

AVANCES EN LA TECNOLOGÍA TIPO VENTURI PARA MINIMIZAR EL IMPACTO DE LA SALMUERA EN ECOSISTEMAS BENTÓNICOS

Autorías:

Adrián Gil Trujillo¹, Gregorio Louzara¹, Manuel Ruiz de la Rosa¹, Jabel A. Ramirez Naranjo¹.

Palabras clave

Salmuera, desalinización, ecosistemas bentónicos, vertido, difusor.

Resumen

La industria de la desalinización se está presentando como el método que puede resolver la creciente demanda de agua. Sin embargo, uno de los mayores desafíos para dicha industria es la gestión del residuo generado, la salmuera. La salmuera es un concentrado hipersalino, con aproximadamente el doble de sales que el agua de captación.

La mayor densidad de la salmuera con respecto al agua del mar, hace que su vertido puede extenderse por el fondo del mar dañando las especies bentónicas como los corales y las praderas de plantas marinas, como la *posidonia oceánica*, que son hábitats muy sensibles a las variaciones de salinidad y un aumento puede resultar letal para ellas, generando un desequilibrio en el medio marino y en los ecosistemas de la zona del vertido.

El proyecto BRINE V+ pretende *optimizar la tecnología de los difusores tipo venturi para minimizar el impacto de la salmuera y de este modo proteger los ecosistemas bentónicos* ofreciendo la mejor solución medioambiental para la industria de la desalinización.

¹ ECOS Estudios Ambientales y Oceanografía S.L.
info@ecoscanarias.com
agiltru@ecoscanarias.com

1. Introducción

En 2012, por medio del proyecto de investigación proyecto Venturi, se demostró que los difusores tipo venturi, para su uso en el proceso de dilución de la descarga de salmuera con emisario, son una tecnología que genera resultados sustancialmente mejores que los la descarga por boquillas convencionales.

La empresa ECOS Estudios Ambientales y Oceanografía, participante de dicho proyecto de investigación, ha continuado trabajando en el desarrollo de mejoras e innovaciones de los difusores de tecnología venturi con el objeto de mejorar los sistemas de descarga de vertidos de tierra al mar por medio de emisarios y minimizar su impacto en los ecosistemas y medio marino.

Estos trabajos se canalizan a través del proyecto BRINE V+, a cargo de la división de Desarrollo e Innovación de la empresa, el cual focaliza sus desarrollos en los vertidos de salmuera procedentes de las plantas desalinizadoras que vierten los concentrados hipersalinos al medio marino. y presentan un riesgo potencial para el medio ambiente marino.

Como se ha comentado, la primera iniciativa en aplicar esta tecnología a los sistemas difusores de salmuera fue el proyecto Venturi (2009-2012) que tenía como objetivo *“el estudio de viabilidad técnica de los difusores venturi como mejora del proceso de dilución en vertidos de salmuera procedentes de desaladoras y consiguiente reducción del impacto ambiental en los ecosistemas marinos”*.

Los resultados obtenidos evidenciaron el potencial de esta tecnología como herramienta para mejorar y/o minimizar el impacto de las descargas de salmuera sobre los ecosistemas bentónicos.

Posteriormente, ECOS accedió en 2016 al, competitivo, programa de financiación europea SME-Instrument H2020 en el topic *“Supporting SMEs efforts for the development - deployment and market replication of innovative solutions for blue growth”* con el proyecto VENTURI PLUS, para la realización de un estudio que definiese una estrategia comercial basada en conclusiones técnicas y financieras.

Las plantas desalinizadoras producen un caudal de rechazo con alta concentración de sales y otros componentes que **representan un alto riesgo para los ecosistemas marinos** bentónicos, como pueden ser las praderas de *Posidonia Oceánica* o la *Cymodocea Nodosa*, de alto valor ecológico.

Con el desarrollo de la industria de la desalación se ha detectado que la interacción de la salmuera con el medio ambiente marino causa un impacto negativo en los organismos. Son ahora muchos los estudios que han tratado de cuantificar en qué medida la salmuera afecta al equilibrio de los ecosistemas marinos. Destaca el informe encargado al CEDEX, en el año 2012, con el objeto de generar un informe que recogiese el estudio de los Umbrales de tolerancia al incremento de salinidad de diversas especie marinas. De este informe resultaron una serie de conclusiones y recomendaciones, destacamos los datos mostrados en la tabla 1, umbrales de tolerancia de la salinidad, de la especies bentónicas *posidonia oceánica* y la *Cymodocea Nodosa*.

