

Introducción

El precio del Litio (Li) ha aumentado exponencialmente desde el 2015, esto debido a su gran demanda en la industria de la telefonía y las baterías recargables de autos eléctricos e híbridos, además de los aceites, cerámica, vidrios, medicina y aires acondicionados (Tabla No.1). Las fuentes geológicas de este metal incluyen pegmatitas, salmueras continentales, algunas arcillas vulcanogénicas y más recientemente de aguas geotermales (pozos) (Bowen et al., 2020). Los principales recursos y reservas de Li en el mundo están en depósitos de pegmatitas, arcillas volcánicas y salmueras continentales. Debido a la movilidad del Li y su incompatibilidad en la litósfera y superficie terrestre, es necesario integrar conocimiento de datos de los sistemas minerales de este metal, así como una herramienta de exploración para su evaluación regional y generación de prospectos (Dill, 2015). Hacemos una breve investigación actualizada sobre las características geológicas de los depósitos de Litio proponiendo al final una metodología para su exploración en México.

El Litio posee las siguientes propiedades de interés (Tabla 1, Brown et al., 2016):

- Metal más ligero de la tabla periódica
- Es el menos denso y puede flotar en el agua
- Asociado a otros metales alcalinos como Na-K-Rb-Cs
- Dureza menor a la del talco
- Reacciona fácilmente con el agua
- Inflamable y explosivo
- Excelente conductor eléctrico
- Metal más electronegativo

Symbol	Li	
Atomic number	3	
Atomic weight	6.94	
Density on solid form @20°C	534	kg m ⁻³
Melting Point	180.54	°C
Boiling Point	1342	°C
Crystal Structure	Body centred cubic	
Hardness	0.6	Mohs scale
Electrical resistivity	9.5	m Ω CM
Thermal conductivity	85	W m ⁻¹ K ⁻¹

Tabla No. 1. Propiedades selectas de Litio (Brown et al., 2016)

La concentración del Litio en la litósfera va de 17 a 20 ppm, en rocas ígneas, de 28 a 30 ppm y en rocas sedimentarias de 3 a 10 ppm. Los minerales donde se encuentra este metal con las mayores concentraciones se muestran en la Tabla No.2.

Mineral Name	Chemical Formula	Lithium content (Li %)	Appearance (colour and lustre)
Spodumene	LiAlSi ₃ O ₆	3.7	White, colourless, grey, pink, lilac, yellow or green; vitreous
Lepidolite	K ₂ (Li, Al) ₃₋₆ (Si ₃₋₄ Al ₂₋₁ O ₁₀)(OH, F) ₄	1.39 - 3.6	Colourless, grey/white, lilac, yellow or white; vitreous to pearly
Petalite	LiAlSi ₃ O ₁₀	1.6 - 2.27	Colourless, grey, yellow or white; vitreous to pearly
Eucryptite	LiAlSiO ₄	2.1 - 5.53	Brown, colourless or white; vitreous
Amblygonite	LiAl[PO ₃][F,OH]	3.4 - 4.7	White, yellow or grey; vitreous to pearly
Hectorite	Na _{0.3} (Mg,Li) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	0.54	White, opaque; earthy
Jadarite	LiNaSiB ₃ O ₇ (OH)	7.3	White; porcellanous

Tabla No. 2. Minerales más comunes que contienen Litio (Brown et al., 2016).

1. Pegmatitas

Las pegmatitas (pegmatitas graníticas, PG) son rocas ígneas en esencia de composición granítica (plutónicas) con tamaños de cristales extremadamente grandes y variables, con abundancia de minerales con textura “gracia esquelética” que muestran varias texturas de crecimiento direccional y que forman lentes, diques o vetas, en cercanía o asociados a grandes intrusiones ígneas graníticas (London, 2014). Estas rocas son de grano muy grueso (cristales mayores a 5 cm) predominando los feldespatos, cuarzo y micas, siendo fundamental en su formación una fuerte influencia de volátiles como Boro (B), Fluor (F), Cloro (Cl) o agua, disminuyendo la velocidad de nucleación, aumentando la velocidad de difusión, originando la formación de grandes cristales, formándose también por el fraccionamiento prolongado o extendido de un magma parental rico en fluidos (Dill, 2015). Otra característica fundamental de las PG es su zonamiento interno (Figuras 1 y 2, Cerny, 1991, London, 2014), tanto en mineralogía como en texturas, predominando las texturas gráficas, esquelética u otras de tipo direccional, con enriquecimiento de elementos como Nb, Ta, Be y Li (London, 2014). Las pegmatitas se clasifican de acuerdo a su enriquecimiento en determinados elementos de interés económico y mineralogía asociada, la familia LCT (Li-Cs-Ta) está asociada a granitos tipo S, peraluminosos, enriquecidos en álcalis raros, Be, B, P y Sn, mientras que la familia NYF (Nb-Y-F) está asociada a los granitos tipo A, están enriquecidas en tierras raras pesadas y F (London 2014). El zonamiento ocurre en dos escalas, regional, manifestado como el aumento de la complejidad química con la distancia desde su fuente termal de origen (Figura 3) y el zonamiento interno, que son cambios texturales y de mineralogía dentro del cuerpo de la PG, compartiendo texturas similares a vetas de origen hidrotermal (London, 2018). Las PG se han formado en periodos de eventos tectónicos asociados a orogéneas (3.1 Ga, 2600, 1800, 962, 529-485 y 307-274 Ma), principalmente en eventos convergentes de supercontinentes (Li et al., 2023, Figura 4a).

