

2021

advección

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

turbulencia

difusión

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{V}) = \Delta C$$

hidrodinámica

GUÍA PARA EL MODELADO DE LA HIDRODINÁMICA Y DEL PROCESO DE MEZCLA DE DESCARGAS SALINAS Y TÉRMICAS

**Departamento de Protección del Medio Ambiente Acuático,
Respuesta a la Contaminación y Cambio Climático**

Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático
Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante



Patricio Winckler Grez
Universidad de Valparaíso

INFORME FINAL

GUÍA PARA EL MODELADO DE LA HIDRODINÁMICA Y DEL PROCESO DE MEZCLA DE DESCARGAS SALINAS Y TÉRMICAS ASOCIADAS A PROYECTOS DE PLANTAS TERMOELÉCTRICAS Y DESALINIZADORAS

2021/11/01

Preparado para:

Departamento de Protección del Medio Ambiente Acuático, Respuesta a la Contaminación y Cambio Climático

Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante

Preparado por:

Patricio Winckler Grez

PhD. in Civil Engineering, MSc.

Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso

Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR)

Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN)

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	EXCLUSIONES.....	6
1.2	CONSULTAS Y ACLARACIONES	6
1.3	AGRADECIMIENTOS	6
2	MARCO TEÓRICO.....	7
2.1	FORZANTES HIDRODINÁMICOS	7
2.2	PROCESOS DE MEZCLA FUNDAMENTALES.....	9
2.3	PROCESOS DE MEZCLA DE DESCARGAS TÉRMICAS Y SALINAS	11
2.3.1	<i>Plumas térmicas.....</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Plumas salinas.....</i>	<i>12</i>
3	MODELACIÓN DE PLUMAS TÉRMICAS Y SALINAS	16
3.1	DEFINICIÓN DE UN MODELO	16
3.2	MODELOS DE PROCESOS HIDRODINÁMICOS Y DE MEZCLA	17
3.2.1	<i>Modelos hidrodinámicos.....</i>	<i>17</i>
3.2.2	<i>Modelos de mezcla</i>	<i>23</i>
3.3	PROPIEDADES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS	25
3.4	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS	26
3.4.1	<i>Calibración</i>	<i>26</i>
3.4.2	<i>Validación</i>	<i>26</i>
3.4.3	<i>Estadígrafos utilizados para comparar registros y modelos.....</i>	<i>28</i>
3.4.4	<i>Variables y tolerancias máximas admisibles en la calibración y validación.....</i>	<i>29</i>
3.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	33
3.6	LÍMITES MÁXIMOS ADMISIBLES.....	35
3.6.1	<i>Límites máximos admisibles de salinidad</i>	<i>35</i>
3.6.2	<i>Límites máximos admisibles de temperatura</i>	<i>37</i>
3.6.3	<i>Límites máximos admisibles de otras sustancias.....</i>	<i>37</i>
3.6.4	<i>Efectos biológicos sobre especies marinas.....</i>	<i>37</i>
3.7	DEFINICIÓN DE ÁREA DE INFLUENCIA	37
3.8	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	38
3.8.1	<i>Bases de datos batimétricas</i>	<i>38</i>
3.8.2	<i>Elaboración del modelo de elevación digital.....</i>	<i>39</i>
3.8.3	<i>Definición del dominio de los modelos hidrodinámico y de procesos de mezcla</i>	<i>39</i>
3.9	DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN.....	40
3.9.1	<i>Modelo hidrodinámico.....</i>	<i>41</i>
3.9.2	<i>Modelo de mezcla</i>	<i>42</i>
3.10	FORMATO DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	43
3.11	SÍNTESIS DE RESULTADOS	45
4	MONITOREO DE VARIABLES	43
4.1	GENERALIDADES	43
4.2	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MUESTREO (EN PLANTA).....	44
4.3	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MUESTREO (COLUMNA DE AGUA)	47
4.4	POSICIONAMIENTO DEL INSTRUMENTAL	47

4.5	DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DEL MUESTREO	48
4.6	MEDICIÓN Y CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TURBULENTA	48
4.6.1	<i>Uso de trazadores</i>	49
4.6.2	<i>Fundamento teórico</i>	50
4.6.3	<i>Información a reportar sobre el coeficiente de difusión turbulenta</i>	52
4.6.4	<i>Información a reportar sobre el programa de monitoreo</i>	52
5	ANEXOS	54
5.1	ACRÓNIMOS.....	54
5.2	CONTENIDOS DE UN INFORME DE MONITOREO Y MODELACIÓN.....	55
6	REFERENCIAS	56

1 INTRODUCCIÓN

En el marco legal vigente, la evaluación de impacto ambiental¹ es el procedimiento orientado a determinar si el impacto ambiental de un proyecto² o actividad se ajusta a Ley N°19300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente (en adelante LGBMA). La evaluación contempla mecanismos para determinar el impacto y su significancia, así como el cumplimiento de las normas ambientales y el Área de influencia (en adelante AI), definida como “el área o espacio geográfico, cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados con la finalidad de definir si el proyecto o actividad genera o presenta alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, o bien para justificar la inexistencia de dichos efectos, características o circunstancias (Título I, art. 2, literal a del D.S. (M.M.A.) N° 40/2012).

Para efectos de esta guía, el AI se define como **“el lugar geométrico, en planta, donde se exceden límites máximos admisibles de variables como la salinidad, temperatura u otras sustancias”** definidos en la Sección 3.6. Para ello, el titular de un proyecto o actividad debe analizar si éste se encuentra en el listado de tipologías susceptibles de causar impacto ambiental -en cualquiera de sus fases- que deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (Art.10, LGBMA; Art.3, Reglamento del SEIA).

En este marco, se presenta esta guía para el modelado de la hidrodinámica y proceso de mezcla de descargas de plumas salinas y térmicas para proyectos de plantas termoeléctricas y desalinizadoras, que son revisados por la Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático (DIRINMAR) de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR). El objetivo de la guía es definir los estudios de modelación necesarios para definir el AI de las descargas de aguas de mar asociadas proyectos de centrales termoeléctricas y plantas desalinizadoras que descargan en aguas oceánicas, fiordos y estuarios bajo jurisdicción de la Autoridad Marítima (AM).

La guía contempla elementos asociados a la modelación y los registros de campo necesarios para calibrar y validar los modelos. Ha sido escrita incluyendo elementos generales de modelación y otros particulares al caso de las descargas de plumas salinas y térmicas, en un lenguaje lo más llano dentro de las complejidades propias de la disciplina. Naturalmente, la complejidad de los trabajos de campo y modelación debieran ser proporcionales al impacto esperado por la planta³, cuestión que se debiera definir en el marco del SEA. Por ende, esta guía debe ser considerada como una recomendación de buenas prácticas de modelación; no tendiendo carácter normativo.

¹ Evaluación de Impacto Ambiental: el procedimiento, a cargo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente o de la Comisión Regional respectiva, en su caso, que, en base a un Estudio o Declaración de Impacto Ambiental, determina si el impacto ambiental de una actividad o proyecto se ajusta a las normas vigentes (Ley N° 19.300).

² Impacto ambiental: la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada (Ley N° 19.300).

³ A modo de ejemplo, una planta desaladora de suministro de agua potable a una localidad aislada tiene un impacto mucho menor que una planta destinada al abastecimiento de un proceso minero.

1.1 EXCLUSIONES

Este documento excluye recomendaciones de modelación y monitoreo en:

- sistemas de captación de aguas utilizadas en centrales termoeléctricas y plantas desalinizadoras
- sistemas de descarga de plantas híbridas (termo-desaladoras)⁴
- sistemas de descarga en lagos y ríos
- la evaluación de efectos sinérgicos asociados a la interacción con otras descargas
- la evaluación de efectos acumulativos en organismos producto de la exposición prolongada a la descarga

Se excluyen también elementos del diseño de los sistemas de captación y descarga, que se asumen responsabilidad exclusiva del titular del proyecto, pero que deben reflejarse en la modelación.

