

Tiempo real, litio real: tecnologías de detección en tiempo real (LIBS) para salmueras continentales, geotérmicas, petroleras y marinas

Real-time, real lithium: detection technologies (LIBS) for continental, geothermal, petroleum, and marine brines

M. de la Luz Hernández Flores ^a, P. Sobron ^{b,c}, M. P. Falcón León ^d, M. A. Cosío León ^d, A. Martínez Vargas ^d, G. Luis Raya ^{b,c,d,*}

^a Laboratorio Estatal de Políticas Públicas, Gobierno del Estado de Hidalgo, México.

^b SETI Institute, Mountain View, CA, USA, 94043

^c Impossible Sensing, Saint Louis, MO, USA, 63110

^d Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca - Cd. Sahagún km 20, Zempoala, 43830, Hidalgo, México

Resumen

El papel del litio en la transición energética exige mediciones de campo más rápidas y confiables en las cadenas de suministro basadas en salmueras. Presentamos una estrategia de LIBS orientada a proceso para la cuantificación en tiempo real de litio en salmueras en flujo. Un láser de 1064 nm, espectrómetros UV-Vis-NIR y una celda diseñada para minimizar la cavitación permiten generar plasma estable. Un flujo de datos guiado por la física (sustracción de línea base, extracción de rasgos, normalización interna y validación por nivel retenido) ofrece una calibración robusta en ~30–1300 ppm en matrices representativas. Las rutas de despliegue abarcan salares continentales, fluidos geotérmicos, aguas producidas en yacimientos de hidrocarburos y charcas hipersalinas marinas, lo que permite un mapeo denso, cribado ágil y el control de DLE en un lazo cerrado. La metodología acorta los ciclos de exploración, reduce la incertidumbre en la optimización de procesos y mejora la resolución espaciotemporal en la gestión del yacimiento. También se discuten las implicaciones de la gobernanza para un desarrollo responsable mediante el monitoreo químico *in situ*.

Palabras Clave:

Salmueras de litio, LIBS, Sensado en tiempo real, Extracción directa de litio (EDL), Analítica de proceso

Abstract

Lithium's role in the energy transition demands faster, field-grade measurements across brine value chains. We present a process-oriented laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) approach for real-time lithium quantification in flowing brines. A 1064 nm pulsed laser, UV-Vis-NIR spectrometers, and a flow cell engineered to minimize cavitation enable stable plasma formation without wet chemistry. A physics-guided data pipeline (baseline removal, feature extraction, internal normalization, and leave-one-level-out validation) delivers robust calibration across ~30–1300 ppm under representative matrices. Deployment pathways span continental salars, geothermal fluids, produced water in hydrocarbon fields, and offshore hypersaline pools, supporting dense resource mapping, quicker screening, and closed-loop control of direct lithium extraction (DLE). The method shortens exploration cycles, reduces uncertainty in process optimization, and improves spatial-temporal resolution for reservoir management. We outline governance implications for responsible development, highlighting the role of in-situ, real-time chemical monitoring in emerging regulatory frameworks. Purpose-built LIBS bridges laboratory accuracy and operational speed, advancing the transition from discovery to production.

Keywords:

Lithium brines, LIBS, Real-time sensing, Direct lithium extraction (DLE), Process analytics

1. Introducción

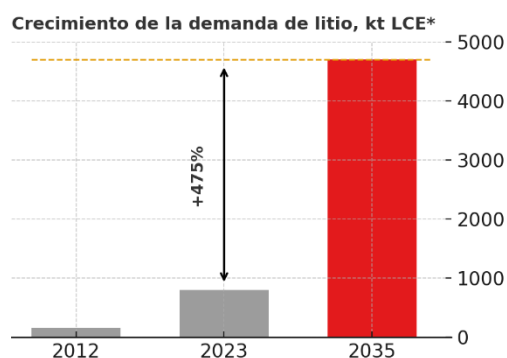
El litio se erige como un recurso estratégico fundamental para la transición energética global, al constituir la base material que posibilita la electrificación del transporte, el almacenamiento eficiente de energías renovables y la modernización de procesos industriales (IEA, 2024; IEA, 2025). A medida que aumenta la

demanda mundial de almacenamiento de energía, se intensifica la presión sobre las cadenas de suministro (IEA, 2024; USGS, 2025). En 2023, el mundo utilizó menos de un millón de toneladas de litio; en 2035, la demanda podría superar los 4,5 millones de toneladas (IEA, 2024; CRS, 2025), como se observa en la figura 1. El 88% proviene de Australia, Chile y China, lo que genera cuellos de botella y riesgos geopolíticos en su suministro (USGS,

*Autor para la correspondencia: gilgamesh@upp.edu.mx

Correo electrónico: lwz.flores@gmail.com (M. de la Luz Hernández Flores), psobron@impossiblesensing.com (P. Sobron), marthafalcon@upp.edu.mx (M. P. Falcón León), ma.cosio.leon@upp.edu.mx (M. A. Cosío León), anabel.martinez@upp.edu.mx (A. Martínez Vargas), gilgamesh@upp.edu.mx (G. Luis Raya).

