

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**ESTIMACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE UNA DESCARGA DE  
SALMUERA PROVENIENTE DE UNA PLANTA DESALADORA MEDIANTE  
MODELACIÓN FÍSICA.**

**JAVIER AGUIRRE G.<sup>1</sup>**  
**ALEXANDRA BRUNA T.<sup>2</sup>**  
**JORGE PÉREZ S.<sup>3</sup>**  
**PATRICIO WINCKLER G.<sup>4</sup>**  
**CRISTIÁN DUARTE V.<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

En el marco del proyecto FONDEF ID23I10336, se desarrollan ensayos a escala reducida de un emisario submarino simplificado para caracterizar el área de influencia de descargas de salmuera, considerando un incremento del 5% de salinidad y umbrales críticos para especies de interés ecológico como *Zostera chilensis* y *Loxechinus albus*. La metodología, de bajo costo, entrega insumos relevantes para evaluar impactos de proyectos de desalinización en el medio marino. Los ensayos, realizados en el LabOceano de la Universidad de Valparaíso, consideran diferentes densidades relativas, diámetros y ángulos de boquillas impresas en 3D, manteniendo similitud del Froude densimétrico. Se utiliza colorante vegetal y una cámara GoPro para registrar las plumas mediante videos, procesados luego mediante un algoritmo en Matlab que corrige distorsiones ópticas, geométricas e intensidad usando la ley de Beer-Lambert, generando mapas de salinidad. Se ensayan 11 configuraciones con tres repeticiones cada una. Los resultados muestran que descargas salinas mayores a 66 g/L o portas con diámetros mayores a 0,4 m producen incrementos de salinidad en el campo lejano mayores al 5%, mientras que descargas menores a 54 g/L o portas menores a 0,2 m evitan la aparición de estos excesos. Por otra parte, ángulos entre 50° y 80° generan áreas de influencia menores en el campo lejano a diferencia de ángulos de 40° y 20°. Esta última configuración mostró impactos adicionales altos sobre *Zostera chilensis* y leves para larvas de *Loxechinus albus*.

---

<sup>1</sup> Asistente de investigación, LabOceano, Universidad de Valparaíso – email: javier.aguirre@postgrado.uv.cl

<sup>2</sup> Encargada de Laboratorio, LabOceano, Universidad de Valparaíso – email: alexandra.bruna@uv.cl

<sup>3</sup> Asistente de investigación, LabOceano, Universidad de Valparaíso – email: jorge.psilva96@gmail.com

<sup>4</sup> Profesor Titular, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso – email: patricio.winckler@uv.cl

<sup>5</sup> Profesor Titular, Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andrés Bello – email: cristianduarte@unab.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de impacto ambiental es un procedimiento que busca determinar si el impacto de un proyecto es significativo, gestionando medidas y cumpliendo con la normativa aplicable. Uno de los pasos fundamentales para ello, es la determinación del área de influencia (AI), definida como el área o espacio geográfico, cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados. En la práctica, el AI de la descarga de una planta desaladora se estima como el lugar geométrico donde se exceden límites máximos admisibles de salinidad. Usualmente se utilizan criterios ambientales para definir este umbral, como el de un 5% de incremento relativo de la salinidad sobre el medio marino receptor, basado en la norma ANZECC (1992)<sup>6</sup>, pero también existen umbrales absolutos como la normativa estadounidense para California, que indica un umbral de 40 ppt, entre otros (Winckler, 2021). Adicionalmente, existen los criterios biológicos, que también pueden sostener la elección de un límite de salinidad, sin embargo, en la experiencia internacional se utilizan para los planes de vigilancia ambiental a través de especies claves como bioindicadores de impacto. Así es el caso de España utilizando la especie *Posidonia oceanica* (Sadhvani, 2018) donde se establece un límite asociado a los efectos del estrés salino. En este estudio proponemos una metodología de estimación del AI, mediante modelación física en ensayos de laboratorio, aplicando criterios ambientales y biológicos, que con ciertas modificaciones podría adaptarse a las modelaciones numéricas típicamente utilizadas en la evaluación de proyectos en Chile.

La obtención de agua mediante desalinización de agua de mar por osmosis reversa (OR), se ha popularizado en las últimas décadas, utilizándose en actividades mineras, riego y abastecimiento de agua potable. Esta tecnología alcanza eficiencias cercanas a un 50%<sup>7</sup>. El agua de descarte se mezcla con otras sustancias utilizadas en la operación en la denominada salmuera o descarte, un efluente no valorizable en la actualidad. La disposición de la salmuera se realiza generalmente mediante emisarios submarinos, cuyo diseño contempla criterios ambientales orientados a minimizar su impacto en el ecosistema marino a través de la dilución<sup>8</sup> con el medio marino.

Dado que la salmuera presenta una densidad superior al agua de mar, puede afectar organismos bentónicos. Por esta razón, el difusor del emisario, compuesto por una serie de portas que buscan asegurar una alta dilución antes de impactar el fondo, de modo de minimizar el AI. En esta primera zona, denominada campo cercano, se presentan altas velocidades y vórtices que favorecen la entrada de agua al chorro, mecanismo principal que favorece la dilución (Fischer, 1979). Cuando la pluma impacta el fondo, comienza una zona de transición hacia el campo lejano. La energía remanente disminuye abruptamente por fricción con el fondo y con la capa superior (Pérez, 2015), formándose un régimen de flujo más estático y dominado por las fuerzas gravitacionales, llegando a una zona que se denomina campo lejano, donde el flujo exhibe velocidades y tasas de dilución considerablemente menores, dependiendo de las condiciones ambientales para su dilución.

---

<sup>6</sup> Esta guía fue sucedida por el Water Quality Guidelines (2018) ([www.waterquality.gov.au/anz-guidelines](http://www.waterquality.gov.au/anz-guidelines)). Sin embargo, a la actualidad en Chile se sigue utilizando el 5% de exceso del guiamiento anterior.

