# Informe de Validación Técnica: Evaluación Exhaustiva de la Capacidad de Captura, Ciclo de Vida y Viabilidad Económica de Nanoadsorbentes Magnéticos para la Extracción Directa de Litio

## 1. Resumen Ejecutivo y Alcance del Estudio

El presente documento constituye un informe técnico de validación profunda solicitado para evaluar la viabilidad operativa y comercial de sistemas de extracción directa de litio (DLE, por sus siglas en inglés) basados en arquitecturas de nanoadsorbentes funcionalizados, coloquialmente denominados "nanobots". Este análisis responde a la necesidad crítica de verificar dos parámetros fundamentales que determinan el éxito o fracaso de esta tecnología emergente: la capacidad real de captura de iones de litio en entornos de salmuera complejos y la estabilidad estructural a largo plazo (ciclos de vida) de los materiales involucrados.

En el contexto de la transición energética global y la demanda exponencial de baterías de ion-litio, la industria se enfrenta a un cuello de botella en el suministro de materias primas. Los métodos convencionales de evaporación solar, aunque económicos en términos operativos, son insosteniblemente lentos y geográficamente limitados. La tecnología de "nanobots" —definida técnicamente como nanopartículas compuestas de núcleo magnético ($Fe\_3O\_4$) y corteza activa de tamiz iónico ($LiMn\_2O\_4$)— promete revolucionar este paradigma mediante la extracción selectiva y rápida.

Este informe integra datos de ingeniería de materiales, electroquímica y modelos financieros para ofrecer un veredicto holístico. Se examinan los mecanismos fisicoquímicos de la adsorción, cuantificando la eficiencia en miligramos de litio por gramo de adsorbente (mg/g), y se deconstruyen los modos de falla del material, específicamente la disolución de manganeso y la distorsión cristalográfica. Asimismo, se incorpora un análisis económico riguroso que contrasta los costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX) con los métodos tradicionales, validando la hipótesis de que la mayor recuperación y velocidad del DLE compensan su complejidad técnica.

## 2. Contexto Estratégico y Fundamentos de la Extracción Directa de Litio (DLE)

La industria del litio atraviesa una transformación estructural. Históricamente, la producción se ha bifurcado entre la minería de roca dura (espodumena), dominante en Australia, y la extracción de salmueras mediante evaporación solar en el "Triángulo del Litio" (Chile, Argentina, Bolivia). Sin embargo, las proyecciones de demanda para la próxima década, impulsadas por la electrificación del parque automotor global, revelan que la oferta actual es insuficiente. Los estanques de evaporación, con sus tiempos de espera de 12 a 24 meses y tasas de recuperación que rara vez superan el 40-50% 1, no poseen la elasticidad necesaria para responder a los choques de demanda.

La Extracción Directa de Litio (DLE) surge no como una alternativa incremental, sino como un cambio de paradigma. Al utilizar procesos químicos activos en lugar de la evaporación pasiva, el DLE permite desacoplar la producción de litio de las condiciones climáticas y reducir drásticamente la huella física de las operaciones. Dentro del ecosistema DLE, que incluye tecnologías de solventes y membranas, la adsorción mediante tamices iónicos inorgánicos se perfila como la ruta más prometedora debido a su alta selectividad y potencial de bajo consumo energético.

El concepto de "nanobot" en este ámbito no debe confundirse con la robótica autónoma en el sentido de la ciencia ficción. Se refiere más bien a partículas "inteligentes" diseñadas a nanoescala que ejecutan una función programada: navegar en una solución compleja, identificar y capturar selectivamente un objetivo (el ion litio), y responder a un estímulo externo (un campo magnético) para su recuperación. Esta funcionalidad se logra mediante la ingeniería de materiales compuestos, donde cada capa de la nanopartícula cumple una función crítica: el núcleo provee la movilidad magnética, la corteza provee la selectividad química, y los recubrimientos superficiales aseguran la durabilidad y dispersabilidad. La validación de estos sistemas requiere, por tanto, un análisis detallado de cada uno de estos componentes y su interacción sinérgica bajo condiciones operativas reales.

## 3. Arquitectura Fisicoquímica del Nanoadsorbente: Deconstrucción del "Nanobot"

Para validar la capacidad de captura, es imperativo entender primero la naturaleza intrínseca de los materiales que componen estos sistemas. La eficiencia no es una variable abstracta, sino una consecuencia directa de la estructura cristalina y la composición química del adsorbente. El sistema analizado se basa predominantemente en la arquitectura de espinela de litio y manganeso, optimizada para funcionar como un tamiz iónico altamente selectivo.

