

AGUA DE MAR COMO FUENTE SOSTENIBLE DE AGUA Y RECURSOS ESTRATÉGICOS

VÍCTOR MONSALVO
JUAN ARÉVALO
JAVIER HERNÁNDEZ
ALEJANDRO CRUZ
YOLANDA BARAHONA
NAIARA HERNÁNDEZ

En la actualidad, más de 20.000 plantas desalinizadoras proporcionan un suministro de agua seguro para casi el 8% de la población mundial ubicada en los municipios costeros urbanos más áridos de Europa, África, Australia, América y el Medio y Lejano Oriente. Al igual que otras plantas de tratamiento de agua, las plantas de desalinización de agua de mar (EDAM) generan corrientes sin valor denominada concentrado o salmuera y que consiste en agua de mar concentrada a casi el doble de salinidad.

Las EDAM cuentan con sistemas integrales para monitorizar y prevenir impactos potenciales en los ecosistemas cercanos a las descargas de las EDAM durante todas las fases de diseño, implementación y operación. Se cuenta con una dilatada experiencia mundial de estudios de grandes proyectos de EDAM que permiten establecer estrategias para minimizar los impactos. Los métodos más utilizados para la gestión de concentrados de desalinización de agua de mar incluyen: descarga al océano a través de emisarios; y en EDAM de pequeño tamaño el concentrado puede reducirse mediante

un sistema de descarga cero para su gestión, trasladarse al sistema de alcantarillado cercano o su descarga subterránea a través de pozos y galerías. La última tendencia de la industria de la valorización de concentrados ha abierto la oportunidad de mejorar la sostenibilidad ambiental y económica de EDAM, ya que varios proyectos permiten vislumbrar las tendencias hacia su valorización.

El principal subproducto de las EDAM se conoce comúnmente como concentrado o salmuera. Contiene los compuestos disueltos presentes en el mar que son rechazados por las membranas de ósmosis inversa, utilizadas para obtener agua potable. El concentrado supone el 90-95% del volumen total de descarga de la EDAM. El resto es agua de retrolavado resultante de las limpiezas periódicas de los filtros de pretratamiento, que contiene partículas otros compuestos retirados del agua de mar antes de su desalinización. Durante la limpieza periódica de los filtros de pretratamiento se genera agua de retrolavado, que contiene partículas y otros compuestos eliminados del agua de la fuente salina antes de la desalinización. El concentrado de las EDAM que utilizan tomas de agua en mar

abierto tiene el mismo color, olor, contenido de oxígeno y transparencia que el agua de mar de origen. Por lo tanto, la descarga de concentrado a las masas de agua no cambia sus características físicas ni tiene impacto estético en el medio acuático. El aspecto visual de la descarga de la EDAM es el mismo que el del agua de mar, es decir, el concentrado es transparente y claro y no tiene impacto estético en el medio ambiente.

Cabe destacar que los procesos de desalinización de última generación empleados en las EDAM modernas utilizan una cantidad muy limitada de productos químicos. Todos los productos químicos añadidos para mejorar la calidad del agua producida son de calidad alimentaria (aprobados para consumo humano), biodegradables y seleccionados específicamente para no causar ninguna toxicidad en la vida marina acuática. A menudo se agregan ácidos e inhibidores de incrustaciones al agua de la fuente de la planta de desalinización para facilitar el proceso de separación de sal. Por lo general, estos aditivos son rechazados por las membranas de ósmosis inversa y se recogen en el concentrado. Sin embargo, estos compuestos acondicionadores de agua de mar se utilizan en concentraciones muy bajas y su contenido no altera significativamente la calidad del agua y concentrado. Las implicaciones ambientales del uso de dichos aditivos se validan antes de su uso, y solo se aplican para el tratamiento del agua de mar los aditivos aprobados por las agencias reguladoras pertinentes y que han demostrado ser inocuos para el medio ambiente.

La industria de la desalinización a menudo se enfrenta a desafíos sobre el impacto potencial de las descargas de salmuera en el medio marino. Sin embargo, la industria de la desalinización y sus reguladores cuentan con sistemas y procedimientos integrales para predecir, monitorear y prevenir posibles impactos ambientales, desde la planificación hasta el diseño, la construcción y la operación.

VALORIZACIÓN DE CONCENTRADOS Y EXTRACCIÓN DE MINERALES

La valorización del concentrado de EDAM está atrayendo una atención significativa

como una fuente potencial de agua y materias primas valiosas, algunas de ellas críticas para el crecimiento industrial sostenible y la transición hacia modelos verdes y digitales. Para fortalecer las capacidades en Materias Primas Críticas (CRM, por sus siglas en inglés) en todas las etapas de la cadena de valor, la Unión Europea implementó la Ley Europea de Materias Primas Críticas. Dentro de este plan de acción, se ha identificado una lista de materias primas críticas con alta importancia económica y elevado riesgo de suministro, promoviendo a su vez la minería innovadora y reciclaje de recursos, en coherencia con el concepto de economía circular.

