

Estudio exploratorio para la minería electroquímica de magnesio en salmueras marinas de Abangares


Exploratory study for the electrochemical mining of magnesium in marine brines of Abangares

Montserrat Brenes-Granados¹, Jairo García-Céspedes², Diego González-Flores³


Fecha de recepción: 13 de mayo, 2025

Fecha de aprobación: 1 de septiembre, 2025

Brenes-Granados, M; García-Céspedes, J; González-Flores, D. Estudio exploratorio para la minería electroquímica de magnesio en salmueras marinas de Abangares. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 74-90.


 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7986>

1 Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 monsof25@gmail.com


 <https://orcid.org/0009-0003-7205-7380>

2 Laboratorio de Geoquímica, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 jairo.garcia@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0009-0001-2933-0287>

3 Centro de Electroquímica y Energía Química (CELEQ), Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA), Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

 diegoandres.gonzalez@ucr.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-0403-2494>



Palabras clave

Minería de salmueras; precipitación electroquímica; magnesio, agua marina.

Resumen

En el distrito de Colorado de Abangares en Guanacaste, Costa Rica, hay una producción importante de sal y gran parte de ella se realiza mediante secado al sol. Además del producto principal que es el cloruro de sodio, se pueden extraer otros sub-productos a partir de las salmueras concentradas por precipitación electroquímica. Para explorar esta opción, se toman muestras de las salmueras de algunas salineras locales. Estas salmueras tienen valores muy elevados de salinidad en el ámbito entre (100-340) PSU y de pH entre (8-15), son ricas en magnesio, pobres en calcio y tienen un contenido de litio muy bajo como para poder explotarse comercialmente. El producto principal de la precipitación electroquímica de las salmueras es el hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$, con un costo de producción estimado de unos 0,036 USD por gramo para la electrólisis propuesta en este estudio.

Keywords

Brine mining; electrochemical precipitation; magnesium; seawater.

Abstract

In the Colorado de Abangares district of Guanacaste, Costa Rica, there is significant salt production, much of which is carried out by sun drying. In addition to the main product, sodium chloride, other by-products can be extracted from the concentrated brines by electrochemical precipitation. To explore this option, brine samples are taken from several local salt mines. These brines have very high salinity values between (100-340) PSU and basic pH values between (8-15). They are rich in magnesium, poor in calcium, and have a lithium content too low to be commercially exploitable. The main product of electrochemical precipitation of the brines is magnesium hydroxide $Mg(OH)_2$, with an estimated production cost of about USD 0.036 per gram for the electrolysis proposed in this study.

Introducción

En el distrito de Colorado de Abangares en Guanacaste, Costa Rica, hay varias cooperativas locales –dedicadas a la producción de sal de cocina– que pretenden diversificar sus actividades comerciales. En particular, estas cooperativas buscan cómo obtener, además de la sal, otros productos minerales a partir de las salmueras concentradas que puedan ser explotados comercialmente.

Una parte importante de la producción de sal de cocina en Costa Rica se lleva a cabo según el método tradicional: el secado al sol del agua de mar para obtener la sal sólida (cloruro de sodio) y una salmuera muy concentrada. La producción de sal en Costa Rica se basa en dos procesos, uno de sal cruda y otro de sal cocinada [1]. El proceso de producción de sal cruda inicia con la eliminación del manglar para crear una pila o pozo (agua de pozo) que luego se llena con el agua de mar empujada por la marea alta. Por bombeo mecánico a través de mangueras se lleva hacia un sistema escalonado de pilas de cristalización en el que se aumenta la salinidad en cada paso debido a la remoción del agua por la evaporación provocada por la energía solar radiante. Cuando se alcanzan valores de salinidad entre el 75 % y el 85 % ocurre el proceso de

cristalización (Figura S1a) [2]. A partir de este momento se acumula una salmuera residual en las pilas –que los productores denominan lejía normal por venir del proceso de sal cruda– que se caracteriza por ser la más concentrada de todo el proceso.

Para elaborar la sal cocinada se utilizan bombas para trasvasar la salmuera concentrada –a un 75 % u 85 % de salinidad– a un contenedor metálico colocado sobre un horno de barro que se alimenta con la quema de leña (Figura S1), en el que se mantiene el fuego encendido entre ocho y doce horas para obtener un residuo conocido como lejía cocinada.

La extracción de minerales como el magnesio se realiza con técnicas que conllevan tanto un alto consumo energético como una alta generación de dióxido de carbono CO_2 [3]. Debido a esto, existe un gran interés en desarrollar alternativas que conlleven a una minería más amigable con el ambiente. Puesto que el mar es ubicuo, se ha propuesto utilizar el agua de mar como una fuente de la que podrían extraerse elementos de interés comercial [4]. Por ejemplo, se estima que el magnesio es el tercer ion con mayor concentración en el agua de mar y que las salmueras concentradas de agua de mar se caracterizan por poseer concentraciones altas de los iones sodio, potasio, cloruro, sulfato y, especialmente, de magnesio cuyos valores pueden ir desde [0,03 a 30,9] g/L, además de contener litio con valores entre [0,23 a 1,5] g/L y calcio de 0,02 a 39 g/L [5]. En Colombia, por ejemplo, ya se ha propuesto utilizar el agua de mar como fuente de magnesio [6]. Mientras que, en los Estados Unidos, el magnesio ha sido incluido en la lista de minerales críticos para la producción doméstica [7],[8].

Dentro de las tecnologías más aceptables para la extracción y precipitación de algunas sales a partir de agua de mar o de salmueras marinas reales o simuladas se encuentran los métodos electroquímicos, entre los que se destacan la electrólisis y la electrodiálisis [9], [10], [11], [12], [13], mientras que este trabajo se enfoca en la electrodeposición.

Uno de los retos para extraer magnesio de agua marina es que la similitud de algunas de sus propiedades comparadas con las del calcio puede complicar su separación. Algunos autores mencionan que se realiza la precipitación de dos maneras. En una se precipita primero el $\text{Mg}(\text{OH})_2$ proceso que se favorece al des airear la disolución y mantener el pH entre 10 y 12 [14] [15]. En contraste, en la otra manera, se realiza precisamente lo contrario: se forma el precipitado de CaCO_3 , promovido por la inyección de CO_2 y luego se procede con la precipitación del $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [16].

