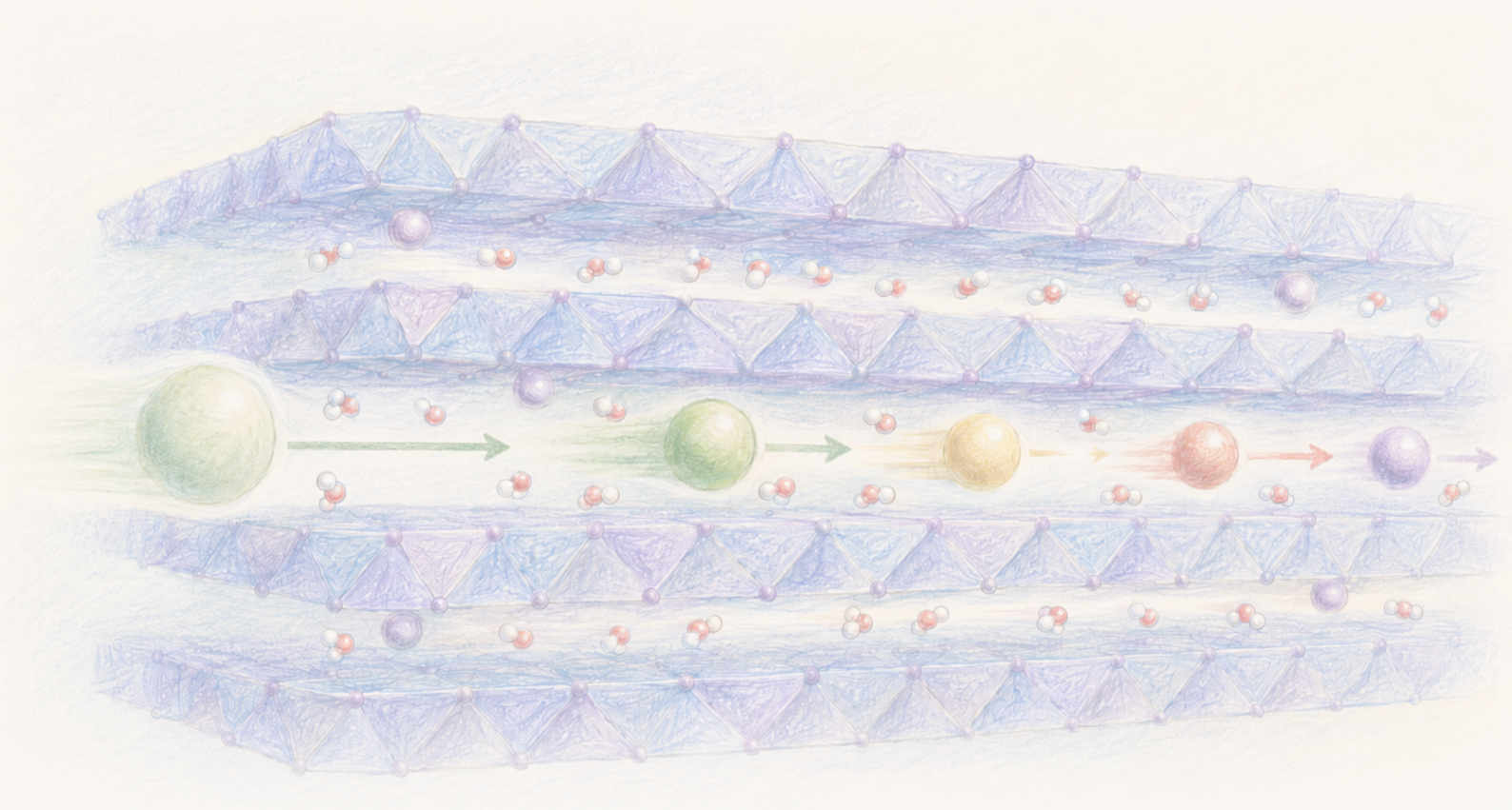


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Inmovilizar un canal mineral lleno de agua ayudó a separar iones de tierras raras muy parecidos

El magnesio mantuvo un hueco hidratado de óxido de manganeso cerca del ancho de la capa de agua de un ion lantánido y mejoró el enriquecimiento de determinados pares en pruebas de laboratorio. El trabajo demostrado utilizó mililitros de solución y miligramos de material; el funcionamiento en flujo, una larga vida en ciclos y el rendimiento ambiental comercial siguen sin demostrarse.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