El aprovechamiento del concentrado de EDAM para la recuperación de compuestos de interés supone un avance hacia la transición a una economía de autosuficiencia para mejorar la resiliencia a largo plazo, generar oportunidades comerciales y económicas, y proporcionar beneficios ambientales y sociales. La Figura 1 muestra las materias primas críticas identificadas en la Unión Europea, indicando el riego del suministro, junto con las principales industrias. Los aspectos más relevantes en la estrategia para la comercialización de los elementos recuperados de concentrados de EDAM se resume en la Figura 2.

El concentrado puede utilizarse como fuente de minerales valiosos, como el calcio, el magnesio y el cloruro de sodio. Los elementos de tierras raras también se pueden extraer de la salmuera, incluyendo el litio, molibdeno, vanadio, rubidio, estroncio, etc. Sin embargo, la recuperación de estos elementos presentes en los concentrados de EDAM se enfrenta a varios desafíos adicionales: la presencia de iones que forman compuestos de baja solubilidad, lo que genera riesgo de incrustaciones en los sistemas de separación; la interferencia de otros componentes en la extracción de minerales; y la alta presión osmótica de la salmuera, que reduce la eficiencia de las membranas de separación por presión en concentraciones elevadas.

Las recientes tensiones en el mercado mundial de elementos de tierras raras han llevado la disponibilidad y el suministro de metales raros a la vanguardia del debate sobre la sostenibilidad y la agenda de inves-

FIGURA 1
PROYECTOS DE VALORIZACIÓN DE CONCENTRADOS DE EDAM EN EL MUNDO

Supply Risk	Material									
5,98	LREEs	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5,63	HREEs	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3,91	Magnesium	●				●	●	●	●	●
3,90	Niobium	●		●			●	●	●	●
3,89	Germanium					●	●	●	●	●
3,55	Phosphorus	●				●	●	●	●	●
3,19	Borates	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3,09	Scandium						●	●	●	●
2,57	Strontium	●				●	●	●	●	●
2,54	Cobalt	●	●	●		●	●	●	●	●
2,38	PGMs	●				●	●	●	●	●
2,29	Beryllium						●			
2,27	Natural graphite	●	●			●	●	●	●	●
2,22	Bismuth					●	●	●	●	●
2,01	Antimony					●	●	●	●	●
1,79	Indium					●	●	●	●	●
1,69	Vanadium		●			●	●	●	●	●
1,64	Lithium	●	●			●	●	●	●	●
1,61	Tungsten					●	●	●	●	●
1,36	Tantalum					●	●	●	●	●
1,15	Fluorspar	●				●	●	●	●	●
1,26	Titanium	●	●			●	●	●	●	●
1,26	Gallium					●	●	●	●	●
1,19	Arsenic	●				●	●	●	●	●
1,18	Silicon metal	●	●		●	●	●	●	●	●
1,12	Hafnium						●	●	●	●
0,94	Molybdenum	●	●			●	●	●	●	●
0,93	Manganese	●	●	●	●		●	●	●	●
0,90	Tin	●		●		●	●	●	●	●
0,86	Chromium	●	●			●	●	●	●	●
0,83	Zirconium	●				●	●	●	●	●
0,68	Silver	●				●	●	●	●	●
0,59	Aluminium	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0,51	Tellurium					●	●	●	●	●
0,49	Nickel	●	●			●	●	●	●	●
0,46	Iron Ore	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0,41	Selenium	●	●			●	●	●	●	●
0,34	Zinc					●	●	●	●	●
0,34	Cadmium					●	●	●	●	●
0,32	Copper	●	●	●	●	●	●	●	●	●
0,19	Gold	●				●	●	●	●	●
0,09	Lead	●		●		●	●	●	●	●

Materials in red are critical raw materials. LREEs, HREEs and PGMs are groups of multiple raw materials.

Fuente: Bobba et al. (2020).

FIGURA 2
ESTRATEGIA PARA COMERCIALIZACIÓN DE ELEMENTOS RECUPERADOS EN CONCENTRADOS DE EDAM



tigación. Estos metales se utilizan para fabricar componentes críticos de numerosos productos ampliamente utilizados, como ordenadores, aviones, automóviles, teléfonos, dispositivos para aprovechar fuentes de energía renovable y dispositivos biomédicos.