Diferentes investigaciones se han enfocado en estudiar los parámetros que determinan la precipitación de minerales. Por ejemplo, se ha identificado que el material de los electrodos puede ser clave en la precipitación [17]. También se ha visto que el área superficial de los electrodos y la agitación puede acelerar la precipitación de minerales en forma de carbonatos [18]. Además, se ha identificado que el voltaje puede regular si se obtiene CaCO_3 o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ como producto durante la electrólisis [17]. La densidad de corriente incluso juega un papel fundamental durante la precipitación. Por ejemplo, en el caso de la precipitación de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ la rapidez de la deposición crece de forma directamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de corriente y es independiente del voltaje aplicado [19] [20]. Por otro lado, las densidades de corriente superiores a 7 A/m² desfavorecen el crecimiento del precipitado sobre el electrodo [21]. El pH es un factor que debe ajustarse durante la precipitación de $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Se ha documentado que la ventana óptima de precipitación es a un pH entre 9 y 11 [21]. Por último, la proporción de magnesio y calcio puede afectar directamente los productos. Por ejemplo, la presencia de magnesio o sulfatos puede inhibir la precipitación de calcita [22].

El desarrollo de procesos para la extracción de minerales podría diversificar las actividades productivas en regiones costeras. Justamente por ello, en este estudio se pretende caracterizar una serie de salmueras provenientes del proceso de extracción de sal en Abangares,

Guanacaste, Costa Rica para usarse como posibles fuentes de magnesio. Asimismo, plantear una metodología para extraer sales de magnesio y generar una nueva fuente de recursos por medio de una metodología electroquímica de precipitación.

Materiales y métodos

Muestreo de salmueras

El muestreo se realizó en Guanacaste, Costa Rica en el distrito de Colorado de Abangares en fincas dedicadas a la producción de sal (Figuras S1 y S2), el día 10 de febrero del 2022; la elección de las fincas se hizo de forma aleatoria y las muestras fueron tomadas por el equipo de trabajo en botellas de polipropileno y llevadas al laboratorio donde se almacenaron a temperatura ambiente (25-30°C) hasta el momento del ensayo. La salmuera se obtiene de unas salinas, las cuales son una serie de cuerpos de agua, en pilas o lagunas, en las que se aísla el agua de mar hasta que se evapora y se obtiene cloruro de sodio: la sal común o sal de mesa [1].

Se tomaron muestras de las salmueras del agua de pozo, es decir, las salmueras crudas tomadas de forma directa de la pileta inicial, del proceso de sal cruda y de sal cocinada, con especial énfasis en las salmueras identificadas como “Santos Prieto Lejía Cocinada”, “Bernio Garay Lejía Normal” y “Diana Colorado Lejía Cocinada”.

Determinación de la salinidad y del pH de las salmueras

En el Laboratorio de Acidificación Oceánica del Centro de Investigación en Ciencias del Mar (CIMAR) de la Universidad de Costa Rica (UCR) se midió la salinidad electroquímicamente – en unidades PSU (Unidades Prácticas de Salinidad)– con un conductivímetro marca Thermo Scientific, modelo Orion, y una celda de conductividad de constante 0,475 cm⁻¹ Orion DuraProbe; este equipo fue previamente calibrado con patrones. También se determina el pH espectrofotométricamente por cromogénesis con m-cresol, el cual es un método utilizado frecuentemente en muestras marinas [23], [24] que consiste en realizar dos adiciones de m-cresol, seguidas de la medición de la absorbancia de la muestra a tres longitudes de onda diferentes: 730 nm, 578 nm y 434 nm; estas se realizaron en un espectrofotómetro marca Ocean Optics, modelo FLAME-S-VIS-NIR-ES, con una fuente de luz halógeno Ocean Optics, HL-2000-FHSA-LL; un portacubeta con tapa Ocean Optics modelo CUV-UV-10, que posee además fibra óptica modelo QP200-2-VIS-BX; para el cálculo de pH se utilizaron los valores de salinidad, se sigue el método indicado en Berghoff CF (2020) [25] y el software Oceanview®.

Caracterización por cromatografía iónica

Las muestras se analizan por cromatografía iónica tanto antes como después del proceso de precipitación electroquímica. Se utilizan dos diferentes cromatógrafos de iones. El primero es un cromatógrafo Dionex ICS-3000 del Laboratorio de Geoquímica Volcánica del OVSICORI-UNA. Los aniones (F⁻, Cl⁻, Br⁻ y SO₄⁻²) se analizaron mediante una columna Dionex IonPac™ AS23, con un supresor Dionex ASRS™ 300 y una solución 9 mM de Na₂CO₃ como eluyente. Los cationes (Li⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺) se analizaron mediante una columna Dionex IonPac™ CS12, con un supresor Dionex CSRS™ 300 y una solución de 20 mM de ácido metanosulfónico. Las curvas de calibración, tanto de aniones como de cationes, se prepararon con estándares de 5, 10, 25, 50, 100, 150, 200 y 250 mg/l. Las muestras se diluyeron alrededor de cien veces antes de los análisis.

El segundo es un cromatógrafo Metrohm IC 881 Pro con detector de conductividad, calibrado previamente con patrones preparados a partir de sales; para la determinación de la concentración de aniones –fluoruro, cloruro, nitrito, nitrato, fosfato, sulfato– se usa como

eluyente una disolución acuosa de carbonato de sodio y bicarbonato de sodio, además de una columna Metrosep A Supp 5; mientras que para la determinación de la concentración de cationes –litio, sodio, potasio, amonio, calcio, magnesio– se usa como eluyente una disolución acuosa de ácido dipicolínico y ácido nítrico, que pasa por una columna Metrosep C 4; como blanco de laboratorio se usa agua con resistividad 18,2 MΩ-cm obtenida de un ultrapurificador Millipore Milli-Q Direct 8. Para diluir las muestras se utiliza una balanza Sartorius Cubis® de cinco decimales y se utilizan factores de dilución de 500, 400 y 200 para cada analito; en el caso del litio se usa un factor de dilución de 100.

Cristalografía de Rayos X

Se realizó en la Unidad de Difractometría de la Escuela de Química de la UCR con un equipo Bruker AXS-D8 Advance con un tubo de rayos X de cobre utilizando un espejo Göbel y un detector Lynx-Eye. Se utiliza un acoplamiento bloqueado de $2\theta = 10^\circ$ a 70° en incrementos de $0,019^\circ$ y un tiempo equivalente de 768 s por paso.

Espectroscopia infrarroja

Se realizó en el cuarto de Instrumentos del Centro de Electroquímica y Energía Química de la Universidad de Costa Rica para obtener información sobre los grupos funcionales presentes en el precipitado mediante espectroscopia infrarroja en modo ATR-FTIR en un equipo marca Thermo Scientific Nicolet 6700 en modo ATR utilizando un cristal de diamante.

Electrodo de trabajo

Para la precipitación electroquímica se utilizaron electrodos separados de malla de platino de la empresa Heraeus Vectra do Brasil EL 04/1 de platino/Iridio 90:10, se utilizó como cátodo el electrodo cilíndrico y como ánodo un electrodo plano cuadrado. En el material suplementario se puede encontrar información sobre el cálculo del área del electrodo.