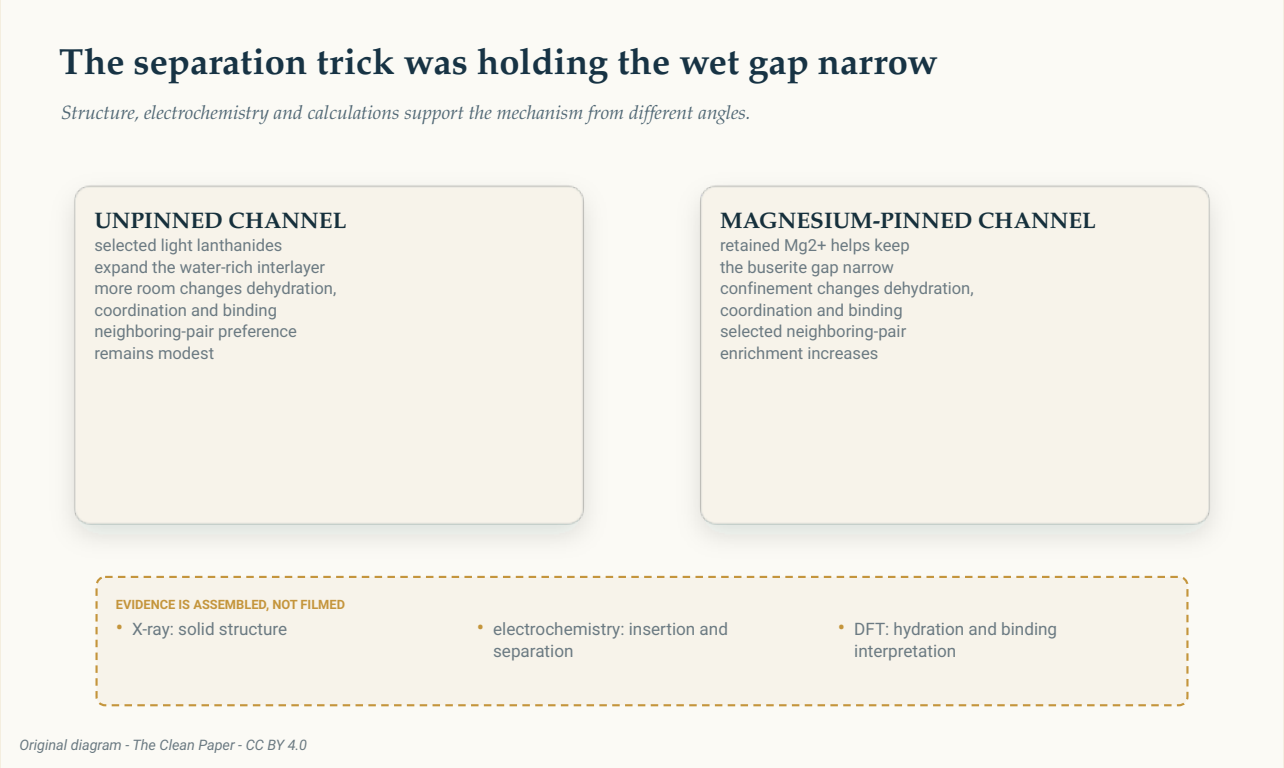
Paper: *Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation*, Siqi Zou, Jiadong Liu, Woo Cheol Jeon, Maoyu Wang, Ronghui Wu, Yu Han, Gangbin Yan, Grant T. Hill, Xiaolin Yue, Hua Zhou, George C. Schatz & Chong Liu, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026) · DOI: 10.1038/s44286-026-00418-8

Inmovilizar un canal mineral lleno de agua ayudó a separar iones de tierras raras muy parecidos

Los iones de tierras raras son difíciles de separar por la misma razón por la que cuesta distinguir a dos hermanos a distancia: las diferencias existen, pero son pequeñas.

Los lantánidos están situados unos junto a otros en la tabla periódica y suelen formar iones con la misma carga. Su tamaño cambia gradualmente a lo largo de la serie, mientras que su comportamiento químico sigue siendo parecido. Por eso, el refinado industrial depende de muchas etapas de separación repetidas.

Un nuevo estudio de laboratorio abordó el problema mediante confinamiento. Los investigadores utilizaron láminas apiladas de óxido de manganeso, separadas por un espacio lleno de agua. Un ion de tierra rara se aproxima a ese espacio rodeado de moléculas de agua. Sin un puntal, las láminas pueden apartarse para acomodarlo. Los iones de magnesio actuaron como un puntal: al permanecer entre las láminas, ayudaron a mantener estrecho el espacio. Los distintos iones de tierras raras tuvieron entonces que pagar costes energéticos diferentes para desprenderse de parte del agua, entrar en el canal y unirse a átomos de oxígeno del sólido.