El magnesio es uno de los compuestos recuperables de los concentrados de EDAM. Las últimas tendencias tecnológicas muestran que el magnesio está reemplazando al aluminio en las industrias del automóvil, la informática y la telefonía móvil porque es más de un 30% más ligero y de durabilidad comparable. Si bien las fuentes mineras terrestres de magnesio del mundo son bastante limitadas, el concentrado de EDAM contiene varios órdenes de magnitud en cantidades mayores de magnesio que puede recuperarse a un costo de producción competitivo mediante concentración y extracción selectiva.

Existe una creciente conciencia de que el desarrollo y la implementación de tecnologías de energía limpia y productos, procesos e industrias manufactureras sostenibles del siglo XXI también requerirán grandes cantidades de metales críticos y elementos valiosos como el litio, el cesio, el cobalto, el germanio y el vanadio, todo ellos presentes

en los concentrados de EDAM, lo que supone una oportunidad de aprovecharlos para obtener productos tan valiosos.

En resumen, los sistemas de valorización se centran en la recuperación de minerales del concentrado de EDAM, independientemente de la calidad de la corriente líquida restante, con el fin de extraer uno o más minerales que tengan valor comercial y puedan generarse a un costo inferior o competitivo y puedan generarse a un coste inferior o competitivo al de su producción mediante la minería terrestre y/o la producción química comercial. La transformación de la desalinización en un recurso de agua dulce asequible eleva la desalinización de agua de mar a una fuente primaria en lugar de suplementaria de agua para la agricultura, el suministro de agua potable e industrial. Por lo tanto, la valorización del concentrado de EDAM abre un nuevo lugar para proporcionar un suministro de agua sostenible a largo plazo para el mundo en general, teniendo en cuenta que, para muchos minerales y metales estratégicos, su cantidad en el océano supera en varios órdenes las fuentes mineras terrestres conocidas.

Además, la valorización del concentrado de EDAM crea nuevas oportunidades de negocio para que la industria del agua

aproveche la demanda de nuevos equipos, instrumentación y tecnología necesarios para mantener y servir a la industria minera de salmuera. La última tendencia en la adecuación de algunas membranas utilizadas para la nanofiltración de concentrado de EDAM, es una clara indicación del reconocimiento de la industria de la desalinización de la importancia de la minería de salmuera como una nueva oportunidad de negocio.

Durante la última década se han llevado a cabo destacados esfuerzos para buscar soluciones que permitan reducir los residuos y recuperar los recursos presentes en el concentrado. Un elemento central es la implementación de modelos económicos circulares en torno a los subproductos susceptibles de recuperación en las EDAM. Sin embargo, la aplicación a gran escala de las tecnologías ZLD sigue siendo limitada, y las tecnologías ZLD convencionales se enfrentan a obstáculos económicos y energéticos para la extracción asequible de minerales comercialmente valiosos contenidos en el concentrado de EDAM. En la Figura 3 se muestran los proyectos más destacados en

el mundo para la valorización del concentrado de EDAM.

A continuación, se resumen las principales características de los proyectos más destacados de valorización de salmueras en el mundo.

ENOWA

- Complejo industrial con varias tecnologías de desalinización y extracción selectiva al norte de Duba y 13 km al sur del Neom (Arabia Saudita)
- Prevé una capacidad de producir hasta 1,5 millones de m³ al día de agua en 2030. El complejo también producirá un conjunto de productos minerales y químicos que se venderán en mercados nacionales e internacionales y ayudarán a compensar el costo del agua y minimizar los impactos ambientales adversos.
- Recuperación y extracción de: agua, NaCl, KCl, Br, MgCl₂, Mg(OH)₂, CaSO₄

FIGURA 3
PROYECTOS DE VALORIZACIÓN DE CONCENTRADOS DE EDAM EN EL MUNDO



Fuente: Aqualia

- Tecnologías para la recuperación y extracción: Nanofiltración, concentrador (OARO), cristalizadores y planta producción de sal a vacío

Saline Water Conversion Corporation (SWCC)

- La SWCC cuenta con tecnología propia patentada de descarga cero de líquidos (ZLD), cuyo objetivo es extraer las sales y minerales valiosos del concentrado de EDAM y aumentar la recuperación de agua dulce hasta un 65 %. El objetivo es contribuir al desarrollo de la industria de acuerdo con la visión de los objetivos para el 2030.
- Se espera que la extracción de salmueras de desalación aporte 400 millones de dólares anuales al PIB saudí hasta 2030.
- SWCC ha firmado acuerdos con empresas locales e internacionales para convertir el concentrado en EDAM en productos químicos y sales útiles para las industrias saudíes, tales como agua, Mg, Br, K, Ca y NaCl.
- Tecnologías para la concentración, recuperación y extracción: nanofiltración, ósmosis inversa y concentradores.