Precipitación electroquímica

Para llevar a cabo la precipitación electroquímica de magnesio, calcio y litio a partir de las salmueras, se dividió el proceso en dos etapas electrolíticas realizadas secuencialmente, tal y como se indica en la Figura 1.

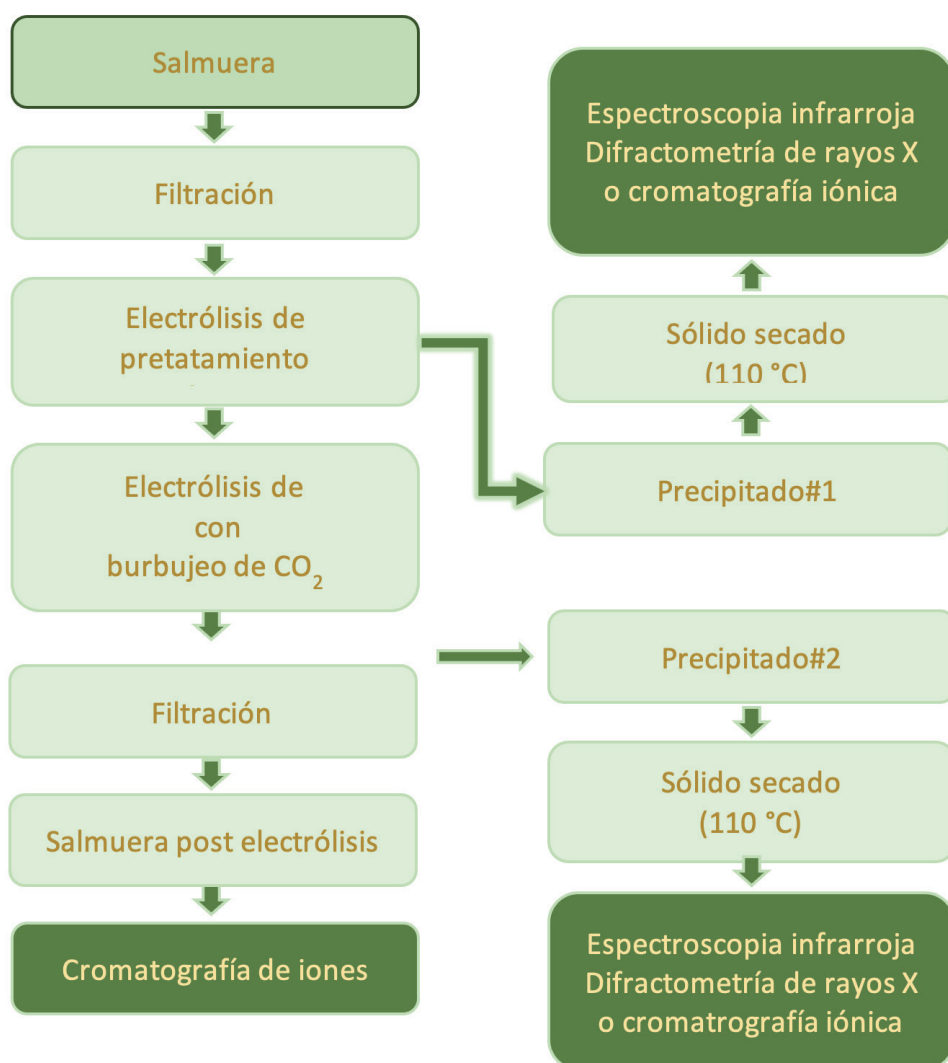


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso aplicado a las muestras de salmuera.
Un esquema de los sistemas utilizados se muestra en la Figura S3.

Con un papel de filtro Whatman® grado 4 (tamaño de retención de 20 - 25 μm) de 125 mm de diámetro, se filtran las muestras de las salmuera. Un volumen de 800 mL del filtrado se recoge en un beaker de 1 L para hacer la precipitación. Se utilizó una fuente de poder Keysight E3633A con capacidad de dar 8 V y 20 A. Los electrodos utilizados son electrodos separados de malla de platino y se lavaron con agua desionizada antes de sumergirlos en la salmuera. El proceso de electrólisis se realiza en el Laboratorio LabVolta de la Universidad de Costa Rica, dentro de una capilla de extracción de gases, puesto que se genera gas cloro Cl_2 debido a la presencia de cloruro de sodio NaCl . El proceso global de electrólisis duró tres horas y se mantuvo continuamente la disolución en agitación con una velocidad de 600-650 rpm. El esquema gráfico se puede visualizar en la Figura 1.

En este trabajo se realiza una primera precipitación para separar el magnesio y luego inyectar CO_2 para precipitar el calcio. La primera electrólisis es denominada electrólisis de pretratamiento y se efectúa para separar los precipitados de magnesio que se identificaron como precipitado#1. La disolución se filtra para aislar el precipitado#1, este sólido se seca a 110 °C por tres horas en una estufa al vacío Thermo Scientific Lab-Line EM 2466, se tomaron las muestras necesarias

para el análisis por difracción de rayos X y por espectroscopía infrarroja y el material restante se almacenó en viales. La masa del precipitado obtenido se determinó en una balanza Ohaus Scout Pro del laboratorio del CELEQ.

La segunda electrólisis se llevó a cabo en la disolución obtenida durante la primera electrólisis. Se agrega un burbujeo continuo de dióxido de carbono con un cilindro de CO_2 a 1000 psi para propiciar la formación de los carbonatos de los elementos de interés (litio y calcio) de acuerdo con lo recomendado por H. Xie et al.[14]. Al finalizar esta segunda etapa se obtiene la salmuera post-electrólisis –que se analizó por cromatografía líquida (iónica)– y el precipitado#2, también sólido, fue secado a 110 °C por tres horas en una estufa al vacío Thermo Scientific Lab-Line EM 2466 y posteriormente analizado por difracción de rayos X y espectroscopía infrarroja.

Optimización de la precipitación electroquímica

Para optimizar los parámetros del proceso de precipitación electroquímica se realizó un estudio con el fin de determinar cuáles son las condiciones más favorables de ciertas variables. Entre las variables a considerar están: los valores de voltaje de [3 – 4] V, el uso de CO_2 , el efecto de la dilución de la salmuera, la densidad de corriente y el tipo de electrodo (concéntrico o separado).

Se realiza esta optimización en la salmuera Diana Colorado lejía cocinada. El sistema se configura similarmente a los pasos descritos en la sección anterior con las siguientes modificaciones: a la salmuera filtrada se le aplican 5 A (0,230 A/cm²) por cuatro horas para obtener el precipitado#1 que se separa; se continúa con la segunda electrólisis por otras cuatro horas más con burbujeo de CO_2 , al final de la cual se obtiene el precipitado#2. Para caracterizar este proceso se analiza la salmuera postelectrólisis por cromatografía iónica, los dos precipitados obtenidos se analizan mediante cristalografía de rayos X y espectroscopía infrarroja. A fin de conocer si los iones magnesio, calcio o litio están presentes en el precipitado o en la salmuera, se preparan varias disoluciones a partir del precipitado #1 y otras a partir del precipitado #2 que luego fueron analizadas por cromatografía iónica; para ello se disuelven 2 g de precipitado en 250 mL de agua desionizada.