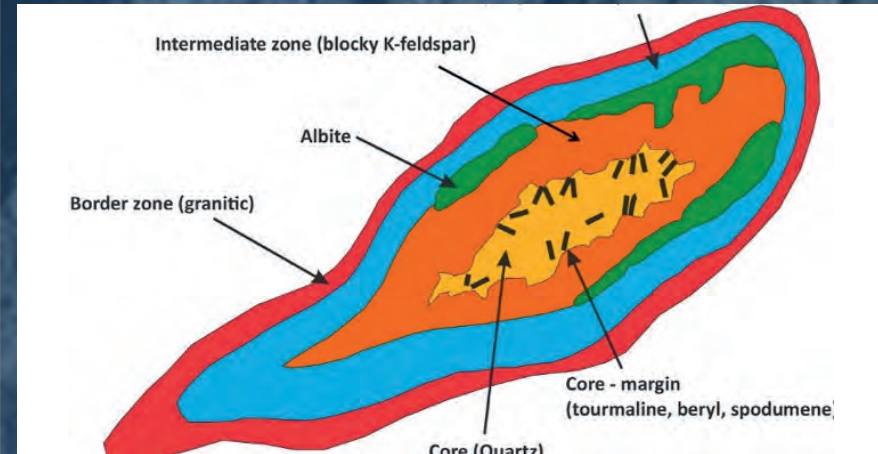


Figura 1. Zonamiento interno típico de las pegmatitas (Cerny, 1991).

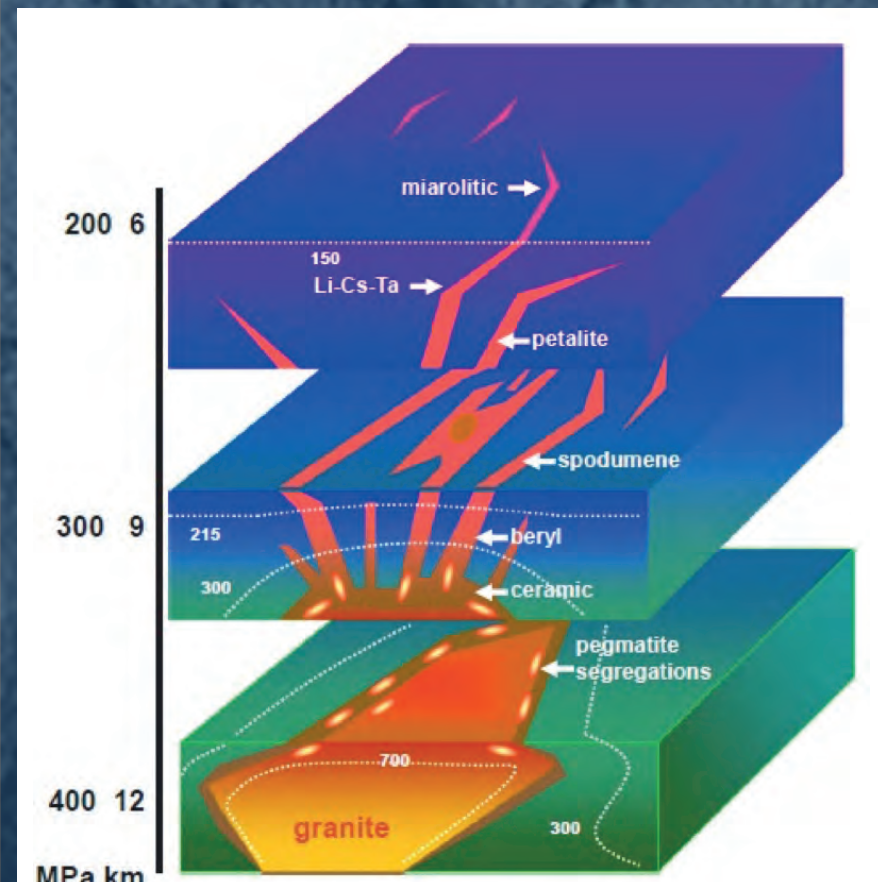


Figura 3. Zonamiento regional dentro de una pegmatita LCT (London, 2014).