1.2 CONSULTAS Y ACLARACIONES

Se recomienda a los eventuales usuarios, enviar observaciones sobre esta guía a la División de Preservación del Medio Ambiente Acuático y Combate a la Contaminación de DIRINMAR, con copia a patricio.winckler@uv.cl.

1.3 AGRADECIMIENTOS

Esta guía fue desarrollada en forma exclusiva por su autor a petición de la DIRINMAR. No obstante, durante el proceso de revisión se recibieron observaciones de Eugenia Valdebenito, Adriana Hidalgo, Jenny Maturana, Claudia Valenzuela, C.F. Haxel Lindermann y C.F. Enrique Vargas (DIRINMAR), Andrés Camaño (CONA), Luis Jollán (Bentos), Rolando García y Benjamín Carrión (PRDW), Humberto Díaz y Matías Quezada (Ecotecnos), Felipe Guerrero (FGM Ingeniería de Servicios Spa), Aldo Hernández (Holon Chile) y Freddy Vargas (AMVAR SpA). En la mayoría de los casos incorporé sus sabias recomendaciones, aun cuando muchas quedan pendientes para una futura versión de la guía. Mis agradecimientos por sus aportes.

Patricio Winckler Grez

Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso

Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR-UV)

Centro Nacional de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres Naturales (CIGIDEN)

Viña del Mar

Noviembre de 2021

⁴ Cabe notar que en plantas termo-desaladoras, la descarga que mezcla agua caliente y salmuera puede tener boyantes positiva o negativa, dependiendo de la concentración de sal y la temperatura que tenga la descarga. Será responsabilidad exclusiva del titular del proyecto evaluar este aspecto en la modelación.

2 MARCO TEÓRICO

Para definir el AI de una descarga en un cuerpo de agua, se debe caracterizar el campo hidrodinámico en un dominio lo suficientemente grande como para incluir la escala de los procesos físicos relevantes de los forzantes, además de incluir la descarga y la física de su pluma de temperatura o salinidad (que normalmente será de una escala menor que los forzantes), según sean proyectos termoeléctricos o desaladoras, respectivamente. En esta sección se introducen los forzantes hidrodinámicos, los procesos de mezcla fundamentales y los procesos de mezcla de descargas térmicas y salinas.

2.1 FORZANTES HIDRODINÁMICOS

El campo hidrodinámico se caracteriza mediante un modelo, debidamente calibrado y validado, el cual genera como resultado un campo de velocidades (magnitud y dirección) y desnivelaciones producidas por diferentes forzantes en el dominio de simulación. Las corrientes forzadas por los vientos, marea y oleaje son las que presentan mayor relevancia en los estudios de circulación, pero también existen aquellas generadas cerca de desembocaduras producto del caudal descargado y aquellas generadas por gradientes densimétricos en zonas de mezcla de agua dulce y salada. Este tipo de forzantes se describe a continuación:

Vientos: Los esfuerzos de corte ejercidos por el viento sobre la superficie del océano se traducen en una transferencia de energía desde la atmósfera a la superficie del agua (Pugh & Woodworth, 2014). La magnitud de la corriente es del orden de un 1% de la magnitud del viento forzante en la superficie (e.g. Lagardère et al., 1994) y decrece a medida que la profundidad aumenta por efecto de la viscosidad del agua. En costas relativamente someras, las corrientes generadas por el viento puede alcanzar el fondo marino, en tanto que, en costas profundas, estas se restringen a las capas superficiales de la columna de agua (Figura 1a).

Mareas: Las corrientes mareales corresponden a un flujo predominantemente horizontal que acompaña el ascenso y descenso periódico del nivel del mar generado por el movimiento relativo de la tierra, la luna y el sol (Pugh & Woodworth, 2014). En zonas costeras, bahías o estuarios se conocen como corrientes de flujo y reflujo, cuyo período es regular y en torno a 12.42 horas en lugares con régimen de marea semidiurna. Suelen generarse antes de alcanzar los puntos más altos y bajos de los ciclos mareales, donde alteran su dirección en función del ciclo mareal. Las corrientes se distribuyen en toda la columna de agua y en el fondo se reducen por la restricción que impone el fondo, en la denominada capa límite de fondo (Figura 1b). Las corrientes mareales son usualmente bajas (cm/s a dm/s) en cuerpos de agua abiertos y fuertes (m/s) en angosturas, fiordos o canales como Canal Chacao y el Estrecho de Magallanes. Su magnitud depende también del rango de mareas de la localidad.

Oleaje: En su propagación desde aguas profundas a aguas someras⁵⁴, el oleaje experimenta diversos procesos costeros entre los que destacan la refracción, el asomeramiento, la difracción, la reflexión y la rotura (Holthuijsen, 2010). Antes de la rotura, el oleaje desarrolla flujos orbitales con períodos característicos de entre 3 y 30 s (Figura 1c), que generan una corriente de magnitud baja (cm/s) debido a la deriva de Stokes. Al aproximarse a zonas bajas, no obstante, el oleaje rompe, generando de una sobrelevación (*wave setup*) y corrientes litorales bastante confinadas a la zona rompiente que, debido a la turbulencia que las caracteriza, son muy eficientes en mezclar sustancias (Winckler et al., 2013). La magnitud de la corriente litoral (m/s) depende del oleaje (altura, período y ángulo de

⁵ Aguas profundas es la profundidad a la cual los efectos del fondo marino son despreciables en la propagación del oleaje y se cumple cuando la profundidad relativa es $d/\lambda > 1/2$, donde d es la profundidad y λ la longitud de onda. Aguas intermedias es la profundidad intermedia donde el fondo comienza a influir en la propagación del oleaje y se cumple cuando $1/25 \leq d/\lambda \leq 1/2$. Aguas someras es la profundidad en la que el fondo es determinante en la propagación del oleaje y se cumple cuando $d/\lambda < 1/25$ (Beyá et al., 2016).

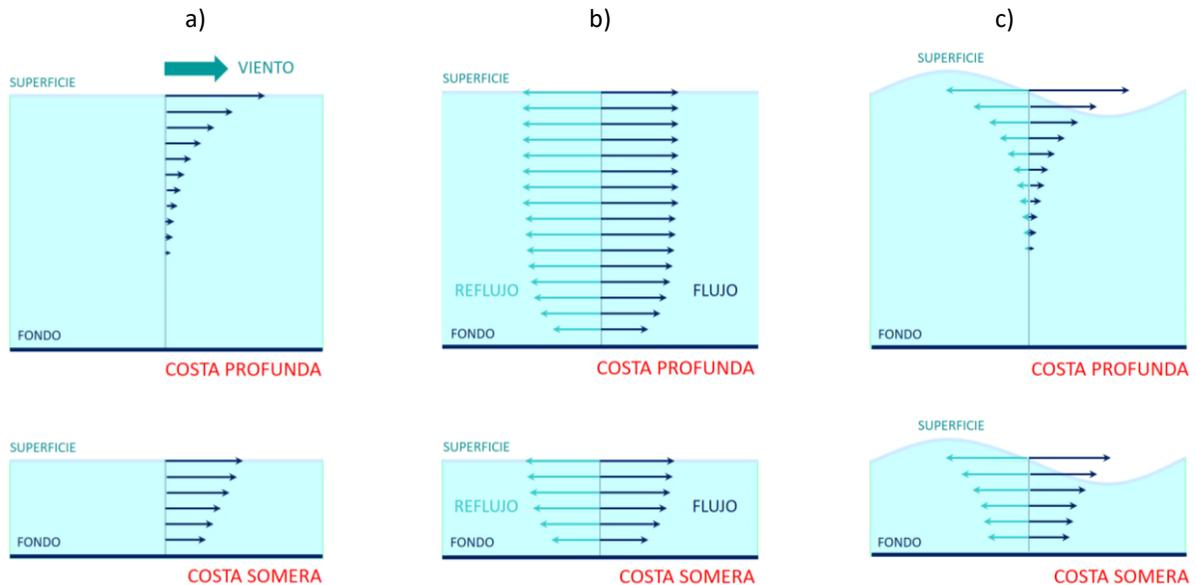
incidencia), de la pendiente de fondo y de la difusión turbulenta y fricción de fondo (Longuett-Higgins, 1970a,b). Si la intensidad de las corrientes litorales es alta, pueden llegar a alterar el patrón de circulación de una bahía, más allá de la zona rompiente.