Resultados

Todas las salmueras tienen un pH extremadamente básico con valores que van de 14,980 a 15,734 y con una salinidad alta que va de 330,5 PSU a 340,8 PSU. Estos datos se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Determinación del pH y la salinidad de muestras de las salmueras del distrito Colorado de Abangares tomadas en abril de 2021.

Nombre de la muestra	pH	Incertidumbre expandida del pH	T (°C)	Salinidad (PSU)
Santos Prieto lejía cocinada	14,980	0,008	25,0	330,5
Santos Prieto Agua de Pozo	9,814	0,006	25,6	194,7
Santos Prieto lejía normal	15,280	0,007	25,2	333,9
Bernio Garay Lejía normal	15,734	0,007	25,2	340,8
Bernio Garay Agua de Pozo	8,905	0,007	25,7	172,5
Diana Colorado Agua de Pozo	15,161	0,007	25,4	328,8
Diana Colorado lejía cocinada	15,227	0,009	25,2	334,4

Los resultados de los análisis por cromatografía iónica de las salmueras antes de los ensayos electroquímicos se muestran en los Cuadros 3 y 4.

En general se observa que las muestras de pozo presentan una concentración menor de sales respecto a las lejías, debido a esto se hizo la precipitación electroquímica en las muestras de lejía de las fincas de Diana Colorado, Bernio Garay y Santos Prieto. Es notorio que las muestras de lejía tengan una concentración bastante baja de calcio respecto a las aguas de pozo (Cuadro 4), debido a precipitación del carbonato de calcio durante la producción de la sal. Esto representa una gran ventaja para los objetivos de este trabajo, ya que normalmente el calcio y el magnesio pueden precipitar simultáneamente o interferir uno en la precipitación del otro.

Cuadro 3. Determinación por cromatografía iónica de la concentración (mg/L) de iones en las salmueras de agua de pozo de Colorado de Abangares en 2021.

Salmuera	Bernio Garay agua de pozo FD 434	Diana Colorado agua de pozo FD 481	Santos Prieto agua de pozo FD 516
Magnesio (± 30)	6090	NR	6780
Calcio (± 30)	1400	$(282,6 \pm 0,6) \times 100$	1190
Sodio $\times 10^2$ (± 4)	466	831	526
Potasio $\times 10$ (± 3)	167	260	180
Cloruro $\times 10^3$ (± 2)	121	221	-
Sulfato $\times 10^3$ ($\pm 0,3$)	9,9	17,2	-
Fluoruro	< 79	< 87	-
Nitrito	< 320	< 350	-
Nitrato	< 360	< 400	-
Fosfato	< 1800	< 2000	-
Amonio	< 19	< 21	< 23
Litio	nd	nd	nd

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR).

NR: Pico no resuelto en el cromatograma,

nd: por debajo del límite de detección.

Cuadro 4. Determinación por cromatografía iónica de la concentración (mg/L) de iones en las salmueras de Colorado de Abangares en 2021.

Salmuera	Santos Prieto lejía cocinada ^a	Santos Prieto lejía normal ^b	Bernio Garay lejía normal	Diana Colorado lejía cocinada
Litio ($\pm 0,4$)	2,2	2,8	4,3	2,3
Sodio $\times 10^4$ ($\pm 0,5 \times 10^3$)	5,1	3,9	3,2	5,6
Potasio $\times 10^4$ ($\pm 0,08 \times 10^4$)	1,16	1,38	1,43	1,21
Calcio ± 2	24	7	2,3	4,4
Magnesio $\times 10^4$ ($\pm 0,4 \times 10^4$)	4	4,9	5,4	4,7
Cloruro $\times 10^5$ ($\pm 0,2 \times 10^5$)	1,4	1,7	1,5	1,6
Sulfato $\times 10^4$ ($\pm 0,6 \times 10^4$)	3,8	6,5	5	4,5

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Instituto Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).

a: la lejía cocinada se refiere al proceso que involucra evaporación con leña.

b: la lejía normal se refiere al proceso que se realiza por evaporación por secado al sol.

Resultados de condiciones de precipitación por electrólisis

Si bien para realizar la precipitación de las salmueras se pueden utilizar electrodos concéntricos, estos hacen más difícil el control de la corriente, pues alcanzan valores tan altos que no favorecen la precipitación. En cambio, al utilizar electrodos separados se logra un control de la corriente que resulta en corrientes más bajas que sí favorecen la precipitación.

Las mejores condiciones para la precipitación de las salmueras –según el esquema de la Figura 1– se muestran en el Cuadro 5. La precipitación consiste en un pretratamiento de electrólisis sin burbujeo de CO_2 para favorecer la precipitación del magnesio, seguida de una etapa de precipitación con burbujeo de CO_2 para favorecer la formación de carbonatos. Solamente una de las salmueras fue diluida (la salmuera de Santos Prieto Lejía Normal, 200 mL de la muestra en 600 mL de agua desionizada, para un factor de dilución de 3) para evaluar el efecto de la alta salinidad en la precipitación. Se obtuvo que la densidad de corriente para la salmuera diluida es de $0,073 \text{ A/cm}^2$ y para las salmueras sin diluir de $0,200 \text{ A/cm}^2$. En general, las salmueras sin diluir presentan una mayor precipitación de producto por la mayor concentración de sales.

Cuadro 5. Parámetros empíricos durante la electrólisis de precipitación de las salmueras de Colorado de Abangares según se describe en el diagrama de la Figura 1.

Salmuera	Santos Prieto lejía normal diluida	Diana Colorado lejía cocinada	Bernio Garay lejía normal	Santos Prieto lejía cocinada
Voltaje (V)	6 – 5	8 – 6	8,8	8 – 7
Corriente (A)	1,55	5,556	5,543	5 – 4
Densidad de corriente (A/cm^2)	0,073	0,260	0,260	0,234
Tiempo (minutos)	180	180	180	180
Masa (g) del precipitado	1,1	7,3	2,6	7,1

Ensayos realizados en el Laboratorio de LabVolta del CELEQ de la Universidad de Costa Rica.

a: la lejía cocinada se refiere al proceso que involucra evaporación con leña.

b: la lejía normal se refiere al proceso que se realiza por evaporación por secado al sol.