### 3.1. El Componente Activo: Espinela de Óxido de Litio y Manganeso (**$LiMn\_2O\_4$**)

El corazón funcional del nanoadsorbente es el Óxido de Litio y Manganeso ($LiMn\_2O\_4$ o LMO). Este material es seleccionado casi universalmente en las aplicaciones de adsorción por su estructura cristalina única tipo espinela cúbica (grupo espacial $Fd\bar{3}m$). En esta red tridimensional, los átomos de oxígeno forman un empaquetamiento cúbico compacto, mientras que los cationes de manganeso ($Mn^{3+}$ y $Mn^{4+}$) ocupan los sitios octaédricos (16d), creando un esqueleto robusto de óxido metálico ($[Mn\_2]O\_4$). Los iones de litio, por su parte, residen en los sitios tetraédricos (8a), los cuales están interconectados por canales tridimensionales que permiten una rápida difusión iónica.3

La "inteligencia" de captura de este material reside en su capacidad de memoria iónica. El proceso de síntesis del adsorbente implica una etapa crítica de "impronta" o *template*. Inicialmente, el material se sintetiza en su estado litiado ($LiMn\_2O\_4$), asegurando que la estructura cristalina se forme alrededor de los iones de litio. Posteriormente, el material se somete a un tratamiento ácido (deslitiación), típicamente utilizando ácido clorhídrico ($HCl$) o ácido nítrico, que extrae los iones de litio de la red sin colapsar la estructura de óxido de manganeso. El resultado es una matriz de $\lambda-MnO\_2$ o $HMn\_2O\_4$ que contiene vacantes estructurales (huecos) con la geometría y el tamaño exactos del ion litio original.5

Esta especificidad geométrica es la clave de la validación de la capacidad de captura. El radio iónico del litio es de aproximadamente 0.76 Å. Otros cationes presentes en abundancia en las salmueras, como el sodio ($Na^+$, 1.02 Å) y el potasio ($K^+$, 1.38 Å), son físicamente demasiado grandes para ingresar en los sitios tetraédricos vacantes de la espinela. Por otro lado, iones como el magnesio ($Mg^{2+}$, 0.72 Å), aunque tienen un radio iónico similar, poseen una energía de hidratación significativamente mayor, lo que hace energéticamente desfavorable su deshidratación para entrar en la red cristalina en comparación con el litio.8 Esta combinación de exclusión por tamaño (efecto estérico) y afinidad energética valida teóricamente la alta selectividad del LMO.

### 3.2. El Núcleo Magnético: Funcionalidad de Recuperación

Para transformar un simple polvo adsorbente en un "nanobot" recuperable y procesable en flujo continuo, el LMO se debe anclar a un sustrato manipulable. Aquí entra en juego la magnetita ($Fe\_3O\_4$), un óxido de hierro con propiedades ferrimagnéticas o superparamagnéticas (dependiendo del tamaño de partícula). La integración de un núcleo de magnetita permite que las nanopartículas, una vez dispersas en la salmuera y cargadas con litio, sean separadas instantáneamente del líquido mediante la aplicación de un campo magnético externo.9

Esta capacidad magnética es fundamental para la viabilidad económica y técnica del proceso, ya que elimina la necesidad de etapas de filtración o centrifugación lentas y costosas, y permite el uso de reactores de tanque agitado en lugar de columnas de lecho empacado. Las columnas tradicionales sufren de caídas de presión, canalización y obstrucción por sólidos suspendidos, problemas que se evitan completamente con la suspensión magnética de nanoadsorbentes. Sin embargo, la magnetita es susceptible a la disolución en medios ácidos, lo que presenta un desafío de ingeniería: el núcleo debe estar herméticamente protegido del ácido utilizado para recuperar el litio del LMO.10

### 3.3. Ingeniería de Interfase: Aglutinantes y Recubrimientos

La unión del núcleo magnético y la corteza de LMO, así como la protección del conjunto, requiere materiales auxiliares avanzados. El Fluoruro de Polivinilideno (PVDF) se utiliza ampliamente como aglutinante debido a su excepcional resistencia química y estabilidad electroquímica. El PVDF actúa como una matriz polimérica que mantiene la integridad mecánica del compósito bajo las fuerzas de cizallamiento hidrodinámico en los reactores y la corrosión química durante la elución.11 Adicionalmente, se emplean recubrimientos de sílice ($SiO\_2$) o tratamientos con siliconato de metilo y potasio (PMS) para modificar la hidrofobicidad superficial y crear barreras selectivas que permitan el paso de iones pero protejan el núcleo de hierro.13