2025; ECLAC/CEPAL, 2024). La volatilidad de los precios refleja esta dinámica: tras alcanzar su máximo en 2022, los precios del carbonato de litio cayeron en dos tercios en 2023; para 2025, se estabilizaron alrededor de \$10,500 dólares por tonelada (Fastmarkets, 2025; CME Group, 2025; ICE, 2025). Se espera que los déficits estructurales de suministro, como la incapacidad del sistema de producción y refinado de litio, las altas concentraciones en unos cuantos puntos geográficos sujetos a limitaciones ambientales (IEA, 2024; IEA, 2025), tecnológicas y geopolíticas, respondan de manera ágil y sostenida a la creciente demanda proyectada hacia finales de la década, motivando aún más la inversión en procesos de búsqueda y extracción del mineral. En resumen, el litio está en feroz demanda, es difícil de obtener y su valor es volátil dada su escasez y que es base de la movilidad a nivel mundial. La capacidad de identificar y desarrollar recursos de litio es ahora una prioridad industrial y estratégica para los países (USGS, 2025; IEA, 2024).



Fuente: McKinsey

*LCE: Equivalente de Carbonato de Litio

Figura 1: Demanda global de litio

Los recursos de litio se distribuyen en cuatro dominios: menas minerales de roca dura, salmueras continentales, salmueras geotérmicas y petroleras, y arcillas sedimentarias (USGS, 2025; ILiA, 2024). Cada uno presenta estructuras de costos, perfiles de escalabilidad y riesgos técnicos distintos. La minería de roca dura, como las operaciones de espodumena en Australia, ofrece material de alta calidad, pero requiere extracción y procesamiento intensivos, con altos requerimientos energéticos, lo que impulsa costos operativos elevados e impactos ambientales. Las salmueras continentales, ubicadas bajo salares y playas, ofrecen costos de extracción más bajos y una logística más simple. Los métodos tradicionales de evaporación son lentos, pero eficientes en términos de capital; las tecnologías emergentes de extracción directa de litio prometen acelerar la producción y reducir la huella de impacto en la tierra (Vera et al., 2023; ILiA, 2024). Las salmueras geotérmicas de yacimientos de fluidos de alta temperatura ofrecen una oportunidad para coproducir litio junto con energía renovable. En lugares como el mar de Salton en California, pozos geotérmicos están siendo reconvertidos para extraer litio mientras producen energía renovable. Sin embargo, la variabilidad de la composición química y las bajas concentraciones de litio dificultan la viabilidad económica de la extracción (LBNL, 2023; DOE, 2023; CEC, 2024). Las salmueras petroleras, subproductos de la producción de hidrocarburos, a menudo contienen litio en concentraciones de entre 150 y 500 mg/L (Standard Lithium, 2025; S&P Global, 2024), como en la formación Smackover de Arkansas. La infraestructura existente reduce los costos de desarrollo, pero las tasas de flujo volumétrico

y la variabilidad química plantean desafíos. Finalmente, los depósitos de litio alojados en arcillas, como Thacker Pass en Nevada, son extensos, pero requieren metalurgia compleja, a menudo incluye lixiviación con ácidos, y la escalabilidad comercial aún está en fase de validación (Vera et al., 2023; Schenker et al., 2024). Mientras que el desarrollo convencional se centra en tierra, la próxima frontera está en el mar, que alberga billones de toneladas de litio (Morozov, 1968; Coterillo et al., 2022; Barbosa et al., 2023), pero en concentraciones (~0.17 mg/L) demasiado bajas para su extracción a escala económica. Ciertas salmueras marinas presentan un caso diferente en regiones como el mar Rojo y el golfo de México; procesos naturales han creado bolsas aisladas de agua hipersalina, enriquecida en minerales. Estas charcas submarinas de salmuera, formadas por la disolución de depósitos de sal, crean cuencas densas y estancadas con concentraciones de metales muy superiores a las del agua de mar común. Por ejemplo, la Cuenca Orca en el Golfo de México abarca 400 km² y contiene una capa hipersalina de aproximadamente 200 metros de espesor a una profundidad de 2.4 km. (Shokes et al., 1977; DSDP, 1986; NOAA Ocean Exploration, 2019). Las concentraciones de litio en tales charcas, aunque más bajas que las de los salares continentales, pueden alcanzar varios miligramos por litro, lo que representa órdenes de magnitud por encima de los niveles del océano abierto. El desarrollo comercial sigue siendo el desafío mayor, pero la combinación de mayores concentraciones, de la infraestructura marina existente y de una demanda creciente posiciona a las charcas de salmuera en el fondo marino como un candidato serio para la exploración futura.

Como se describió anteriormente, la minería de roca dura sigue siendo la base para una producción rápida, pero de alto costo energético, económico y ambiental. Los salares dominan las operaciones de gran escala y de bajo costo. Las salmueras geotérmicas y petroleras están emergiendo, aprovechando la infraestructura existente. Las arcillas siguen siendo una incógnita técnica. Las salmueras marinas representan una perspectiva a largo plazo, dependiente de umbrales económicos y la madurez de la tecnología. Cada fuente conlleva compensaciones en términos de costo, escalabilidad e impacto ambiental. Pero el cambio en marcha es claro: a medida que evolucionan las tecnologías de extracción, el desarrollo del litio se está trasladando de los sólidos a los líquidos, en desierto, planta de energía, campo petrolero u océano, donde la escalabilidad y el menor impacto ambiental puedan alinearse con las necesidades de suministro.