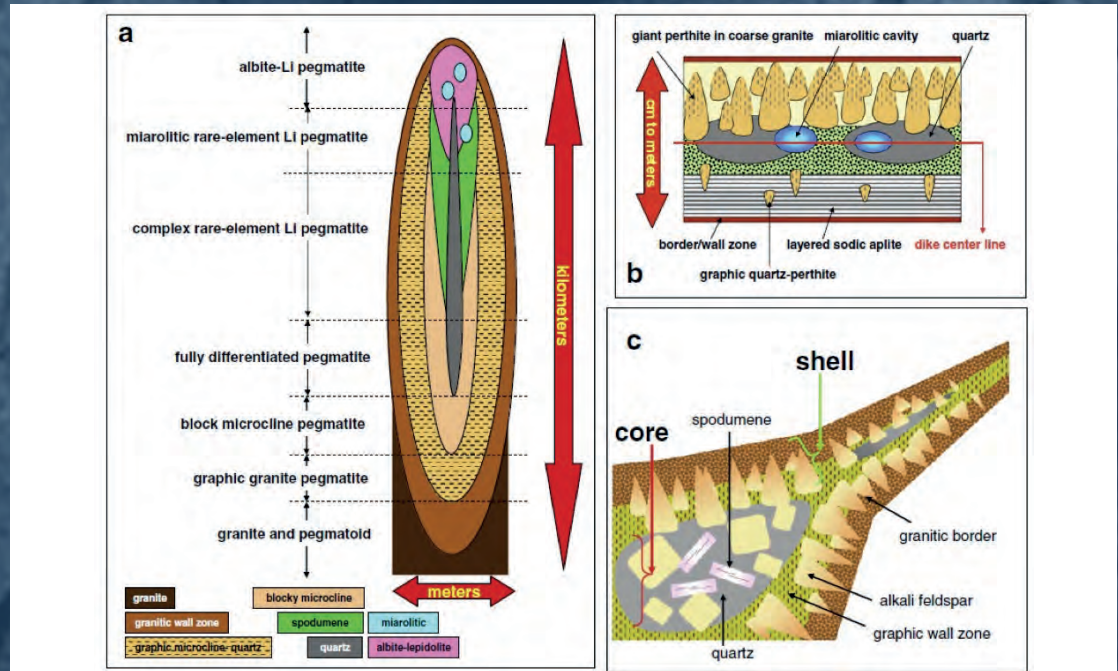


Figura 2. Zonamiento interno de pegmatitas de acuerdo a 3 modelos (London 2014).

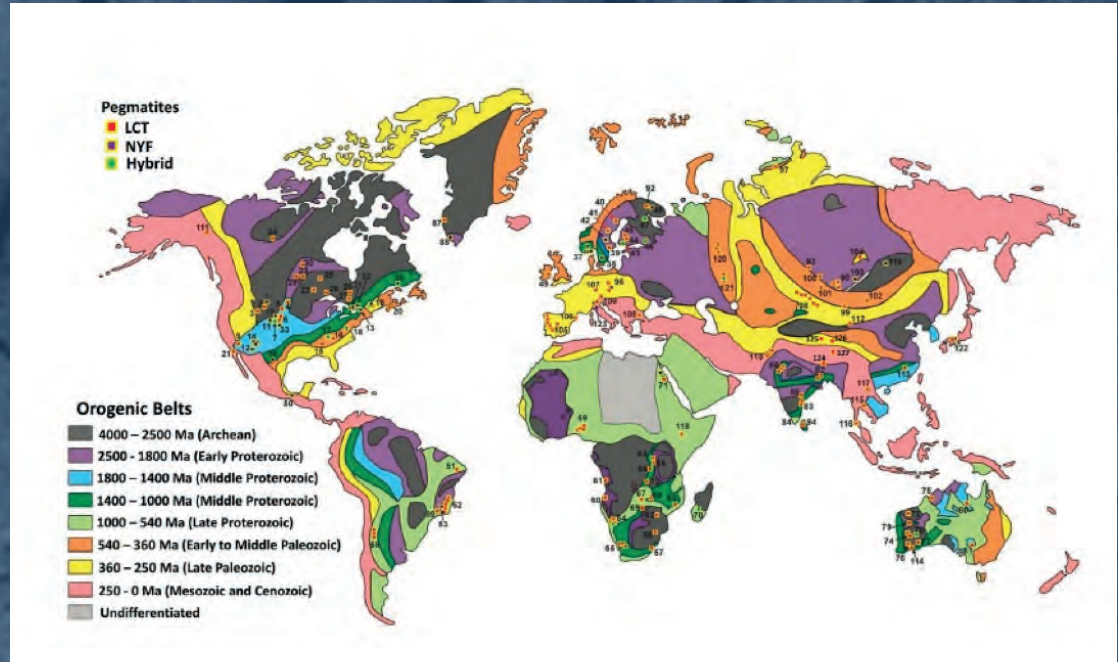


Figura 4. Mapa de regiones orogénicas del mundo con localizaciones de pegmatitas (Li et al., 2023).

