

Ocurrencia de lepidolita con (Li) en la Formación Atotonilco el Grande, en el estado de Hidalgo

Occurrence of lepidolite with (Li) in the Atotonilco el Grande Formation, in the state of Hidalgo

B. A. Vera-Morales ^{a,*}, J. Hernández-Ávila ^a, E. Salinas-Rodríguez ^a, E.-Cerecedo Sáenz ^a
J. Flores-Badillo ^a, E. Aquino-Torres ^b

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de Alimentos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Av. Universidad Km 1, Rancho Universitario, CP 43600, Tulancingo, Hidalgo, México.

Resumen

En este trabajo se realizó la caracterización de un mineral de lepidolita con contenidos de litio. Dado que el litio es un elemento estratégico, es importante establecer posibles fuentes minerales alternas de litio que permitan desarrollar tecnologías tanto, para su prospección y su posterior extracción. A partir de técnicas analíticas se determinó que se trata de una mineral de lepidolita con PDF [96-900-0629], los análisis de XPS revelaron la presencia de litio con 0.3%, entre otros elementos como Si, C, F, O, Mg. Se puede concluir que la ocurrencia de lepidolita corresponde al resultado de actividad de fluidos hidrotermales de origen magmático.

Palabras Clave:

Lepidolita, litio, fluidos hidrotermales, XPS.

Abstract

In this work, the characterization of a lepidolite mineral with lithium content was carried out. Lithium being a strategic element, it is important to establish possible alternative mineral sources of lithium that allow the development of technologies for both its prospecting and its subsequent extraction. Based on analytical techniques, it was determined that it is a lepidolite mineral with PDF [96-900-0629], the XPS analysis revealed the presence of lithium with 0.3%, among other elements such as Si, C, F, O, Mg. It can be concluded that the occurrence of lepidolite corresponds to the result of the activity of hydrothermal fluids of magmatic origin.

Keywords:

Lepidolite, lithium, hydrothermal fluids, XPS.

1. Introducción

El propósito de este trabajo es estudiar la ocurrencia de lepidolita con litio (Li) en la Formación Atotonilco el Grande, ubicada en el estado de Hidalgo, a través de análisis instrumental para determinar sus características principales.

La importancia de investigar la presencia de lepidolita con litio en esta formación radica en que este tipo de prospección no se ha realizado previamente en México, lo que convierte este estudio en un esfuerzo pionero. Este trabajo puede proporcionar datos valiosos sobre la presencia de minerales estratégicos como las tierras raras (REE), el litio y los del grupo del platino (PGE). De esta manera, contribuye a la innovación en la exploración de yacimientos estratégicos de litio, permitiendo la validación de áreas con potencial de exportación en el continente y, al mismo tiempo, minimizando los costos directos de exploración.

Por otro lado, la ocurrencia de una mica de lepidolita que aflora en una secuencia ígnea bimodal de edad K/Ar de 2.56 M. a (Cantagrel y Robin 1979), esta edad radiométrica de igual forma

ha sido confirmada por Orozco et al. (2007) en 2.5 Ma, denominada Formación Atotonilco el Grande, del oriente del estado de Hidalgo, en un ambiente geodinámico de rift, esto Los estudios preliminares muestran que se trata de una lepidolita con pequeñas cantidades de litio.

Por su parte, el estudio de varias aportaciones sobre la extracción de litio muestra un cambio en su proceso a lo largo de los años. Al principio, se enfocaba en la extracción de minerales de las pegmatitas, pero luego pasó a las salmueras, y se prevé que en el futuro se sumen yacimientos relacionados con arcillas. La proporción estimada de estos depósitos es la siguiente: salares (58%), pegmatitas (26%) y arcillas (7%). El otro 9% se halla en salmueras geotermales e hidrocarbúrficas, además del agua de mar (Etcheverry, et al., 2020).

Las pegmatitas que contienen espodumeno con otros minerales asociados como petalita, lepidolita y ambligonita son los depósitos de litio más accesibles, pudiendo contener hasta 0.5 millones de toneladas de litio. (Ruíz Noriega & Lugo Zazueta, 2022)

*Autor para la correspondencia: ve352040@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: ve352040@uaeh.edu.mx (Betzábe Andrea Vera-Morales), herjuan@uaeh.edu.mx (Juan Hernández-Ávila), salinasr@uaeh.edu.mx (Eleazar Salinas-Rodríguez), eduardoc@uaeh.edu.mx (Eduardo Cerecedo-Sáenz), javier_flores11060@uaeh.edu.mx (Javier Flores-Badillo), equino@uaeh.edu.mx (Eliazar Aquino-Torres).