HYREC

- Hyrec es un desarrollador, propietario y operador de EDAM, desalinización de alta recuperación y ZLD. Hyrec utiliza un proceso de ósmosis inversa asistida osmóticamente (OARO).
- El proceso OARO permite concentrar los sólidos disueltos hasta casi la saturación, lo que no sólo aumenta la tasa de recuperación de agua desalinizada, sino que también permite producir económicamente sales de gran pureza a partir de la salmuera concentrada.
- Hyrec-Maven: La primera planta OARO del mundo se está construyendo en Indonesia. La planta producirá 25.000 m³/día de agua desalinizada y 220.000 toneladas al año de sal marina de calidad

alimentaria. Hyrec comenzó a trabajar en este proyecto en 2018.

EDAS El Paso

- La empresa UpWell junto a la desalinizadora de agua superficial de El Paso ha instalado una planta para el desarrollo de procesamiento del concentrado, con el objetivo de:
- Recuperación de minerales proporcionando un ZLD (Zero liquid discarg). Compuestos recuperados: NaCl, CaSO₄, NaOH, K₂CO₃, Br, Mg. Rendimiento de producción de agua dulce próximo al 99 %.
- Preservar los recursos acuíferos finitos, produce agua de manera económica y con un bajo impacto en la huella de carbono.

Water and Added Value European (WAVE) Center

El Centro de innovación y desarrollo WAVE (figura 4) se ubica en el municipio de Adeje, en el suroeste de la isla de Tenerife, anexo a la EDAM de La Caleta. Canarias es un lugar estratégico para el desarrollo de soluciones innovadoras en torno a la desalinización, ya que posee un gran número de desaladoras y su climatología favorece el uso de energías renovables acoplados a los procesos de desalinización. Aqualia apuesta por la innovación y desarrollo del ciclo integral del agua para lo que ha construido, con la colaboración de Entemanser y el Ayuntamiento de Adeje, un centro de innovación de referencia denominado Centro WAVE (Water Added Value European Center). El centro cuenta con los recursos materiales y humanos necesarios para la realización de actividades destinadas tanto a la generación de conocimiento científico como a facilitar su desarrollo, transferencia y explotación.

El Centro WAVE, como ejemplo clave de la colaboración público-privada, es un centro abierto a todos los grupos de interés, en el que desarrollar de forma conjunta iniciativas. En el centro se propician colaboraciones de I+D+i con Universidades, Centros

FIGURA 4
CENTRO WAVE (WATER AND ADDED VALUE EUROPEAN CENTER) EN TENERIFE, ESPAÑA



Fuente: Aqualia

de Investigación, Organismos públicos y empresas privadas como un centro abierto en el que desarrollar actividades de forma conjunta y colaborativa.

El Centro está especialmente enfocado al desarrollo de iniciativas relativas, en un marco amplio, a sistemas de desalación de agua de mar, valorización del concentrado y acoplamiento con energías renovables. La configuración del Centro ofrece una plataforma flexible y multipropósito, fácilmente adaptable a las necesidades que van surgiendo y a las nuevas líneas de investigación que se pueden ir desarrollando, adaptándolos al contexto y a las nuevas situaciones que puedan acontecer en cualquiera de sus líneas de acción.

Las diversas instalaciones y el personal altamente cualificado del WAVE, proporcionan una infraestructura única para I+D+i, evaluación, demostración, formación y transferencia de tecnologías de desalinización. El centro cuenta con espacios comunes (oficinas, laboratorio, taller) y áreas dotadas de los servicios para la recepción y operación de tecnologías novedosas, con los siguientes objetivos:

- Promover la introducción en el mercado de tecnologías innovadoras de desalinización y valorización de salmueras.
- Contribuir a la sostenibilidad en un ciclo del agua integrado y circular.
- Contribuir a la conservación de las fuentes de agua y protección del medioambiente.
- Contribuir al desarrollo y competitividad del sector del agua local, regional y nacional
- Generar alianzas público-privadas para favorecer el impacto de las nuevas tecnologías.

La minería de salmuera convencional y los sistemas ZLD utilizan tecnologías basadas en la evaporación natural o térmica, como las balsas de evaporación y/o equipos mecánicos de evaporación térmica para concentrar la salmuera producida por las plantas de desalinización antes de que la salmuera concentrada sea procesada por cristalizadores térmicos. Estas soluciones son intensivas en energía por lo que son viables en geografías con precios de energía bajos. Por contra, en el caso de las balsas de evaporación de salmuera, las

sales mezcladas que cristalizan en el fondo de las balsas se recogen periódicamente. Dependiendo de las condiciones climáticas locales y las tasas de evaporación, la salmuera concentrada resultante puede necesitar cristalizarse mediante procesos térmico-mecánicos.