Los canales sin inmovilizar y los inmovilizados con magnesio son interpretaciones mecanísticas respaldadas por estructura, electroquímica y cálculos. Ningún experimento observó por sí solo toda la secuencia molecular.

The Clean Paper CC BY 4.0

Para uno de los pares ensayados, lantano y neodimio, esta **inmovilización** elevó el factor de enriquecimiento de 1,6 a **5,4**. Para lantano y praseodimio, aumentó de 1,5 a **4,2**. Un factor de enriquecimiento

compara la proporción entre los dos iones después de la separación con la proporción inicial. Un valor de 1 indicaría ausencia de preferencia; 5,4 significa que el material capturado favorecía al neodimio frente al lantano 5,4 veces más que la mezcla de partida.

Son resultados de laboratorio significativos para pares concretos. No demuestran que ahora puedan separarse limpiamente todas las tierras raras, que se haya demostrado un proceso de flujo ni que pueda sustituirse la extracción con disolventes.

La idea más sólida del artículo es más pequeña que una refinería: impedir que se abra un espacio mineral húmedo.

Un ion en agua es mayor que el átomo desnudo

Los elementos de tierras raras incluyen los lantánidos, además del escandio y el itrio. El estudio probó doce iones lantánidos de carga positiva, desde el lantano hasta el iterbio. Se excluyó el cerio porque cambia con facilidad de estado de oxidación, y también el prometio, por ser radiactivo.

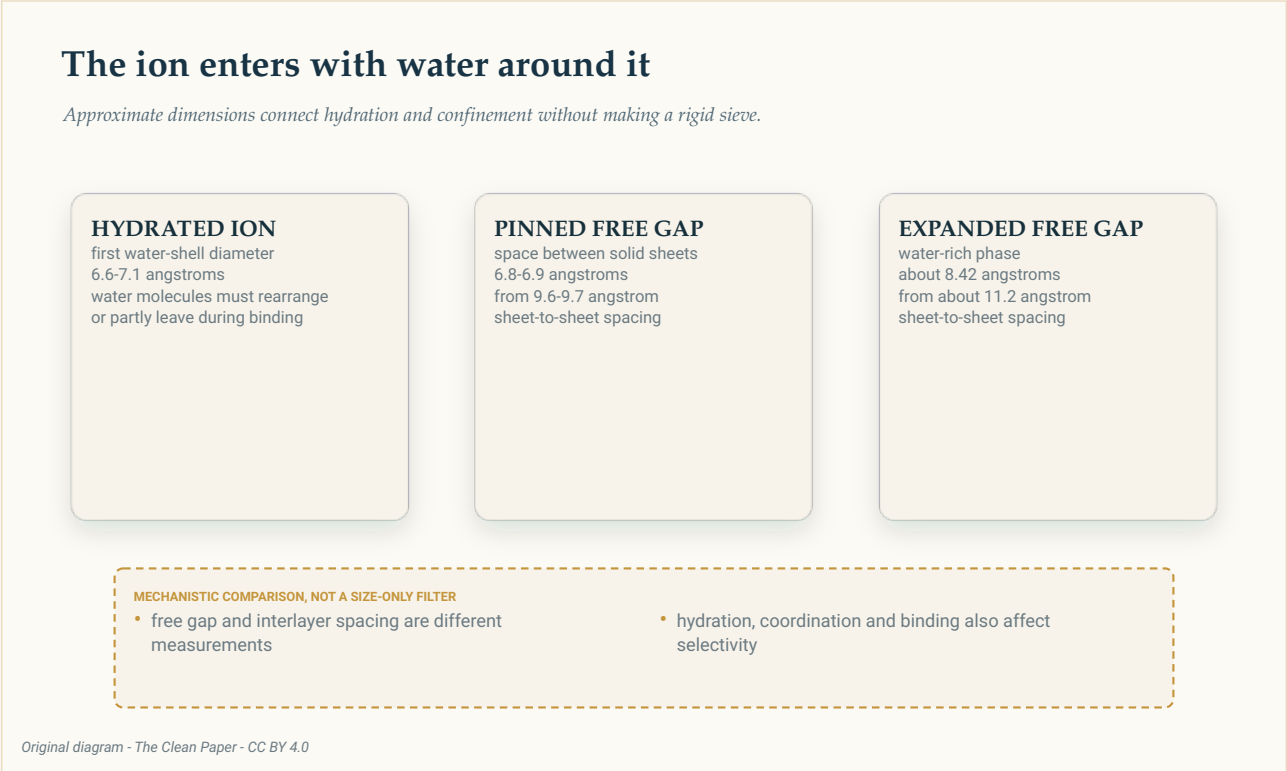
En el agua, un ion no viaja solo. Las moléculas de agua se ordenan alrededor de su carga y forman una **capa de hidratación**. Para entrar en un canal estrecho y unirse a un sólido, el ion puede tener que reorganizar o perder parte de esa capa de agua. El coste energético depende tanto del ion como de su entorno.