Tabla 1. Umbrales de tolerancia de salinidad

Organismos / hábitats	$S_{25, \text{lim}}$	$S_{5, \text{lim}}$
Posidonia oceánica	38.5 psu	40.0 psu
Cymodocea nodosa	39.5 psu	41.0 psu

$S_{25, \text{lim}}$ = salinidad en más del 25% de las observaciones
 $S_{5, \text{lim}}$ = salinidad en más del 5% de las observaciones

Fuente. CEDEX. Informe técnico UMBRALES DE TOLERANCIA AL INCREMENTO DE SALINIDAD DE DIVERSAS ESPECIES MARINAS (2012)

El comportamiento de la salmuera

La salmuera al tratarse de un fluido con características hipersalinas muestra, en los procesos de desalinización por membrana, un comportamiento de flotabilidad negativa con respecto el medio receptor o medio marino debido a su diferencia de densidades.

En los vertidos tradicionales de salmuera el vertido se realiza mediante un emisario o conducción submarina en la la parte final de este se coloca el sistema difusor donde el vertido de salmuera describe un tiro parabólico. Alcanzando el valor de máxima altura en el punto en el que las fuerzas cinéticas se equilibran fuerza gravitacional, a partir de este punto la segunda componente es predominante, descendiendo e impactando en el lecho marino.

El impacto de la pluma hiperdensa sobre el fondo provoca una zona de turbulencia que se disipa paulatinamente, en estas regiones en la que predominan las variables afectadas por el diseño y características del vertido se le denomina campo cercano. Tras la zona de turbulencia en el fondo la salmuera o flujo de mezcla pasa a la región de campo lejano, donde los parámetros que afectan a la dilución dependen de las características oceanográficas del medio. Una baja dilución en el campo cercano, provoca que al llegar al campo lejano, la salmuera tenga una densidad superior al agua receptora, lo que ralentiza el proceso de mezcla con el agua de mar, pudiendo extenderse varios kilómetros o hectáreas, como si fuera una lava que busca la línea de máxima pendiente a través del fondo marino, afectando a los ecosistemas marinos.



Ilustración 1. Comportamiento de la pluma de salmuera, en plantas de OI.

El comportamiento del difusor tipo venturi

La tecnología de difusores tipo venturi se basan en el *efecto venturi* el cual le da su nombre. El efecto se produce cuando chorro del vertido descarga al medio marino pasando por el interior de la cabeza difusora tipo venturi. La alta velocidad del fluido al pasar por la sección estrecha del dispositivo, provoca un diferencial de presión con respecto al medio receptor, produciéndose un efecto de succión en esa sección. El agua del medio atraída por la succión entre en el dispositivo mejorando la mezcla y la dilución del vertido.

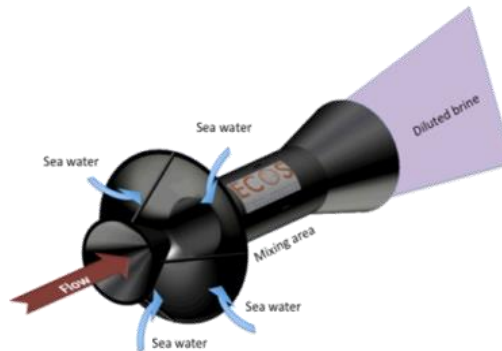


Ilustración 2. Dispositivo Brine V+1, difusor tipo venturi

2. El Proyecto BRINE V+

Como se ha comentado, el proyecto BRINE V+ surge del conocimiento de que los difusores tipo venturi producen mejores resultados en la dilución de vertidos de salmuera que los difusores convencionales, menor impacto en los ecosistemas bentónicos de la zona, y además la intención de completar su desarrollo para llevar esta tecnología al mercado internacional.

El proyecto BRINE V+ se desarrolla con el objetivo de introducir en el mercado la tecnología de difusores tipo venturi, puesto que se ha observado que esta clase de difusores obtienen mejores resultados que los convencionales en la dilución de vertidos de salmuera, y como consecuencia un menor impacto en los ecosistemas bentónicos.

El **objetivo global** del proyecto sería, por tanto, la eliminación del impacto de la salmuera de los vertidos; tanto de las plantas ya existentes como de las futuras, y la recuperación de los ecosistemas bentónicos afectados por dichos vertidos.