En cambio, los salares poseen una mayor cantidad de reservas, llegando a contener hasta 7 millones de toneladas de litio. Los depósitos vinculados a arcillas presentan una media de leyes y tonelajes. (Etcheverry, et al., 2020)

Los recursos de litio en la naturaleza se almacenan principalmente en tres tipos de depósitos salmueras, pegmatitas y rocas sedimentarias; así, principalmente salmuera subterránea y de lagos salados, y el mineral de litio de tipo pegmatita se almacena en espodumena, lepidolita, petalita y zinwaldita, mientras que rocas sedimentarias los minerales incluyen jadalita, arcilla de litio, etc. (Su, et al., 2019). Se pueden hallar arcillas con litio en cuencas sedimentarias del período Neógeno (Terciario), donde se observa una actividad volcánica considerable en un entorno de clima árido. La lepidolita con un contenido teórico de Li_2O de hasta el 7,7 % suele asociarse con potasio, rubidio y cesio (Tian-ming, et al., 2023), que es un recurso potencial para la producción de litio. El famoso depósito de lepidolita de Yichun en la provincia de Jiangxi, China, tiene una reserva de litio de 325 kt, pero el contenido de óxido de litio es solo del 0,88 % (Su, et al., 2019).

Varios depósitos de interés han sido estudiados en diversos países, en México se tienen reportadas diversas anomalías en el rango de 66 a 3281 ppm en algunas localidades de los estados de Oaxaca, Puebla, Zacatecas, San Luis Potosí, Chihuahua, Jalisco, Coahuila, Michoacán y Sonora. (Harp, 2020)

Un ejemplo interesante, es el yacimiento de la empresa Bacanora Minerals en el poblado de Bacadehuachi, Sonora, donde el origen es aún medio incierto, posiblemente, resultado de alteración hidrotermal por vulcanismo alcalino sobre rocas vulcanoclásticas que contienen el mineral polythionita [$\text{KLi}_2\text{Al}(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2$] aunque tampoco se sabe si existen otros minerales de litio adicionales. (Alatorre, 2020)

De igual manera, se ha mencionado que otras fuentes alternativas para localizar litio, se ubican en ambientes geodinámicos específicos en particular en el ambiente tectónico de rift, que es una mega estructura tectónica, que comienza como una pequeña fisura derivada de los esfuerzos generados en las placas tectónicas, y al interactuar entre sí principalmente en zonas de subducción, provoca un movimiento geodinámico dentro de la corteza. Por ello, a lo largo de millones de años en la historia geológica de un rift, es posible que se puedan asociar varios tipos de mineralización durante o después del mismo en toda su secuencia, y debido a los fenómenos asociados a los esfuerzos generados durante la formación del rift. (Cerece Sáenz, et al., 2023)

La ocurrencia de REE y Li asociados con estructuras tipo rift tiene evidencia en todo el mundo. (Montgarri Castillo, et al., 2019)

La lepidolita es un tipo de mineral de silicato de mica que pertenece al sistema cristalino monoclinico de tipo diseminación de grano fino y generalmente tiene una estructura escamosa. La fórmula química de la lepidolita es $\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_{2,5-3}[\text{Si}_{3,5-3} \text{Al}_{0,5-1} \text{O}_{10}](\text{OH}, \text{F})_2$ ($x = 0-0,5$), su color va del púrpura al rosa. La lepidolita se distribuye en pegmatita granítica, que está incrustada principalmente con minerales como cuarzo, feldespato, espodumena y moscovita. En la actualidad, la extracción de recursos de litio se basa principalmente en minerales que contienen litio, aunque con un crecimiento constante de la explotación de litio a partir de salmueras de lagos salados. Los minerales que contienen litio con valor comercial incluyen principalmente espodumena, lepidolita, montebrasita, petalita y zinwaldita (Tang, et al., 2024).

Entre ellos, la extracción industrial de litio a partir de lepidolita ha captado cada vez más atención con el aumento de la aplicación de litio. Sin embargo, las rocas enriquecidas en lepidolita generalmente están asociadas con cuarzo, lo que provoca una baja ley de Li_2O . (Xu, et al., 2024). El contenido de Li_2O en la lepidolita es relativamente bajo, oscilando entre 3,0 y 7,7% en

peso (que contiene entre 1,39 y 3,58% de Li) en comparación con el de espodumeno (6 a 8% en peso).

Actualmente, este tipo de prospección no se ha realizado en México, por lo que es interesante realizar estudios pioneros como el que aquí se presenta, ya que podrían aportar datos valiosos sobre la presencia de minerales estratégicos (REE), litio y los del grupo platino (PGE). De esta forma, este trabajo contribuye a la consolidación innovadora de la exploración de yacimientos estratégicos de litio, ya que ha permitido validar áreas de posible exportación en el continente, minimizando además los costos directos de exploración.

2. Materiales y métodos

El material utilizado en este trabajo fue muestreado en el municipio de Metzquitlán, Hgo. México. Para la realización del muestreo se realizó de forma selectiva con un peso por muestra de 5 kg, aproximadamente con una longitud de 2 m por 0.30 cm de ancho, tomando un total de 20 muestras representativas.

Para identificar adecuadamente el afloramiento y realizar muestreos, se analizaron las secuencias continentales, y particularmente considerando las formaciones que contenían depósitos geológicos de edad Plioceno de la Formación Atotonilco el Grande integrando estudios geológicos, litológicos y estructurales. Así, al localizar el afloramiento, Figura 1, se observa la ocurrencia de los siguientes minerales paligorskita, lepidolita, xenotima, toba, perlita, y basalto.



Figura 1: Afloramiento típico en el área de estudio, la mineralización que se observa es paligorskita, lepidolita, xenotima, toba, perlita, y basalto.