<sup>7</sup> 1 m<sup>3</sup>/s de agua de mar genera ~0,5 m<sup>3</sup>/s de agua de producto y ~0,5 m<sup>3</sup>/s de agua de descarte con cerca del doble de salinidad.

<sup>8</sup> La dilución corresponde a la razón  $(S_0 - S_a)/(S - S_a)$ , que indica cuánto ha sido disminuida una salinidad S desde su salinidad inicial de descarga  $S_0$  y en un medio con salinidad  $S_a$ .

El campo cercano y lejano difieren tanto en las escalas temporales como espaciales: El campo cercano presenta fenómenos rápidos y tasas de dilución mayores debido a los procesos de advección y difusión turbulenta, mientras que el campo lejano presenta procesos comparativamente más lentos y en distancias mayores necesarias para reducir la salinidad.

Minimizar el AI se obtiene maximizando la dilución en el campo cercano. Para ello el diseñador puede variar dos variables fundamentales: la velocidad de descarga y el ángulo de las portas. Estas variables deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño y operación de los emisarios, ya que definen su capacidad de cumplir con los objetivos ambientales establecidos. Otras variables de diseño consisten en la ubicación del difusor. En términos prácticos, la descarga debe ubicarse lejos de zonas ecológicamente relevantes (e.g., hotspot de diversidad) y evitar sectores donde la circulación del agua sea limitada. La descarga debe realizarse a una profundidad óptima donde la altura terminal del chorro llegue a no más del 90% de la profundidad de la columna de agua, de modo que el chorro no interactúe con la superficie libre (Abessi & Roberts, 2016). Asimismo, resulta esencial analizar las corrientes generadas por viento, mareas u oleaje, y utilizar modelos hidrodinámicos y de mezcla para simular el comportamiento de la pluma (Winckler, 2021). Esto permite definir el AI en relación con los umbrales de calidad ambiental establecidos por la normativa vigente.

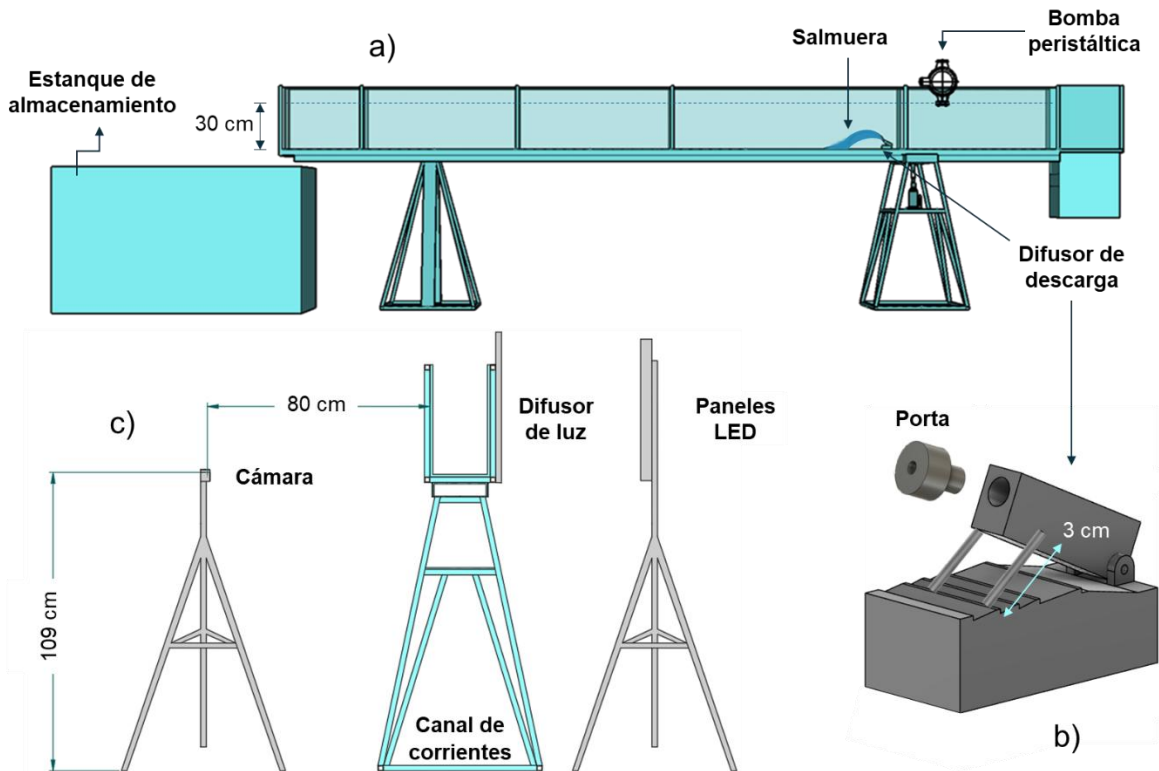
Una herramienta que permite optimizar la configuración de un difusor es la modelación física a escala reducida, que entrega información útil de procesos complejos de resolver a través de fórmulas matemáticas, como la turbulencia. En las últimas décadas, se han efectuado diversos estudios de plumas de boyantez negativa centrados en el campo cercano y en condiciones estacionarias (Gungor & Roberts, 2009; Abessi & Roberts, 2014; Abessi & Roberts, 2016) y algunos que permiten caracterizar la estructura tridimensional de chorros de descarga (Roberts & Tian, 2000; Roberts & Tian, 2004). Estos experimentos, realizados con técnicas relativamente complejas, han servido para generar modelos basados en fórmulas empíricas y ecuaciones integradas, o para validar modelos CFD. El alto costo de estas técnicas, sin embargo, hace que su uso se cierre al ámbito científico con aplicaciones ingenieriles pocas veces viables económicamente.