Resultados de la caracterización de precipitados por IR y Rayos X

Se caracterizaron los precipitados obtenidos por espectroscopía infrarroja y análisis de rayos X de polvos. El análisis de los espectros de infrarrojo de los precipitados obtenidos de las salmueras muestra señales de grupos O-H, C-O y M-O, como se indica en la Figura 2a [26]. Los difractogramas de rayos X de estos precipitados obtenidos presentan picos de mayor intensidad correspondientes a $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y a NaCl (Figura 2b), con lo que se tiene que el precipitado obtenido se compone principalmente de una mezcla de ambos compuestos. Se concluye entonces que debido a la alta proporción Mg:Ca, se favorece siempre la precipitación de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (precipitado#2 de Figura 1) aunque se utilice CO_2 . Por lo tanto, la salmuera tiene potencial para usarse como una buena fuente de magnesio al seguir este procedimiento.

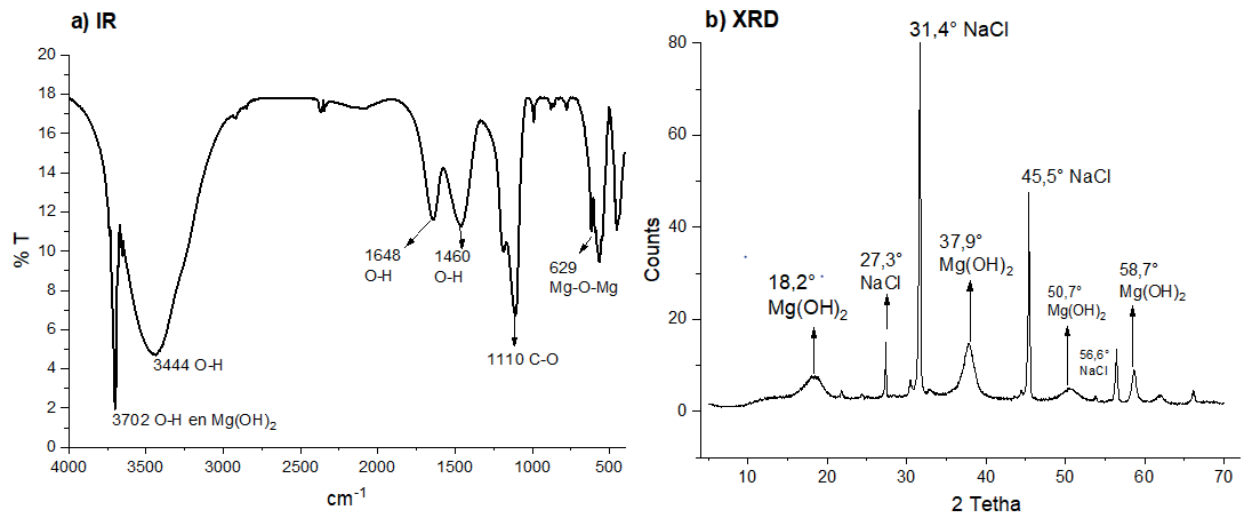


Figura 2. Caracterización del precipitado#1 (Figura 1) de la muestra de salmuera Diana Colorado Lejía Cocinada por medio de a) espectroscopia infrarroja ATR-FTIR y b) difracción de rayos X de polvos.

Resultados de la caracterización de salmueras post electrólisis

La caracterización de las salmueras post-electrólisis se hizo por cromatografía iónica posterior al proceso de electrólisis por tres horas y se enseñan los resultados en el cuadro 6. Se observa que luego de la electrólisis permanece una concentración de magnesio significativa en estas salmueras que podría aprovecharse si se aplica la electrólisis por un intervalo mayor de tiempo.

Cuadro 6. Determinación de la concentración (mg/L) de las especies iónicas mayoritarias en salmueras después de hacer la electrólisis por tres horas.

Salmuera	Santos Prieto lejía cocinada	Bernio Garay lejía normal	Diana Colorado lejía cocinada
Litio	3,3 ± 0,3	3,1 ± 0,3	1,5 ± 0,3
Sodio	(5,6 ± 1) × 10 ³	(36 ± 7) × 10 ³	(58 ± 11) × 10 ³
Potasio	335 ± 67	(15 ± 3) × 10 ³	(12,4 ± 2,4) × 10 ³
Calcio	2,6 ± 3	2,1 ± 0,2	29 ± 3
Magnesio	(1,1 ± 0,1) × 10 ³	(58 ± 6) × 10 ³	(44,9 ± 4,4) × 10 ³
Cloruro	(1,4 ± 0,1) × 10 ³	(170 ± 17) × 10 ³	(153 ± 15) × 10 ³
Sulfato	278 ± 56	(57 ± 11) × 10 ³	(43 ± 11) × 10 ³

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Instituto Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).

a: la lejía cocinada se refiere al proceso que involucra evaporación con leña.

b: la lejía normal se refiere al proceso que se realiza por evaporación por secado al sol.

Resultados de la electrólisis de optimización

Para evaluar el efecto del CO_2 , se aplicó una electrólisis optimizada (5 A, 4 horas) a la muestra de la salmuera Diana Colorado, porque es la muestra con la mayor concentración de magnesio. Los resultados se presentan en el Cuadro 7.

En la electrólisis de optimización de condiciones se aplicó una corriente de 5 A por cuatro horas para una densidad de corriente similar a las pruebas de precipitación electroquímica iniciales, con valores de $0,230 \text{ A/cm}^2$ (Cuadro 5). Con estas modificaciones se obtuvo hasta el triple de la cantidad de precipitado #1 y #2 que habían sido obtenidos al aplicar la electrólisis por solamente tres horas.

El resultado de los espectros de infrarrojo del precipitado#1 (sin uso de CO_2) y del precipitado#2 (con uso de CO_2) indica señales sugerentes de grupos OH, C-O y de M-O; mientras que los difractogramas de rayos X de los precipitados obtenidos de este proceso mostraron señales que indican que están presentes el hidróxido de magnesio y el cloruro de sodio en ambos, igual que en los anteriores. No se observan diferencias por el uso de CO_2 en los precipitados y no hubo evidencia de señales de otros compuestos en la muestra, lo cual indica que la precipitación podría realizarse sin uso de CO_2 .

En las disoluciones elaboradas con los precipitados #1 y #2 hay una alta concentración de cationes sodio y magnesio, junto con los aniones bromuro, sulfato y potasio. Estos datos se presentan en el Cuadro 7. La distribución de magnesio en el proceso optimizado muestra que los precipitados recuperan conjuntamente 2,8% del magnesio inicial (1,35% en precipitado #1 y 1,46% en precipitado #2), permaneciendo el 91% en la salmuera post-electrólisis. Se observa un incremento en la concentración de calcio en ambos precipitados, atribuible a la contaminación durante el proceso. Lo anterior indica que las salmueras estudiadas poseen potencial para la extracción de magnesio en forma de $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Las concentraciones de litio $-[1,8-4,3] \text{ mg/L}$ en las salmueras iniciales– son insuficientes para justificar la explotación comercial por este método.