Las muestras fueron trituradas y molidas para ser homogeneizadas, para ser caracterizadas con el fin de obtener datos precisos de las fases mineralógicas presentes.

Para ello, se realizó un análisis de las fases generales mediante difracción de rayos X (DRX), para lo cual las muestras fueron molidas hasta un tamaño de partícula promedio menor a 78 μm y colocadas en un Difractómetro de Rayos X Equinox 2000 (INEL, Artenary, Francia, ubicado en UAEH), que fue operado con radiación $\text{CoK}\alpha_1$. La identificación de fases se basó en las bases de datos COD Inorganics 2015 en Crystallography Open Database Math. Software, (v.1.10, Crystal Impact, Bonn, Alemania).

La morfología de las muestras se obtuvo utilizando un microscopio electrónico de barrido, JEOL modelo JSM-IT300 con una aceleración de 30 keV (situado en UAEH) y equipado con un Espectrómetro de Dispersión de Energía de Detector de Rayos X EDS y usando la técnica XPS para proporcionar información cualitativa y cuantitativa de todos los elementos presentes.

Para determinar los contenidos se realizó XPS. El análisis se ejecutó en una máquina de Análisis de Superficies K ALPHA (Thermo Scientific) que cuenta con un analizador hemisférico (180°) de doble aproximación y detector de 128 canales con una presión base de 2×10^{-9} mbar. La pistola de rayos X utiliza la línea $K\alpha$ monocromática de Al (1486,6 eV) a 12 kV y 40 vatios de potencia en un área ovalada de 400 μm de diámetro e incide sobre la muestra con un ángulo relativo de 30°.

En la erosión se utiliza un haz de iones de argón acelerado a 3 kV con una potencia de 30 W, incidiendo en un área de 1×2 mm concéntrica al haz de rayos X. El neutralizador genera una nube de iones de argón de energía cercana a 0 V en la zona analizada. Los espectros XPS se obtuvieron en dos condiciones: en barrido amplio (0–1350 V) con 1 eV/paso, y en modo de ventanas pequeñas con 0,1 eV/paso, con energía de paso de 50 eV.

Para identificar adecuadamente el afloramiento, y realizar muestreos, se analizaron las secuencias continentales, y particularmente considerando las formaciones que contenían depósitos geológicos de edad terciario de la Formación Atotonilco el Grande integrando estudios geológicos, litológicos y estructurales. Así, al localizar el afloramiento se obtuvieron muestras mediante muestreo de esquirlas y de canal. Las muestras fueron homogeneizadas, y cuarteadas para obtener muestras homogéneas. La caracterización realizada en este trabajo se ejecutó con el fin de obtener datos precisos de las fases mineralógicas presentes.

3. Resultados

3.1 Descripción de geología del área de estudio y la mineralización asociada.

Formación Atotonilco el Grande

Geyne *et al.* (1963) la localidad tipo aflora en la periferia del poblado del mismo nombre en el Estado de Hidalgo, compuesta por fangolita y conglomerado.

También, afloran basaltos intercalados con tobas dacíticas a riolíticas, de tipo bimodal; Robin (1979) las cartografió como ignimbritas en la región de Zacualtipán.

La litología que aflora en el área de estudio consta de basaltos intercalados con derrames piroclásticos de brecha o toba de composición dacítica a riolítica.

Yace sobre rocas pre terciarias en discordancia erosional y angular, sobre la Formación Tlanchinol ígnea de composición más básica, y el espesor es mayor a 400 m.

Entre tanto, en muestras del área de estudio Cantagrel y Robin (1979), calcularon para la serie bimodal las edades de potasio-argón como sigue: a 2.5 Km al sur de Zacualtipán álcali-riolita (obsidiana) 4.4 +/- 0.1 Ma. En el Banco andesita basáltica sobreyaciendo a ignimbrita de Zacualtipán 2.56 Ma. +/- 0.08; cerca de Metzquititlán basalto alcalino 5.15 0.25 +/- Ma. Por lo que en el área de estudio la Formación Atotonilco el Grande le corresponde una edad del Plioceno.

PLANO GEOLÓGICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

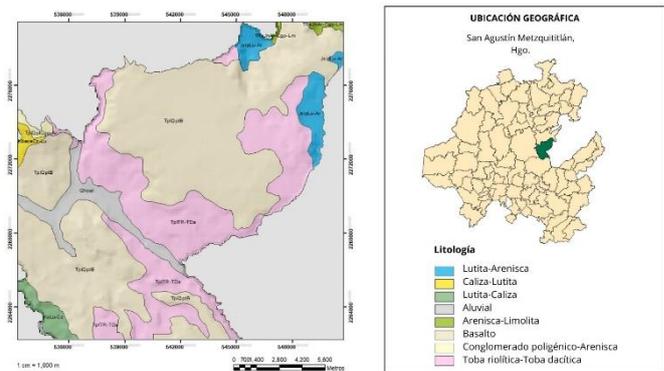


Figura 2: Geología regional del área de estudio.