Puntualmente, Choi, Lai, & Lee (2016) utiliza una técnica de atenuación de luz basada en la ley de Beer-Lambert para obtener valores del campo lejano, en vista superficial. Esta técnica, llamada también colorimetría digital de imágenes, ha sido ampliamente investigada en ámbitos químicos y biológicos (Kehoe & Penn, 2013; James & Honeychurch, 2024). En esta línea, el objetivo de este trabajo es modelar físicamente un emisario de descarga de una sola porta, escalado con similitud de Froude, desarrollando técnicas de bajo costo. Esto considerando umbrales de salinidad asociado a criterios ambientales y biológicos para la determinación de potenciales impactos ambientales, obteniendo información desde una vista lateral que permitan obtener mapas de salinidad en los campos cercano y lejano.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Diseño del modelo**

Los experimentos se realizan en el canal de corrientes del LabOceano<sup>9</sup> de la Universidad de Valparaíso (Figura 1a), cuyas dimensiones son 21 cm de ancho, 5 m de largo y 40 cm de altura. Los ensayos consideran un medio sin corrientes ambientales y una profundidad de agua potable de 30 cm sin estratificación. Al canal se acopla una bomba peristáltica que impulsa oscilatoriamente salmuera hacia el difusor de descarga a través de una manguera de 4 mm de espesor. Al interior del canal se instala una porta de descarga modular impresa en 3D (Figura 1b) que permite modificar el ángulo de la porta respecto a la vertical. El soporte posee un orificio de entrada, por donde se inserta la manguera y se instalan, a presión, portas de diferentes diámetros.



**Figura 1.** a) Canal de corrientes del LabOceano de la Universidad de Valparaíso. b) Difusor de descarga modelado e impreso en 3D y c) Vista lateral del aparato experimental.

Se modelan 11 casos analizados por Federici (2017) sin considerar corrientes ambientales. El escalamiento se basa en la similitud del número de Froude densimétrico

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{(\rho_0 - \rho_a / \rho_a)gd}} \quad (1)$$

que garantiza que la relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales sea equivalente en el modelo y el prototipo, denominados con superíndices  $P$  y  $M$ , respectivamente:

$$Fr^P = Fr^M \quad (2)$$

En (1),  $\rho_0$  es la densidad del efluente,  $\rho_a$  la densidad ambiente,  $g$  la aceleración de gravedad,  $u$  la velocidad de descarga y  $d$  el diámetro de la porta. El medio receptor del modelo fue agua potable, mientras que en el prototipo es agua de mar. Para mantener la similitud de

<sup>9</sup> <https://ingenieriaoceanica.uv.cl/laboceano>

flotabilidad se cumplió la igualdad de densidades relativas ( $\rho_r$ ) de la descarga (Chow, Shrivastava, Adams, Al-Rabaie, & Al-Anzi, 2020):

$$\rho_r^P = \rho_r^M \quad \rightarrow \quad \frac{\rho_0^P - \rho_a^P}{\rho_a^P} = \frac{\rho_0^M - \rho_a^M}{\rho_a^M} \quad (3)$$

Combinando (1), (2) y (3) condice a la siguiente relación:

$$\frac{u^P}{\sqrt{d^P}} = \frac{u^M}{\sqrt{d^M}} \quad \rightarrow \quad \frac{u^P}{u^M} = \left(\frac{d^P}{d^M}\right)^{1/2} \quad (4)$$

La velocidad y el diámetro se relacionan con el caudal de descarga  $Q$  mediante la expresión  $Q = u \pi d^2 / 4$ , lo que da:

$$\frac{u^P}{u^M} = \left(\frac{d^P}{d^M}\right)^{1/2} = \left(\frac{Q^P / u^P}{Q^M / u^M}\right)^{1/4} \quad \rightarrow \quad \frac{u^P}{u^M} = \left(\frac{Q^P}{Q^M}\right)^{1/5} = \left(\frac{8 \times 10^2}{1,35 \times 10^{-3}}\right)^{1/5} \quad (5)$$

Dado que el caudal de la bomba peristáltica fue de  $Q^M = 1,35 \times 10^{-3}$  L/s y el caudal del prototipo es de  $Q^P = 8 \times 10^2$  L/s (Federici, 2017), la razón  $Q^P / Q^M$  es de  $1: 5,92 \times 10^5$ . Luego, de la ecuación (5) se obtiene la razón de  $1: 1,43 \times 10^1$  para velocidad y desde la ecuación (4) la razón  $1: 2,04 \times 10^2$  para longitud.

**Tabla 1.** Casos prototipo y modelo escalado.

Código <sup>10</sup>	$\theta$ [°]	$\rho_{relativo}$ [-]	Prototipo				Modelo				Error [%]
			$\rho_0$ [g/L]	$d$ [m]	$u$ [m/s]	$Fr^P$ [-]	$\rho_0$ [g/L]	$d$ [mm]	$u$ [m/s]	$Fr^M$ [-]	
T6R24U000D20 Ri	60	0,024	1050	0,4	6,36	20,56	1026	2,0	0,431	19,68	-4,3
T2R24U000D20 Ri	20	0,024	1050	0,4	6,36	20,56	1026	2,0	0,431	19,68	-4,3
T4R24U000D20 Ri	40	0,024	1050	0,4	6,36	20,56	1026	2,0	0,431	19,68	-4,3
T5R24U000D20 Ri	50	0,024	1050	0,4	6,36	20,56	1026	2,0	0,431	19,68	-4,3
T8R24U000D20 Ri	80	0,024	1050	0,4	6,36	20,56	1026	2,0	0,431	19,68	-4,3
T6R24U000D10 Ri	60	0,024	1050	0,2	25,46	116,41	1026	1,0	1,722	$\frac{111,3}{3}$	-4,4
T6R24U000D15 Ri	60	0,024	1050	0,3	11,32	42,24	1026	1,5	0,765	40,40	-4,4
T6R24U000D25 Ri	60	0,024	1050	0,5	4,07	11,78	1026	2,5	0,276	11,27	-4,4
T6R15U000D20 Ri	60	0,015	1040	0,4	6,36	26,54	1017	2,0	0,431	25,41	-4,3
T6R34U000D20 Ri	60	0,034	1060	0,4	6,36	17,37	1036	2,0	0,431	16,63	-4,3
T6R73U000D20 Ri	60	0,073	1100	0,4	6,36	11,87	1075	2,0	0,431	11,36	-4,3