Las dimensiones se miden en **ångströms (Å)**. Un ångström es una diezmilmillonésima parte de un metro (**1 Å =** 10^{-10} **m**). Según el artículo, las primeras capas de hidratación de los lantánidos probados medían aproximadamente entre **6,6 y 7,1 Å** de diámetro.

Los investigadores emplearon un óxido de manganeso hidratado y laminar llamado buserita. La separación entre sus láminas apiladas era de unos **9,6 a 9,7 ångströms**, medida desde una posición repetida de una lámina hasta la siguiente. Pero la propia lámina ocupa espacio. El hueco libre lleno de agua entre las láminas era de apenas **6,8 a 6,9 ångströms**.

La diferencia importa. Un espaciado interlaminar de 9,7 ångströms no equivale a un canal abierto de 9,7 ångströms.

Algunos lantánidos ligeros hicieron que la estructura se expandiera y adoptara una fase más rica en agua. En ella, la distancia entre láminas era de unos **11,2 ångströms** y el hueco libre estimado, de unos **8,42 ångströms**. Una estructura relacionada más estrecha, la birnessita, presentaba un hueco libre de aproximadamente **4,42 ångströms**.



La comparación se establece entre el diámetro aproximado de la capa de hidratación y el hueco libre lleno de agua, no entre un ion desnudo y la distancia completa entre láminas. El tamaño forma parte del mecanismo, pero no lo explica por completo.

The Clean Paper CC BY 4.0

El mineral puede adaptarse al ion

Sin la inmovilización con magnesio, el canal no es un tamiz rígido: sus láminas apiladas pueden moverse. En los experimentos, los iones ligeros lantano, praseodimio y neodimio hicieron que el material absorbiera más agua y se abriera. Los iones más pesados, desde el europio hasta el iterbio, tendieron a dejar intacto el canal más estrecho. El samario quedó entre ambas respuestas.

El artículo denomina a la primera respuesta **Grupo I** y a la segunda **Grupo II**. Son etiquetas que describen cómo respondía este material concreto a los iones, no números de grupo de la tabla periódica. La frontera también podría cambiar bajo otras condiciones experimentales.

Esa diferencia estructural ayudó con los pares pertenecientes a grupos distintos. En intercambio iónico directo, el factor de enriquecimiento comunicado fue de **7,8** para lantano frente a disprosio, **5,7** para praseodimio frente a disprosio, **4,5** para neodimio frente a disprosio y **2,6** para neodimio frente a europio.

La mayoría de los pares vecinos fueron mucho más difíciles, con factores de enriquecimiento cercanos a 1,1. Un factor próximo a 1 indica muy poca preferencia. El material discriminaba con mayor facilidad cuando los dos iones favorecían estructuras de canal distintas que cuando estaban próximos

dentro del mismo grupo de respuesta.

El magnesio inmoviliza el canal

A continuación, los investigadores utilizaron **intercalación electroquímica**: una reacción eléctrica que introduce iones entre capas sólidas. Los iones de magnesio permanecieron en el canal mientras entraban los iones de tierras raras. El magnesio retenido ayudó a impedir que se expandiera el espaciado de la buserita.