Cuadro 7. Determinación de la concentración (mg/L) de las especies iónicas mayoritarias en la muestra de la salmuera Diana Colorado en los diferentes productos obtenidos durante la electrólisis de cuatro horas.

Muestra	Litio ($\pm 0,1$)	Sodio (± 689) (± 695) (± 11816)	Potasio (± 40) (± 38) (± 2690)	Calcio (± 14) (± 10) (± 4)	Magnesio (± 203) (± 215) (± 4265)	Cloruro (± 523) (± 653) (± 14898)	Sulfato (± 128) (± 155) (± 9697)
precipitado#1 sin CO_2	1,4	3446	199	139	2028	5226	641
precipitado#2 con CO_2	1,1	3474	189	101	2150	6534	773
lejía cocinada post electrólisis 4 horas	1,8	59081	13452	43	42650	148981	48484

Ensayos realizados en el Laboratorio de Geoquímica Volcánica del Instituto Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OVSICORI) de la Universidad Nacional de Costa Rica (UNA).

La electrólisis optimizada por cuatro horas se hizo según el procedimiento indicado en el diagrama de la figura 1.

Un balance de masa y energía se muestra en el Cuadro 8. Inicialmente en la salmuera hay una cantidad de 37 g de magnesio y de esta salmuera se obtiene una cantidad de 16,8 g de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ con la primera electrólisis y luego 20,6 g en la segunda electrólisis. A pesar de esto,

aún sigue quedando magnesio remanente en disolución que se podría continuar aprovechando. Se estima, además, que el costo de producción por gramo de magnesio para este proceso sería de \$0,036USD/g.

Cuadro 8. Balance de masa y energía para la obtención de magnesio a partir de la electrólisis de la salmuera Diana Colorado Lejía Cocinada de Colorado de Abangares.

Etapa	Magnesio (g)	Masa Precipitado $Mg(OH)_2$ (g)	Tiempo (h)	Energía (kWh)	Costo (\$/g Mg)	Observaciones
Salmuera inicial	37	-	-	-	-	Material de partida
↓ Electrólisis pretratamiento (5A, 4h)	Primera precipitación					
Precipitado #1	0.5	16.8	4	0.14	0.036	Recuperación: 1.35% Mg
↓ Filtración						
↓ Electrólisis con CO_2 (5A, 4h)	Segunda precipitación					
Precipitado #2	0.54	20.6	4	0.14	0.036	Recuperación: 1.46% Mg
↓ Filtración						
Salmuera post-electrólisis	34	-	-	-	-	Material final para recuperación

Según el procedimiento descrito en la Figura 1.

Otros metales como el calcio y litio representan menos de un 0,1% de la cantidad de magnesio y por eso no se tomaron en cuenta en el balance de masa.

En la información suplementaria se describe el cálculo del consumo energético.

Para el 2021 se reporta un costo de producción industrial de magnesio de \$0,006USD por gramo [27]. Este precio ha oscilado debido a su elevado costo de producción y su dependencia geopolítica porque China ha reducido su producción para alcanzar sus objetivos anuales de emisiones. En comparación, el costo de la electrólisis propuesta en este trabajo (0,036 USD/g) es unas cinco veces mayor, atribuible principalmente a la escala de laboratorio y al uso de condiciones aún no del todo optimizadas. Existen diferentes modificaciones que se podrían realizar en el proceso de electrólisis para mejorar su eficiencia. Por ejemplo, en el trabajo de Sano et al. [15] utilizaron un sistema de electrólisis en flujo continuo con una membrana de intercambio catiónico y reportan un costo de 0,97 USD/kg (0,00097 USD/g) lo que demuestra el potencial de reducción de costos por escalamiento. En esa investigación se reportaron problemas de contaminación por la coprecipitación de $CaCO_3$, sin embargo, en el caso de las salmueras concentradas de Abangares esto no sería un problema ya que la concentración de calcio es muy baja. Los costos de producción podrían reducirse aún más si, por ejemplo, se utilizan electrodos de acero, de mayor área superficial y con energía solar. Todo este proceso se podría adaptar por medio de un diseño experimental de superficie de respuesta para optimizar los costos y sería el enfoque para continuar con esta línea de investigación.

Conclusiones y recomendaciones

Los resultados muestran que los precipitados obtenidos se componen principalmente de una mezcla de hidróxido de magnesio con cloruro de sodio. Debido a que la mayor parte del precipitado obtenido es magnesio –como $\text{Mg}(\text{OH})_2$ – el cual también es catalogado como un ion de importancia creciente, se puede considerar a estas salmueras como una fuente relevante de magnesio, que se puede destinar para el uso en aplicaciones energéticas y electrónicas. El método aplicado en este trabajo es una estrategia de minería del mar que no requiere del uso de agentes químicos en cantidades excesivas.

Según las pruebas realizadas, no se considera necesario realizar la dilución de la salmuera para el proceso de electrólisis. Tampoco es útil el uso de CO_2 porque no se observa un cambio significativo en la masa del precipitado obtenido. Para propiciar una precipitación mayor de la salmuera se requiere de un área de electrodo mayor y de la aplicación de la electrólisis por un intervalo de tiempo mayor.

En general, las salmueras son una fuente rica de magnesio el cual que puede ser separado de forma bastante selectiva. El precipitado obtenido de estas salmueras está compuesto principalmente por $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y NaCl , con pequeñas cantidades de litio y calcio, entre otros iones.

El uso de técnicas electroquímicas para la extracción de sales del mar está en constante innovación y su uso va en aumento, esto fomenta aspectos importantes como la reducción o la ausencia de agentes químicos contaminantes.

Las características de las salmueras de la extracción de sal de Colorado de Abangares –tales como su alto contenido de magnesio y su bajo contenido de calcio– hacen favorable la exploración de otros métodos de extracción que puedan a su vez disminuir el costo de producción y lograr que la electrólisis sea más competitiva.

Agradecimientos

Diego González le agradece al posgrado en Química de la Universidad de Costa Rica (UCR), a la Vicerrectoría de Investigación de la misma universidad y al Consejo Nacional de Rectores (CONARE).

Se agradece al equipo del CIMAR involucrado y a Josué Álvarez por la ayuda brindada en el desarrollo de este trabajo.

Se agradece además a Mavis L. Montero del CICIMA, UCR, a Alejandro Rodríguez del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, y a la Cooperativa Nacional de Productores de Sal, R.L por su apoyo con el muestreo y mediciones.

Se agradece a la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica por su colaboración en los ensayos.