1.1. Litio con futuro: ¿qué lo hace realmente explotable?

Históricamente, los proyectos viables de salmuera de litio requerían concentraciones superiores a 50 mg/L (ILiA, 2024; Schenker et al., 2024). Los salares de alta calidad, como los del Triángulo del Litio en América del Sur, a menudo superan los 1,000 mg/L. Las expectativas están cambiando (NREL, 2021; S&P Global, 2024), las tecnologías de extracción directa de litio prometen reducir el umbral para la recuperación económica a tan solo 10–50 mg/L. Este cambio podría desbloquear vastos recursos como las salmueras Smackover (150–500 mg/L) y ciertos fluidos geotérmicos. A medida que avanzan las tecnologías de extracción, el umbral de viabilidad continúa disminuyendo. Por ejemplo; en las salmueras profundas del Golfo, donde 5 mg/L alguna vez fue desestimado, ¿cuánto tiempo tardará en convertirse en un objetivo viable? En todos los casos, evaluar el potencial económico de un recurso de salmuera depende de una cuantificación precisa del litio, desde la exploración inicial hasta la optimización de la producción. La detección debe avanzar al ritmo de las tecnologías de extracción, ya que los análisis de laboratorio para validar la pureza de los minerales generan meses de retraso en puntos de

decisión críticos, como, por ejemplo: en proyectos de salares, geotérmicos, petroleros, marinos y de extracción de litio.

1.2 Precisión a prueba: láser vs laboratorio en la detección de litio

La medición tradicional de litio se basa en técnicas de laboratorio centralizadas, como la espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) o la espectroscopía de absorción atómica por llama. Estos tres métodos requieren la recolección de muestras, su conservación, su envío y una química húmeda extensa, lo que ocasiona retrasos de semanas o meses entre el muestreo y la entrega del resultado. Los costos operativos y de oportunidad de este retraso son significativos, especialmente a medida que se acelera el desarrollo de los recursos. Técnicas de campo como la fluorescencia de rayos X (XRF) portátil ofrecen lecturas más rápidas, pero están limitadas por la física de los elementos de bajo número atómico (EPA, 2007; Thermo Fisher, 2024). Cerrar estas brechas requiere una tecnología de sensado diseñada para la velocidad, la precisión y el alcance. Ahí es donde entra en juego la espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS). Al generar emisiones de plasma que captan directamente las emisiones de toda la tabla periódica, LIBS proporciona mediciones de litio en tiempo real, sin las dependencias ni los retrasos de los métodos tradicionales. Las primeras aplicaciones de LIBS se centraron en sólidos. Aplicar LIBS a líquidos fue un desafío técnico, el salpicado, el acoplamiento óptico variable y la corta vida útil del plasma en el agua dificultaban las mediciones cuantitativas. Pero han llegado avances, recientes mejoras han mitigado estos problemas, con técnicas como configuraciones de doble pulso y sistemas especiales de inyección Venturi (Jin et al., 2024; Erbetta et al., 2024). Las unidades LIBS portátiles comerciales han demostrado la detección de litio en salmueras a ~5 ppm mediante adquisiciones de un solo punto en condiciones controladas, ya que utilizan un pequeño accesorio líquido para acoplar la salmuera al láser. Es magia técnica convertida en rutina: un pulso láser, una ráfaga de luz y un número en la pantalla, todo en un parpadeo.

2. Metodología

2.1. Sensado imposible: ingeniería LIBS para las nuevas fronteras del litio

Los dispositivos LIBS portátiles han demostrado que el litio puede medirse en salmueras, pero sus límites de detección, estabilidad y precisión quedan por debajo de lo que toleraría una operación industrial de salmuera. Sus diseños priorizan la portabilidad y el análisis de sólidos, lo que limita su estabilidad y precisión en condiciones de producción. Esto refleja una realidad más amplia: LIBS debe ser rediseñado con un propósito específico. Los sistemas de propósito general adaptados a tareas especializadas comprometen la precisión, la confiabilidad y la escalabilidad.

Por eso, este documento marca un punto de inflexión. Hemos desarrollado una plataforma LIBS (Figura 2) construida específicamente para la cuantificación directa de litio en salmueras en flujo y que ya ha sido probada en el fondo oceánico (Yanchilina A.G. et al. 2024). La misma arquitectura óptica y de sensado se ha validado en escenarios industriales de alta fidelidad, incluyendo el monitoreo de la captura de carbono en sistemas de desalinización y el aseguramiento de la calidad del agua en la Estación Espacial Internacional. El avance se debe al control preciso de la formación del plasma en líquidos cargados de

minerales en movimiento. Primero, la duración del pulso láser se ajusta finamente para equilibrar la estabilidad del plasma y minimizar el salpicado de la muestra. Demasiado corto, y el plasma colapsa antes de emitir una señal legible. Demasiado largo, y el daño térmico degrada la medición. Luego, la sincronización del láser con el detector se calibra con nanosegundos de precisión. Capturar la emisión exactamente con el retraso adecuado después del destello del plasma, marca la diferencia entre un fondo ruidoso y una señal de litio limpia y nítida. Finalmente, la geometría del fluido se diseña para evitar la formación de burbujas y la cavitación. Así, la plataforma logra mediciones continuas de litio en tiempo real en condiciones de flujo operativo, sin preparación de muestras ni alteración química. El sistema está en el Nivel de Madurez Tecnológica (TRL-6), con validación en condiciones industriales simuladas.