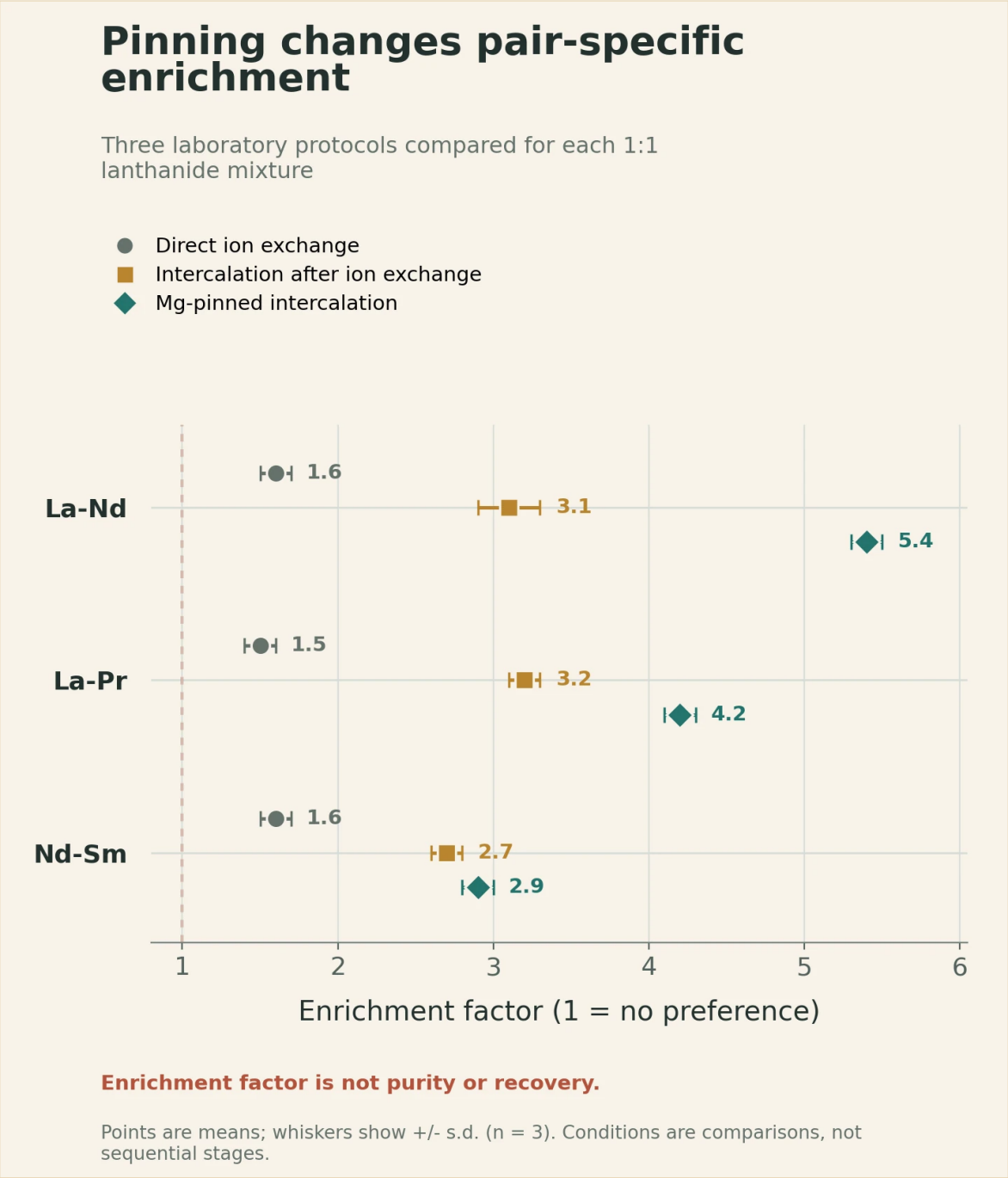
Dentro de ese hueco húmedo más estrecho, un ion hidratado que entra dispone de menos espacio. El mecanismo propuesto combina confinamiento, deshidratación parcial, coordinación y unión. **Coordinación** designa los átomos cercanos —a menudo oxígeno— que rodean directamente al ion e interactúan con él.

Las pruebas proceden de varios tipos de trabajo. Las mediciones de rayos X siguieron la estructura del sólido. Los experimentos electroquímicos midieron la inserción y la separación. La **teoría del funcional de la densidad**, un cálculo de mecánica cuántica, comparó estructuras, hidratación y unión. Los cálculos ayudan a interpretar el mecanismo; no son una película directa de un ion atravesando el canal.

Tampoco se trata simplemente de que «los iones pequeños pasan y los grandes se detienen». Contribuyen la capa de agua, la respuesta de las láminas, el coste de la deshidratación y la forma en que el ion se coordina con el sólido.

La inmovilización mejoró algunos pares vecinos

El cambio más destacado fue el del lantano y el neodimio: el enriquecimiento aumentó de **1,6 +/- 0,1** sin inmovilización a **5,4 +/- 0,1** con magnesio. El lantano frente al praseodimio pasó de **1,5 +/- 0,1** a **4,2 +/- 0,1**. El neodimio frente al samario pasó de **1,6 +/- 0,1** a **2,9 +/- 0,1**.



Cada fila compara tres protocolos de laboratorio independientes, no etapas consecutivas de un único proceso. Un factor de 1 indica ausencia de preferencia; los valores más altos indican un enriquecimiento más fuerte y específico para ese par. Los puntos representan medias y los bigotes, +/- una desviación estándar (n = 3).