2. Arcillas vulcanogénicas

Se han detectado anomalías geoquímicas de Li en arcillas y que están asociadas generalmente a rocas riolíticas, las cuales se pueden subdividir en 3 subtipos, (a) Li en hectorita y otras capas mezcladas de arcillas, (b) iones de Li adsorbido a las arcillas y (c) en depósitos de jaderita (Bowen, 2022). Las tobas riolíticas se consideran como un recurso potencial de este metal, debido a la presencia de jaderita y otras arcillas de Li. Existen otros tipos de arcillas donde se ha detectado Li de forma anómala, sin embargo, los espesores de la litología y la heterogeneidad geológica hace a estos depósitos complejos para considerarse como una fuente próxima para explotarlos, cuando el precursor del metal podría ser volcánico o que los altos contenidos de Li sean derivados por alteración

supergénica o hidrotermal (Bowen, 2022). Existen depósitos importantes de arcillas ricas en Litio en Nevada (USA), Turquía, Argentina y Sonora, dentro de secuencias de tobas riolíticas, llegando a tener espesores desde 1 hasta 90 m con hasta 20 Km de extensión lateral con capas individuales de varios kilómetros de longitud (Bowen, 2022). Los tipos de arcillas son variables y dependen de la roca fuente parental y de procesos de hidrotermalismo, identificándose minerales como hectorita, tallonita, illita, esmectita, clorita, caolinita, así como coquitas, encontradas en depósitos de bauxitas, considerándose estos depósitos de origen sedimentario (Ye et al., 2025, Wang et al., 2024).

3. Salmueras continentales

Las salmueras continentales (SC) se definen como soluciones conteniendo sales totales disueltas en concentraciones mucho más altas que el agua marina (>3.5%) siendo clasificadas como hipersalinas, mostrando evidencias de concentración de Li por evaporación y procesos hidrotermales. Estos depósitos contienen cantidades importantes de Li, B, Ba, Sr, Br, I y F además de Na, K, Mg, Ca, Cl, SO₄ y CO₃. Las SC se caracterizan por ser concentraciones de iones disueltos que están cerca de la saturación para muchas sales, especialmente en depósitos de salmueras (salares maduros). Estas acumulaciones salinas ricas de Li en superficie son derivadas de las salmueras y cumplen con 6 factores fundamentales para su génesis, (a) clima árido, (b) cuenca cerrada conteniendo un salar, lago salado o ambos, (c) actividad ígnea o hidrotermal asociada, (d) subsidencia tectónicamente activa, (e) fuentes de Li adecuadas y (f) suficiente tiempo para concentrar este metal. El clima es la primera característica y más importante ya que contribuye (1) a la formación de los salares en una cuenca cerrada, (2) es un factor en la concentración del Li con el tiempo y (3) es esencial para la separación del Li en estanques (Munk et al., 2016).