El prototipo consistió en un difusor monoporta que descarga a ángulos entre 20 y 80°, densidades relativas de  $\rho_r^P = 0,024$  a  $0,073$ , densidad ambiente de  $\rho_a^P = 1025$  g/L, velocidades de  $u^P = 4,07$  a  $25,46$  m/s y diámetros de  $d^P = 0,2$  a  $0,5$  m. Con ello, en el modelo se obtienen velocidades de descarga  $u^M = 0,276$  a  $1,722$  m/s, diámetros de  $d^M = 1,0$

<sup>10</sup> *Ti*: Ángulo  $\theta$  con respecto a la vertical y su magnitud  $i$  en grados dividido 10. *Rj*: Densidad relativa de la descarga  $\rho_0$  y  $j$  su magnitud multiplicada por  $10^{-3}$ . *Ui*: Velocidad ambiental, con  $i$  igual a 0 para todos los casos, debido a la ausencia de corrientes en los experimentos realizados. *Di*: Diámetro del emisario y su magnitud  $i$  en milímetros multiplicado por 10. *Ri*: Repetición  $i$ , con valores de 1, 2 o 3 considerando ensayos realizados en triplicado.

a 2,5 mm, densidad ambiente de  $\rho_a^M = 1002$  g/L y ángulos y densidades relativas equivalentes entre prototipo y modelo. En la Tabla 1 se resumen los valores del prototipo (Federici, 2017) y el modelo. El error entre  $Fr$  fue menor al 5% en todos los casos. Considerando las velocidades del modelo, el Reynolds asociado (calculado como  $\sqrt{(\pi u^2 d^2 / 4)} / \nu$ ) tiene valores entre 610 a 1526.

La salmuera se preparó a partir de agua potable con una densidad de  $\rho_a^M = 1002$  g/L, a la que se agregó sal monitoreando su densidad con un densímetro de flotación. Se añadió colorante vegetal color calipso en una proporción de 16 gotas por litro. Cada solución se preparó en un vaso precipitado de 250 mL, utilizando 200 mL en cada descarga. Todos los ensayos se realizaron a una temperatura ambiente.

Para la obtención de imágenes, se utiliza una cámara GoPro Hero 5 con una resolución de 3840x2160 píxeles y una captura de 30 fotogramas por segundo. La Figura 1c muestra el posicionamiento de la cámara, ubicada con un ángulo de visión ortogonal al fondo del canal. La iluminación del sistema se compone de dos paneles LED de luz blanca de 45 W cada uno, ubicados tras un difusor de luz.

## 2.2. Procesamiento de datos

El procesamiento de las imágenes se realiza mediante algoritmos en MATLAB de autoría propia. El primer paso consiste en corregir la distorsión óptica generada por la curvatura del lente de la cámara, mediante la cuadrícula de referencia de la Figura 2a, la cual además muestra los resultados de la corrección (Figura 2b y c). Luego, cada fotograma se descompone en sus canales de color RGB, donde se selecciona el canal rojo por ser el que más contraste logra entre el fondo y la pluma. Posteriormente, se define una ventana rectangular de análisis (FOV, *field of view*) fija para todos los experimentos, la cual abarca el campo cercano y parte del campo lejano.