A su vez, el proyecto presenta **tres objetivos específicos** relacionados con la eficiencia y viabilidad técnico-económica de la tecnología.

En primer lugar se busca alcanzar, bajo cualquier circunstancia de operatividad y diseño, un rango de **succión del orden de 5:1 en el dispositivo**. Esto quiere decir que por cada unidad de caudal que vierte el emisario submarino hacia la entrada del difusor, este absorberá el cuádruple procedente del medio receptor, más el caudal original del emisario.

Para que la dilución sea altamente eficiente no basta con tener un alto grado de succión; también debe producirse un efecto adecuado de mezclado entre el caudal vertido y el succionado, así como evitar la estratificación del flujo mezcla en el interior del dispositivo. Por ello, uno de los objetivos específicos del proyecto BRINE V+ es alcanzar una **mezcla del 80% del efluente** con el medio receptor en cualquier escenario de operatividad de planta y de diseño.

Por último, otro punto a favor del dispositivo desarrollado es que trabaja de forma pasiva y sin necesidad de un suplemento de energía para la planta por medio de bombeos. Por ello se están desarrollando los diseños y configuraciones apropiadas para que su punto óptimo de succión y mezcla se encuentren en velocidades que **generen pérdidas de carga por debajo de los 2 m.c.a.**

2.1. Metodología de trabajo

Para alcanzar los objetivos establecidos se ha partido de los resultados alcanzados en el Proyecto Venturi (2009-2012). En este proyecto se obtuvieron dos fuentes de datos:

- Estudio de validación del prototipo a pequeña escala en laboratorio, realizado por el CEDEX.
- Medidas in-situ del vertido con el prototipo básico instalado y planta en condiciones de operatividad normal, medidas tomadas a partir de una serie de campañas de medición para la caracterización de la pluma.

Caracterización del difusor

El dispositivo queda caracterizado tras definir los tres elementos estructurales básicos que lo compone:

I. REDUCTORA (R)

- Diámetro de entrada $\rightarrow \Phi_T$ o diámetro de tubería.
- Diámetro de salida $\rightarrow \Phi_R$ o diámetro de reductora
- Ángulo de la reductora $\rightarrow \beta_R$ (con respecto el eje horizontal)
- Longitud de la reductora $\rightarrow LR$ (en su proyección horizontal)

II. CABEZA O CABEZA DIFUSORA

Convergencia o campana (C)

- Diámetro de entrada $\rightarrow \Phi_E$
- Diámetro de salida coincidirá con el diámetro de la garganta por ello le llamamos $\rightarrow \Phi_G$
- Ángulo de la campana $\rightarrow \beta_C$ (con respecto el eje horizontal)
(Ojo, en el futuro este ángulo puede ser variable)
- Longitud de la campana $\rightarrow L_C$ (en su proyección horizontal)

Garganta (G)

- Diámetro de garganta $\rightarrow \Phi_G$ (con respecto el eje horizontal)
- Longitud de garganta $\rightarrow L_G$ (en su proyección horizontal)

Divergencia o trompeta (D)

- Diámetro de entrada coincidirá con el diámetro de la garganta por ello le llamamos $\rightarrow \Phi_G$

- Diámetro de salida $\rightarrow \Phi_s$
- Ángulo de la divergencia $\rightarrow \beta_D$ (con respecto al eje horizontal)
(Ojo, en el futuro este ángulo puede ser variable)
- Longitud de la divergencia $\rightarrow L_D$

III. ELEMENTOS DE SUJECIÓN.

- Sujeciones de unión, entre piezas
- Sujeciones de soporte

A su vez, el dispositivo de difusor tipo venturi se componen de cuatro regiones básicas según el comportamiento del fluido:

- Aceleración. La aceleración se produce al inicio, en la pieza reductora de diámetro, aumentando la velocidad del efluente.
- Succión. La región de succión se localiza en la sección convergente de la cabeza difusora, y dependerá de la velocidad del flujo de vertido y de las dimensiones del dispositivo.
- Mezcla. La mezcla se produce en la región de garganta del dispositivo que media entre la zona de succión y la zona de difusión
- Difusión. Denominamos difusión a la mezcla y dilución del flujo saliente de la cabeza del dispositivo, y se produce en la divergencia o trompeta.