Figura 2: Equipo portátil de LIBS de desarrollo propio para mediciones en fluidos.

2.2 ¿qué hemos demostrado?

El sistema LIBS construido por la empresa Impossible Sensing (USA) en colaboración con el Grupo Interdisciplinario de Ciencia e Investigación Aplicada del Estado de Hidalgo, ha demostrado la cuantificación directa y en tiempo real de litio en salmueras, igualando los estándares de laboratorio con una centésima parte del costo, tiempo y complejidad operativa. El sistema integra un láser de 1064 nm, a 20 Hz y 20 mJ/pulso, con una matriz de espectrómetros de alta resolución de seis canales que cubre longitudes de onda desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo cercano. La generación de plasma está optimizada para interfaces líquidas, y la integración del espectrómetro maximiza la detección de emisión en presencia de litio. Las pruebas emplearon una celda capilar de flujo continuo, introduciendo salmuera fresca a través del sendero del láser, sin turbulencia ni alteraciones químicas. El diseño permite una integración sencilla en líneas de producción de 1 a 3 pulgadas, sin requerir alteraciones químicas ni interrupción del flujo, preservando la química nativa de la salmuera durante la medición. Las muestras de calibración abarcaban concentraciones de cloruro de litio de 30 a 1300 ppm, cubriendo regímenes de salmuera de grado residual hasta de alto grado en diez pasos incrementales, con adquisiciones de cinco segundos (~100 espectros por muestra), lo que permitió un promedio estadístico robusto. Se utilizó una matriz compuesta por 90 % de agua y 10 % de aceite mineral con surfactante, simulando la dispersión óptica y la viscosidad en salmueras operativas. La calibración resultante mostró valores de R^2 en la validación cruzada superiores a 0.98 (Figura 3). No se requirió dilución, química húmeda ni estabilización de muestras. La velocidad de

adquisición y el diseño del sistema permiten una integración perfecta en operaciones de campo con un costo completamente asequible y amortizable entre miles de muestras. El rango de concentración se seleccionó para satisfacer las necesidades operativas, no para la conveniencia estadística. La plataforma proporciona una cuantificación precisa a partir de 30 ppm, cubriendo los niveles actuales de salmueras minables y anticipando umbrales más bajos a medida que avanzan las tecnologías de detección directa de litio. La confiabilidad de la calibración se basa en la amplia dispersión de las concentraciones, la alta densidad espectral por punto y la validación estadística rigurosa. La fortaleza del modelo proviene de la calidad y estructura de los datos, no del número de puntos.

Mejor desempeño del modelo ($R^2 = 0.9820$)

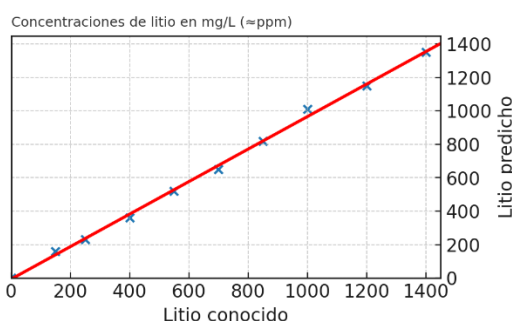


Figura 3: Desempeño del modelo de cuantificación de Li en salmueras (mg/L $\approx$ ppm). Dispersión de Li conocido–predicho y ajuste lineal ($R^2 = 0.9820$), con adquisición rápida (~ 5 s) y promedio espectral.

2.3 Tras la huella de la curva: así construimos la calibración

El modelo de calibración se construyó mediante una ingeniería de datos rigurosa en cada etapa. Los espectros en bruto se procesaron primero mediante la sustracción de la línea base para eliminar la emisión continua del plasma y el ruido del detector. Se aplicó un desenfoque selectivo que preservó las características de emisión reales sin distorsionar la estructura espectral. La extracción de características generó más de cien variables físicamente fundamentadas, incluyendo intensidades máximas absolutas, áreas integradas y proporciones entre las líneas de emisión de litio, hidrógeno, sodio y potasio. La ingeniería de características se impulsó por principios físicos y químicos. Las variables reflejaron los efectos de la temperatura del plasma, de la abundancia elemental y de las estrategias de normalización basadas en líneas de referencia estables. No se permitió la selección aleatoria de características; cada característica candidata tenía una base física interpretable para evitar anomalías estadísticas, sobreajuste y predicciones falsas (Molina M. et al., 2025; Shabbir et al., 2022). El entrenamiento del modelo exploró aproximadamente 4,000 modelos candidatos mediante la selección de un subespacio aleatorio. Cada modelo se evaluó utilizando validación cruzada por exclusión de un elemento (leave-one-out cross-validation LOO-CV), estructurada de manera que en cada iteración se retuvieran todos los datos de un solo punto de concentración. Esto garantizó que el modelo se entrenara sin exposición a ninguna muestra del valor de ppm retenido, proporcionando una prueba estricta de generalización e inmediatamente revelando cualquier sobreajuste. Para preservar aún más la interpretabilidad y evitar el sobreajuste, los conjuntos de características se limitaron a un máximo de 10 variables físicamente fundamentadas. El modelo más fuerte surgió de un conjunto de características enfocado en

variables centradas en litio y normalizaciones internas fundamentadas físicamente:

- Áreas integradas de regiones moleculares y atómicas de emisión característica
- Proporciones de intensidad entre líneas espectrales de litio y de referencia
- Comparaciones relativas entre emisiones de litio en diferentes regiones espectrales
- Medidas directas de intensidades de líneas clave de litio
- Normalización interna usando características de emisión de fondo estables

Esta estructura preservó tanto la información de concentración elemental como el comportamiento del plasma dentro del modelo predictivo, los residuos cruzadamente validados se alinearon con los límites teóricos establecidos por la variabilidad de emisión del plasma y la resolución del espectrómetro. El tamaño efectivo de la muestra se amplió, registrándose aproximadamente cien eventos de plasma independientes por punto de concentración, lo que generó un conjunto de datos de suficiente peso estadístico sin sacrificar la velocidad operativa. Los puntos de calibración se espaciaron deliberadamente a lo largo del rango de concentración económicamente relevante, en lugar de agruparse, lo que asegura la generalidad del modelo frente al sesgo de interpolación. El proceso de modelado se basó en el principio de que el poder predictivo debe reflejar el comportamiento físico, no la coincidencia estadística. Los modelos que respetaban la física del plasma funcionaron de manera confiable; los que se desviaban colapsaban durante la validación. La curva de calibración resultante es robusta frente a las condiciones de flujo, las variaciones de la matriz y las perturbaciones operativas. Es un sistema predictivo diseñado para las necesidades reales, no para la idealización de laboratorio.

2.3 ¿Qué implica todo esto?

La cuantificación LIBS desplegable en los campos de litio transforma los flujos de trabajo del desarrollo de recursos. La exploración de salares (Figura 4) permite un mapeo directo en campo del litio de alta densidad, lo que apoya el modelado dinámico de recursos y la priorización de nuevos sitios de extracción. En operaciones geotérmicas, proporciona retroalimentación en tiempo real sobre las concentraciones de litio en los fluidos producidos, lo que permite optimizar de forma continua los sistemas de extracción directa de litio y gestionar los yacimientos. En entornos petroleros, permite el cribado rápido de corrientes de agua producidas para evaluar su potencial de litio, identificando nuevas corrientes de valor a partir de la infraestructura existente. Y en entornos de aguas profundas, permite el mapeo químico en tiempo real de lagos de salmuera sobre domos salinos, lo que apoya la evaluación de recursos de litio antes inaccesibles (CEC, 2024; DOE, 2023; Standard Lithium, 2025; Shokes et al., 1977; DSDP, 1986).

Los conceptos de extracción directa de litio de bucle cerrado, que extraen iones de litio y devuelven los fluidos agotados a la charca de salmuera, constituyen una vía de extracción de bajo impacto. La salinidad extrema de estos entornos excluye naturalmente la vida biológica, minimizando la alteración ecológica. Quizás el hecho más importante es que la plataforma LIBS demostrada aquí es modular por diseño.



Figura 4: Equipo LIBS portátil realizando mediciones en salares de Utah.

Con los desafíos fundamentales de adaptación al propósito, el sistema ahora se escala horizontalmente a través de cuencas de salares, campos geotérmicos, pozos petroleros y operaciones mar adentro, con solo ajustes menores en la integración del flujo y de los parámetros operativos. El hardware de sensado central permanece constante, y, críticamente, también lo hace el marco de análisis de datos. La ingeniería de características y el modelado predictivo están diseñados para extenderse a nuevas condiciones químicas de las salmueras sin necesidad de reconstruir el sistema. Esta capacidad de ajuste no es una adaptación; es una característica integrada en la arquitectura. Posiciona la plataforma para apoyar múltiples fronteras de litio simultáneamente, fortaleciendo la resiliencia de la cadena de suministro y acelerando la transición de la exploración a la producción dondequiera que se encuentren los recursos basados en litio.

3. Perspectivas nacionales

3.1 Un giro profundo en la política: ¿estamos listos para el litio marino?

En abril de 2025, se emitió una Orden Ejecutiva de Estados Unidos (EO 14285). Se solicitó el mapeo, la evaluación y el desarrollo responsable acelerado de recursos minerales del lecho marino dentro de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de ese país. Se instruyó a las agencias que agilizaran los permisos, coordinaran esfuerzos interagenciales y demostraran tecnologías que minimizaran el impacto ambiental. El mensaje es claro: “Muéstranos que los minerales críticos pueden obtenerse del océano de manera responsable, y apoyaremos el desarrollo.” Las charcas de salmuera de aguas profundas, como las que se encuentran sobre domos salinos del Golfo de México, encajan directamente dentro de este nuevo mandato estratégico. A diferencia de los nódulos polimetálicos o de las vetas hidrotermales, las charcas hipersalinas excluyen naturalmente la vida biológica, lo que elimina preocupaciones ecológicas. Las concentraciones de litio, aunque más bajas que las de los salares continentales, son órdenes de magnitud más altas que las del agua de mar, y ya existe infraestructura para operar de manera confiable a estas profundidades. Los requisitos de sensado esbozados en la Orden Ejecutiva (monitoreo químico en tiempo real, mínima alteración del lecho marino y resiliencia operativa) no constituyen objetivos futuros (NOAA Ocean Exploration, 2019; CRS, 2025); son capacidades estratégicas y multidisciplinarias que Impossible Sensing en colaboración con el Grupo Interdisciplinario de Ciencia e Investigación Aplicada del Estado de Hidalgo, ya han demostrado a través de despliegues probados en aguas profundas. Lo que se necesita ahora no es invención, sino aplicación. Con sensado LIBS en tiempo real, los conceptos de extracción submarina directa de litio ofrecen una vía clara hacia la extracción del mineral de bajo impacto y alineada con los estándares de

política emergentes. La tecnología, la infraestructura y el motivo ya están en su lugar, avanzar en el litio de aguas profundas ya no es especulativo; es una extensión estratégica y técnicamente fundamentada de una plataforma que ya opera en las fronteras.