Descargas de ríos: Los ríos generan corrientes en las desembocaduras cuya magnitud puede ser importante durante las crecidas (m/s). Su magnitud, no obstante, decae rápidamente con la distancia a la desembocadura (Salcedo-Castro et al., 2020), pero puede ser un forzante importante para descargas ubicadas cerca o en esta.

Gradientes densimétricos: Los gradientes horizontal y vertical de densidad que ocurre naturalmente producto de la descarga de agua dulce al mar en ríos, estuarios y fiordos, genera corrientes que usualmente son de baja magnitud (dm/s), pero pueden tener efectos sinérgicos con las corrientes generadas en las desembocaduras o confluencias de masas de agua (Cáceres et al., 2002; Castillo et al, 2016).

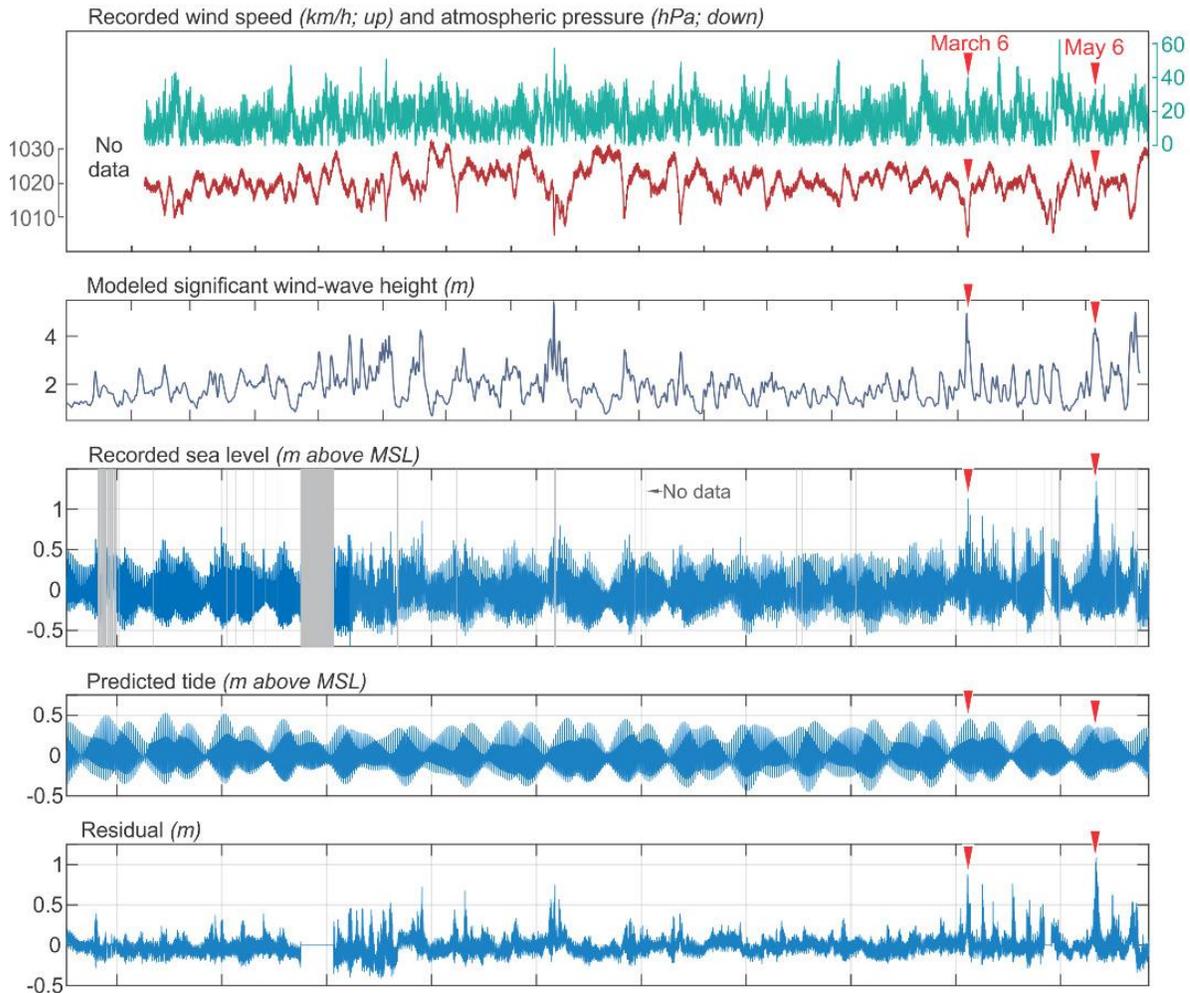
Para efectos de la modelación de una pluma de descarga, es necesario justificar, mediante un estudio oceanográfico, los forzantes dominantes que generan corrientes cuya magnitud e intensidad turbulenta es relevante en el proceso de mezcla⁶. Para ello, es pertinente contar con mediciones simultáneas de los diferentes forzantes hidrodinámicos y algún parámetro de respuesta (corriente o nivel del mar), de forma de determinar la influencia relativa de cada forzante en la respuesta (en la *Figura 2* se muestra un ejemplo de mediciones simultáneas). La atribución de la influencia relativa puede efectuarse mediante correlaciones de a pares o mediante una regresión lineal múltiple (Amat, 2016).

Figura 1: Esquema simplificado del perfil de la velocidad horizontal de las corrientes para forzantes de a) viento, b) marea y c) oleaje en un medio no estratificado.



⁶ Cabe notar que en un estudio oceanográfico basado en la Publicación SHOA 3201, la medición mediante ADCP convencional no permite capturar en forma adecuada la turbulencia, pues la frecuencia de muestreo es baja de modo de permitir la medición continua durante un mes. Dado que el estudio busca definir AI, el registro se orienta a definir las velocidades medias (que definen las dimensiones máximas de la pluma). La turbulencia se considera mediante la modelación de la hidrodinámica (mediante la viscosidad de remolino) y el proceso de mezcla (mediante el coeficiente de difusión turbulenta).

Figura 2: Ejemplo de registros de viento y de presión atmosférica, modelo de oleaje, registros del nivel del mar, marea astronómica y residuo meteorológico obtenidos mediante análisis armónico (adaptado de Carvajal et al., 2020)



2.2 PROCESOS DE MEZCLA FUNDAMENTALES

Los procesos de mezcla que describen dos líquidos (e.g. salmuera o plumas térmicas en agua) se pueden dividir en (Fischer et al., 1979) advección, difusión, reacción y dispersión.