## 4. Análisis Crítico de la Capacidad de Captura

La métrica más inmediata para validar estos sistemas es su capacidad gravimétrica: ¿cuánto litio puede extraer realmente un kilogramo de nanobots? El análisis de la literatura y los datos experimentales revela una distinción crucial entre la capacidad teórica máxima y la capacidad operativa sostenible.

### 4.1. Límites Teóricos y Realidad Experimental

La capacidad teórica del $LiMn\_2O\_4$, basada en la extracción completa de un mol de litio por fórmula unidad, es de aproximadamente **148 mAh/g** en términos de carga eléctrica, lo que equivale a una capacidad de adsorción de masa de aproximadamente **40-42 mg de Li por gramo de adsorbente** (mg/g).4 En condiciones de laboratorio controladas, utilizando soluciones sintéticas de cloruro de litio puro, los materiales optimizados se acercan a este límite, reportando capacidades de adsorción en el rango de **30 a 40 mg/g**.8

Sin embargo, la validación en condiciones reales de operación DLE muestra un panorama más matizado. Las salmueras naturales son matrices químicas complejas con altas fuerzas iónicas y competidores. En pruebas realizadas con salmueras sintéticas representativas de yacimientos petrolíferos y fuentes geotérmicas, la capacidad de adsorción efectiva suele situarse en el rango de **20 a 27 mg/g**.6 Algunos estudios avanzados que utilizan membranas compuestas de óxido de grafeno y LMO han logrado mantener capacidades altas de hasta **37.5 mg/g** incluso en presencia de interferentes 8, pero el consenso industrial para el diseño de procesos se sitúa conservadoramente entre **20 y 30 mg/g**.

Es fundamental destacar que esta reducción respecto al teórico no invalida la tecnología. Incluso una capacidad de 20 mg/g es económicamente viable dado que el proceso es cíclico y rápido. A diferencia de los estanques que operan una sola vez en meses, estos nanobots pueden realizar múltiples ciclos de captura y liberación por día.

### 4.2. Selectividad y Factores de Separación

La verdadera prueba de fuego para la capacidad de captura no es la cantidad absoluta de litio adsorbido, sino la pureza de esa extracción. Los datos validan una selectividad excepcional del LMO frente a sus principales competidores: Sodio ($Na^+$) y Magnesio ($Mg^{2+}$).

Los estudios de isotermas de adsorción (modelados frecuentemente bajo las ecuaciones de Langmuir) demuestran que la afinidad del adsorbente por el litio es órdenes de magnitud superior a la de otros cationes. En experimentos con una relación molar inicial Na:Li de 227:1 en la alimentación, el proceso de separación logró producir una solución concentrada con una relación Na:Li de apenas 2.9:1 en un solo ciclo.16 Esto implica un factor de separación masivo que simplifica enormemente las etapas posteriores de purificación para alcanzar el grado batería (99.5%+ pureza). La adsorción de iones como el potasio ($K^+$) es prácticamente nula (0 mg/g reportado en algunos casos), lo que confirma la eficacia del mecanismo de tamizado por tamaño de poro.16

El magnesio sigue siendo el interferente más tenaz. Aunque el LMO prefiere termodinámicamente al litio, altas concentraciones de Mg pueden bloquear cinéticamente los poros o competir por sitios superficiales. Sin embargo, los factores de separación Li/Mg reportados siguen siendo suficientes para procesar salmueras con relaciones Mg/Li moderadas (hasta 20:1 o 30:1) que serían intratables mediante evaporación convencional sin un costoso pretratamiento de encalado.6

## 5. Validación de Ciclos de Vida y Estabilidad Estructural

Si la capacidad de captura determina los ingresos potenciales (cuánto producto se genera), el ciclo de vida del adsorbente determina los costos operativos a largo plazo (cuán a menudo debe reemplazarse el material). Este es el aspecto técnico más crítico y desafiante de la tecnología de nanobots LMO.

### 5.1. Mecanismos de Degradación: El "Talón de Aquiles" del Manganeso

El análisis de los datos revela dos mecanismos primarios que limitan la vida útil de estos materiales: la disolución química del manganeso y la fatiga estructural mecánica.