Uno de los sistemas con los que cuenta el Centro WAVE son balsas evaporativas, diseñadas como una serie de balsas de diferente profundidad y superficie que permiten separar selectivamente minerales de valor comercial. Estos sistemas se caracterizan por un bajo coste de inversión y operación. Sin embargo, son intensivos en espacio y han encontrado una aplicación limitada, principalmente para producir cloruro de sodio, además de minerales de calcio y magnesio. El control de la calidad de los minerales extraídos de los procesos de extracción de salmuera basados en balsas de evaporación es muy sencillo, pero está expuesto a las incertidumbres climáticas. Debido a las grandes necesidades de tierra de las balsas de evaporación solar y los altos costos de capital y energía extremadamente altos de los sistemas de evaporación térmica (generalmente de 4 a 6 veces más altos que los costos de la EDAM que genera el concentrado), su aplicación práctica, especialmente para proyectos de desalinización de agua de mar de tamaño mediano y grande, ha sido muy limitada y principalmente impulsada por factores locales como las regulaciones de descarga.

Otra de las soluciones con gran interés comercial es el proceso de nanofiltración (NF). Este sistema avanzado de valorización del concentrado de EDAM separa en dos corrientes: por un lado, minerales monovalentes que se encuentran naturalmente en el agua de mar (dominada principalmente por cloruro de sodio); y por otro, minerales multivalentes (dominada principalmente por sulfato y cloruro de calcio y magnesio).

Esta separación del concentrado en dos corrientes utiliza membrana de NF diseñados específicamente para un rechazo de magnesio de más del 85% y para un bajo rechazo de minerales monovalentes (menos del 15%). Esta separación es importante para producir minerales y metales puros comer-

cialmente viables porque los iones multivalentes (como el calcio y el magnesio) en la corriente de elementos monovalentes se consideran impurezas en los productos de sal comerciales; y viceversa. Además, la corriente de monovalentes puede someterse a un sistema de ósmosis inversa de ultra alta presión (UHPRO, por sus siglas en inglés) para recuperar más agua dulce y concentrar los elementos monovalentes. De manera similar, la corriente de multivalentes se procesa en un clarificador para la precipitación de sales de interés de calcio y magnesio.

Los elementos de ósmosis inversa convencionales tienen una sola función: separar el agua dulce de la salmuera. El sistema de valorización de salmuera con elementos de ósmosis inversa selectivos de minerales combina tres funciones: (1) producción de agua dulce; (2) separación y recuperación de minerales específicos, y (3) concentración de los minerales recuperados.

Las membranas de ósmosis inversa selectiva son de tamaño estándar y se pueden aplicar directamente en las EDAM existentes basadas en ósmosis inversa, una característica que facilitaría su adopción en toda la industria a un ritmo acelerado. Los elementos de ósmosis inversa selectiva operan dentro de las mismas presiones de alimentación y flujo que los elementos EDAM con ósmosis inversa estándar y, por lo tanto, la recolección de minerales se completa a una demanda de energía un orden de magnitud menor en comparación con los sistemas de minería de salmuera convencionales (basados en división monovalente-polivalente). El uso de esta nueva generación de sistemas de minería de salmuera permite evitar la necesidad de separación de salmuera monovalente y polivalente y costosos métodos de precipitación química para la recolección de minerales de magnesio y calcio.

Un beneficio importante es que minimiza significativamente el uso de procesos químicos para la extracción de minerales: dichos procesos son reemplazados por sistemas selectivos basados en membranas que utilizan menos de productos químicos y energía.

DESALACIÓN Y GASTRONOMÍA: UN MARIDAJE INESPERADO

Al igual que las depuradoras de aguas residuales se están convirtiendo paulatinamente en estaciones circulares o ecofactorías, capaces de extraer de los procesos de depuración agua regenerada, energía y recursos aprovechables para destinárselos a usos agrícolas o industriales, también las desaladoras pueden hacer lo propio. El departamento de Innovación y Tecnología de Aqualia ha desarrollado esta línea de trabajo en los últimos cuatro años. Hasta ahora, se ha resuelto exitosamente devolver al mar el concentrado de las desaladoras con garantías para no generar un impacto negativo en el medioambiente. Sin embargo, no se extrae el verdadero valor de esta corriente.

El valor de esa concentración es tal que puede dar origen a un componente que prácticamente toda la población, en menor o mayor medida, consume a diario: la sal de cocina. "Alma de Mar", es una línea de sales de mesa *gourmet* creada por Aqualia. Combinando procesos tradicionales e innovadores se obtiene esta sal de alta pureza, gracias a que el propio proceso de la EDAM elimina impurezas del agua de mar, a la que se le han añadido ocho sabores distintos para coronar el producto con un toque *gourmet*.