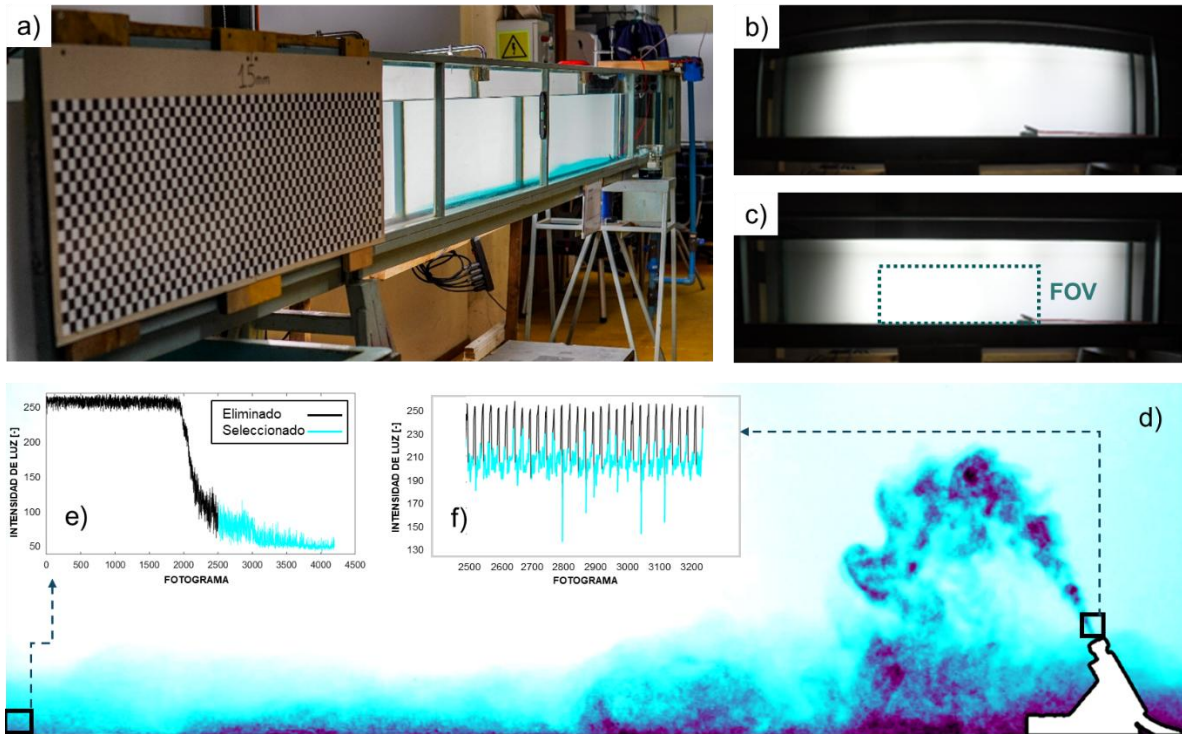
Para identificar el instante a partir del cual la pluma se encuentra completamente desarrollada, para cada experimento se utiliza como punto de control su píxel ubicado en la esquina inferior izquierda del FOV, de coordenadas  $(i_C, j_C)$ , y se extrae la intensidad  $I(i_C, j_C, \tau)$  cuyos valores van de 0 a 255, siendo  $\tau$  el contador del tiempo o fotograma (Figura 2e). Cuando esta intensidad ( $I$ ) deja de presentar una tendencia, se asume que el campo lejano se encuentra desarrollado, en el fotograma  $\tau_d$ . Por otro lado, se realiza un control de las oscilaciones de la bomba peristáltica en el píxel más cercano a la porta, de coordenadas  $(i_P, j_P)$ , eliminando para cada experimento los fotogramas donde no hay pluma (Figura 2f). El criterio utilizado para ello es eliminar los fotogramas con el 20% de mayor intensidad en este punto, que indica menor presencia de salmuera. Una vez identificado el fotograma  $\tau_d$ , se obtiene la intensidad media en cada píxel  $I_M(i, j) = 1/n \sum I(i, j, \tau)$  y la intensidad base  $I_0 = I_M(\tau = 1)$  en que aún no hay chorro.

Se aplica el método de corrección de atenuación de luz basado en la ley de Beer-Lambert (6), la cual relaciona la concentración instantánea  $C(i, j, \tau)$ , la intensidad base  $I_0(i, j)$ , la intensidad transmitida instantánea  $I(i, j, \tau)$ , el ancho de la pluma  $b(i, j)$  y la absorbancia molar  $\varepsilon$  (Figura 3a):

$$C = \frac{\log(I_0/I)}{\varepsilon b} \quad (6)$$

En la ecuación (6)  $C$  y  $\varepsilon$  son incógnitas, por lo que resulta necesaria una ecuación adicional, la cual resulta de igualar la máxima concentración encontrada con el método, con la concentración de descarga  $C_0$ . Asumiendo  $\varepsilon$  como constante, encontramos su valor como:

$$C_0 = \max \left\{ \frac{\log(I_0/I)}{\varepsilon b} \right\} = \frac{1}{\varepsilon} \max \left\{ \frac{\log(I_0/I)}{b} \right\} \rightarrow \varepsilon = \frac{\max \left\{ \frac{\log(I_0/I)}{b} \right\}}{C_0} \quad (7)$$

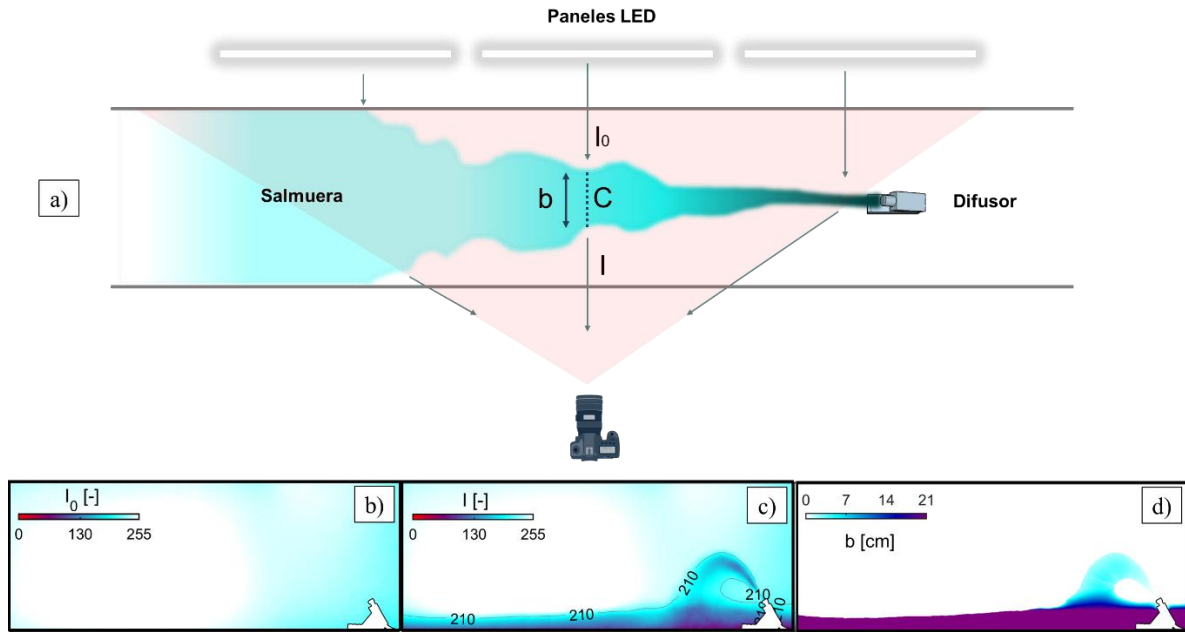


**Figura 2.** a) Panel de corrección de curvatura de cámara, b) imagen capturada por la cámara en la zona de corrección, c) imagen corregida con ventana de análisis, d) fotograma procesado con e) punto de control para determinar flujo desarrollado y f) Punto de control para la corrección de las pulsaciones.