Advección: es un proceso de transporte de una sustancia o de una propiedad (calor, humedad, salinidad, momentum, energía, entre otros) por efecto del flujo. En ingeniería oceánica, estos flujos pueden asociarse al viento, al oleaje o a las corrientes marinas. En algunas disciplinas (ciencias atmosféricas o ingeniería mecánica), este proceso también se denomina convección, aun cuando se diferencia porque éste se gatilla por una fuente de calor.

Difusión molecular: se asocia al movimiento térmico de las partículas de un fluido (líquido o gas) a temperaturas por encima del cero absoluto. En forma empírica se sabe que flujo neto de moléculas ocurre de una región de mayor concentración a una de menor concentración, lo que se modela mediante la Ley de Fick.

Difusión turbulenta es un proceso por el cual las sustancias se mezclan debido a la presencia de remolinos (eddies) que

pueden variar en tamaño dependiendo de la geometría y condiciones dinámicas del cuerpo de agua donde se desarrolla el proceso de mezcla. En el océano, la difusión turbulenta predomina como mecanismo de mezcla por sobre la difusión molecular, por lo que sólo se modela con la primera.

Reacción: es un proceso en el cual un efluente transforma su estructura molecular y enlaces al mezclarse en agua, generando otras sustancias debido a reacciones de tipo químico, físico o biológico. Las sustancias se clasifican en no conservativas cuando son degradadas por dichas reacciones (cambiando su masa total en el agua), y conservativas cuando no son afectadas por dichas reacciones (la masa total permanece constante). Existen otros procesos de tipo reactivo (e.g. evaporación, biodegradación, fotooxidación) y algunos representan la forma en que se produce la mezcla (e.g. floculación, emulsificación o la disolución) que aparecen en problemas específicos no cubiertos en el texto.

Dispersión: En los flujos medioambientales existen gradientes espaciales de velocidad debido, entre otras razones, a la condición de no deslizamiento en los bordes sólidos. En un campo de velocidades no uniforme, la pluma de una especie (solute o contaminante), se advecta a diferentes velocidades, haciendo que se extienda longitudinalmente en forma más rápida que una nube liberada en una corriente uniforme. La advección diferencial del medio aumenta la difusividad efectiva, fenómeno que se conoce como dispersión por corte (shear dispersion), o dispersión de Taylor. En general, los términos de dispersión surgen producto de la modelación de un fenómeno tridimensional (3D) mediante ecuaciones en dos dimensiones (esto es, corresponde a un artefacto matemático que surge de una reducción dimensional del problema físico). De ello se deduce que un modelo 3D no incluye dispersión.

En términos matemáticos, los procesos de mezcla son esencialmente tridimensionales y pueden ser modelados mediante la ecuación de advección-difusión-reacción en coordenadas cartesianas (x, y, z) :

$$\begin{aligned} & \underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{VARIACIÓN LOCAL}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial y}(vC) + \frac{\partial}{\partial z}(wC)}_{\text{ADVECCIÓN}} \\ &= \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right)}_{\text{DIFUSIÓN TURBULENTA}} + \underbrace{R(C)}_{\text{REACCIÓN}} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $C(x, y, z, t)$ es la concentración de una sustancia, que puede ser la temperatura para una pluma térmica o salinidad para una pluma salina, $V = (u, v, w)$ es el campo de velocidades, $D = (D_x, D_y, D_z)$ es el coeficiente de difusión turbulenta, $R(C)$ representa la reacción, que puede ser modelada de diferentes formas. Esta ecuación permite calcular la concentración de dicha sustancia si se conoce el campo de velocidades -usualmente mediante modelos hidrodinámicos calibrados y validados con datos de campo- y el coeficiente de difusión turbulenta que se estima mediante mediciones en terreno (sección 4.6) o a través de formulaciones que permitan apropiada caracterización del campo de corrientes en el dominio. Como se verá en esta guía, esta ecuación, o alguna de sus simplificaciones, es fundamental para la definición del AI de un proyecto.

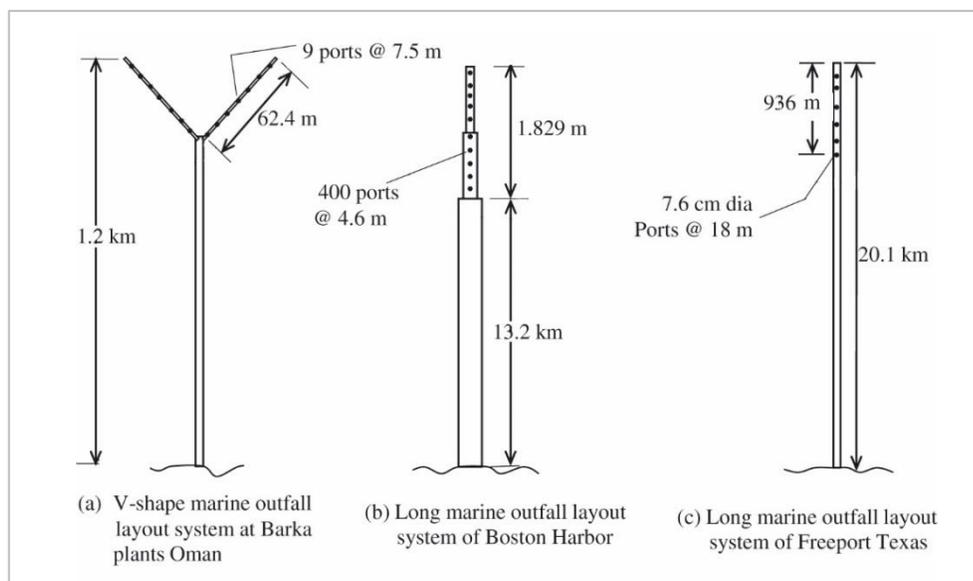
Cabe notar que las descargas pueden contener partículas de tamaño reducido que experimentan procesos como la sedimentación, la resuspensión, el transporte en suspensión y el de fondo, la coagulación-floculación, entre otros. En esta guía se asume que las descargas térmicas o salinas no contienen una fracción significativa de partículas, por lo que estos procesos no se consideran.

2.3 PROCESOS DE MEZCLA DE DESCARGAS TÉRMICAS Y SALINAS

Los procesos de mezcla de descarga de plumas térmicas y salinas difieren en forma notoria debido a, esencialmente, su densidad. Las plumas térmicas, de boyantes positiva, son más livianas que el medio en las cercanías de la descarga. Ello se explica porque el agua de mar utilizada en el sistema de refrigeración de una central termoeléctrica (u otro proceso industrial), aumenta su temperatura, a salinidad constante, reduce su densidad. Las plumas salinas, en contraste, son de boyantes negativa puesto que la salmuera corresponde a agua de mar, debidamente filtrada, que aumenta su salinidad aumentando, a temperatura constante, su densidad.

La eficiencia del proceso de descarga depende también del diseño de la descarga, la cual depende del tipo de difusor (*Figura 3*). Las descargas con una rápida dilución inicial en áreas de buena circulación acotan los impactos a pocas decenas de metros mientras que aquellas diseñadas de manera deficiente pueden causar alteraciones en la comunidad de pastos marinos sistemas de sedimentos blandos (Jenkins et al., 2012). A continuación, se introducen conceptos básicos para describir ambos tipos de plumas.

Figura 3: Ejemplos de difusores con múltiples portas. Difusor en V, difusor telescópico y difusor de sección constante (Ahmad & Baddour, 2014). El tipo de emisario y difusor, longitud, tamaño y espaciamiento de portas debe ser dimensionado para satisfacer los requerimientos de cada lugar.