Con base en el análisis, la formación geológica transgresiva en el área de estudio se identificó como la Formación Huayacocotla del Jurásico Inferior (Pleisbachiano) con un espesor de 600 m. Su contacto superior pertenece a la Formación Tepexic del Jurásico Medio, y su contacto inferior se encuentra en una discordancia angular a lo largo de la secuencia Paleozoica y Precámbrica. (Cerece Sáenz, et al., 2023).

Se cree que la mineralización se produjo como resultado de un evento extensional del Terciario (Plioceno tardío) que comenzó en el Jurásico Medio y formó bloques y grabens en las fallas NW-SE y N-SE.

Este primer período está asociado con el nacimiento del Golfo de México durante el descubrimiento de Pangea.

Por otro lado, también hay evidencia de una abrupta terminación posterior de la Formación Cahuassas del Jurásico medio, origen de lo que se interpreta como depósitos de graben bandeados, y que fue consecuencia de la evolución del rift.

Además, se identificaron dos eventos tectónicos importantes en el área de estudio. Sin embargo, solo uno está directamente relacionado con el proceso de mineralización. El primero es el fenómeno de subsidencia continua y transgresión marina, que indica un cambio en la litología de sucesión siliciclástica a sedimentos carbonatados marinos convencionales durante el Jurásico Tardío, como ocurrió en las formaciones Santiago, Chipoco y Pimienta.

Estas condiciones persistieron hasta el final del Cretácico, excepto el plegamiento durante el Eoceno Cretácico Superior, como ocurrió durante el plegamiento de Laramide.

El segundo hecho importante fue la reactivación post-Pliocénicas con la aparición de fallas normales.

En la Figura 3, se muestra un modelo idealizado de la ocurrencia de lepidolita en intrusiones graníticas.

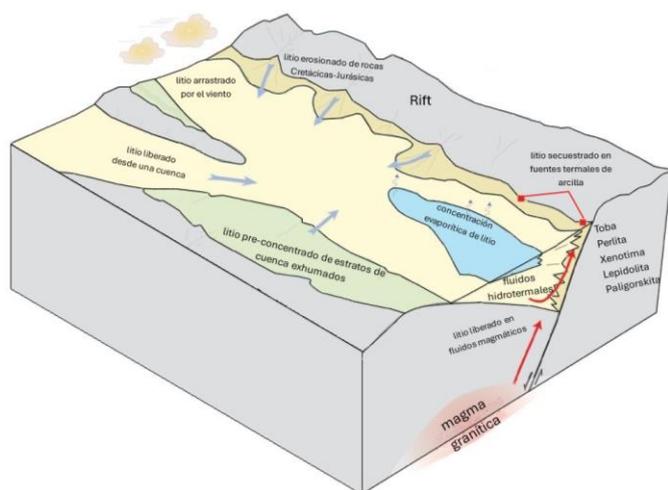


Figura 3: Modelo conceptual de la ocurrencia de litio, modificado de Munk y otros (2016).

Las intrusiones graníticas se forman por el ascenso de magma de baja viscosidad y rico en Li desde el manto hacia la superficie (Yang, 2023; Wang, 2019). La zonación de estas intrusiones corresponde a una progresión en la solidificación del magma, donde los fluidos remanentes finales causan metamorfismo que afecta principalmente a minerales preexistentes, los cuales en este caso son reemplazados por lepidolita.

La presencia de fluidos hidrotermales se debe a una falla normal, ya que actúa como una vía de escape para el ascenso de fluidos; por lo que el origen de estas mineralizaciones se atribuye a la actividad de fluidos hidrotermales de origen magmático, que se liberarían del magma fundido al enfriarse, transportando consigo elementos fundentes e impurezas, especialmente litio. Estos depósitos hidrotermales están asociados al magmatismo granítico y muestran una mineralogía variada, figura 4, en la Carta F14-11 del SGM se observa una intensidad de nano teslas que va de 100 a 200 nanoteslas, lo que indica la existencia de una intrusión granítica, que podrían tratarse del magma fundido.

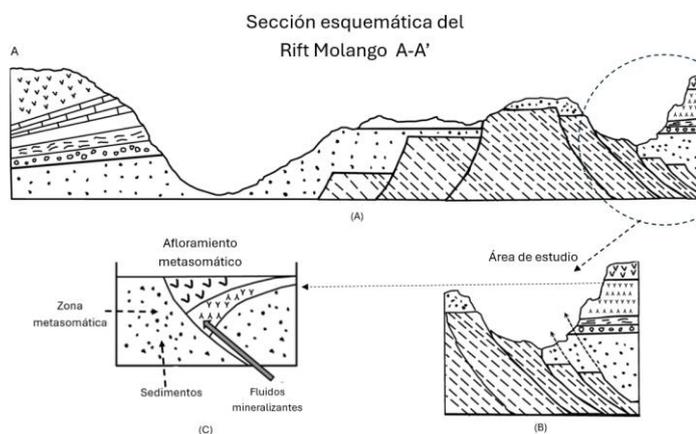


Figura 4: En (A) se observa la sección esquemática a través de Rift Molango, en donde en el centro se presenta el alto del basamento flanqueado por secuencias transgresivas del Jurásico Inferior. En (B) se observa un acercamiento de la zona de estudio que muestra zonas con canales de conducción de fluidos mineralizantes. En (C) la zona con contenidos de minerales como xenotima y lepidolita. Se presenta la correlación litológica de la etapa transgresiva del Jurásico en el área de estudio, y por otro lado fue observada una unidad continental de tobas y derrames basálticos correspondientes a la Formación Atotonilco el Grande.