Referencias

- [1] A. Valverde-Espinoza, *La ciudad de Puntarenas: Una aproximación a su historia económica y social 1858-1930*, 1st ed. Universidad de Costa Rica, Sede del Pacífico, 2008.
- [2] EUsalt, "Harvesting salt by solar evaporation." Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: <https://eusalts.com/about-salt/salt-production/solar-evaporation>
- [3] G. Feng, N. Zuo-ren, W. Zhi-hong, G. Xian-zheng, and Z. Tie-yong, "Assessing environmental impact of magnesium production using Pidgeon process in China," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, no. 18, pp. 749–754, 2008.
- [4] M. S. Diallo, M. R. Kotte, and M. Cho, "Mining Critical Metals and Elements from Seawater: Opportunities and Challenges," *Environ Sci Technol*, vol. 49, no. 16, pp. 9390–9399, Apr. 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b00463.

- [5] D. Fontana, F. Forte, M. Pietrantonio, S. Pucciarmati, and C. Marcoaldi, "Magnesium recovery from seawater desalination brines: a technical review," Dec. 01, 2023, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s10668-022-02663-2.
- [6] L. F. Berrio-Betancur *et al.*, "Desarrollo de la industria de aleaciones de magnesio en Colombia - una oportunidad," *DYNA (Colombia)*, vol. 84, no. 203, pp. 55–64, Dec. 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n203.66440.
- [7] E. L. Bray, "2018 Minerals Yearbook MAGNESIUM," 2021. Accessed: Oct. 06, 2025. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2018/myb1-2018-magnesium-metal.pdf>
- [8] US Department of Energy, "Critical Minerals and Materials," 2018. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2021/01/f82/DOE%20Critical%20Minerals%20and%20Materials%20Strategy_0.pdf
- [9] T. Hoshino, "Innovative lithium recovery technique from seawater by using world-first dialysis with a lithium ionic superconductor," *Desalination*, vol. 359, pp. 59–63, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.desal.2014.12.018.
- [10] B. S. Oh, S. G. Oh, Y. J. Jung, Y. Y. Hwang, J. W. Kang, and I. S. Kim, "Evaluation of a seawater electrolysis process considering formation of free chlorine and perchlorate," *Desalination Water Treat*, vol. 18, no. 1–3, pp. 245–250, 2010, doi: 10.5004/dwt.2010.1780.
- [11] C. Carré, A. Zanibellato, M. Jeannin, R. Sabot, P. Gunkel-Grillon, and A. Serres, "Electrochemical calcareous deposition in seawater. A review," Jul. 01, 2020, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s10311-020-01002-z.
- [12] B. S. Lalia and R. Hashaikeh, "Electrochemical precipitation to reduce waste brine salinity," *Desalination*, vol. 498, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.desal.2020.114796.
- [13] N. Mahmud, D. V. F. Alvarez, M. H. Ibrahim, M. H. El-Naas, and D. V. Esposito, "Magnesium recovery from desalination reject brine as pretreatment for membraneless electrolysis," *Desalination*, vol. 525, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.desal.2021.115489.
- [14] H. Xie *et al.*, "Using electrochemical process to mineralize CO₂ and separate Ca²⁺/Mg²⁺ ions from hard water to produce high value-added carbonates," *Environ Earth Sci*, vol. 73, no. 11, pp. 6881–6890, Jun. 2015, doi: 10.1007/s12665-015-4401-z.
- [15] Y. Sano, Y. Hao, and F. Kuwahara, "Development of an electrolysis based system to continuously recover magnesium from seawater," *Heliyon*, vol. 4, p. e00923, 2018, doi: 10.1016/j.heliyon.2018.e00923.
- [16] B. S. Lalia, A. Khalil, and R. Hashaikeh, "Selective electrochemical separation and recovery of calcium and magnesium from brine," *Sep Purif Technol*, vol. 264, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2021.118416.
- [17] C. Barchiche *et al.*, "Characterization of calcareous deposits in artificial seawater by impedance techniques: 3 - Deposit of CaCO₃ in the presence of Mg(II)," *Electrochim Acta*, vol. 48, no. 12, pp. 1645–1654, May 2003, doi: 10.1016/S0013-4686(03)00075-6.
- [18] F. Souiad *et al.*, "Electrodeposition of calcium carbonate and magnesium carbonate from hard water on stainless-steel electrode to prevent natural scaling phenomenon," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 19, Oct. 2021, doi: 10.3390/w13192752.
- [19] C. H. Díaz Nieto, J. A. Kortsarz, M. L. Vera, and V. Flexer, "Effect of temperature, current density and mass transport during the electrolytic removal of magnesium ions from lithium rich brines," *Desalination*, vol. 529, May 2022, doi: 10.1016/j.desal.2022.115652.
- [20] K. Zeppenfeld, "Electrochemical removal of calcium and magnesium ions from aqueous solutions," *Desalination*, vol. 277, no. 1–3, pp. 99–105, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.04.005.
- [21] K. Akamine and I. Kashiki, "Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 1)-Mechanism of Electrodeposition," *Zairyo-to-Kankyo*, vol. 51, pp. 496–501, 2002.
- [22] D. Nguyen Dang *et al.*, "Role of Brucite Dissolution in Calcium Carbonate Precipitation from Artificial and Natural Seawaters," *Cryst Growth Des*, vol. 17, no. 4, pp. 1502–1513, Apr. 2017, doi: 10.1021/acs.cgd.6b01305.
- [23] M. Gómez Batista *et al.*, "Determinación espectrofotométrica de pH en agua de mar utilizando indicador púrpura de meta-cresol purificado y un espectrofotómetro Ocean Optics. Red de Investigación de Estresores Marinos - Costeros en Latinoamérica y El Caribe – REMARCO," Santa Marta, 2021. Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: <https://remarco.org/manual-ao/>
- [24] X. Li *et al.*, "Purified meta-Cresol Purple dye perturbation: How it influences spectrophotometric pH measurements," *Mar Chem*, vol. 225, p. 103849, 2020, doi: 10.1016/j.marchem.2020.103849.
- [25] C. F. Berghoff, "Procedimiento de determinación espectrofotométrica del pH de agua de mar con púrpura de meta-cresol," 2020. Accessed: Oct. 07, 2025. [Online]. Available: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2022/03/berghoff_informe_ases_transf_086_2020_protocolo_ph.pdf

- [26] A. Ansari, A. Ali, M. Asif, and Shamsuzzaman, "Microwave-assisted MgO NP catalyzed one-pot multicomponent synthesis of polysubstituted steroidal pyridines," *New Journal of Chemistry*, vol. 42, no. 1, pp. 184–197, 2018, doi: 10.1039/c7nj03742b.
- [27] B. Daigle and S. Decarlo, "Office of Industries Magnesium Price Spike: A Flash in the Pan?," 2021. Accessed: Oct. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/magnesium_wp_compliant_.pdf
- [28] H. I. Lee *et al.*, "The Structural Effect of Electrode Mesh on Hydrogen Evolution Reaction Performance for Alkaline Water Electrolysis," *Front Chem*, vol. 9, Nov. 2021, doi: 10.3389/fchem.2021.787787.