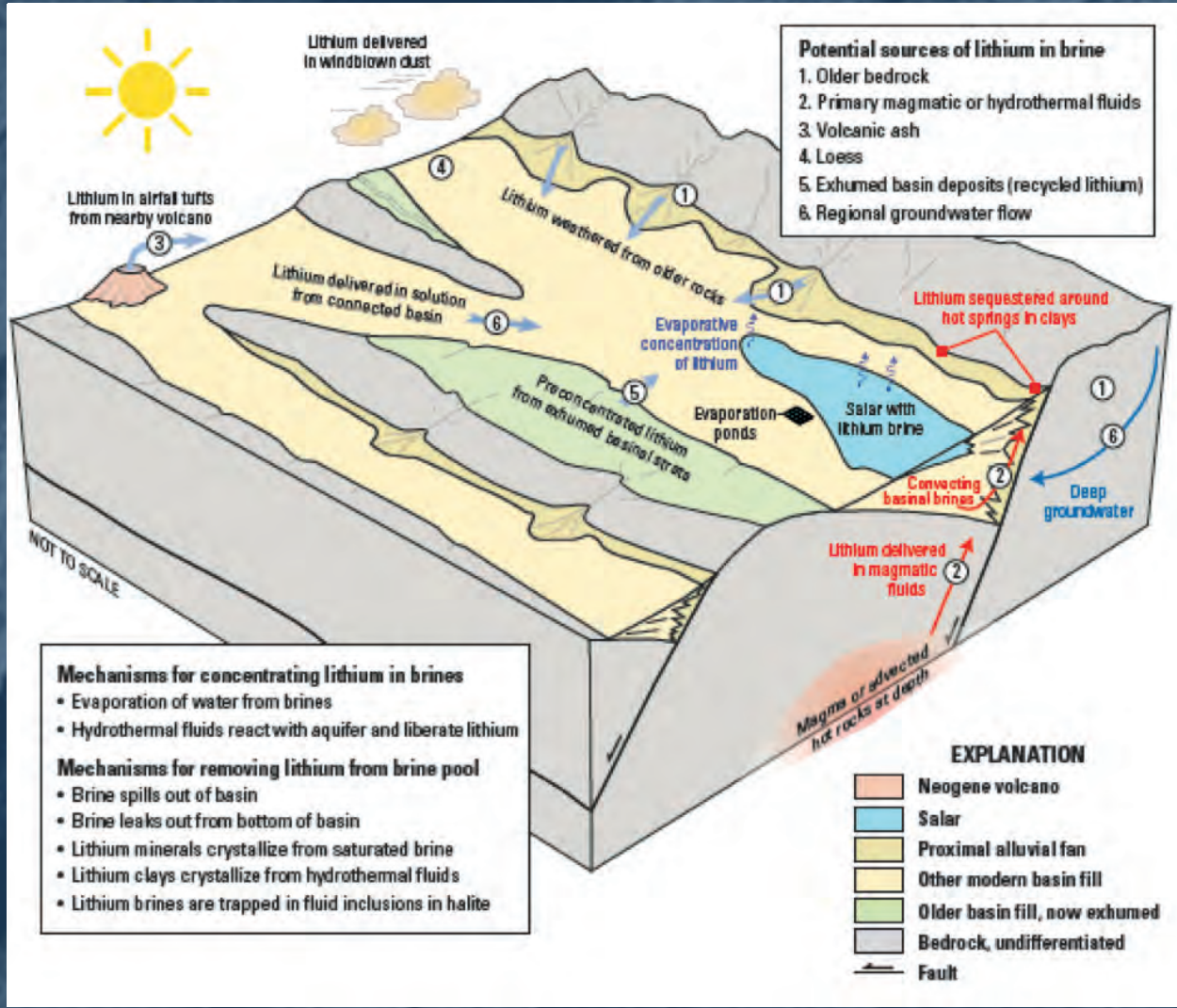


Figura 5. Modelo conceptual del depósito mineral en SC de Litio (Bradley et al., 2016)