La ecuación (6) se puede expresar en términos de valores medios como  $C_M = \log(I_0/I_M) / \varepsilon b$  utilizando el promedio  $I_M$  de flujo desarrollado. Para estimar el ancho de cada píxel se asume a) un comportamiento isotrópico a lo largo del eje de la pluma en el campo cercano (e.g., que las dimensiones de la pluma en sentido perpendicular al FOV son equivalentes a las calculadas en el FOV b) un ancho constante en el campo lejano, equivalente al ancho del canal de 21 cm. Para el campo cercano, primero se extrae el contorno de la pluma considerando como límite, valores de intensidad de píxel entre 200 a 235 en la escala entera de 8 bits, escogidos en función de obtener un contorno continuo válido para el procesamiento pero sin demasiada pérdida de información. A partir de este contorno, se calcula la línea central mediante distancias mínimas entre el contorno superior e inferior y se trazan 500 líneas perpendiculares a la línea central. El largo de estas líneas corresponde al ancho máximo ( $b_{max}$ ) en el punto central. Para representar los valores de ancho en el resto de la línea perpendicular, se utiliza una distribución normal de la forma:

$$b(x') = b_{max} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x'-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (8)$$

Donde  $x'$  corresponde a la distancia a lo largo de la línea perpendicular al eje de la pluma,  $\mu$  es su punto medio, y  $\sigma$  se define como  $\sigma = b_{max}/(2z_{lim})$ , con  $z_{lim} = 1,036$  asociado al nivel de contención del 70% del área bajo la curva. Con ello, se crea una matriz de ancho  $b$ , a la cual se interpolan los valores faltantes mediante la función *inpaint\_nans* con el método 4, basado en el modelo de resortes (*spring methapor*). Las Figura 3b, c y d muestran un ejemplo de los resultados de la medición de intensidad base ( $I_0$ ), intensidad media ( $I_M$ ) y ancho ( $b$ ) para el caso T6R24U00D20.



**Figura 3.** a) Vista en planta de la pluma y las variables relevantes para el cálculo en base a la ley Beer-Lambert. b) Intensidad base  $I_0(i, j)$ , c) Intensidad media del flujo desarrollado  $I_M(i, j)$  y d) anchos  $b(i, j)$  para el caso T6R24U00D20.

Para convertir los valores de concentración media  $C_M$  a salinidad, se considera la densidad prototipo de descarga para cada caso, la cual es convertida a salinidad de descarga de prototipo ( $S_p$ ) mediante la correlación descrita por Sharqawy et al (2010). Finalmente, se obtienen valores de exceso de salinidad porcentual  $\Delta S$ , considerando una salinidad ambiente calculada para una densidad de 1025 g/L:

$$\Delta S = \left(\frac{C}{C_{max}} \frac{S_p}{S_{1025}} - 1\right) 100\% \quad (9)$$

Las densidades relativas de 0,015, 0,024, 0,034 y 0,073 corresponden a salinidades de 54, 66, 79 y 131 g/L, respectivamente para el caso del prototipo, utilizando la correlación de Sharqawy et al (2010), para una temperatura de 17°C.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 muestra los mapas de salinidad para cada caso y repetición, incluyendo áreas de exceso de salinidad según tres criterios:

- Incremento de salinidad del 5% (~36 g/L) asociado al criterio ambiental de la normativa de ANZECC (1992).
- Salinidad de 40 PSU (~40 g/L) que genera efectos sobre el pasto marino *Zostera chilensis* (Blanco-Murillo et al., 2023).
- Salinidad de 54 PSU (~54 g/L) que ha mostrado efectos subletales en el erizo comestible *Loxechinus albus* (Duarte, 2025).