A diferencia de los procesos más intensivos, Alma de Mar se obtiene mediante un proceso sostenible que utiliza exclusivamente energía del sol y del viento, y que combina el sistema tradicional de extracción de salmuera a partir de agua de mar con las nuevas tecnologías. El proceso productivo es más eficiente y requiere menos espacio porque, gracias a la sinergia con la EDAM, partimos de una concentración de sales superior a la del agua de mar. Dependiendo de las condiciones climáticas (sol y viento, fundamentalmente), adaptamos el proceso para maximizar la recuperación de sal y garantizar su pureza". Y de ahí salen los diferentes destinos de la sal resultante: industrial o alimentario (https://www.youtube.com/watch?v=krqt6B8m_A0&t=23s).

La marca "Alma de Mar" está registrada en 38 países, cumpliendo con la normativa técnico-sanitaria para su uso culinario. El producto es un ejemplo de hasta qué punto se pueden reaprovechar los recursos de los procesos del ciclo del agua. En línea con la Ley Europea de Materias primas críticas pretende garantizar un suministro seguro y sostenible de materias primas fundamentales para la industria europea y reducir la dependencia con respecto a las importaciones, la recuperación de estos compuestos presentes en el concentrado de las EDAM supone una oportunidad.

SEA4VALUE: RECUPERACIÓN DE MATERIAS PRIMAS CRÍTICAS

Este proyecto ha supuesto un avance destacado en el desarrollo de tecnologías de próxima generación (incluidos los procesos avanzados de concentración y cristalización y los procesos de separación altamente selectivos) para la recuperación de Mg, B, Sc, In, V, Ga, Li, Rb, Mo (ver Figura 5). Ha sentado las bases para su futura asimilación en las EDAM ya existentes y futuras.

La Comisión Europea es muy consciente de la importancia económica y el riesgo de suministro de las materias primas críticas, y por ello activó el proyecto SEA4VALUE, reuniendo un consorcio industrial y de usuarios que representan a toda la cadena de valor (desde el operador de infraestructura de agua hasta la industria de procesamiento) para avanzar en las estrategias de economía circular en torno a la recuperación de materias primas críticas. Ver figura 5.

Los minerales industriales, las materias primas específicas y las materias primas críticas tienen una importancia estratégica para la economía europea y mundial. Son cruciales para los productos de alta tecnología (por ejemplo, teléfonos inteligentes, industria aeroespacial, industria química, energías renovables, equipos médicos, etc.) utilizados en la vida cotidiana y las tecnologías modernas. El acceso sostenible, fiable y sin trabas a las materias primas críticas es una preocupación creciente en la UE y en todo el mundo. Para ello, se ha generado una plataforma

en línea de libre acceso para proporcionar información sobre la composición del concentrado de EDAM en 34 países (www.sea4value.eu). Esta base de datos permite a los operadores y diseñadores identificar las ubicaciones geográficas óptimas para maximizar la recuperación de metales y minerales de la salmuera.

SEA4VALUE ha trabajado en el desarrollo de nuevas membranas selectivas; la producción de nuevos adsorbentes selectivos impresos en 3D; la aplicación de soluciones metalúrgicas avanzadas, como la solvometalurgia, los líquidos iónicos y las membranas líquidas soportadas; la mejora de la cristalización de las membranas; y el desarrollo de materiales compuestos poliméricos térmicamente conductores para los intercambiadores de calor que se utilizarán en la destilación multiefecto, al tiempo que se genera confianza para la adopción en el mercado de los elementos recuperados y, por lo tanto, facilitando la llegada al mercado y la aceptación del concentrado de EDAM como nueva fuente de materias primas.

La recuperación de valiosos metales y minerales menores y traza para fines comerciales a partir de concentrado de EDAM es una fuente potencial innovadora de recursos que ha estado aumentando el interés en los últimos años. Los principales benefi-

cios son claros: recuperar metales y minerales valiosos que pueden ser reintroducidos en la fabricación y el procesamiento industrial; reducir el impacto ambiental debido a la disminución del vertido de salmuera; disminuir el costo de capital y gastos operativos (CAPEX y OPEX) de las plantas operativas. SEA4VALUE ha determinado que, teniendo en cuenta el riesgo de suministro, la importancia económica, la concentración y el valor de mercado, la recuperación de materias primas críticas, es decir, boro (B), magnesio (Mg), escandio (Sc), vanadio (V), indio (In) y galio (Ga), y otros elementos no relacionados con el CRM pero aún estratégicos como el litio (Li), el molibdeno (Mo) y el rubidio (Rb), debe convertirse en una prioridad para la industria.