2.3.1 Plumitas térmicas

Una pluma térmica se caracteriza por dos regiones claramente diferenciadas por los procesos dominantes (*Figura 4a*). En la región del campo cercano, el proceso de mezcla está dominado por la boyantes y el momentum de la descarga actuando a una escala espacial del orden de metros y a una escala temporal del orden de minutos. La eficiencia del proceso de mezcla depende del sistema de vertido (difusor), de las características físicas del efluente y las del medio receptor. El diseño de la descarga busca maximizar la reducción de temperatura, que en esta región se activa por el flujo turbulento asociado a la cantidad de movimiento transmitida en las portas del difusor. La pluma genera modificaciones en el patrón hidrodinámico del medio, por lo que se denomina efluente activo. En la medida que la pluma asciende, se mezcla por la difusión turbulenta y el arrastre de agua de mar (*entrainment*), aumentando

su densidad hasta alcanzar la misma densidad del medio, donde se estratifica.

Usualmente, la estratificación de la pluma se da a una profundidad donde se ubica la pycnoclina, pero en términos más generales, ocurre cuando el perfil de densidad de la pluma se intersecta al perfil de densidad del medio. En la región del campo lejano, el proceso de mezcla está dominado por las corrientes forzadas por vientos, mareas, oleaje o gradientes densimétricos, entre otros. La pluma no modifica el flujo y por tanto se denomina efluente pasivo. El proceso de mezcla responde a escalas espaciales del orden de kilómetros y escalas temporales de horas. Las plumas térmicas son especialmente sensibles a la estratificación, puesto que ella puede definir si la pluma aflora a la superficie o queda atrapada a media profundidad (*Figura 4*). La *Figura 5* muestra un ejemplo de un modelo físico a escala de un difusor con portas alternadas, descargando una pluma térmica en un flujo orientado en forma perpendicular al difusor (Roberts et al., 2011).

2.3.2 Plumitas salinas

La salmuera es un residuo hipersalino que resulta de la producción en plantas desalinizadoras. Asimismo, la salmuera contiene los aditivos utilizados en la limpieza de filtros y las membranas, anti-incrustantes (e.g. fosfato, ácido málico y ácido sulfúrico), anticorrosivos (sulfuro de sodio), *antifouling* (de base cloro), y metales pesados, entre otros compuestos. Dado que la salmuera no sufre variaciones térmicas significativas durante la osmosis⁷, la hipersalinidad se traduce en una flotabilidad negativa de la salmuera al ser vertida al medio marino (*Figura 4b* y *Figura 6*).

Una vez descargada, la pluma salina describe una trayectoria aproximadamente parabólica en la región de campo cercano, que es definida por el balance entre el momentum de los chorros y la gravedad. El efluente, es también activo pues modifica el flujo ambiente. La eficiencia del proceso de mezcla en esta región depende del sistema de vertido (difusor), de las características físicas del efluente y las del medio receptor. Una vez que la pluma impacta el fondo, los procesos turbulentos asociados a la descarga se reducen y el flujo se estratifica, formando una pluma que se comporta como una corriente de gravedad, característica de la región de campo lejano. En esta región, el flujo depende de la diferencia de densidad entre la salmuera y el medio, de la batimetría, la rugosidad, las corrientes y el efecto del oleaje en el fondo. El proceso de mezcla responde a escalas espaciales del orden de kilómetros y escalas temporales de horas a días, de modo que la pluma puede desplazarse grandes distancias con escasa dilución.

IHA y CEDEX (2011) proponen una metodología de diseño de los vertidos al mar de la salmuera, para reducir el impacto ambiental de las plantas desalinizadoras (MEDVSA) define en forma detallada:

- la caracterización de los efluentes de rechazo de la desalación,
- la identificación de ecosistemas, la localización y sistema de descarga,
- el diseño del sistema de descarga y el modelado para predecir su comportamiento,
- la valoración del impacto ambiental sobre el medio marino y
- las medidas protectoras y Programa de Vigilancia Ambiental.

⁷ La temperatura de la descarga aumenta levemente respecto del medio. Por ejemplo, Lykkebo Petersen (2017) reporta un aumento de 1.2°C en la descarga y Chandía (comunicación personal) ha reportado incrementos de hasta 6°C.

Figura 4: Esquemas de a) una pluma térmica estratificada y de boyantes positiva, sometida a una corriente y b) una pluma salina de boyantes negativa.

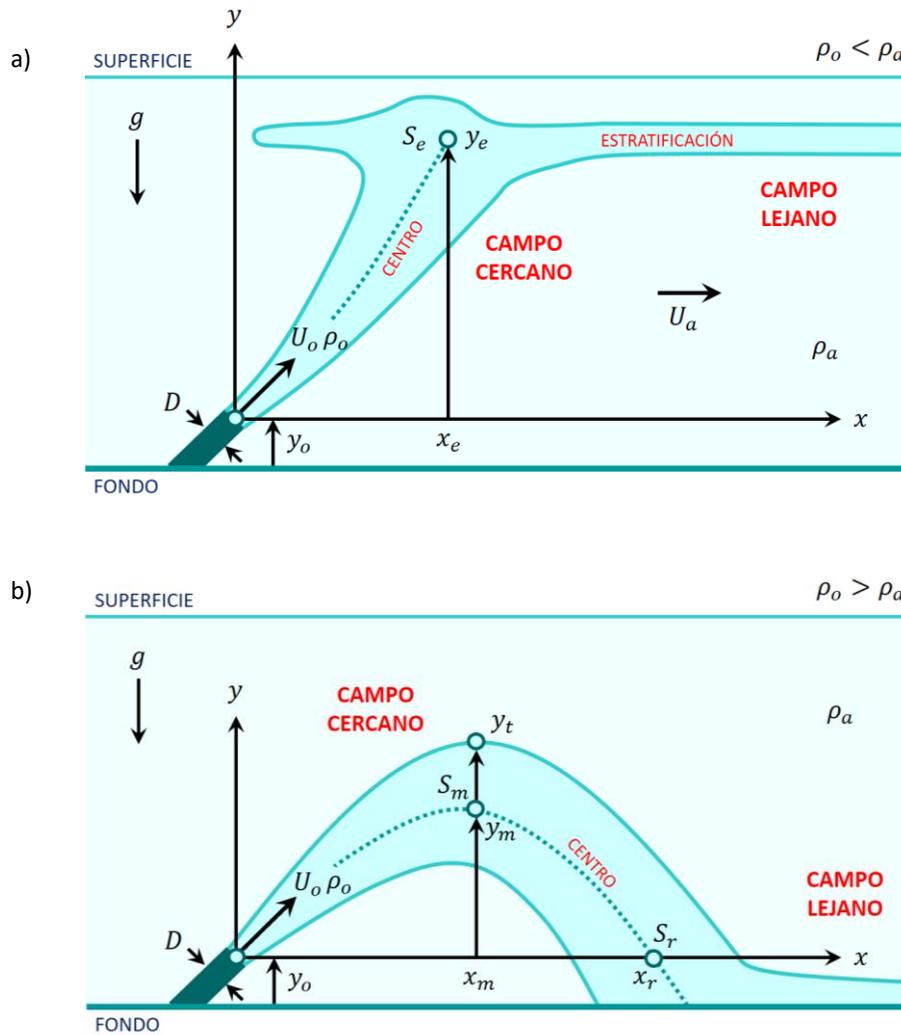


Figura 5: Ejemplo de un modelo físico a escala de un difusor con portas alternadas, descargando una pluma térmica en un flujo orientado en forma perpendicular al difusor (Roberts et al., 2011). Se muestra la configuración del difusor (arriba), fotografías del proceso de mezcla (centro) y la distribución tridimensional de incremento en la temperatura en secciones ubicadas aguas abajo del difusor (abajo).