3.2 Difracción de Rayos X.

A partir de muestras de polvo preparada para analizarse en difracción de rayos X; se obtuvieron los que se muestran en la figura 4, lo cual confirma la presencia de lepidolita y el molibdato conjugado de Litio y Cobalto. Posteriormente se realizó el cálculo de los Índices de Miller y los parámetros de red, mediante las leyes de Bragg y de Scherer (C. Suryanarayana, 1998).

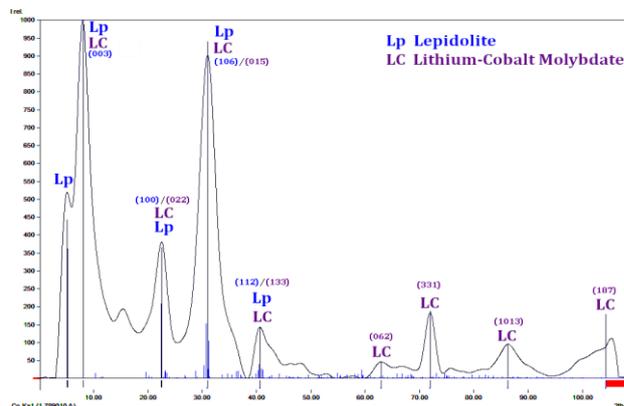


Figura 5: Difractograma de la muestra P11X7.

Por otro lado, se utilizó el método analítico descrito en C. Suryanarayana (1998) para realizar el cálculo de los parámetros, y mediante el software Crystal Impact Diamond 3.2 el modelo de la lepidolita, ver figura 6, esta presenta una estructura cristalina trigonal, con un grupo espacial $P3_12$ y clase cristalina mayoritaria $\bar{3}$, en combinación con la clase $\bar{3}/2m$ ($\bar{3}/m$); por lo que presenta una simetría no centrosimétrica combinada con una simetría centrosimétrica en los extremos. Los cristales de lepidolita, son clasificados como una combinación de simetría romboédrica, y en los extremos del cristal presenta un escalenoedro ditrigonal; por ello, se muestran Índices de Miller [002] y [003]. Presenta como parámetros de red $a=5.200 \text{ \AA}$ y $c=29.760 \text{ \AA}$; por lo que la relación entre la altura y el largo de la estructura cristalina (c/a) es de 5.723.

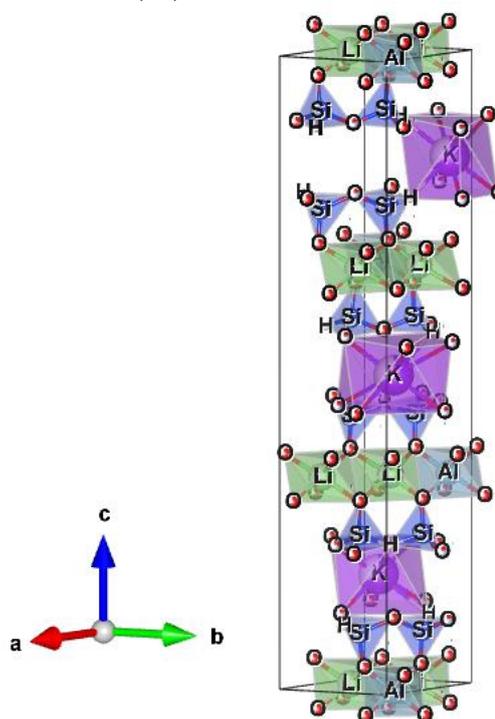


Figura 6: Estructura cristalina de lepidolita.

La lepidolita, al igual que otras micas y silicatos, muestran un marcado politipismo, principalmente en sistema monoclinico, pero con posibilidad de mostrar politipos en otros sistemas cristalinos, como ortorrómbico o trigonal, como es el caso; por ello, se pueden observar que dichos cristales de lepidolita exhiben grupos espaciales enantiomorfos $P3_112$ o $P3_212$, donde las capas de apilamiento hexagonales forman un ángulo de 120° de forma centrosimétrica, donde en un cristal de lepidolita que presenta un politipismo trigonal, se observa un apilamiento de tres capas. Es importante señalar que en esta estructura se presenta una coordinación tetraédrica, octaédrica y romboédrica; donde la estructura tetraédrica presenta en su centro iones Si^{4+} , mientras que en sus vértices se observa principalmente iones O^{2-} , aunque también es posible observar de forma sustitucional la presencia del ion F^- . Mientras que en la coordinación octaédrica se puede observar la presencia en el centro de la coordinación de iones Al^{3+} , sustituyendo también por iones Li^+ y Mn^{2+} ; teniendo en los vértices a los iones O^{2-} . Finalmente, en la coordinación romboédrica se puede observar la presencia en el centro de la coordinación de iones K^+ , teniendo en los vértices a los iones O^{2-} .