The Clean Paper CC BY 4.0

A pH 2, el valor lantano-neodimio fue de **5,6 +/- 0,2**. Al multiplicar por cinco la velocidad eléctrica, de 0,1C a 0,5C, disminuyó de **5,4 +/- 0,1** a **4,3 +/- 0,4**. La tasa C compara la corriente eléctrica aplicada con la capacidad del material. Una tasa más alta da menos tiempo a los iones y al sólido para responder.

Ningún valor único describe universalmente el material. El enriquecimiento depende del par, de la estructura sólida, de la acidez y de la velocidad de operación.

El artículo también puso a prueba el material frente a iones abundantes que no eran de tierras raras. Las mezclas iniciales contenían un ion de tierra rara por cada 1.000 iones competidores. Las selectividades comunicadas fueron de aproximadamente **1.200** frente al sodio, **6.500** frente al calcio y **1.700** frente al magnesio.

Esto aporta pruebas útiles de que, bajo estas condiciones de laboratorio, los iones comunes no anulan automáticamente la separación. No es una prueba con un líquido completo procedente de mineral que contenga todos sus metales, acidez y contaminantes.

Enriquecimiento, separación, pureza, agotamiento y recuperación son resultados diferentes

El artículo presenta varias medidas de rendimiento, y no pueden sustituirse unas por otras.

Un **factor de enriquecimiento** compara la proporción entre dos iones después de la separación con la proporción anterior. Un valor de 5,4 significa que el material capturado favorecía a uno de los miembros del par 5,4 veces más que la mezcla inicial.

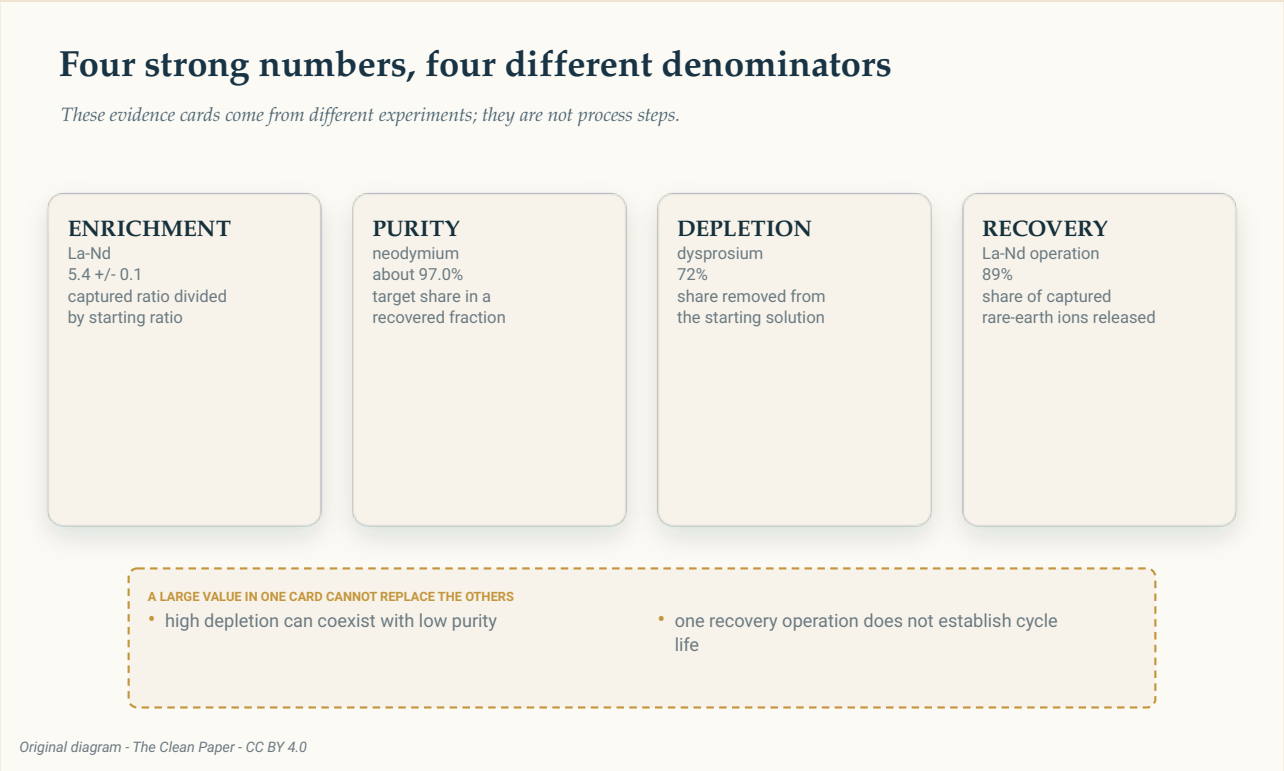
Un **factor de separación** también tiene en cuenta lo que permanece en el líquido: compara, para cada ion, la cantidad capturada con la no capturada y después compara ambos balances. Por eso puede aumentar a medida que se retira más material, aunque el factor de enriquecimiento siga una tendencia diferente.

