roasting with iron(II) sulfate followed by water leaching. *Hydrometallurgy*, 208, 105820. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105820>