Por parte del molibdato conjugado de Litio y Cobalto, figura 7, se presenta una estructura cristalina ortorrómbica, con un grupo espacial $Pnma$ y clase cristalina $P 2_1/m 2_1/n 2_1/a (2/m 2/m 2/m)$, mostrando una simetría centrosimétrica. Los cristales de molibdato conjugado de Litio y Cobalto, son clasificados como una combinación de prisma rómbico y rómbico bipiramidal; por ello, muestra los Índices de Miller [003] y [001]. Presenta como parámetros de red $a=5.086 \text{ \AA}$, $b=10.484 \text{ \AA}$ y $c=17.606 \text{ \AA}$; por lo que la relación entre la altura y el largo de la estructura cristalina (c/a) es de 3.461659, mientras que la relación entre el ancho y la altura de la estructura cristalina (c/b) es 1.679321.

Cabe señalar que, en la estructura, presenta coordinación tetraédrica y octaédrica; donde la estructura tetraédrica presenta en su centro iones Mo^{6+} , mientras que en sus vértices se observa principalmente iones O^{2-} . Mientras que en la coordinación octaédrica se puede observar la presencia en el centro de la coordinación de iones Li^+ , sustituyendo parcialmente por iones Co^{2+} ; teniendo en los vértices a los iones O^{2-} .

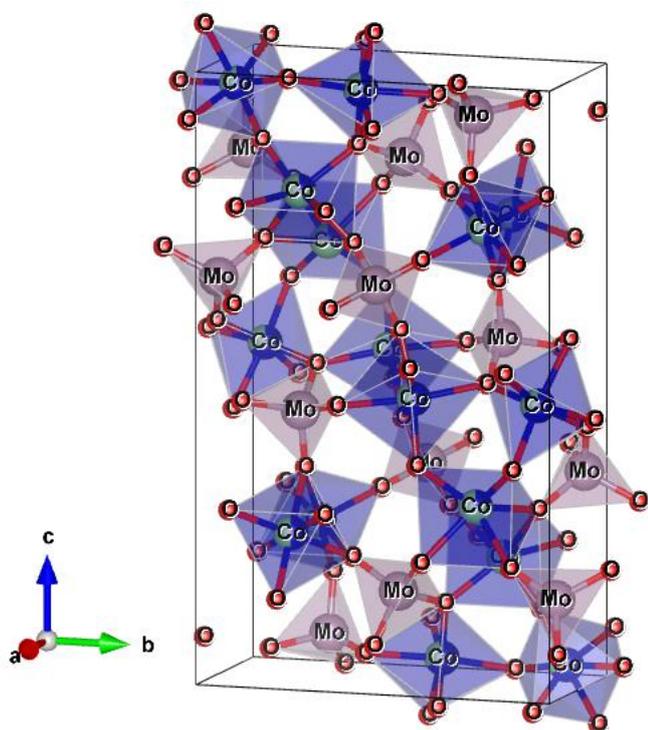


Figura 7: Estructura cristalina del molibdato.

3.3. Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS)

Finalmente, para confirmar la ocurrencia de Li en la estructura de la lepidolita, se realizó el análisis XPS y los resultados se muestran en la Figura 8.

El espectro revela la presencia de Li 1s (a 54.83 eV) en un 0.3 %, de Li y de igual modo muestra picos Si, C, O, F, Mg principalmente.

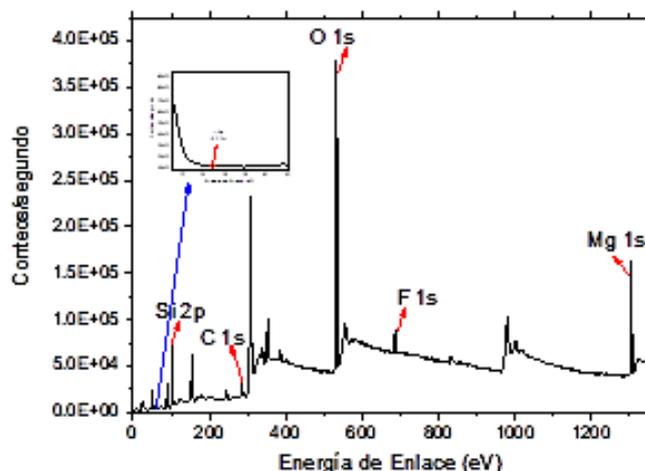


Figura 8: Espectros de XPS de mineral de lepidolita.

La composición química promedio de mineral, se muestra en la tabla 1, donde se aprecia como compuestos mayoritarios: sílice, carbón, oxígeno, litio, flúor, magnesio.

Tabla 1: Compuestos mayoritarios del espectro de XPS; pico BE, energía de enlace (eje x) y Área (P) CPS. eV, conteos por segundo en el área de barrido (eje y), dentro de la figura 8; % atómico, porcentaje atómico ; Q, factor de área debajo de la curva; SF, factor de sensibilidad.