3.2 ¿Qué sigue?

Los próximos pasos inmediatos incluyen extender la calibración a salmueras del mundo real, salares, áreas geotérmicas, petroleras y marinas. Los flujos de trabajo de ciencia de datos ampliarán la ingeniería de características y el refinamiento del modelo mediante nuevas matrices, sin reentrenar la arquitectura de sensado. El objetivo es simple: lograr una mayor precisión en la cuantificación de litio de grado de campo a través del rango completo de salmueras comerciales y estratégicamente relevantes. Los despliegues piloto integrarán la plataforma LIBS a lo largo de la cadena de valor del litio, desde cuencas de salares hasta campos geotérmicos, campos petroleros y operaciones mar adentro (CEC, 2024; DOE, 2023; LBNL, 2023). El sistema ya está diseñado para entornos remotos y robustos, validado a través de campañas de campo en minería, agricultura, monitoreo, y durante más de una década en el planeta Marte, donde operamos LIBS bajo las condiciones más duras conocidas. Su integración modular de flujo, diseño probado en campo, visualización en tiempo real y transmisión de datos adaptable apoyan un despliegue rápido con una modificación mínima específica del sitio. Impossible Sensing aporta no solo tecnología, sino también experiencia probada en despliegue industrial. Proyectos petroleros anteriores (Wright B. 2023), incluyendo la medición en tiempo real del flujo multifásico bajo condiciones de alta presión y alta variabilidad, han demostrado la capacidad de integrar y comercializar sensores ópticos avanzados en flujos de producción sin comprometer el tiempo de actividad ni la seguridad. La ruta es clara: calibrar en salmueras reales, validar el rendimiento predictivo en condiciones operativas y desplegar a gran escala para el mapeo de litio en tiempo real y la optimización de la producción.

3.3 litio mexicano: de recurso crítico a prioridad nacional

En este contexto de acelerada demanda global y evolución tecnológica en la detección de litio, las mayores reservas de Litio están en América Latina, México está entre los 10 países con mayores reservas a nivel mundial (Figura 5), aun cuando nuestro país está dentro de ese privilegiado grupo a nivel de Estados Unidos de Norteamérica, no se le incluye por sus reservas en salmueras, de aquí la necesidad de que México explore activamente nuevas fuentes de este mineral, se vuelve imperativa (USGS, 2025; Reuters, 2022; Mexico Business News, 2023; Aenert, 2025). La transición energética global, impulsada por la electrificación del transporte y el crecimiento de las energías renovables, ha situado al litio en el centro de las cadenas de valor estratégicas del siglo XXI.

México posee un potencial geológico considerable, aunque distinto del de los salares sudamericanos. Las principales oportunidades se concentran en yacimientos de arcillas litíferas, como los identificados en Bacadéhuachi, Sonora, así como en salmueras geotérmicas y petroleras distribuidas en varias regiones del país. Aunque México no cuenta con salares continentales de alta concentración como el Salar de Atacama en Chile o el Hombre Muerto en Argentina, las cuencas endorreicas del norte y noroeste, junto con los ambientes geotérmicos activos, representan oportunidades emergentes que deben evaluarse mediante tecnologías de punta.

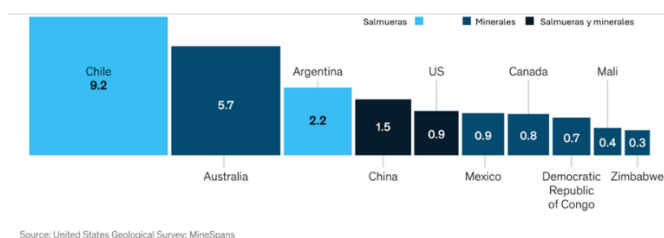


Figura 5: Los 10 países con las reservas más grandes de litio, millones de toneladas métricas

La aplicación de herramientas avanzadas como la espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS), desarrollada por Impossible Sensing y el Grupo Interdisciplinario de Ciencia e Investigación Aplicada del Estado de Hidalgo, ofrece una nueva capacidad para realizar análisis en tiempo real directamente en el campo. Esta tecnología permite detectar litio y otros elementos clave de forma rápida y precisa, con una logística mucho más ágil que en los métodos tradicionales de laboratorio. El uso de LIBS representa una disrupción en la forma de hacer prospección minera, permitiendo acelerar los ciclos de exploración, reducir riesgos y tomar decisiones más informadas en etapas tempranas del desarrollo de un proyecto (Molina M. et al., 2025; Fraunhofer IPM, 2025; White House, 2025).