Disolución de Manganeso (Chemical Fade):

El proceso de recuperación del litio capturado (elución) requiere exponer al adsorbente cargado a un medio ácido (típicamente $HCl$). En este entorno, y especialmente si el estado de oxidación del manganeso no se controla perfectamente, ocurre una reacción de disproporción del manganeso trivalente ($Mn^{3+}$):

$$2Mn^{3+}\_{(s)} \rightarrow Mn^{4+}\_{(s)} + Mn^{2+}\_{(aq)}$$

El ion $Mn^{4+}$ permanece estable en la red sólida, pero el $Mn^{2+}$ es soluble y se lixivia hacia la solución ácida. Esto representa una pérdida irreversible de material activo. En materiales LMO de primera generación o no optimizados, se han documentado tasas de pérdida de manganeso catastróficas, llegando hasta un 5.8% de la masa total en los primeros ciclos.3 A esta tasa, el adsorbente perdería su funcionalidad operativa en menos de 20 ciclos, haciendo inviable el proceso.

Efecto Jahn-Teller y Fatiga Mecánica:

Además de la disolución química, la estructura cristalina sufre estrés físico. El ion $Mn^{3+}$ es un ion Jahn-Teller activo, lo que significa que induce una distorsión geométrica en los octaedros de oxígeno circundantes para reducir su energía electrónica. Esta distorsión provoca una transición de fase local de simetría cúbica a tetragonal durante el ciclo de carga/descarga (inserción/extracción de Li). Aunque el cambio de volumen global es pequeño, la acumulación de estrés anisotrópico genera microgrietas en las nanopartículas, pulverizando el material y exponiendo nuevas superficies al ataque ácido.17

### 5.2. Estrategias de Ingeniería y Datos de Longevidad

La industria y la academia han respondido a estos desafíos con estrategias de ingeniería de materiales que han mejorado drásticamente la estabilidad, validando la viabilidad de ciclos de vida extendidos.

* **Dopaje Estructural:** La sustitución parcial de manganeso por otros cationes metálicos como el magnesio ($Mg$), aluminio ($Al$) o titanio ($Ti$) estabiliza la estructura cristalina y suprime la disproporción del $Mn^{3+}$. Los datos muestran que el dopaje con magnesio (en una relación molar Mg/Mn de 0.33) reduce la disolución de manganeso de un 5.8% a aproximadamente un **1.0%** inicial, estabilizándose posteriormente en una tasa de pérdida de **~0.25% por ciclo**.3 Similarmente, la sustitución con titanio ha demostrado reducir la disolución en los primeros ciclos de 5.6% a **1.8%**.7
* **Recubrimientos Protectores:** La encapsulación de los nanobots es otra línea de defensa validada. El recubrimiento con matrices porosas de sílice ($LMO@SiO\_2$) o el uso de aglutinantes hidrofóbicos modificados crea una barrera física que permite el paso de iones de litio solvatados pero retarda la difusión de protones ácidos hacia la superficie del manganeso. Estudios de flujo continuo con adsorbentes recubiertos de sílice reportan una tasa de disolución de manganeso constante y controlada de **1.26% por ciclo** durante más de 50 ciclos, manteniendo una capacidad de carga estable.14 Aunque 1.26% sigue siendo alto para una aplicación industrial de miles de ciclos, representa una mejora significativa que, combinada con el dopaje, apunta hacia la viabilidad.
* **Tecnologías de Intercambio Iónico de Nueva Generación:** Empresas líderes en DLE, como Lilac Solutions, afirman haber superado las limitaciones de los polvos LMO tradicionales mediante el desarrollo de medios de intercambio iónico (IX) cerámicos patentados (Gen 3 y Gen 4). Estos materiales reportan una durabilidad extrema, soportando miles de ciclos con una degradación mínima, lo que permite proyectar vidas útiles de "meses a años" en lugar de días, resolviendo efectivamente el problema de la reposición frecuente de adsorbente.18

### 5.3. Proyección de Vida Útil

Basado en la convergencia de datos experimentales y avances industriales, se puede establecer que:

* El **LMO en polvo estándar** es inadecuado para DLE industrial debido a su corta vida (<50 ciclos).
* Los **nanobots compuestos avanzados** (núcleo magnético + LMO dopado + recubrimiento protector) alcanzan estabilidades que permiten cientos de ciclos operativos (100-500+), situándolos en el umbral de la rentabilidad.
* La reposición del adsorbente debe considerarse un costo operativo (OPEX) recurrente y planificado, no una inversión de capital única (CAPEX).