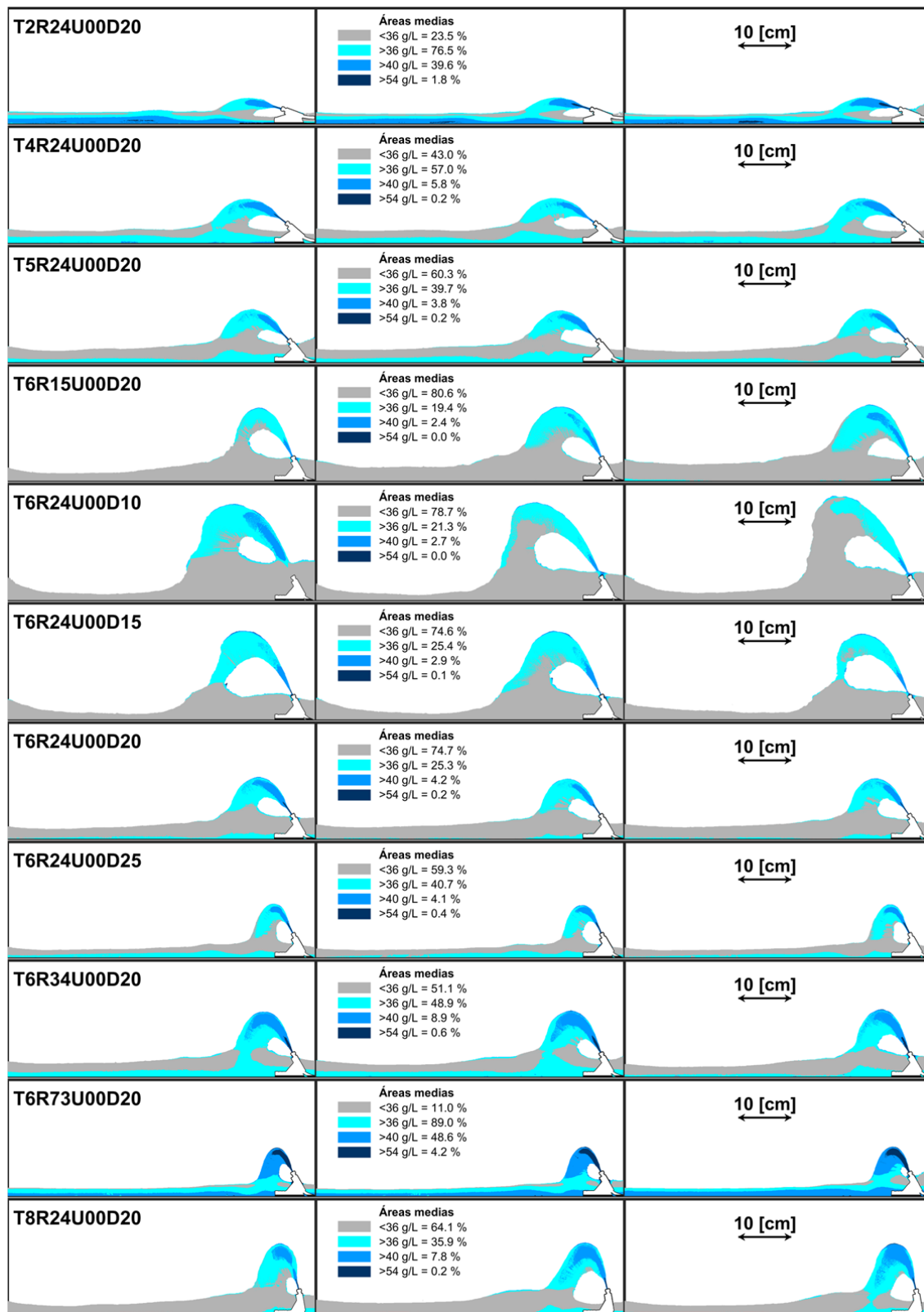
Se observa que ángulos menores a 40° y densidades relativas de descarga de 0,073 generan zonas superiores a 40 g/L en el campo lejano, lo que podría afectar a la especie *Zostera chilensis*. El ángulo de 20° mostró el peor desempeño, generando zonas en el campo lejano sobre los 54 g/L, que podría afectar a la especie *Loxechinus albus*. Sólo las configuraciones de densidad relativa de 0,015 y portas menores a 30 cm diluyen la salmuera en el campo cercano, obteniendo un campo lejano libre de excesos del 5%, mientras que los demás casos generan excesos que incrementarían el área de influencia de posibles impactos ambientales.

La baja dilución en una descarga proyectada a 20° se explica debido a que esta genera velocidades mayormente horizontales, lo que provoca que el chorro interactúe con el campo intermedio, provocando una reincorporación de salmuera al chorro. Adicionalmente, el chorro podría impactar el fondo tempranamente, y con velocidades más altas, por lo que mayor parte de la energía se disipa por fricción.

Similarmente, con un ángulo de 40° persiste esta problemática, sin embargo, al ir aumentando este ángulo, la dilución comienza a ser más efectiva y las áreas de exceso son menores. Esto se debe a que el chorro tiene un mayor ángulo de proyección, y por ende una trayectoria más larga, alcanzando mayor altura terminal y permitiendo una mayor interacción con el medio. Además, en este caso la energía del chorro tiende a disiparse en forma de remolinos, facilitando el proceso de difusión turbulenta. Sin embargo, ángulos muy verticales pueden disminuir la efectividad de la mezcla, dado que el chorro puede colapsar consigo mismo, disminuyendo la entrada de agua del medio (Gungor & Roberts, 2009). En la práctica se suele utilizar ángulos entre 45° a 60° los cuales se encuentran respaldados en la literatura.

Un incremento en el diámetro de porta genera que las velocidades de descarga disminuyan, por ende, su momentum baja y se produce menor turbulencia. Se puede observar que, para un diámetro de 2,0 mm (40 cm a escala de prototipo), el área de exceso por sobre el umbral comienza a extenderse al campo lejano. Un diámetro menor, por ende, puede favorecer la mezcla, sin embargo, aberturas muy pequeñas pueden tener pérdidas de carga muy altas en el emisario (Bleninger & Jirka, 2008).

Se observa también que descargas con mayor salinidad impactan en el fondo a menores distancias, debido a que existe más fuerza gravitacional. De esta manera densidades relativas mayores a 0,024 inducen excesos mayores al umbral en el campo lejano. La menor altura terminal del chorro hace que el área de contacto disminuya, a esto se le suma la necesidad de alcanzar diluciones mayores debido a una salinidad inicial mayor.



*Figura 4. Resultados de mapas de áreas de exceso de salinidad para 11 casos en triplicado. Repeticiones de experimentos 1, 2 y 3 en las columnas de izquierda a derecha.*

**Tabla 2.** Niveles de incremento de salinidad en el campo lejano según criterio.

Criterio	Ángulo [°]					Densidad relativa [-]				Diámetro [m]			
	20	40	50	60	80	0,015	0,024	0,034	0,073	0,2	0,3	0,4	0,5
5%	Alto	Medio	Medio	Leve	Leve	Nulo	Leve	Medio	Alto	Nulo	Nulo	Leve	Medio
40 g/L	Medio	Leve	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Medio	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo
54 g/L	Leve	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo

La Tabla 2 sintetiza los niveles cualitativos para cada uno de los 3 criterios de exceso de salinidad. Los resultados muestran algunas configuraciones deficientes en términos de dilución que se traducen en la aparición de zonas de excesos de salinidad en el campo lejano.