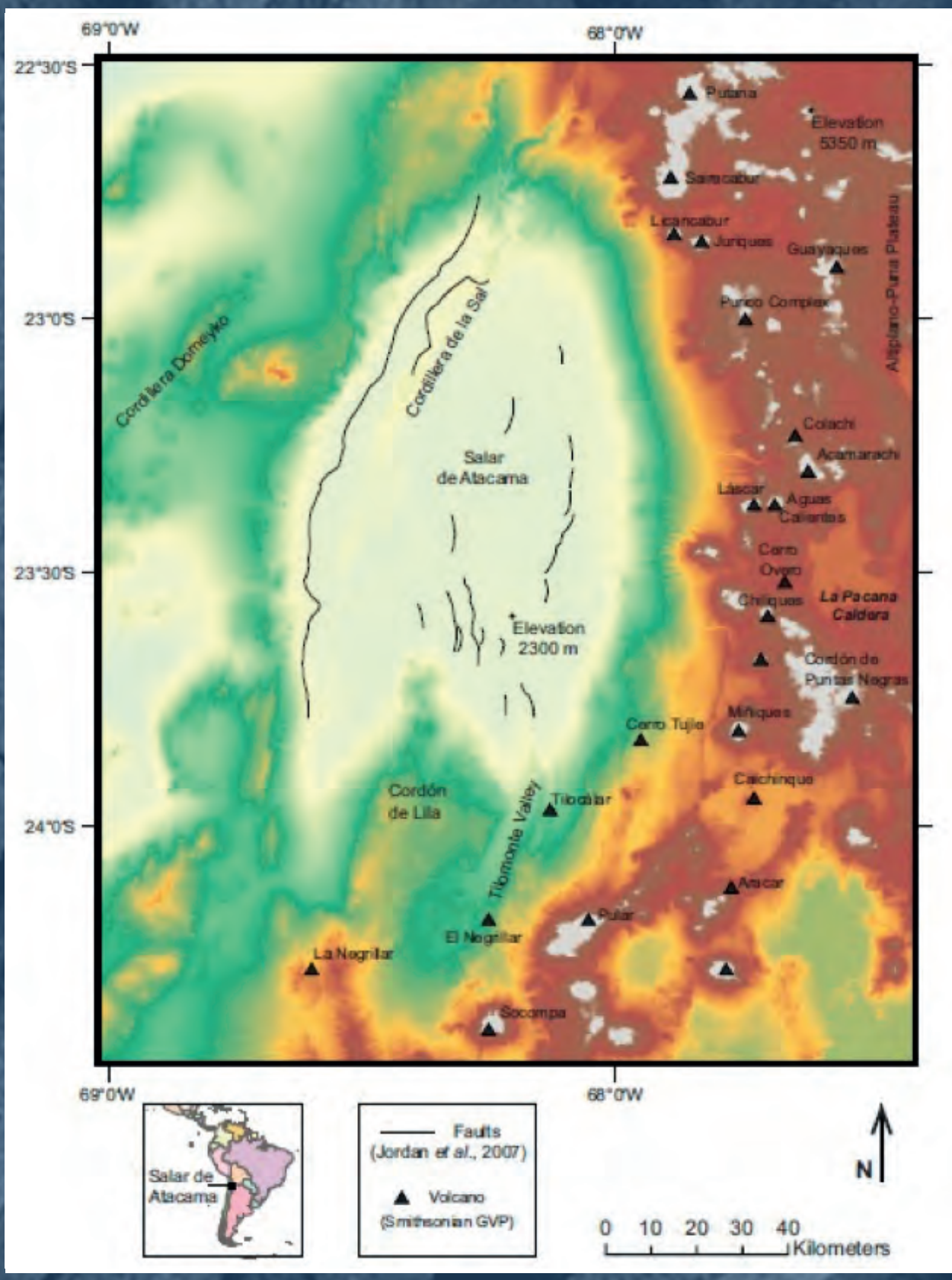


Figura 6. Salar de Atacama, donde se observan los volcanes que rodean el salar de esta región (Munk et al., 2016).

4. Salmueras geotermales

Ya en 2021 (Dill) proponía la idea de recuperar Li de salmueras geotermales (Litio geotermal) en Italia, donde menciona diferentes localidades y proyectos geotérmicos donde el Litio presenta concentraciones elevadas lo que delinea la idea de utilizar dichos fluidos para extraer el preciado metal. Otros autores en la actualidad (Ayaz y Muñoz, 2024) encuentran una fuerte relación entre el Litio en pequeños salares ricos en Litio y los fluidos geotermales de la región de Laguna Verde (Chile), donde se comprueba la fuerte relación entre este proceso de enriquecimiento de Li y la actividad volcánica-plutónica, representada por volcanes de andesitas y dacitas así como de la actividad fumarólica presente de forma regional contundente, comprobando con métodos geoquímicos el origen magmático del Litio por medio de análisis de isótopos. Cao et al (2025) hacen una como comparación de la productividad de Litio en diversos campos geotermales activos determinados los procesos que determinan el enriquecimiento y empobrecimiento de este metal en estos sistemas hidrotermales. El inventario de sitios geotérmico (pozos geotermales y manifestaciones termales superficiales) evaluando las variaciones del litio en los fluidos geotermales es una técnica adecuada para evaluar a nivel de recurso de este metal a nivel regional (Sanjuan et al, 2022). La extracción directa del Litio (EDL) es una excelente opción para este tipo de salmueras, siendo mas amigables con el ambiente (Saleen et al., 2025). Después de haber descrito las características fundamentales de génesis y de geología de enriquecimiento del Litio, es importante notar la diferencia entre las concentraciones de este metal en las diferentes fuentes naturales mostradas (Tabla No. 3).

Deposit	Type	Location	Main Owner	Li (Kt)	Grade (wt% Li)	Resource/ Reserve
Greenbushes	Pegmatite	Greenbushes (Australia)	Tianqi Lithium	943	1.091	R ^(1,2)
Wodgina	Pegmatite	Pilbara (Australia)	Mineral Resources	826	0.543	R ^(1,3)
Earl Grey	Pegmatite	Goldfields (Australia)	Kidman Resources & SQM	658	0.697	R ^(1,4)
Pilgangoora	Pegmatite	Pilbara (Australia)	Pilbara Minerals	628	0.580	R
Grota do Cirilo	Pegmatite	Minas Gerais (Brazil)	Sigma Lithium	293	0.641	r; M+I ⁽⁵⁾
Whabouchi	Pegmatite	Quebec (Canada)	Nemaska Lithium	220	0.604	R ^(1,6)
Arcadia	Pegmatite	Harare (Zimbabwe)	Prospect Resources	164	0.608	R ⁽⁷⁾
Tanco	Pegmatite	Manitoba (Canada)	Sinomine Rare Metals	110	1.180	R ⁽⁸⁾
Atacama	Brine	Atacama (Chile)	SQM; Albermarle	6,300	0.184	R ⁽⁹⁾
Uyuni	Brine	Oruro and Potosí (Bolivia)	COMIBOL	3,600	0.045	R ⁽⁹⁾
Zhabuye	Brine	Tibet (China)	Tibet Shigatse & Tianqi	1,500	0.100	R ⁽¹⁰⁾
Centenario	Brine	Salta (Argentina)	Eramet	921	0.045	r; M+I ⁽¹¹⁾
Hombre Muerto	Brine	Catamarca (Argentina)	Livent	835	0.071	R ⁽¹¹⁾
Olaroz/Cauchari	Brine	Jujuy (Argentina)	Orocobre	345	0.053	r; M ⁽¹²⁾
Cauchari	Brine	Jujuy (Argentina)	Lithium Americas & Exar	282	0.069	R ^(11,13)
Maricunga	Brine	Atacama (Chile)	Minera Salar Blanco	269	0.117	R ⁽¹⁴⁾
3Q	Brine	Catamarca (Argentina)	Neo Lithium	243	0.079	R ^(11,15)
Rincon	Brine	Salta (Argentina)	Argosy Minerals	203	0.032	R ⁽¹¹⁾
Clayton Valley	Brine	Nevada (USA)	Pure Energy Minerals	41	0.012	R ⁽¹⁶⁾
Sonorra	Li-Clay	Sonorra (Mexico)	Bacanora & Ganfeng	845	0.229	R ^(1,17)
Thacker Pass	Li-Clay	Nevada (USA)	Lithium Americas	582	0.236	R ^(1,18)
Rhyolite Ridge	Li-clay	Nevada (USA)	ioneer Resources	209	0.170	r; M+I ⁽¹⁹⁾
Falchini	Li-Tuff	Puno (Peru)	Plateau Energy Metals	146	0.296	r; r ⁽¹⁾

Tabla No. 3. Comparación de las concentraciones de Litio en diferentes fuentes naturales (geológicas) de este metal (Bowen 2022).