El desafío de extraer materias primas críticas presentes en muy baja concentración en el agua de mar radica en:

- las enormes cantidades de agua que deben procesarse y eliminarse, lo que requiere infraestructura de captación y descarga y cantidades masivas de energía (ver figura 6);
- la preparación de metales y minerales de grado básico a partir de matrices complejas, como las salmueras de agua de mar, requiere una nueva generación completa de tecnologías de separación

**FIGURA 5
ELEMENTOS CRÍTICOS Y ESTRATÉGICOS OBJETO DE RECUPERACIÓN EN CONCENTRADO DE EDAM EN EL PROYECTO SEA4VALUE**



FIGURA 6
DESCRIPCIÓN DEL CONCEPTO E IMPACTO ESPERADO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES ESTUDIADAS EN EL PROYECTO SEA4VALUE



Fuente: Sea4Value

capaces de recuperar selectivamente los elementos objetivo, lo que ha demostrado ser técnica y rentablemente inviable con las tecnologías de separación actuales;

- la necesidad de desarrollar procesos y tecnologías flexibles capaces de trabajar sinéricamente para recuperar diferentes elementos en un mismo proceso integrado, aumentando la viabilidad económica y ambiental.

A continuación, se describen las diez tecnologías novedosas estudiadas en SEA4VALUE operadas con el concentrado de EDAM en el Centro WAVE (ver figura 7):

- Membranas de nanofiltración para la separación de iones monovalentes y multivalentes
- Destilación multifecto avanzada
- Cristalización avanzada de membranas
- Membranas de inclusión de polímeros selectivos de iones
- Electrodialisis con membranas bipolares
- Módulos de adsorción impresos en 3D
- Extracción con disolventes líquidos iónicos

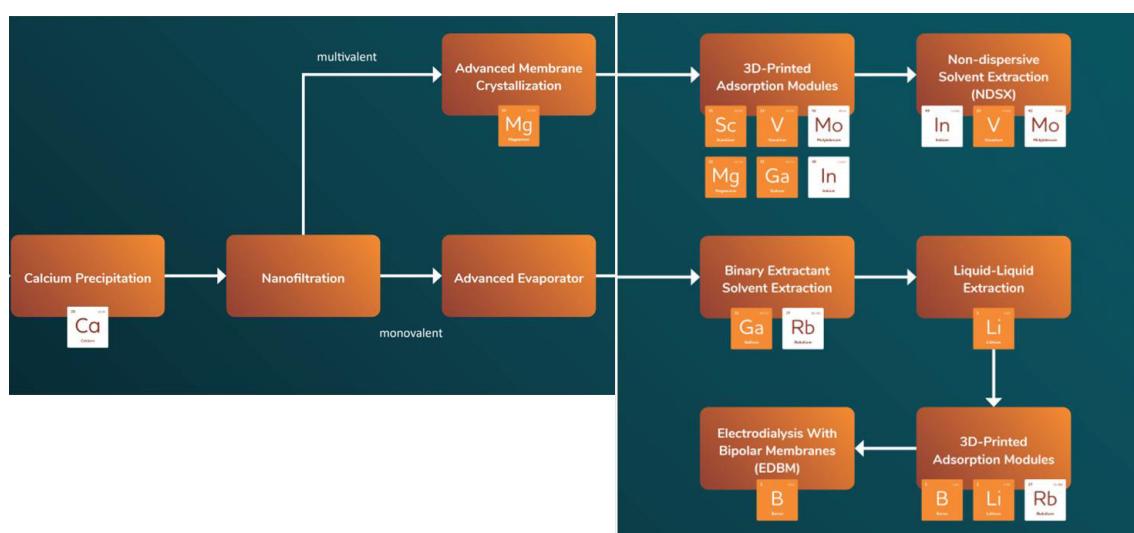
- Extracción con disolventes de extracto binario
- Extracción sinérgica con disolventes combinada con solvometalurgia
- Extracción con disolventes no dispersivos

La validación de estas tecnologías se ha llevado a cabo en el Centro WAVE, donde los procesos descritos se han testado trabajando con concentrado de EDAM. Se han estudiado y optimizado para extraer los elementos diana, que a su vez han sido validados en términos de producción y pureza, además de su aceptabilidad en el mercado de las nuevas fuentes de materiales y viabilidad económica.

CONCLUSIONES

La desalinización supone una herramienta estratégica frente a los riesgos del cambio climático relacionados con la sequía. Se espera que los recientes cambios en la industria de la desalinización permitan avanzar hacia soluciones tecnológicas sin productos químicos y la recuperación de minerales valiosos y metales raros presentes en el concentrado de desaladoras de agua de mar (EDAM), lo que transformará la desalinización en una de las alternativas de su-

FIGURA 7
TECNOLOGÍAS Y ELEMENTOS RECUPERADOS EN EL PROYECTO SEA4VALUE



Fuente: Sea4Value

ministro de agua más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente del siglo XXI, además de una fuente de materias primas críticas.