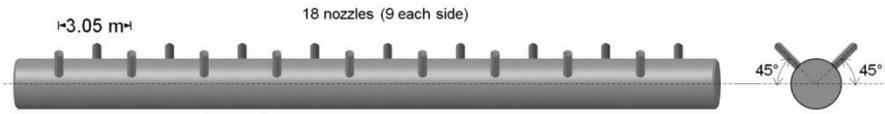


Fig. 1. Diffuser configuration

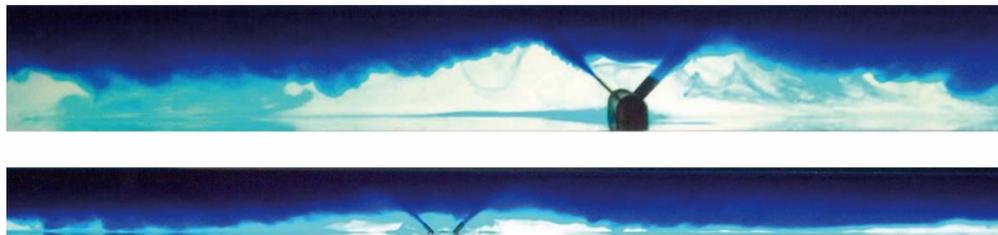


Fig. 3. Close-up and wide-angle photographs of the discharge flowfield

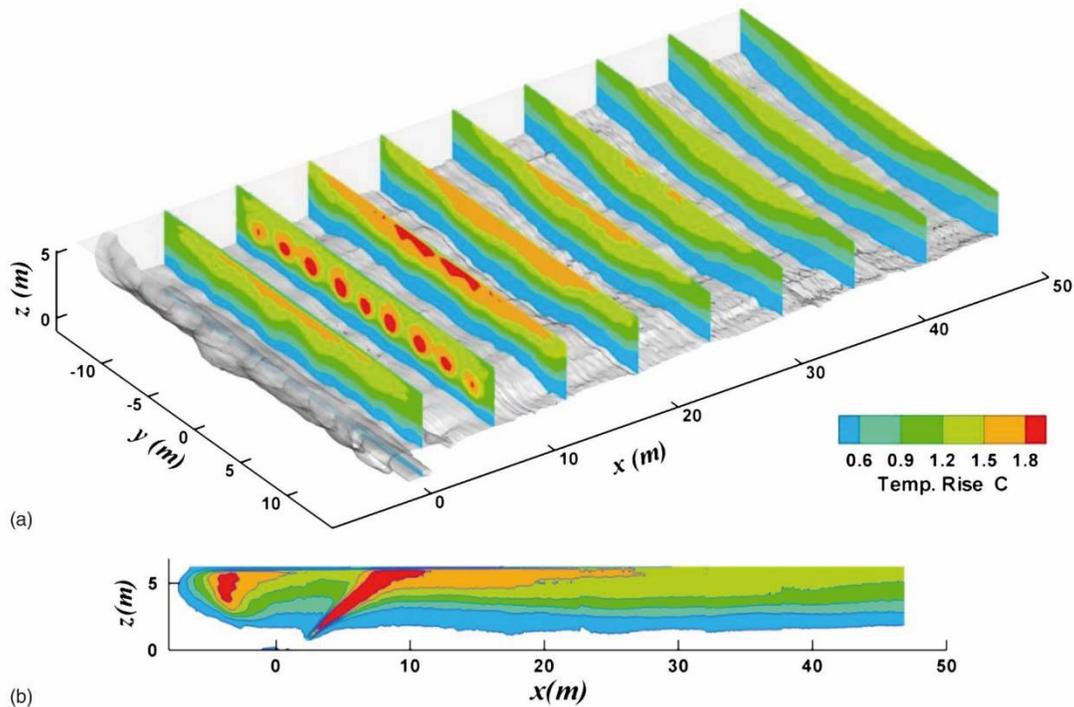


Fig. 6. Flow and temperature rise for $u_{up} = 0.33$ m/s: (a) perspective view; (b) on center plane

Figura 6: Ejemplo de un modelo físico a escala de un difusor con portas transversales, descargando una pluma de boyantes negativa en un medio en reposo (Abessi & Roberts, 2014). Se muestra la configuración del difusor (arriba), la distribución tridimensional de concentración instantánea (centro) y promediada en el tiempo (abajo).

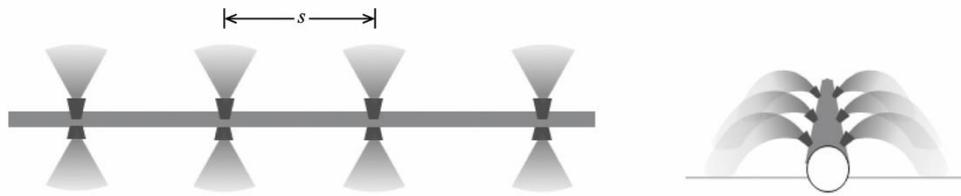


Fig. 2. Multiport dense effluent diffuser

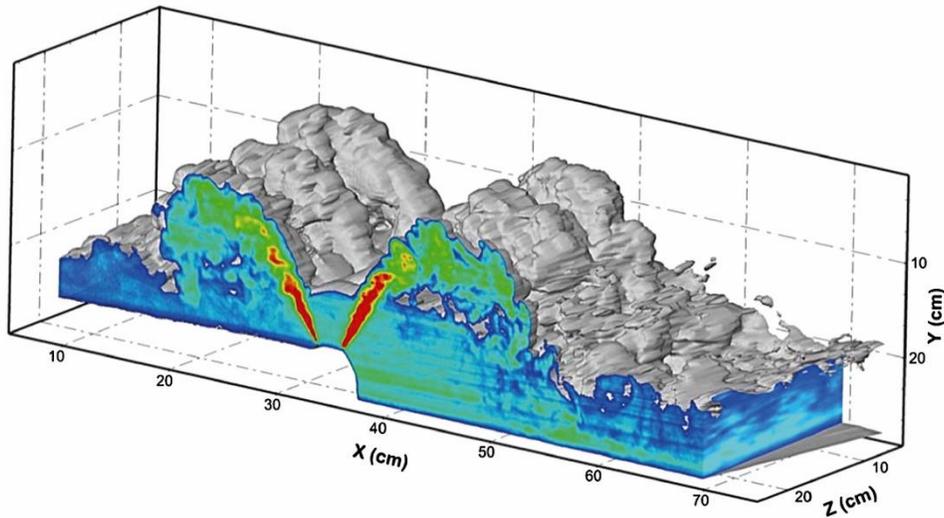


Fig. 3. Three-dimensional instantaneous image of flow from a multiport diffuser; $F = 46$, $s/(dF) = 0.6$

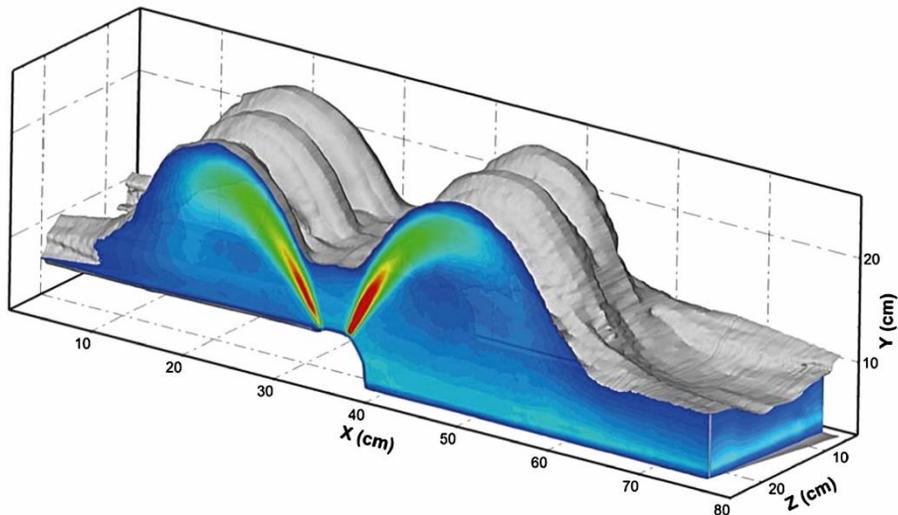


Fig. 4. Three-dimensional time-average image of flow from a multiport diffuser; $F = 46$, $s/(dF) = 0.6$

3 MODELACIÓN DE PLUMAS TÉRMICAS Y SALINAS

En este capítulo se definen los elementos fundamentales de la modelación de plumas térmicas y salinas, cuyos objetivos son comprender la interacción física entre la descarga y la hidrodinámica del sector, con la finalidad de determinar el AI directa del ésta y su respectivo plan de monitoreo.