## 6. Ingeniería de Superficies y Componentes Auxiliares

La validación de un "nanobot" no termina en el material activo; los componentes auxiliares son vitales para su funcionamiento en un entorno industrial agresivo.

### 6.1. El Rol del Siliconato de Metilo y Potasio (PMS)

Los documentos de investigación destacan el uso del **Siliconato de Metilo y Potasio (PMS)**.13 Este compuesto organosilícico se utiliza industrialmente para impartir hidrofobicidad a materiales de construcción. En el contexto de los nanoadsorbentes, la modificación superficial con PMS cumple funciones críticas:

* **Protección y Estabilidad:** Al reaccionar con el dióxido de carbono atmosférico o la superficie del sustrato, el PMS polimeriza formando una red de resina de silicona insoluble y repelente al agua. Esta capa nanométrica puede modular la humectabilidad del adsorbente, protegiendo el núcleo de magnetita de la corrosión inmediata sin bloquear necesariamente los poros hidrofílicos del tamiz iónico, actuando como una membrana selectiva.20
* **Integridad Mecánica:** Actúa como un agente de acoplamiento que mejora la cohesión entre las partículas cerámicas de LMO y el aglutinante polimérico, incrementando la resistencia al desgaste por atrición durante el bombeo y la agitación magnética.22

### 6.2. Aglutinantes de Alto Rendimiento: PVDF

El **Fluoruro de Polivinilideno (PVDF)** es el estándar de oro para la aglutinación de materiales catódicos.11 Su función es adherir las nanopartículas de LMO al núcleo magnético. La validación económica muestra que, aunque el PVDF es un polímero de ingeniería de costo medio-alto ($20-$60 USD/kg), su alta resistencia a los ciclos de pH extremo (ácido/base) es indispensable para evitar la desintegración del nanobot. Un fallo en el aglutinante resultaría en la liberación de partículas finas de LMO y magnetita a la salmuera, perdiendo material valioso y contaminando el pozo de reinyección.

### 6.3. Nano Silicio como Aditivo Estructural

Aunque el **nano silicio** se asocia principalmente con ánodos de baterías 23, su presencia en la cadena de suministro de materiales para baterías sugiere sinergias. En DLE, las nanopartículas de sílice o silicio funcionalizado se integran en la corteza del adsorbente para mejorar la porosidad y la resistencia mecánica, actuando como espaciadores que previenen la aglomeración excesiva de las partículas activas y facilitan el acceso de la salmuera a los sitios de adsorción.14

## 7. Viabilidad Económica y Escalabilidad Industrial

La validación técnica carece de sentido sin una validación económica. ¿Es rentable sustituir la energía solar gratuita (evaporación) por procesos químicos intensivos en capital y reactivos? El análisis de los costos y modelos financieros sugiere que sí, especialmente bajo las condiciones de mercado actuales y futuras.

### 7.1. Análisis Comparativo de CAPEX y OPEX

Históricamente se percibía al DLE como una tecnología costosa. Sin embargo, los datos recientes desmienten esta noción al considerar la eficiencia total del proyecto.

* Gastos de Capital (CAPEX):  
  Los estanques de evaporación requieren inversiones masivas en movimiento de tierras, impermeabilización y construcción de infraestructura en áreas remotas, con costos que oscilan entre $26,000 y $34,000 USD por tonelada anual de LCE (Carbonato de Litio Equivalente) de capacidad instalada.1 Sorprendentemente, el CAPEX de las plantas DLE modernas, a pesar de su complejidad tecnológica, se sitúa en un rango competitivo de $23,000 a $34,000 USD/ton LCE.1 La eliminación de la infraestructura de estanques compensa el costo de los reactores y columnas de adsorción.  
  El caso del Proyecto Kachi (tecnología Lilac Solutions) es ilustrativo: la adopción de su tecnología de intercambio iónico de cuarta generación permitió reducir el CAPEX unitario en $98 millones de dólares y generar ahorros totales de capital de aproximadamente $160 millones, validando la eficiencia de capital de los sistemas avanzados frente a los convencionales.18
* Gastos Operativos (OPEX):  
  Aquí reside el principal trade-off. Los estanques tienen un OPEX bajo ($2,800 - $3,600 USD/ton) debido al uso de energía solar pasiva. El DLE, al ser un proceso químico activo que consume reactivos (ácido, base) y electricidad, tiene un OPEX superior, estimado típicamente entre $3,300 y $4,900 USD/ton LCE.1  
  Sin embargo, este mayor costo operativo unitario se ve compensado por la tasa de recuperación. Mientras que los estanques recuperan solo el 40-50% del litio extraído del salar, el DLE recupera consistentemente entre el 70% y el 90%+.2 Esto significa que, para una misma inversión en bombeo y pozos, el DLE produce casi el doble de producto vendible, diluyendo el impacto del mayor costo de procesamiento y resultando en un costo total por tonelada altamente competitivo y un retorno de la inversión superior.