El papel de la Unión Europea en la promoción de la valorización de concentrados de EDAM a través de la Ley Europea de Materias Primas Críticas demuestra un compromiso firme con la sostenibilidad y la seguridad en el suministro de materiales estratégicos. La extracción de minerales del concentrado de desaladoras de agua de mar no sólo crea la oportunidad de aprovechar el océano para obtener recursos valiosos, sino que también resuelve el problema de la escasez de fuentes terrestres naturales (minas) para ciertos minerales de alto valor económico y estratégico y abre un nuevo lugar para el crecimiento industrial sostenible de muchas geografías. Por lo tanto, la minería de concentrado de desaladoras abre un nuevo lugar para la desalinización sostenible y asequible y es la clave para aprovechar la fuente de agua más abundante del planeta.

A través de tecnologías avanzadas de membranas y procesos híbridos, es posible recuperar materiales críticos y esenciales para la transición industrial verde y digital. Este enfoque no solo permite mejorar la eficiencia

en el uso del agua y los minerales, sino que también reduce los impactos ambientales asociados a la minería convencional. La integración de estos avances tecnológicos dentro de los principios de economía circular facilitará el crecimiento económico, generará nuevos mercados y contribuirá a la reducción del impacto ambiental de otros procesos de minería convencional.

Los desafíos técnicos en la recuperación de minerales de salmueras incluyen la presencia de interferencias químicas y la baja concentración de algunos elementos que dificulta los procesos tradicionales de separación. Sin embargo, el uso de nuevas tecnologías ofrece soluciones prometedoras. A pesar de que aún son escasos los proyectos de valorización del concentrado en EDAM, existen ejemplos pioneros en los que poder validar las soluciones tecnológicas y sobre los que generar nuevas oportunidades de mercado en torno a los elementos recuperados.

REFERENCIAS

Bobba et al (2020). Critical raw materials for strategic technologies and sector in the EU. file:///C:/Users/MON SALVO/Downloads/critical%20raw%20materials%20for%20strategic%20technologies-ET0420034ENN.pdf

- Mori, M.; Stropnik, R.; Sekavčnik, M.; Lotrič, A. (2021). Criticality and Life-Cycle Assessment of Materials Used in Fuel-Cell and Hydrogen Technologies. *Sustainability*, 13, 3565. <https://doi.org/10.3390/su13063565>
- Loganathan, P., Naidu, G., & Vigneswaran, S. (2017). Extracción de minerales valiosos a partir de agua de mar: una revisión crítica. *Ciencias Ambientales: Investigación y Tecnología del Agua*, 3(1), 37-53.
- Aconsejable: el costo de la desalinización (<https://www.advisian.com/en/global-perspectives/the-cost-of-desalination>).

SOBRE LOS AUTORES

Víctor Monsalvo es Responsable del Área de Ecoeficiencia en Aqualia. Preside el Comité de I+D de la IDRA y es miembro del Water Positive Think Tank y Foro de Expertos de Economía Circular de Castilla La-Mancha. Víctor es Doctor en Ing. Química. Ha desarrollado más de 50 proyectos de innovación, editor de 4 libros, coautor de 3 capítulos, 8 patentes, 1 modelo de utilidad, más de 110 comunicaciones y galardonado con 7 reconocimientos.

Juan Arévalo es Jefe de Proyectos en el Departamento de Innovación y Tecnología de Aqualia. Licenciado en Ciencias Ambientales, y Doctor en Ingeniería Ambiental por la Universidad de Granada. Cuenta con 20 años de experiencia en la industria trabajando en el sector de la innovación aplicado al agua.

Javier Hernández es Graduado en Química por la Universidad de La Laguna. Actualmente trabaja como Técnico de I+D en el Área de Ecoeficiencia del Dpto. De innovación y Tecnología en Aqualia, implicado en los estudios de postratamiento de agua y valorización de salmuera.

Alejandro Cruz integrado en el equipo del Departamento de Sistema de Gestión corporativo de Aqualia para asegurar su despliegue y mejora en la compañía. Es licenciado en Ciencias Biológicas por la Universidad Complutense de Madrid y máster post-grado en gestión ambiental empresarial por la Escuela Superior de Eindhoven (Países Bajos). Es además profesor en diversas Escuelas de Negocio.

Yolanda Barahona es jefa del departamento de Sostenibilidad en Aqualia. Licenciada en Ciencias Económicas y Empresariales ha dedicado los últimos 27 años de su carrera a Aqualia ocupando diversas posiciones, obteniendo una visión integral de las operaciones de la compañía.

Naiara Hernández es licenciada en Química, tiene un máster en Electroquímica y es doctora en Tecnologías Electroquímicas por la Universidad de Alicante. Actualmente trabaja como jefa de proyectos de I+D en el Área de Ecoeficiencia del Dpto. de Innovación y Tecnología en Aqualia.