5. Exploración en México

Consideramos que en México se tienen 2 grandes fuentes naturales de Li, en las que se debe de poner atención para su exploración, en pegmatitas y en salmueras geotermales, esto debido a que existen localidades importantes de pegmatitas en diversos estados (Figuras 9 y 10), así como la geotermia en México tiene un buen grado de desarrollo, principalmente en la producción de electricidad con 5 campos geotérmicos a nivel nacional (Figuras 11 y 12). Respecto del Li en arcillas existen dos proyectos importantes, en uno ya hay incluso perforación y en el otro falta una evaluación preliminar, sin embargo, en este tipo de depósitos de Li es difícil aun la explotación de este metal. En México no existen salmueras continentales. Nos centramos en las propuestas de exploración para pegmatitas, ya que lo estudios que existen son de carácter netamente petrológico, geoquímico y geocronológico, pero no existen estudios enfocados a la exploración y en el caso de salmueras geotermales, existe infraestructura para la investigación y recolección de datos de Li y hacer el inventario geoquímico pertinente.



Figura 9. Aforamiento de pegmatitas en el Complejo Metamórfico de Acatlán en Puebla (Zarzosa, 2024)



Figura 10. Cristales de feldespatos y cuarzo de más de 2 cm de diámetro en una pegmatita dentro del Complejo Metamórfico de Acatlán en Puebla (Zarzosa, 2024).



Figura 11. Precipitación de minerales en un pozo de exploración a temperatura ambiente (Mengelle, 2025a).



Figura 12. Pozo geotermal en el campo geotermoelectrico de Humeros en Puebla (Mengelle, 2025b).

6. Propuestas de exploración

Para la exploración de pegmatitas se deberán de emplear las siguientes técnicas como en cualquier otro proyecto de minería metálica, esto para definir las guías que deberán de emplearse a escala regional, distrito y prospecto, en los estados como Sonora, Chihuahua, Oaxaca, Puebla entre otros donde hay evidencias de pegmatitas siguiendo varias etapas lógicas:

(a) Construir una base de datos actualizada (desarrollo de conocimiento) sobre la clasificación de los diversos tipos de pegmatitas, detallando conceptos como la mineralogía, geoquímica y los diversos zonamientos en dichas tipologías en distintas escalas de estudio además de considerar el ambiente geológico y tectónico.

(b) Percepción remota, empleando sensores remotos de resolución espacial y espectral alta, esto para poder identificar zonas de caolín, posiblemente asociadas a pegmatitas afectadas por una fuerte alteración supergénica e hipogénica, así como a los minerales constituyentes de dichas rocas, generando en esta etapa prospectos para su posterior investigación en campo (prospección geológica y geoquímica), cubriendo una superficie de varios kilómetros cuadrados, en las regiones ya mencionadas.

(c) Geofísica aérea, donde lo que se pretende es identificar anomalías geofísicas que puedan estar asociadas a plutones de diversas dimensiones, en donde puedan estar alojadas las pegmatitas, generando de esta también prospectos.

(d) Prospección geológica a escalas grandes de semidetalle que permitan ir integrando cartográficamente las diversas localidades identificadas y verificadas en el campo, describiendo todas las características geológicas de los sitios.

(e) Muestreo y análisis de laboratorio de las especies minerales de la pegmatita y sobre todo del cuarzo del núcleo de dichas rocas, para determinar las temperaturas de cristalización características de esta roca que correspondan con anomalías geoquímicas de Li y Elementos de las Tierras Raras (ETR) de las pegmatitas LCT y NYF, así como de otros tipos con enriquecimiento en Li y ETR.

(f) Integración de toda la información generada durante las etapas anteriores, para evaluar los recursos de Li y ETR, así como determinar los sitios con posibilidades de generar reservas, por medio de la perforación.

(g) Perforación de prospección para verificar objetivos en el subsuelo.



Figura 13. Pozo geotermal activo en el campo geotermoelectrico de Los Azufres en Michoacan (Mengelle, 2025a).