### 7.2. Costos de Insumos y Cadena de Suministro

La viabilidad de fabricar "nanobots" a escala industrial depende del precio de sus componentes. El análisis de mercado de los precursores indica disponibilidad y precios compatibles con la escala masiva:

* **LMO ($LiMn\_2O\_4$):** Como material catódico maduro, su cadena de suministro es robusta. Los precios industriales varían entre **$25 y $135 USD por kg** dependiendo de la pureza y el proveedor.25 Para aplicaciones de DLE, donde el material se recicla miles de veces, este costo inicial es amortizable.
* **Magnetita ($Fe\_3O\_4$):** Es un *commodity* abundante. El polvo de magnetita de alta pureza (99%) tiene un costo accesible de **$20 - $50 USD/kg** para grados finos, y tan bajo como **$1 - $2 USD/kg** para grados industriales a granel.28 Esto es crucial si se considera que el núcleo magnético constituye una fracción significativa de la masa del nanobot.
* **Aglutinantes (PVDF):** Con precios de **$20 - $60 USD/kg** 30, representa un costo menor en la formulación total.

### 7.3. Punto de Equilibrio (Break-even) y Sensibilidad de Precios

Los modelos financieros para proyectos DLE en desarrollo (como SWA Reynolds en EE.UU. o proyectos en Argentina) sugieren que el precio de equilibrio del litio para garantizar la rentabilidad se sitúa alrededor de **$16,000 USD/ton LCE**.32 Con proyecciones de precios a largo plazo que oscilan entre $20,000 y $25,000 USD/ton, y picos históricos recientes muy superiores, la tecnología presenta un margen de seguridad saludable. Proyectos optimizados como Kachi apuntan a costos operativos en el cuartil inferior de la curva de costos ($4,000 USD/ton), lo que los hace resilientes incluso ante caídas drásticas del mercado.18

## 8. Impacto Ambiental y Sostenibilidad

La validación de la tecnología también abarca su huella ecológica. El DLE con nanobots ofrece ventajas sustanciales:

* **Uso del Agua:** Aunque el proceso utiliza agua dulce para la elución y el lavado, la capacidad de reciclar gran parte de esta agua y la eliminación de la evaporación masiva (que pierde millones de litros de agua de la cuenca a la atmósfera) resulta en un balance hídrico neto a menudo favorable o manejable mediante tecnologías de recuperación de agua.18
* **Huella de Carbono:** La rapidez del proceso (horas vs años) reduce la infraestructura y la logística. Además, la posibilidad de utilizar energía geotérmica (frecuentemente disponible en las mismas fuentes de salmuera) para alimentar los reactores y bombas puede llevar la huella de carbono a niveles cercanos a cero en operaciones optimizadas, a diferencia de la minería de roca dura que depende de combustibles fósiles para la trituración y calcinación.33

## 9. Conclusiones y Veredicto Técnico

Tras la revisión exhaustiva de la evidencia experimental, los modelos de ingeniería y los datos económicos, se presentan las siguientes conclusiones validadas:

1. **Capacidad de Captura Validada:** Los nanoadsorbentes basados en $LiMn\_2O\_4$ demuestran una capacidad operativa real de **20-30 mg Li/g** con una selectividad excepcional frente a Sodio y Magnesio. Esta capacidad es suficiente para soportar procesos industriales de alta eficiencia.
2. **Ciclo de Vida como Desafío Superable:** La inestabilidad intrínseca del manganeso (disolución) ha sido el principal obstáculo, pero las estrategias de ingeniería modernas (dopaje con Mg/Ti, recubrimientos de Sílice/PMS y núcleos protegidos) han logrado reducir las tasas de degradación a niveles manejables (**<0.2% por ciclo** en sistemas avanzados), validando vidas útiles que permiten la viabilidad comercial.
3. **Superioridad Económica Estratégica:** A pesar de un OPEX químico superior al de la evaporación solar, la tecnología de nanobots DLE ofrece un **Retorno sobre el Recurso** superior (90% de recuperación vs 40%) y una **Velocidad de Producción** incomparable (días vs años). Con costos operativos proyectados en el rango de **$4,000 USD/ton**, es competitiva en el mercado actual.
4. **Madurez Tecnológica:** La tecnología ha trascendido la escala de laboratorio. La existencia de cadenas de suministro robustas para los insumos críticos (LMO, Magnetita, PVDF) y la validación en plantas piloto pre-comerciales confirman que los "nanobots" de captura de litio son una solución técnica viable y escalable para resolver la crisis de oferta de litio del siglo XXI.

Este informe ratifica la validez técnica de los nanoadsorbentes magnéticos y recomienda su adopción bajo esquemas de ingeniería rigurosos que prioricen la gestión del ciclo de vida del material y la integración eficiente de energía.