3.1 DEFINICIÓN DE UN MODELO

Un modelo es una representación simplificada de un fenómeno que interesa estudiar, comprender y/o predecir su comportamiento. El modelado de plumas térmicas y salinas tiene como objetivo predecir el comportamiento del efluente (temperatura o salinidad), considerando las características del sistema de descarga y del fluido receptor. Para ello, existen dos tipos de modelos complementarios entre sí.

Los modelos físicos son representaciones de un sistema a escala y bajo condiciones controladas en laboratorio (*Figura 5 y Figura 6*). En estos se escalan en forma simultánea la geometría, la cinemática (desplazamientos, velocidad y aceleración) y la dinámica (fuerzas) del prototipo en tamaño real a un modelo a escala menor, donde se ejecutan las observaciones (Hughes, 1993). Los plazos y costos necesarios para implementar un modelo físico son altos, y es por ello que se restringen al estudio casos donde no se dispone de modelos numéricos fiables para modelar la configuración diseñada (IHA y CEDEX, 2011).

Los modelos numéricos, pueden clasificarse en a) modelos de procesos, que reproducen los principios de conservación de la masa, momentum y energía mediante sistemas de ecuaciones diferenciales parciales y b) modelos empíricos, que caracterizan la evolución de las propiedades del flujo en el espacio y el tiempo mediante ecuaciones empíricas calibradas en modelos físicos a escala. Ambos tipos de modelos son complementarios. Los modelos empíricos permiten estudiar una gran cantidad de casos de geometría y flujos simplificados, a un costo computacional menor. Los modelos de procesos permiten incorporar las condiciones con y sin proyecto, batimetrías irregulares, condiciones iniciales y de borde complejas y parámetros que pueden o no ser constantes en el tiempo o el espacio. Los modelos de procesos permiten simular forzantes de manera individual (a objeto de evaluar la importancia relativa de cada forzante), o series de tiempo de parámetros forzantes durante períodos de un mes o más.

Los elementos que constituyen un modelo numérico son las ecuaciones de gobierno, condiciones iniciales, condiciones de borde, dimensiones y el sistema de coordenadas, una malla numérica donde se resuelven las ecuaciones (mallas estructuradas, no estructuradas, adaptativas y métodos lagrangianos, entre otros), un método numérico (diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos, entre otros) y un algoritmo en lenguaje de programación para resolver las ecuaciones discretas. Para la implementación del modelo más apropiado un caso particular, se debe:

- Identificar el/los modelos aplicables a la configuración de la descarga
- Conocer las limitaciones y grado de fiabilidad del modelo
- Definir las forzantes y parámetros de entrada del modelo
- Ejecutar el modelo para diversos escenarios de forzantes y configuración de descarga

A continuación, se describen los modelos hidrodinámicos y los modelos de procesos de mezcla que en conjunto se utilizan acopladamente para evaluar el impacto de plumas térmicas y salinas.

3.2 MODELOS DE PROCESOS HIDRODINÁMICOS Y DE MEZCLA

Los modelos hidrodinámicos tienen como objetivo calcular las propiedades del flujo (magnitud y dirección de la velocidad, presión y/o el nivel del mar) que surgen como consecuencia de las forzantes hidrodinámicas (mareas, vientos, descargas de ríos, oleaje o gradientes densimétricos). Los modelos de procesos de mezcla de plumas buscan calcular el campo espacial de una propiedad (densidad, salinidad, temperatura, concentración) del efluente. A continuación, se revisan algunos de los modelos comúnmente utilizados para caracterizar estos procesos.

3.2.1 Modelos hidrodinámicos

En esta sección se introducen en principio los modelos tridimensionales, basados en las ecuaciones de Navier-Stokes (NS)⁸ y que, dadas las limitaciones computacionales actuales, permiten modelarla hidrodinámica sólo en el campo cercano. Luego se presentan ecuaciones de onda larga (SWE), que son comúnmente utilizadas para caracterizar el campo hidrodinámico en el campo lejano en cuerpos de agua forzados por mareas, vientos y oleaje. Finalmente, se mencionan los modelos ecuación de energía de oleaje que, a partir de los denominados tensores de radiación, permiten forzar los modelos de onda larga. Cabe notar que esta sección comienza con las ecuaciones más complejas (NS) pues rescatan toda la física, y luego se procede con ecuaciones simplificadas (SWE) que surgen de supuestos sobre la estructura del flujo, y que por ello permiten abarcar dominios mayores. Se recomienda revisar el texto de Winckler (2021) para mayores detalles.

a) Modelos hidrodinámicos tridimensionales (CFD)

Estos modelos se basan en la resolución de las ecuaciones de NS (o simplificaciones de la misma) que permiten calcular el campo de velocidades y la presión en todo el dominio. A continuación, se presentan estas ecuaciones para un flujo incompresible, supuesto razonable para la modelación de plumas térmicas y salinas⁹. En coordenadas cartesianas definidas para cada punto $\vec{r} = (x, y, z)$, la ecuación de conservación de la masa es

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

donde $u(\vec{r}, t)$, $v(\vec{r}, t)$ y $w(\vec{r}, t)$ son las velocidades en las direcciones horizontales x , y y z . A esta ecuación se puede adicionar un término que representa las descarga, otras fuentes o sumideros de masa en el sistema. Las ecuaciones de conservación de momentum se escriben como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - g \frac{\rho - \rho_0}{\rho} \quad (5)$$

donde t es el tiempo, $p(\vec{r}, t)$ es la presión, ν es la viscosidad cinemática del fluido, g es la aceleración de gravedad,

⁸ En esta sección se utilizan los siguientes acrónimos provenientes del inglés: NS: Navier Stokes equations, SWE: Shallow water equations, CFD: Computational Fluid Dynamics, DNS: Direct Numerical Simulation, RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes Equations, LES: Large Eddy Simulation y URANS: unsteady RANS.

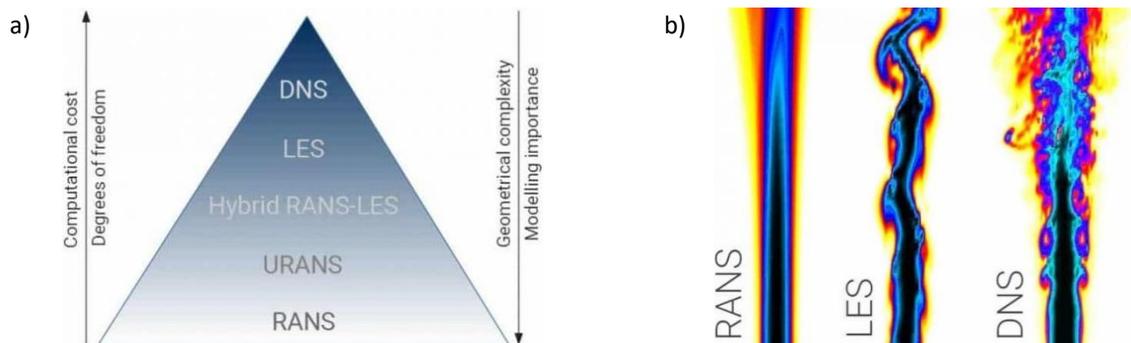
⁹ Las ecuaciones de NS pueden expresarse de diferentes formas dependiendo de la notación (e.g. notación vectorial o de Einstein), supuestos físicos (e.g. compresibilidad) y sistemas de coordenadas.