2.2. Metodología de diseño

- **Calibración y validación del modelo computacional inicial.** En primer lugar se modeló con software CAD el diseño inicial resultante del Proyecto Venturi, y posteriormente se simuló con un software CFD (Dinámica de Fluidos Computacional). El objetivo de esta fase era conseguir un modelo computacional validado respecto de datos empíricos. La fuente de los datos provenía de un artículo que expone los resultados numéricos del Proyecto Venturi y de ensayos a escala realizados en CEDEX.
- **Generación y discusión de alternativas de diseño.** Se generaron nuevos diseños del difusor a partir de modificaciones de la configuración original. El objetivo perseguido era la mejora de las características iniciales incidentes en la capacidad de dilución, que tal y como hemos mencionado son la succión, la mezcla y la difusión del efluente. Para ello, en primer lugar fue necesario realizar un trabajo de caracterización y comprensión del comportamiento del fluido en el interior del difusor, especialmente en la región afectada por su interacción con el agua del medio. El dispositivo queda caracterizado por 4 regiones de comportamiento tal y como hemos explicado.

Para llegar a la completa comprensión del comportamiento y de la relación existente entre las variables estructurales del dispositivo, se accedió a fuentes bibliográficas y se realizaron razonadamente varias hipótesis concernientes a las modificaciones estructurales que mejoraran los parámetros de la dilución

- **Simulación de los diseños seleccionados** Los diseños resultantes de la fase anterior fueron puestos a prueba a través del escenario computacional anteriormente calibrado. En síntesis la simulación computacional fue construida por medio de un

modelo de Elementos Finitos aplicado a la hidrodinámica de un volumen de control que emulaba un vertido costero de poca profundidad. Se impusieron los parámetros y condiciones de contorno validados en el diseño original, modificando en cada caso la forma del difusor; concretamente se experimentó con las siguientes alternativas:

- Diseño con un contorno más hidrodinámico.
- Diseño con el alargamiento de la garganta o zona de mezcla.
- Diseño con inclusión de orificios en la región de garganta

Tabla 2. Parámetros de diseño de entrada

Parámetros de entrada	
Salinidad	35.62 <i>psu</i>
Tª mar	19.85 °C
Densidad	1025.29 <i>kg/m³</i>
Salinidad salmuera	67.8 <i>psu</i>
Densidad salmuera	1050.12 <i>kg/m³</i>

3. Resultados

Los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas se muestran en la siguiente tabla de valores de densidades de los casos simulados:

Tabla 3. Resultados de densidades de casos simulados

Casos simulados	Densidades
Prototipo inicial	1035.60 <i>Kg/m³</i>
Dispositivo hidrodinámico	1033.64 <i>Kg/m³</i>
Alargamiento de garganta	1033.50 <i>Kg/m³</i>
Garganta alargada con orificios	1033.32 <i>Kg/m³</i>

El punto de referencia que se tomó para evaluar los distintos diseños simulados ha sido en la salida de la cabeza difusora al tratarse de un parámetro homogéneo que permite una simulación más precisa.

La simulación de prototipo inicial de difusor tipo venturi, validado durante el proyecto Venturi (2009-2012), proporcionó una mejora sustancial en el proceso de dilución de la salmuera en el medio, alcanzando un valor medio de densidad a la salida del dispositivo de 1035,60 *Kg/m³* con respecto el valor de densidad del efluente de salmuera de 1050,12 *Kg/m³* en un medio receptor de densidad 1025,29 *Kg/m³* (agua de mar).

El resto de diseños, elaborados en el marco del proyecto BRINE V+, han mostrado mejoras en los resultados, obteniendo menores densidades a la salida del dispositivo difusor.

El dispositivo considerando características de diseño hidrodinámicas presentó valor medio de 1033,64 *Kg/m³* en el punto de salida del difusor.

El segundo diseño propuesto presentó unos valores de similares al anterior diseño, evidenciando que el alargamiento de la sección de garganta, con respecto al dispositivo prototipo inicial, aumenta el comportamiento de mezclado. Siendo el valor medio de $1033,50 \text{ Kg/m}^3$ en el punto de salida del difusor.

Por último en el diseño combinado de garganta alargada con el añadido de orificios en dicha sección mostró los mejores resultados, con una densidad media en el punto de salida del difusor de $1033,32 \text{ Kg/m}^3$.

Además de todo ello los trabajos de desarrollo ejecutados durante el proyecto BRINE V+ ha dado lugar a la protección de las innovaciones generadas en el difusor tipo venturi por medio de una patente internacional en un procedimiento PCT (Tratado de Cooperación en materia de Patentes).