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio efectúa un análisis de la capacidad de dilución de un difusor de descarga de salmuera en un ambiente estático, modificando el diámetro de porta, el ángulo y la densidad relativa de descarga. Los resultados muestran que configuraciones con diámetro pequeño (menores a 30 cm) o salinidades de descarga de 54 g/L, permiten alcanzar valores bajo el umbral del 5%. En contraste, configuraciones con ángulos pequeños o salinidades de descarga altas, superan el umbral del 5%, y en ocasiones los umbrales de 40 y 54 g/L, en el campo lejano, lo que traería consecuencias en las comunidades biológicas.

Las modelaciones fueron analizadas mediante colorimetría digital de imágenes, utilizando la ley de Beer-Lambert, que transforma la tridimensionalidad de la pluma a un plano de concentración de dos dimensiones. Esta metodología, no obstante, presenta complejidades en el campo intermedio, donde los valores del ancho cambian abruptamente. Este tipo de errores podrían mejorarse con el uso de láser y trazadores fluorescentes (Gungor & Roberts, 2009) que precinden de estas correcciones. Otro error es la interacción de la pluma con los bordes, que entorpecen la difusión vertical y puede saturar el medio si se considera tiempos prolongados. Finalmente, el escalamiento basado en el  $Fr$  entregó flujos con Reynolds entre 610 y 1.526, lo que indica que la turbulencia generada puede ser insuficiente para reproducir con exactitud la mezcla del prototipo, subestimando la dilución. De esta manera, el presente trabajo busca explorar la técnica de atenuación de luz y sus resultados deben ser tomados con precaución y desde el ámbito de laboratorio. Se recomienda complementar con modelos numéricos o pruebas con Reynolds de al menos 4.000 (Fisher, 1979) para enrobustecer la física modelada.

Debido a que se utiliza un gran espectro de intensidades de luz, mayor profundización debe ser requerida para escoger el equipamiento idóneo para representar colores lineales, sobre todo en los extremos del espectro, donde fue necesario utilizar para la extracción de contornos como base para los algoritmos de cálculo. El umbral para este cálculo no pudo ser estandarizados y variaba entre 200 a 235 de intensidad de pixel.

Finalmente, si bien no se realizó una validación directa del método, se puede comprobar la repetibilidad en triplicados y verificar la consistencia cualitativa del comportamiento de la pluma frente a cambios en las variables, lo que reforzaría la confiabilidad relativa del enfoque. Para futuros estudios se recomienda complementar este método óptico con puntos

de medición directa (como sensores de conductividad o extracción de muestras) para validar directamente la estimación por intensidad de luz e incluir variabilidad de altura y forma de las portas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento de ANID a través del proyecto FONDEF ID23I10336, al centro COSTAR por el financiamiento del escrito y a la empresa BENTOS por la provisión de Rodamina WT para los experimentos de laboratorio.

## REFERENCIAS

- Abessi, O., & Roberts, P. (2014). Multiport Diffusers for Dense Discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8). doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000882
- Abessi, O., & Roberts, P. (2016). Dense Jet Discharges in Shallow Water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1). doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001057
- ANZECC. (1992). *Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters*. Canberra: Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters.
- Blanco-Murillo, F., Díaz, M., Rodríguez-Rojas, F., Navarrete, C., Celiz-plá, P., Sanchez-Lizaso, J., & Sáez, C. (2023). A risk assessment on *Zostera chilensis*, the last relict of marine angiosperms in the South-East Pacific Ocean, due to the development of the desalination industry in Chile. *Science of the Total Environment*, 883. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163538>
- Bleninger, T., & Jirka, G. (2008). Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, 585-597.
- Choi, K., Lai, C., & Lee, J. (2016). Mixing in the Intermediate Field of Dense Jets in Cross Currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1). doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001060.
- Chow, A., Shrivastava, I., Adams, E., Al-Rabaie, F., & Al-Anzi, B. (2020). Unconfined Dense PLunging Jets Used for Brine Disposal from Desalination Plants. *Processes*, 8(696). doi:10.3390/pr8060696
- Duarte, C. W. (2025). Exposición y recuperación de *Loxechinus albus* frente a estres por agua de descarta de una planta desalinizadora (Datos no publicados). Valparaíso, Chile: FONDEF ID23I10336.
- Federici, P. (2017). *Estudio numérico del comportamiento de la salmuera descargada al mar mediante emisarios submarinos*. Universidad de Valparaíso, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica.
- Fisher, H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. California: Academic Press, Inc.
- Gungor, E., & Roberts, P. (2009). Experimental Studies on Vertical Dense Jets in a Flowing Current. *Journal of Hydraulic Engineering*(135), 935-948.
- James, H., & Honeychurch, K. (2024). Digital Image Colorimetry Smartphone Determination of Acetaminophen. *Journal of chemical education*, 101, 187-196. Obtenido de <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00659>
- Kehoe, E., & Penn, L. (2013). Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 90, 1191-1195. Obtenido de [dx.doi.org/10.1021/ed300567p](http://dx.doi.org/10.1021/ed300567p)
- Perez-Díaz, B., Palomar, P., Castañedo, S., & Álvarez, A. (2015). Caracterización experimental del campo lejano de los vertidos de salmuera al mar. *Ribagua*.
- Roberts, P., & Tian, X. (2000). Three-dimensional imaging of stratified plume flows. *5th International Conference on Stratified Flows*. Vancouver, British Columbia.
- Roberts, P., & Tian, X. (2004). New experimental techniques for validation of marine discharge models. *Environmental Modelling & Software*, 19, 691-699. doi:10.1016/j.envsoft.2003.08.005
- Sharqawy, M., Lienhard, J., & Zubair, S. (2010). Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*, 354-380. doi:10.5004/dwt.2010.1079
- Winckler, P. (2021). *Guía para el modelado de la hidrodinámica y del proceso de mezcla de descargas salinas y térmicas*. DIRECTEMAR, Departamento de Protección del Medio Ambiente Acuático.
- Winckler, P. (2021). *Introducción al modelado de procesos costeros. Apuntes de clases*. Valparaíso, Chile: Universidad de Valparaíso.