#### Fuentes citadas

1. Global Metals & Mining Direct Lithium Extraction A ... - Goldman Sachs, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.goldmansachs.com/pdfs/insights/pages/gs-research/direct-lithium-extraction/report.pdf>
2. Direct Lithium Extraction: Is Lithium from Brine the New Oil? - Volta Foundation, acceso: diciembre 21, 2025, <https://volta.foundation/battery-bits/direct-lithium-extraction-is-lithium-from-brine-the-new-oil>
3. (PDF) Magnesium-Doped Manganese Oxide with Lithium Ion-Sieve Property: Lithium Adsorption from Salt Lake Brine - ResearchGate, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/259461496_Magnesium-Doped_Manganese_Oxide_with_Lithium_Ion-Sieve_Property_Lithium_Adsorption_from_Salt_Lake_Brine>
4. LiMn2O4 CATHODES FOR SOLID STATE LITHIUM-ION BATTERIES - ENERGY STORAGE AND CONVERSION, acceso: diciembre 21, 2025, <https://chalcogen.ro/9_Rao.pdf>
5. Synthesis and Characterization of Lithium Manganese Oxide with Different Ratio of Mole on Lithium Recovery Process from Ge-othermal Fluid of Lumpur Sidoarjo - Scirp.org., acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=61374>
6. Maximizing Lithium Adsorption and Selectivity on Manganese-Based Ion Sieves: Effects of Thermal Treatment, Acid Content, and Operating Conditions | Industrial & Engineering Chemistry Research - ACS Publications, acceso: diciembre 21, 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.5c00735>
7. Synthesis of Lithium Manganese Oxide and Ti‐Substituted LMO Sorbents for Lithium Extraction in a Spray‐Drying Process - PMC - NIH, acceso: diciembre 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12232121/>
8. Synthesis of membrane-type graphene oxide immobilized manganese dioxide adsorbent and its adsorption behavior for lithium ion - PubMed, acceso: diciembre 21, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33865165/>
9. Magnetite Powder | Low Price $50 | Highly pure - Nanochemazone, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.nanochemazone.com/product/magnetite-powder/>
10. High-Purity Magnetite Nanocomposite Iron Oxide (Fe₃O₄) Powder – 10 Ton Supply, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.eunano.us/order/nano-fe3o4-powder-10-ton.php>
11. PVDF polyvinylidene difluoride used as lithium ion battery cathode binder, acceso: diciembre 21, 2025, <https://electrodesandmore.com/products/pvdf-polyvinylidene-difluoride-used-as-lithium-ion-battery-cathode-binder>
12. Lithium Ion Battery Binder PVDF Polyvinylidene Fluoride with High Purity - Shandong Gelon Lib Co., Ltd., acceso: diciembre 21, 2025, <https://gelonlib.en.made-in-china.com/product/HdhfVWtTYkUl/China-Lithium-Ion-Battery-Binder-PVDF-Polyvinylidene-Fluoride-with-High-Purity.html>
13. SEAL16 Potassium Methyl Siliconate | Elkay Chemicals India, acceso: diciembre 21, 2025, <https://elkaysilicones.com/lk-seal-16-potassium-methyl-siliconate/>
14. Continuous flow extraction of lithium from brine using silica-coated LMO beads, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/389424441_Continuous_flow_extraction_of_lithium_from_brine_using_silica-coated_LMO_beads>
15. Spinel LiMn2O4 Nanorods as Lithium Ion Battery Cathodes - Columbia Blogs, acceso: diciembre 21, 2025, <https://blogs.cuit.columbia.edu/yanggroup/files/2018/08/1-3.pdf>
16. Lithium iron manganese oxide as an adsorbent for capturing lithium ions in hybrid capacitive deionization with different electrical modes | Request PDF - ResearchGate, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/336997853_Lithium_iron_manganese_oxide_as_an_adsorbent_for_capturing_lithium_ions_in_hybrid_capacitive_deionization_with_different_electrical_modes>
17. On the Manganese Dissolution Process from LiMn2O4 Cathode Materials, acceso: diciembre 21, 2025, <https://d-nb.info/1232363278/34>
18. Lilac's Gen 4 DLE Technology Drives Improved Economics in Lake Resources' Kachi Project DFS Addendum - Sunya AI, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.sunya.ai/news/lilac-s-gen-4-dle-technology-drives-improved-economics-in-lake-resources-kachi-project-dfs-addendum>
19. Aqueous composition for rendering a substrate hydrophobic - Google Patents, acceso: diciembre 21, 2025, <https://patents.google.com/patent/US20030021904A1/en>
20. POTASSIUM METHYL SILICONATE | - atamankimya.com, acceso: diciembre 21, 2025, <https://atamankimya.com/sayfalar.asp?LanguageID=2&cid=3&id=8&id2=12890>
21. China Potassium Methyl Siliconate (PMS) Manufacturers, Suppliers, Factory, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.silibasesilicone.com/potassium-methyl-siliconate-pms/>
22. WO2013192435A1 - Novel adsorbent compositions - Google Patents, acceso: diciembre 21, 2025, <https://patents.google.com/patent/WO2013192435A1/en>
23. Nano Silicon Powder, 99% trace metals basis, 80~100nm, acceso: diciembre 21, 2025, <https://landtinst.com/nano-silicon-powder-trace-metals-basis/>
24. Charged EVs | Lilac's direct lithium extraction technology improves economics for Lake Resources' Kachi Project, acceso: diciembre 21, 2025, <https://chargedevs.com/newswire/lilacs-direct-lithium-extraction-technology-improves-economics-for-lake-resources-kachi-project/>
25. Spinel Lithium Manganese Oxide (LiMn2O4) Cathode Powder - Landt Instruments, acceso: diciembre 21, 2025, <https://landtinst.com/spinel-lithium-manganese-oxide/>
26. Gelon Litium Battery Cathode Materials Lithium Manganese Oxide (LMO) - Made-in-China.com, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.made-in-china.com/price/lithium-manganese-oxide-price.html>
27. Lithium Manganese Oxide Limn2o4 Lmo for Lithium Ion Battery Materials - Made-in-China.com, acceso: diciembre 21, 2025, <https://m.made-in-china.com/product/Lithium-Manganese-Oxide-Limn2o4-Lmo-for-Lithium-Ion-Battery-Materials-691413822.html>
28. IRON OXIDE POWDER, BLACK (MAGNETITE) - Atlantic Equipment Engineers, acceso: diciembre 21, 2025, <https://micronmetals.com/product/iron-oxide-powder-black-magnetite/>
29. High Purity Atomized Welding Iron Powder Price Ton, acceso: diciembre 21, 2025, <https://shlaiwu.en.made-in-china.com/product/WxhpnCBKAIcy/China-High-Purity-Atomized-Welding-Iron-Powder-Price-Ton.html>
30. Battery Binders - Xiaowei Materials Shop, acceso: diciembre 21, 2025, <https://xwmaterial.com/product-category/auxiliary-materials/battery-binders/>
31. Pvdf Powder Binder - Made-in-China.com, acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.made-in-china.com/products-search/hot-china-products/Pvdf_Powder_Binder.html>
32. Can Emerging Industrial Technologies Compete? Scoping the ..., acceso: diciembre 21, 2025, <https://www.rff.org/publications/reports/can-emerging-industrial-technologies-compete-scoping-the-market-viability-of-direct-lithium-extraction-in-the-united-states/>
33. Strategic Growth Through Lithium Extraction, acceso: diciembre 21, 2025, <https://lithiumharvest.com/services/produced-water-treatment/strategic-growth-through-lithium-extraction/>