4. Conclusiones

Los dispositivos difusores tipo venturi son una innovación tecnológica en el ámbito de los vertidos de salmuera de tierra al mar por medio de emisario submarino que mejoran las técnicas actuales con respecto los tramos difusores convencionales y de este modo benefician al equilibrio del medio ambiente marino y especialmente a los ecosistemas bentónicos que habitan en la zona de influencia del vertido en toda la extensión de su pluma.

El proyecto BRINE V+, aun estando en desarrollo, ha alcanzado las siguientes conclusiones:

- Se han obtenido **mejoras significativas** con respecto al prototipo de difusor venturi inicial.
- El alargamiento de la sección de garganta en el dispositivo difusor es una característica del diseño que favorece y mejora la mezcla.
- Diseña un dispositivo difusor cuidando la hidrodinámica del mismo produce mejoras sustanciales en la dilución y en el funcionamiento del mismo.
- Es posible llegar a la **estandarización** de un dispositivo altamente eficiente, económico y escalable para el beneficio del sector y del medio ambiente.

Con respecto a un vertido simple, de boca única, expulsa el flujo de salmuera con una densidad aproximadamente el doble de sales concentradas, siendo en el caso estudiado de $1050,12 \text{ Kg/m}^3$ la densidad de la salmuera, con la instalación de un dispositivo venturi mejorado se alcanza en la boca de la salida del equipo una densidad $1033,32 \text{ Kg/m}^3$, muy próxima a la densidad natural del medio receptor.

5. Retos y líneas de investigación activas

Variación de caudales. Aun quedando demostrada la eficacia de los difusores tipo venturi para los vertidos de salmuera al mar, el punto de funcionamiento óptimo o máxima

eficiencia se encuentra directamente relacionado con la velocidad de salida del efluente. Para mantener la eficacia del dispositivo bajo cualquier circunstancia, se está trabajando en un diseño flexible, adaptable a las condiciones de operatividad de aquellas plantas de tratamiento que trabajan produciendo distintos caudales de aguas de vertidas.

Epifitismo del dispositivo. A pesar de ser un dispositivo que no precisa de una actividad intensiva de mantenimiento, en aguas con un alto porcentaje de nutrientes es posible que la epifitación de las algas en algunas partes del dispositivo produzca la disminución de su eficacia. Por ello, está abierta una línea de desarrollo con el objeto de evitar las incrustaciones masivas en el equipo.

Validación para aguas residuales urbanas. Se ha comenzado el proyecto para el estudio y validación de la tecnología de difusores tipo venturi para su uso en el tratamiento de vertidos de aguas residuales. Este nuevo proyecto financiado por el gobierno regional canarias ya está obteniendo resultados prometedores, que dan más confianza en la futura extensión de esta tecnología.

Bibliografía

Ruiz de la Rosa, M. 2006. Preliminary results of experimental evaluation about different methods of transplanting *Cymodocea nodosa* in the Canary Islands. *Biol. Mar. Medit.* 13(4): 267-271.

E. Portillo, M. Ruiz de la Rosa, G. Louzara, J. Quesada, J.M. Ruiz, H. Mendoza. 2013. Dispersion of desalination plant brine discharge under varied hydrodynamic conditions in the south of Gran Canaria. *Desalination and Water Treatment*

Portillo, E., Louzara, G., Ruiz de la Rosa, M., Quesada, J., González, J. C., Roque, F., Antequera, M., Mendoza, H., 2013. Venturi diffusers as enhancing devices for the dilution processes in desalination plant brine discharges. *Desalination and Water Treatment* 51: 525-542.

Portillo, E., Ruiz de la Rosa, M., Louzara, G., Quesada, J., Ruiz, J.M., Marín-Guirao, L., González, J.C., Roque, F. & Mendoza, H. 2014. Assessment of the abiotic and biotic effects of sodium metabisulphite pulses discharged from desalination plant chemical treatments on seagrass (*Cymodocea nodosa*) habitats in Canary Islands. *Marine Pollution Bulletin* 80 (1-2): 222-233.

Ruiz de la Rosa, M. (2012) Environmental impact assessment of the brine discharge in seagrass *Cymodocea nodosa*: Accurate toxicity in mesocosm. Published in: Technical Report: Project of National Research Plan. N° EXP. 004/RN08/03.3 (Proyecto Venturi).