Para las salmueras geotermales es necesario hacer un inventario de manifestaciones termales y de pozos activos, describiendo todas las características geoquímicas de los fluidos profundos en dichos sistemas geológicos, construyendo un mapa con dicha información, enfocándose a las concentraciones de Li y otros elementos como B, Rb, K, SO₄, Na, Cl y F, así como Mg, Mn U y NH₄. Esta es una actividad fundamental ya que en México existen campos geotérmicos en donde los pozos de producción permitirían generar una base de datos robusta y evaluar el recurso de Litio en este tipo de salmueras (Figura 13).

Para los depósitos de Li en arcillas se recomienda en el primer caso evaluar la región de Zacatecas y San Luis Potosí a nivel de recursos con técnicas actuales, sumando recursos a los de Sonora.

Referencias bibliográficas

- Ayaz, A.M., Muñoz, A., 2024. A critical evaluation of the role of a geothermal system in lithium enrichment of brines in the salt flats: A case study from Laguna Verde in the Atacama Region of Chile. *Geothermics*, V. 119, 102970, Number 2.
- Bowen, R.J., Lagos, L., de Los Hoyos, C.R., Declercq, J., 2020. Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources. *Elements*, V. 16, p. 259-264.
- Bradley, D., Munk, L.A., Jochens, H., Hynke, S., Labay, K., 2013. A Preliminary Deposit Model for Lithium Brines. *USGS Open-File Report* 2013-1006.
- Brown, R., Walters, A., Idone, N., Gunn, G., Shaw, R.A., Rayner, D., 2016. *Lithium. Definition, Mineralogy and Deposits*. British Geological Survey, p. 39.
- Cao, R., Yang, Y., Dor, J., Liu, Q., Cai, Y., Wan, S., 2025. The source and differential enrichment mechanisms of lithium in Gudu geothermal field: Constraints from enrichment and dilution processes of geothermal-type Lithium. *Geothermics*, V. 125, 103190.
- Cerny, P., 1991. Rare-element Granitic Pegmatites. Part I: Anatomy and Internal Evolution of Pegmatite Deposits. *Geoscience Canada*, V. 18, Number 2.
- Dill, H., 2015. Pegmatites and apatites: Their genetic and applied ore geology. *Ore Geology Reviews*, V. 69, P. 417-651.
- Kessler, S.E., Gruber, P.W., Medina, P.A., Kellelin, G.A., Everson, M.P., Wallington, T.J., 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, V. 48, 65-79.
- Li, J., Yan, Q., Li, P., Jacobson, M.I., 2023. Formation of granitic pegmatites during orogenesis: Indications from a case study of the pegmatites in China. *Ore Geology Reviews*, V. 156, 105301.
- London, D., 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites: Lithos, 194-197.
- London, D., 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites. *Ore Geology Reviews*, V. 101, p.349-383.
- López, S.R.L., Salvi, S., García, G., Peralta, A.Y., Beziat, D., Franco, G., Constantini, O., Córdoba, F.E., Caffa, P.J., 2018. Northern Puna Plateau-scale survey of Li brine-type deposits in the Andes of NW Argentina. *Journal of Geochemical Exploration*, V. 190, p. 26-38.
- Mengelle, L.J.J., 2024. Reservorio y modelación del sistema geotermal Sol de Mañana en Bolivia. *ANDIMEX*. No publicado.
- Mengelle, L.J.J., 2025a. Informe de práctica de campo (campo geotérmico Los Azufres). Geotermia y métodos de exploración. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. No publicado.
- Mengelle, L.J.J., 2025b. Informe de práctica de campo (campo geotérmico Los Humeros). Geotermia y métodos de exploración. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. No publicado.
- Muller, A., Bronner, M., Menue, J., 2025. The GREENPEP Project Toolkit to Explore for Buried Pegmatites-hosting Lithium, High-Purity Quartz, and Other Critical Raw Materials. *Economic Geology*, V. 120, p. 745-778.
- Munk, L.A., Hynke, S.A., Bradley, D.C., Boutt, D., Labay, K., Jochens, H., 2018, pp. 339-365.
- Saleen, U., Williams, A., Sotomann, J., Knuutila, H.K., Bandyopadhyay, S., 2025. Direct lithium extraction (DLE) methods and their potential in Li-ion battery recycling: Separation and Purification Technology, V. 361, 105556.
- Sanjuan, B., Gourcerol, B., Millot, R., Rettenmaier, J., Jander, E., Roubault, A., 2022. Lithium-rich geothermal brines in Europe: An update about geochemical characteristics and implications for potential Li Resources. *Geothermics*, V. 101, 102385.
- Wang, W., Shian, S.J., Shang, W.S., Yin, J., 2024. A new type of clay-Li deposit: Fault-controlled hydrothermal alteration in southern Hubei Province, China. *Ore Geology Reviews*, V. 170, p. 106-138.
- Ye, Q., Luo, Ch., Wen, H., Chen, Y., Yu, W., 2025. Smectite as the lithium-rich mineral precursor: Key to lithium enrichment in claystone from Central Yunnan, Southwest China. *Ore Geology Reviews*, V. 180, 105556.
- Zarzosa, L., 2024. Reporte de práctica de campo. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. No publicado.