Pico	BE	Área (P) CPS. eV	% Atómico	Q	SF
Si2p	102.6	48405.46	23.13	1	0.817
C1s	284.8	31166.47	13.24	1	1
O1s	531.9	298442.83	49.69	1	2.93
Li1s	54.85	44.35	0.3	1	0.057
F1s	685.4	22088.68	2.7	1	4.43
Mg1s	1304.3	92902.49	10.94	1	11.18

3.4. Microscopía Electrónica de Barrido (EDS & Mapeo de rayos - X)

La Figura 9, muestra micrografías del mineral original, con una morfología relativamente suave, con una rugosidad aparente, teniendo microestructuras similares, junto con las variaciones en sus formas (euhédrica, anhédrica y subhédrica) y superficies (lisa,

fibrosa y sinuosa).

En la Figura 9, se presenta el espectro del microanálisis semicuantitativo por MEB-EDS, en el cual se puede observar como elementos mayoritarios al Sílice y Magnesio y minoritarios como el Flúor, Cloro, Calcio y Oro.

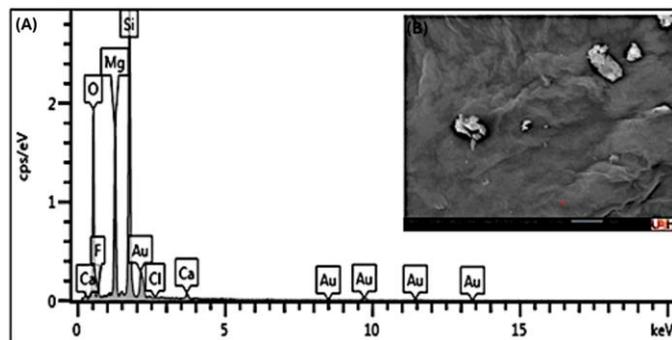


Figura 9: (A) Se muestra el espectro del microanálisis semicuantitativo realizado por MEB-EDS. (B) Fotomicrografía de lepidolita.

4. Discusión

El origen de la mineralización de lepidolita es controversial pero usualmente se atribuye a la actividad de fluidos hidrotermales de origen magmático (Liu, 2019; Ruíz, 2022), un posible origen del magma en el área de estudio podría ubicarse de acuerdo a la carta geofísica hoja Pachuca F14-11, ahí puede observar una intensidad de nano teslas que va de 100 a 200 nanoteslas, lo que indica la existencia de una intrusión granítica, que podrían tratarse del magma fundido que al disminuir la temperatura de este, atraparía elementos constitutivos de la lepidolita, y algunos elementos fundentes y/o impurezas, entre los que destacan el litio.

Estos depósitos de lepidolita del tipo hidrotermal se encuentran asociados a magmatismo granítico (Yang, 2023; Wang, 2019), presentan una mineralogía variada, en donde se concentran principalmente micas, en este caso de lepidolita.

5. Conclusiones

- La lepidolita estudiada muestra un politipismo trigonal, en donde se observa un apilamiento de tres capas. En la estructura, se encuentran coordinaciones tetraédricas, octaédricas y romboédricas. La coordinación octaédrica muestra iones Al^{3+} en el centro, que pueden ser sustituidos por iones Li^+ y Mn^{2+} , con iones O^{2-} en los vértices. Por último, la coordinación romboédrica presenta iones K^+ en el centro y iones O^{2-} en los vértices.
- Por parte del molibdato conjugado de Litio y Cobalto presenta una estructura cristalina ortorrómbica, mostrando una simetría centrosimétrica. Los cristales de molibdato conjugado de Litio y Cobalto, son clasificados como una combinación de prisma rómbico y rómbico bipiramidal.
- Por último, el análisis de XPS que se realizó confirma la ocurrencia de Li en la estructura de la lepidolita. El resultado del espectro revela la presencia de Li 1s (a 54.83 eV) en un 0.3 %, de Li y de igual modo muestra picos Si, C, O, F, Mg principalmente.
- La geología de la Formación Atotonilco el Grande proporciona un marco geológico importante para entender la ocurrencia de litio en el área y puede servir como base para futuros estudios de prospección y extracción de este recurso estratégico. Entre tanto, la etapa regresiva se identificó en el Terciario, durante el Plioceno representado por la Formación Atotonilco el