Sin embargo, el avance tecnológico por sí solo no es suficiente. Para transformar este potencial geológico en riqueza tangible, el sector político debe asumir un papel activo y visionario. Es fundamental que el Estado mexicano, a través de sus instituciones gubernamentales, defina una estrategia nacional clara para la exploración y el aprovechamiento del litio, basada en la evidencia científica, la colaboración con centros de investigación y el impulso a las startups tecnológicas. Esta colaboración entre instituciones especializadas y tecnología de vanguardia no solo acelera la exploración, sino que también fortalece la soberanía tecnológica y energética del país, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con la transición energética.

Esto implica generar políticas públicas que promuevan la identificación, caracterización y valorización de nuevos depósitos, establecer mecanismos de financiamiento para proyectos en etapa temprana, crear un marco regulatorio que brinde certeza a inversionistas responsables y, sobre todo, garantizar que la explotación de estos recursos se realice con criterios de sustentabilidad, inclusión social y soberanía tecnológica (ILiA, 2024; Vera et al., 2023).

México está en una posición única para construir una cadena de valor nacional del litio que no se limite a la extracción, sino que abarque desde la investigación científica hasta la manufactura de baterías, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. Adoptar tecnologías de análisis en tiempo real, como LIBS, no solo fortalece esta visión, sino que también otorga al país una ventaja competitiva en el nuevo orden energético global.

El momento actual exige voluntad política, coordinación interinstitucional y visión de largo plazo. Solo así, México podrá asegurar su participación activa en la economía del futuro, diversificar su matriz productiva y reducir su dependencia de fuentes internacionalmente concentradas, convirtiendo su potencial mineralógico en un verdadero motor de desarrollo sostenible y transformación tecnológica.

4. Conclusión

El objetivo se mantiene claro: obtener datos de litio de calidad suficiente para la toma de decisiones, a la misma velocidad con que se realizan las operaciones, sin depender de laboratorios centrales ni de análisis demorados.

Con esta base, la tecnología LIBS permite identificar recursos más rápidamente, gestionar de forma dinámica los yacimientos y acelerar la transición del descubrimiento a la producción, sin depender de laboratorios centralizados ni de análisis retrasados.

El panorama finalmente comienza a alinearse: el sensado en tiempo real, las tecnologías avanzadas de extracción y una política clara de impulso estratégico están convergiendo para superar los cuellos de botella que separaban el potencial del suministro efectivo. El litio deja de estar atado a los tiempos del laboratorio o a los límites de la exploración tradicional. Ahora existe allí donde el flujo puede medirse, el valor puede calcularse y la extracción puede optimizarse. El futuro del litio es el flujo mismo: un recurso detectado con mayor rapidez, escalado con mayor amplitud y asegurado con visión estratégica, garantizando la resiliencia energética y tecnológica del mañana.

Agradecimientos

G. Luis Raya agradece al Consejo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Hidalgo (CITNOVA) y al Gobierno del Estado de Hidalgo por el otorgamiento de la beca posdoctoral.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Aenert (2025). Lithium resources—world map (2025). AENERT, Kyiv.
- American Society of International Law (ASIL), (2025). On the possibility of authorizing seabed mining in ABNJ after EO 14285. ASIL Insights 29(9).
- AP News, (2023). Mexico in talks with mining companies about lithium. AP News, Jan 2023.
- Bouma, A. H., Shipboard Scientific Party, (1986). Site 618—Orca Basin. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project 96, 429–444.
- California Energy Commission; Nagar, A., Ventura, S., Bhamidi, S., Hombostel, M., (2024). Pilot-Scale Recovery of Lithium from Geothermal Brines. CEC-500-2024-020.
- California Energy Commission, (2025). EPIC 2024 Annual Report (incl. EPC-19-017 lithium recovery). CEC, Sacramento, CA.
- CME Group, (2025). Lithium Carbonate CIF CJK (Fastmarkets). CME, Chicago.
- Congressional Research Service, (2025). Critical Mineral Resources: National Policy and Recent Developments (R47982). CRS, Washington, D.C.
- Congressional Research Service, (2025). Critical Minerals on the U.S. Outer Continental Shelf (R48302). CRS, Washington, D.C.
- DOE EERE—GTO, (2024). The Drill Down GTO highlights (Newsletter, Jan 17, 2024). DOE, Washington, D.C.