La **pureza** es la proporción de un ion elegido dentro de una fracción recuperada. Las demostraciones en dos etapas alcanzaron aproximadamente un **97,0% de pureza de neodimio** y un **92,3% de pureza de disprosio** en sus rutas específicas.

El **agotamiento** es la fracción retirada de la solución inicial. Ocho adiciones sucesivas de 10 miligramos de polvo retiraron el **72% del disprosio** en una prueba con neodimio y disprosio y produjeron un factor de separación acumulado de 10,8.

La **recuperación** pregunta cuánto del ion capturado puede liberarse después. El intercambio iónico inverso recuperó el **80%** en una operación con neodimio y disprosio. La extracción electroquímica recuperó el **89%** en una operación con lantano y neodimio.

La recuperación demuestra reversibilidad. No establece cuántas veces puede reutilizarse un electrodo conservando su rendimiento.



Cuatro métricas comunicadas utilizan denominadores distintos y proceden de experimentos diferentes. Son fichas de evidencia, no etapas consecutivas de un proceso.

The Clean Paper CC BY 4.0

> **¿Por qué dos porcentajes impresionantes pueden significar cosas distintas?**
>
> Supongamos que un proceso retira el 90% de un ion del líquido inicial. Eso es un agotamiento alto. Si con él se retiran muchos iones no deseados, el material recuperado aún puede tener una pureza baja. A la inversa, una fracción pequeña y muy pura puede representar una recuperación deficiente si la mayor parte del objetivo quedó atrás. Para evaluar un proceso hacen falta todos estos balances, no solo la cifra mayor.

El aparato demostrado sigue siendo un experimento de vaso de precipitados

Las pruebas electroquímicas orientadas a la escala comenzaron con **5 mililitros** de solución que contenían 25 milimoles por litro de cada ion. Los electrodos llevaban aproximadamente **25 a 40 miligramos** de material activo.

Un electrodo retiró cerca del 40% del neodimio. Tres electrodos empleados en serie alcanzaron aproximadamente un **90% de agotamiento** y un factor de separación acumulado de **16,6 +/- 0,4**. Según la velocidad de operación, las reacciones duraron entre **200 minutos y 13 horas**.

Estas dimensiones y tiempos forman parte esencial de la historia porque definen qué se demostró realmente.

El suplemento también identifica una limitación de transferencia de masa. Para un objetivo de mayor concentración en vaso de precipitados, se estimó que alcanzar un agotamiento total del 50% exigiría un **electrodo de 266 miligramos**, es decir, **532 miligramos de material activo por centímetro cuadrado**. Depositar tanta cantidad en el pequeño electrodo dificultaría que los iones disueltos alcanzaran todo el material. Por eso, los autores recurrieron a una solución más diluida en el experimento de vaso de precipitados.

La celda de flujo hipotética aparece únicamente como proyección. Para una celda supuesta de 1,25 mililitros con un electrodo de 5 por 5 centímetros, el suplemento estima unos **20 minutos a 1C** o **40 minutos a 0,5C** para lograr cerca de un 90% de agotamiento. No se comunica ningún experimento con esa celda de flujo.

La escalera termina en una frontera: existen pruebas binarias y escalonadas de laboratorio, mientras que el tiempo en flujo y el rendimiento ambiental siguen siendo proyecciones o escenarios, no demostraciones a escala industrial.

The Clean Paper CC BY 4.0

La comparación ambiental es un escenario, no un resultado de planta

La evaluación del ciclo de vida suplementaria compara etapas de separación que terminan en óxidos de tierras raras y comunica los insumos por **1 kilogramo de óxido de neodimio**.

No incluye la minería, el pretratamiento del mineral ni una cadena comercial completa de refinado. El proceso de laboratorio se representa mediante supuestos reunidos de varias fuentes. Las vidas útiles de los electrodos de **10, 20 y 100 ciclos** son valores de escenario y sensibilidad, no una durabilidad medida en este estudio. El modelo supone que la solución de recuperación de magnesio puede reutilizarse hasta que su concentración cambie un 10%, supone un **95% de reciclaje del agua** e incluye calcinación a 450-600 grados Celsius durante dos horas, aunque aquí no se demostró experimentalmente la calcinación.