Grande, lo cual es importante porque se identificó que la mineralización de lepidolita se debió a un evento de extensión, ocurrido durante el terciario, (post Plioceno) que inicio en el Jurásico Medio y formó horsts y grabens de fallas NW-SE y N-S.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Alatorre-Campos, A. E. y Santillán-Alcántara, Y. (2020). Yacimientos de Litio. En *Geomimet*. 348.
- Cantagrel, JM y Robin, C. (1979). Datación K-Ar en rocas volcánicas del este de México: relaciones entre las provincias andesíticas y alcalinas. *Revista de Vulcanología e Investigación Geotérmica* 5: 99-114
- Cárdenas-Reyes, E.A., Salinas-Rodríguez, E., Hernández-Ávila, J., Rodríguez-Lugo, V., Gutiérrez-Amador, M.P., Roldán-Contreras, E., & Cerecedo-Sáenz, E. (2019). Influence of the Rift Molango over the mineralization of platinum group elements and light rare earths into a sedimentary exhalative ore deposit. *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints201906.0011.v1>
- Cerecedo, Sáenz, E., Salinas, R. E., & Hernández, A. J. (2023). El Rift Molango: El Rift Molango y sus recursos minerales. Editorial Académica Española.
- Etcheverry, R. O., Tessone, M. o. R., Moreira, P., Kruse, E. E., & Díaz, F. J. (2020). Caracterización geológica de las fuentes actuales y potenciales de obtención de litio en la República Argentina. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/121293>
- Geyne, A. R., Fries, Jr. C., Segerstrom, K., Black, r. F., Wilson, I. F., (1963). *Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, México*. Publication 5E, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, México. D F
- Harp, F., M. (2020). Depósitos de litio en México. Government of Mexico. https://www.geomin.com.mx/pdf/panel/litio/PRESENTA_LITIO_MEXICO_AIMMGMNov2020_Corregida.pdf.
- Hernández-Ávila, J., Cerecedo-Sáenz, E., Salinas-Rodríguez, E., Arenas-Flores, A., Del Pilar Gutiérrez-Amador, M., & Monroy-Olguín, C. (2022). Concentración por gravimetría de un depósito tipo Sedex de (AU-PT). *PADI Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI, 10(Especial7)*, 10-14. <https://doi.org/10.29057/icbi.v10iespecial7.9720>
- J. M. Cantagrel, C. Robin. *Jour. Volcan. Geother. Res.* 5 (1979) 99-114.
- Liu, X.; Yang, K.; Rusk, B.; Qiu, Z.; Hu, F. and Pironon, J. *Copper* (2019). Sulfide Remobilization and Mineralization during Paleo-proterozoritic Retrograde Metamorphism in the Tongkuangyu Copper Deposits, North China Craton. *Minerals*, 9(7), 443. DOI: 10.3390/min9070443
- Montgarri Castillo, O., Melgarejo, J. C., Torró, L., Amores Casals, S., Xu, J., Proenza, J., & Tauler, E. (2019). Sandstone-Hosted Uranium Deposits as a Possible Source for Critical Elements: The Eureka Mine Case, Castell-Estaó, Catalonia. *Minerals*, 10(1). doi: <https://doi.org/10.3390/min10010034>
- Munk, L.A., Hynek, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D.F., Labay, K., and Jochens, H. (2016). Lithium brines—A global perspective: *Reviews in Economic Geology*, v. 18, p. 339–365
- Orozco-Esquivel, T., Petrone Ch.M., Ferrari, L., Tagami, T., Manetti, P. (2007). Geochemical and isotopic variability in lavas from the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: slab detachment in a subduction zone with varying dip. *Lithos*, 93, 149-174.
- Roldán-Contreras, Edmundo, Eleazar Salinas-Rodríguez, Juan Hernández-Ávila, Eduardo Cerecedo-Sáenz, Ventura Rodríguez-Lugo, Ricardo I. Jeldres, and Norman Toro. (2020). "Leaching of Silver and Gold Contained in a Sedimentary Ore, Using Sodium Thiosulfate; A Preliminary Kinetic Study" *Metals* 10, no. 2: 159. <https://doi.org/10.3390/met10020159>
- Ruiz, N. J. (2022). Estudio geológico y geoquímico de anomalía de litio en suelos de la Región Norte de Sahuaripa, Sonora, México. Repositorio UNISON. <http://www.repositorioinstitucional.uson.mx/handle/20.500.12984/8302>
- Servicio Geológico Mexicano, 1996, Carta Geológico-Minera Pachuca F14-11, Hgo., Qro., Edo. Méx., Ver. y Pue., escala 1:250 000, Secretaría de Economía.

- Su Hui, Zhu Zhaowu, Wang Lina, Qi Tao. (2019). Research progress on the extraction and recovery of lithium from ore resources [J]. *Acta Chemical Engineering*, 2019, 70(1): 10-23.
- Suryanarayana, C., & Grant, M. (1998). *X-Ray Diffraction A Practical Approach*. Springer Science Business Media New ork. Plenum Publishing Corporation
- Tang, Y., Zhang, Q., Yang, W., Miao, Y., & Feng, Q. (2024). A novel combined collector with superior selectivity for flotation separation of lepidolite from feldspar: Experimental insight and MD simulation. *Separation And Purification Technology*, 127627. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127627>
- Tian-Ming, G., Na, F., Wu, C., & Tao, D. (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>
- Xu, R., Liu, Y., Sun, N., Kang, J., Sun, W., Tang, H., & Wang, L. (2024). The activation role of Mg²⁺ in the lepidolite flotation using NaOL. *Separation And Purification Technology*, 128035. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128035>
- Yang, K., Fan, H., Pirajno, F., & Li, X. (2023). Magnesium isotope fractionation in differentiation of mafic-alkaline-carbonatitic magma and Fe-P-REE-rich melt at Bayan Obo, China. *Ore Geology Reviews*, 157, 105466. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105466>
- Wang, J.; Wang, X.; Liu, J.; Liu, Z.; Zhai, D. and Wang, Y. (2019). Geology, Geochemistry, and Geochronology of Gabbro from the Haoyaoerhudong Gold Deposit, Northern Margin of the North China Craton. *Minerals*, 9(1), 63. DOI: 10.3390/min9010063.