- ECLAC/CEPAL, (2024). Critical minerals for the energy transition and electromobility opportunities. CEPAL, Santiago.
- EnergyX, (2025). Lithium prices in Q2-2025: Market snapshot. EnergyX Blog, May 30, 2025.
- Erbetta, N., Puebla, G., Day, D., Jennings, M., Loureiro, A., Green, C., Gallardo, L., Quiroz, W., (2024). Direct determination of lithium in brine samples using handheld LIBS without sample treatment: Venturi introduction. *Analytical Methods* 16, 7311–7321. <https://doi.org/10.1039/D3AY02025H>
- Fastmarkets (2025). Lithium carbonate prices methodology and daily assessments (MB-LI-0029). Fastmarkets, London.
- Federal Register, (2025). Unleashing America's Offshore Critical Minerals and Resources (EO 14285). 90 FR 17735–17738.
- Fraunhofer IPM, (2025). Innovative measurement technology for efficient lithium extraction using LIBS (LiVision). Press release.
- Gallagher, S. M., et al., (2025). Battery-Grade Lithium Materials: Virgin Production and Recycling, a Techno-Economic Comparison. *Advanced Energy Materials*, <https://doi.org/10.1002/aenm.202501813>.
- ICE, (2025). Battery Materials Outright — Lithium Carbonate CIF CJK (Fastmarkets) Future. ICE, London.
- Yanchilina A. G., L. E. Rodriguez, R. Price, L. M. Barge, and P. Sobron (2024). Sensing remote realms of the deep ocean on Earth—and beyond, *Eos*, 105, <https://doi.org/10.1029/2024EO240375>. Published on 29 August 2024. International Energy Agency (IEA), (2024). Global Critical Minerals Outlook 2024. IEA, Paris.
- International Lithium Association (ILiA), (2024). Direct Lithium Extraction (DLE): An Introduction. ILiA, London.
- International Lithium Association (ILiA), (2024). The Lithium Voice—Special Edition 2024. ILiA, London.
- International Seabed Authority (ISA), (2025). SG Statement on the U.S. EO 14285. ISA, Kingston.
- Jin, X., Gu, T., Zhan, Y., (2024). A review: experimental and applied research of double-pulse LIBS. *Applied Spectroscopy Reviews* 59(9), 1–44. <https://doi.org/10.1080/05704928.2024.2320146>.
- Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL); Dobson, P., et al., (2023). Characterizing the Geothermal Lithium Resource at the Salton Sea. LBNL, Berkeley, CA.
- Lithium Future, (2025). Global lithium deposit map (online resource). LithiumFuture.org.
- Mexico Business News; Dilge, K., (2023). Mexican lithium production remains stagnant despite demand. MBN, Mexico City.
- Molina M., J., Sarchi, C., Tesio, A. Y., Costa-Vera, C., Díaz Pace, D. M., (2025). Quantitative Analysis of Lithium in Natural Brines by LIBS. *Atoms* 13, 56. <https://doi.org/10.3390/atoms13060056>
- Morozov, N. P., (1968). Lithium and rubidium concentrations in waters of seas and oceans (dataset). PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.753510>
- NOAA Ocean Exploration, (2019). The Orca Basin: Hypersaline, Anoxic Brine Pool of the Gulf of Mexico. NOAA, Silver Spring, MD.
- Reuters; Valencia, A., (2022). Lithium experts skeptical on success of Mexico's state-run miner. Aug 26, 2022.
- Reuters, (2022). Changes to Mexico mining law set to nationalize lithium resources. Apr 18, 2022.
- Reuters, (2024). Mexico to seek deal over disputed mining concession with Chinese lithium firm. Jun 27, 2024.
- Schenker, V., Bayer, P., Oberschelp, C., Pfister, S., (2024). Is lithium from geothermal brines the sustainable solution for Li-ion batteries? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 144456. doi.org/10.1016/j.rser.2024.114456
- SciAps Inc., (2022). Z-9 Liquidator for Rapid Multi-Element Analysis of Lithium Brines (Application Note). SciAps, Boston, MA.
- chlatter, N., & Lottermoser, B. G. (2024). Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Applied to Elemental Analysis of Aqueous Solutions—A Comprehensive Review. *Spectroscopy Journal*, 2(1), 1-32. <https://doi.org/10.3390/spectroscj2010001>
- Skočovská K, Novotný J, Prochazka D, Pořízka P, Novotný K, Kaiser J. (2016) Optimization of liquid jet system for laser-induced breakdown spectroscopy analysis. *Rev Sci Instrum.* 87(4):043116. <https://doi.org/10.1063/1.4947233>
- Shokes, R. F., Trabant, P. K., Presley, B. J., Reid, D. F., (1977). Anoxic, hypersaline basin in the northern Gulf of Mexico. *Science* 196, 1443–1446. <https://doi.org/10.1126/science.196.4297.1443>
- Standard Lithium Ltd., (2025). Investor Presentation: The Future of Lithium in North America (Sept 3, 2025). Standard Lithium, Vancouver.
- ThinkGeoEnergy, (2023). Fraunhofer IPM developing in-line sensor for geothermal lithium extraction. ThinkGeoEnergy, Mar 7.
- Trading Economics, (2025). Lithium price chart and history. Trading Economics, New York.
- The White House, (2025). Executive Order 14285 Unleashing America's Offshore Critical Minerals and Resources (April 24,). The White House, Washington, D.C.
- U.S. BOEM, (2025). Executive Orders & Secretary's Orders Offshore Critical Minerals. BOEM, Washington, D.C.
- U.S. Department of Energy, Geothermal Technologies Office, (2023). Improved Quantification of Lithium Resources in the Salton Sea Region Fact Sheet. DOE/EERE, Washington, D.C.
- U.S. EPA, (2007). SW-846 Method 6200: Field Portable X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry. EPA, Washington, D.C.
- U.S. Geological Survey; Jaskula, B. W., (2025). Lithium. Mineral Commodity Summaries 2025, 110–111. <https://doi.org/10.3133/mcs2025>
- U.S. Government Publishing Office, (2025). 90 FR 17735 EO 14285. GPO, Washington, D.C.
- World Economic Forum; de la Iglesia, R., (2023). Lithium and Latin America are key to the energy transition. WEF, Geneva.
- Wright, B. (2023). Common Ground: The Unique Synergy Between the Oil Field and Aerospace. *Journal of Petroleum Technology*.