Una **evaluación del ciclo de vida** contabiliza las cargas ambientales dentro de unos límites del sistema declarados. Su respuesta solo es tan amplia como esos límites y tan fiable como su inventario y sus supuestos de escala.

El análisis puede identificar dónde importan la energía, los materiales y la reutilización. No puede demostrar que una versión comercial tendría un impacto ambiental menor que la extracción industrial con disolventes.

Un mecanismo, una plataforma y un largo camino de ingeniería

El artículo establece que el espaciado y el entorno químico de un sólido hidratado en capas pueden controlarse deliberadamente para mejorar la separación de algunos lantánidos. La inmovilización con magnesio hizo algo más que añadir otro sitio de unión química: restringió la estructura por la que debían moverse los iones rodeados de agua.

Ese resultado abre preguntas prácticas. ¿Puede mantenerse el rendimiento con mezclas reales procedentes de minerales? ¿Pueden fabricarse electrodos con una carga de masa viable? ¿Qué estabilidad tiene el óxido de manganeso durante muchos ciclos de inserción y liberación? ¿Puede una celda continua mantener la selectividad, el caudal y el balance de agua? ¿Qué aspecto tendría la comparación ambiental con inventarios medidos a escala piloto?

El experimento no responde a esas preguntas. Las hace más concretas.

El logro no es una refinería de tierras raras terminada. Es la demostración de que unos pocos ångströms de espacio controlado y lleno de agua pueden cambiar una separación difícil.

En pocas palabras

Los investigadores emplearon óxido de manganeso hidratado en capas para separar determinados pares de iones lantánidos en agua. El hueco libre del material medía aproximadamente 6,8-6,9 ångströms, cerca del diámetro comunicado de 6,6-7,1 ångströms de la primera capa de hidratación de los iones. El magnesio retenido ayudó a inmovilizar el canal y mejoró el enriquecimiento específico de algunos pares, incluido lantano-neodimio, de 1,6 a 5,4, y lantano-praseodimio, de 1,5 a 4,2. El estudio también comunicó pruebas frente a iones abundantes, pureza por etapas, agotamiento secuencial y operaciones de recuperación. La escala demostrada siguió siendo la de pruebas en vasos de 5 mililitros, con 25-40 miligramos de material activo y tiempos de reacción de 200 minutos a 13 horas. La operación en celda de flujo se proyectó, no se probó la reutilización durante muchos ciclos y la comparación del ciclo de vida dependía de supuestos de escala de laboratorio. El artículo respalda un mecanismo de confinamiento y una plataforma de laboratorio, no un sustituto industrial de la extracción con disolventes.

Sin rodeos

Lo que muestra el artículo: mantener un hueco hidratado de óxido de manganeso cerca de 6,8-6,9 ångströms mediante magnesio retenido modificó la separación de determinados pares de lantánidos. Las mediciones estructurales, la electroquímica y los cálculos respaldan un mecanismo que implica confinamiento, deshidratación, coordinación y unión.

Qué rindió mejor: bajo las condiciones especificadas, el enriquecimiento lantano-neodimio alcanzó 5,4 +/- 0,1 y el de lantano-praseodimio 4,2 +/- 0,1. Los valores de otros pares fueron distintos. Experimentos independientes comunicaron resultados de pureza, agotamiento y recuperación con denominadores diferentes.

Lo que no muestra: un separador universal para todas las tierras raras; funcionamiento con una corriente completa procedente de mineral; una celda de flujo continuo demostrada; electrodos duraderos durante muchos ciclos; sustitución de la extracción con disolventes; ni una superioridad ambiental comercial probada.

Principales límites de escala: las pruebas demostradas utilizaron 5 mililitros de solución, aproximadamente 25-40 miligramos de material activo y entre 200 minutos y 13 horas. Un objetivo de mayor concentración implicó un problema de carga de 532 miligramos por centímetro cuadrado. Los tiempos de flujo fueron extrapolados. La vida útil del electrodo y varios insumos importantes de reciclaje en la evaluación del ciclo de vida fueron supuestos.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Confianza alta en las mediciones de laboratorio comunicadas para los pares y condiciones indicados. Confianza moderada en la interpretación molecular propuesta, porque combina estructura y electroquímica directas con cálculos. Confianza baja en que los datos actuales permitan predecir el caudal industrial, la vida útil o el rendimiento ambiental.

Fuentes

Zou et al., Pinning angstrom-size solid ionic channels for rare-earth element separation, Nature Chemical Engineering 3, 402-413 (2026)
https://doi.org/10.1038/s44286-026-00418-8