Material suplementario

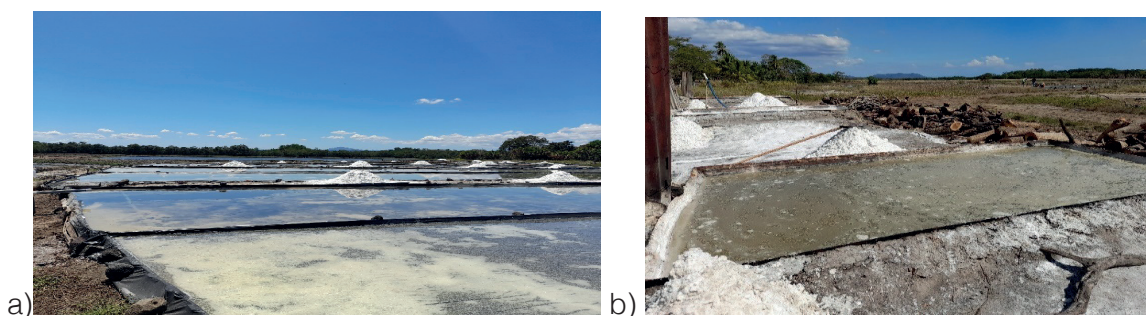


Figura S1. Proceso de extracción de sal del agua de mar. a) Pila de cristalización usada en la producción de sal cruda; b) Recipiente metálico con agua de mar sobre un horno de barro usado en la producción de sal cocinada. Fotografías por autora tomadas en Colorado de Abangares en la finca Bernio Garay del día 10/02/2022.

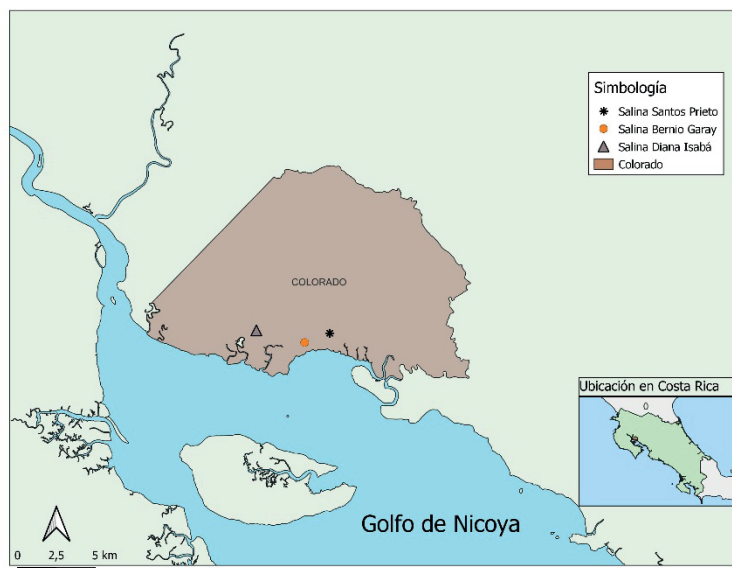


Figura S2. Región de Abangares en el Golfo de Nicoya con los puntos de muestreo de las salinas. Fuente: Modificación del mapa de la región de muestreo en Colorado de Abangares realizado por Ana Cristina Brenes Granados y Rafael Bonilla Mata.



Figura S3. Configuración del sistema de electrólisis para la precipitación de calcio, magnesio y litio a partir de salmueras.

Estimación del área de los electrodos

Para la determinación de la densidad de corriente se realiza un cálculo del área superficial del electrodo considerando la geometría del electrodo según la información presente en el Cuadro 1 y el procedimiento descrito en el artículo de Lee y colaboradores [28] para el cálculo de las unidades por área, segmentos independientes y de unión del electrodo.

Cuadro 1. Características del electrodo separado de Pt/Ir 04/1 utilizado en la electrólisis.

30 mm	Diámetro del electrodo
15 mm	Radio del electrodo
40 mm	Altura del electrodo
0,120 mm	Diámetro del alambre
0,5 mm	Ancho medio de poro

Datos obtenidos de la ficha técnica del fabricante de los electrodos, marca Heraeus.

Para esto se definió primero una unidad de malla, así la longitud de una unidad de malla está compuesta por 2 alambres y un poro, es decir 2 veces el diámetro del alambre y el ancho del poro. Luego se realizó el cálculo del área cilíndrica del electrodo para establecer una relación entre el área de las unidades de malla y el área total y de esta manera calcular el número total de unidades de malla en el electrodo.

Cálculo del área de un electrodo cilíndrico

$$A_{cilindro} = 2\pi rh$$

$$A_{electrodo} = 2 \cdot \pi \cdot 15 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}$$

$$A_{electrodo} = 3,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

Según el artículo de Lee [28] se puede realizar el cálculo de área con las siguientes fórmulas:

$$\text{Área del segmento independiente} = \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot s \cdot w$$

$$\text{Área del segmento de unión} = \pi \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot s^2 = \frac{3\pi}{8} \cdot s^2$$

Donde:

s= ancho del alambre

w= ancho medio de poro

Luego se multiplicó el área de cada sección independiente y de segmento de unión por el número de segmentos correspondientes. Para el cálculo de la cantidad de segmentos se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Segmentos independientes} = 2 * n * (n + 1)$$

$$\text{Segmentos de unión} = (n + 1)^2$$

Donde n= número de poros, contados a lo largo y a lo ancho como una única unidad

Finalmente, estos valores se multiplicaron por las unidades totales de poro para obtener el valor del área total del electrodo de malla. Las unidades de malla totales se relacionan de manera cuadrática con el número total de poros.

Cálculo del consumo energético

Se tiene la aplicación de 5 A por 4 horas a una tensión constante de 7 V, se obtiene el consumo energético:

Este valor transformado a kW*h corresponde a:

Luego para un consumo de energía menor a 3000 kWh se tiene una tarifa de 70,83 colones por cada kWh, esto quiere decir que el costo de producción para este consumo es de 10 colones.

Cálculo de masa de magnesio:

$$\text{Masa de magnesio} = V_{\text{salmuera}} * \text{Concentración magnesio}_{\text{salmuera}}$$

$$\text{Masa de magnesio} = 0,8 \text{ L} * 46629 \text{ mg/L}$$

$$\text{Masa de magnesio} = 37303 \text{ mg}$$

$$\text{Masa de magnesio} = 37,30 \text{ g}$$

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.