ρ es la densidad y ρ_0 la densidad de referencia del fluido. La técnica de resolver estas ecuaciones (NS) a este tipo de escalas se denomina DNS y es aplicable, con los recursos computacionales actuales (HCP, High Computing Performance), a dominios del orden de decímetros de arista. Ello, pues los procesos viscosos ocurren a escalas espaciales muy pequeñas, lo que implica que las ecuaciones de NS requieren de una resolución espacial comparable a la escala de Kolmogorov (escala bajo la cual la viscosidad domina por sobre la inercia).

En la modelación de plumas salinas o térmicas, donde las escalas espaciales son mucho relativamente grandes y los flujos son turbulentos, se hace impracticable el uso de DNS por el costo computacional que implican. Es ahí donde las ecuaciones de NS promediadas por Reynolds (RANS) y aquellas basadas en la técnica simulación de grandes remolinos (LES) entran en el juego.

En las RANS se descompone la velocidad y la presión en componentes medias y fluctuaciones turbulentas, $(u, v, w) = (\bar{u} + u', \bar{v} + v', \bar{w} + w')$ y $p = \bar{p} + p'$, lo que lleva a un set de ecuaciones con la misma estructura que las ecuaciones (2-5), pero donde la viscosidad depende del flujo. En las RANS, la viscosidad turbulenta ν_e , también llamada viscosidad de remolino o viscosidad Eddie, es una incógnita que debe resolverse a partir de otras propiedades del flujo (e.g. la disipación o la energía cinética turbulenta), lo que requiere de ecuaciones de conservación adicionales cuya estructura depende de la parametrización del modelo de cierre de la turbulencia. También deben asumirse supuestos para el coeficiente de difusión turbulenta¹⁰. Las RANS, por ende, corresponden a una aproximación de las NS cuyo fin es obtener una representación del flujo equivalente en una escala de tiempo y espacio mayor a las de las fluctuaciones turbulentas, las cuales no se resuelven, sino que se modelan mediante un modelo de cierre. Las LES, por su parte, obedecen a un filtrado de las fluctuaciones turbulentas más pequeñas. En otras palabras, ni las RANS ni las LES son exactas.

Figura 7. a) Diferentes tipos de modelos CFD incluyendo el costo computacional e importancia en la modelación. b) Simulación de una pluma térmica mediante modelos RANS, LES y DNS¹¹.



¹⁰ Se recomienda al lector avanzado revisar textos de mecánica de fluidos avanzada para comprender estas ecuaciones (Pope, 2000). Con todo, Mohammadian et al. (2020) efectúan un acabado estudio comparativo entre diferentes modelos de cierre turbulento para diferentes paquetes computacionales disponibles en la actualidad (Tabla 1).

¹¹ www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/

Existen también modelos derivados de los anteriores, como las URANS y las Hybrid RANS-LES, cuyo costo computacional es proporcional a la capacidad de reproducir la física (Figura 7a). La Figura 7 muestra un ejemplo de simulación de una plumatérmica mediante un modelo mediante modelos RANS, LES y DNS, donde se observa la capacidad creciente de reproducir los fenómenos turbulentos. Los modelos RANS y LES son bastante populares en la actualidad (Mohammadian et al., 2020), aun cuando son utilizados por usuarios con un alto grado de especialización y requieren de recursos computacionales exigentes. Su aplicación se restringe en la actualidad al campo cercano, pero con el avance en la capacidad computacional, es probable que se extiendan al campo lejano en las próximas décadas. La Tabla 1 muestra algunos de estos paquetes bajo el título *Sophisticated Multidisciplinary Models*.

b) Modelos hidrodinámicos bidimensionales

Los modelos SWE se basan en ecuaciones de conservación de la masa y momentum, que permiten caracterizar la evolución del flujo en el tiempo y espacio. Para efectos de modelación de plumas térmicas y salinas, tienen la limitación de que no capturan la variación vertical de velocidades. No obstante, pueden ser utilizados en forma acoplada con modelos más pequeños, pero de mayor resolución que permitan capturar el carácter tridimensional del flujo. En coordenadas cartesianas, mediante estas ecuaciones se resuelven la desnivelación instantánea $\eta(x, y, t)$ y dos velocidades horizontales mutuamente ortogonales $\bar{u}(x, y, t)$ y $\bar{v}(x, y, t)$, promediadas en la profundidad $h(x, y)$ para cada punto $\vec{r}(x, y, t)$, donde

$$\bar{u}(x, y, t) = \frac{1}{\eta + h} \int_{-h}^{\eta} u(x, y, z, t) dz, \quad \bar{v}(x, y, t) = \frac{1}{\eta + h} \int_{-h}^{\eta} v(x, y, z, t) dz \quad (6)$$

En una de sus tantas versiones, la ecuación de conservación de la masa y las ecuaciones de conservación de momentum se escriben como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} ((\eta + h)\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y} ((\eta + h)\bar{v}) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - f\bar{v} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - F_x^b + F_x^s + F_x^w + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}_e \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + f\bar{u} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - F_y^b + F_y^s + F_y^w + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_e \frac{\partial \bar{v}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}_e \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}) \quad (9)$$

donde $f = 2\omega \sin \phi$ es el parámetro de Coriolis, siendo ω la velocidad angular de rotación de la tierra y ϕ la latitud; $\bar{v}_e(x, y, t)$ representa la viscosidad turbulenta característica de la columna de agua. Los forzantes de esta ecuación se representan mediante los gradientes espaciales de la presión atmosférica $p_a(x, y, t)$, la fricción de fondo $F_{x,y}^b(x, y, t)$, el esfuerzo de corte superficial generado por el viento $F_{x,y}^s(x, y, t)$ y el efecto del oleaje $F_{x,y}^w(x, y, t)$, asociado a los tensores de radiación obtenidos mediante modelos basados en la ecuación de energía del oleaje, como el ilustrado en la Figura 11. Los términos forzantes de fricción y viento pueden representarse mediante diversos modelos que, por síntesis, no son tratados acá. El lector puede revisar Winckler (2021) para una explicación somera o en el *Guide to storm surge forecasting* (Horsburgh & De Vries, 2011).

La Figura 8 muestra dos modelos hidrodinámicos basados en las SWE para forzantes de vientos, utilizando $F_{x,y}^s$ en la bahía de Coquimbo. La Figura 9 muestra el forzamiento mediante mareas a través de condiciones de borde de las ecuaciones de gobierno (7-9). La Figura 10 ilustra la respuesta hidrodinámica ante el oleaje, utilizando $F_{x,y}^w$ (obtenidos de modelos de propagación de oleaje como el de la Figura 11) que se traduce en corrientes altas en la zona de rompiente.

Figura 8: Modelo hidrodinámico de la bahía de Coquimbo, considerando un vertido de pluma de boyantes positiva (aguas servidas) en el centro de la bahía. El forzamiento es para un viento constante desde el NW (izquierda) y SW (derecha). Se muestra la concentración de coliformes fecales¹² en (nmp/100 ml). Los vectores blancos representan la dirección de la corriente. Adaptado de Herrera (2017).

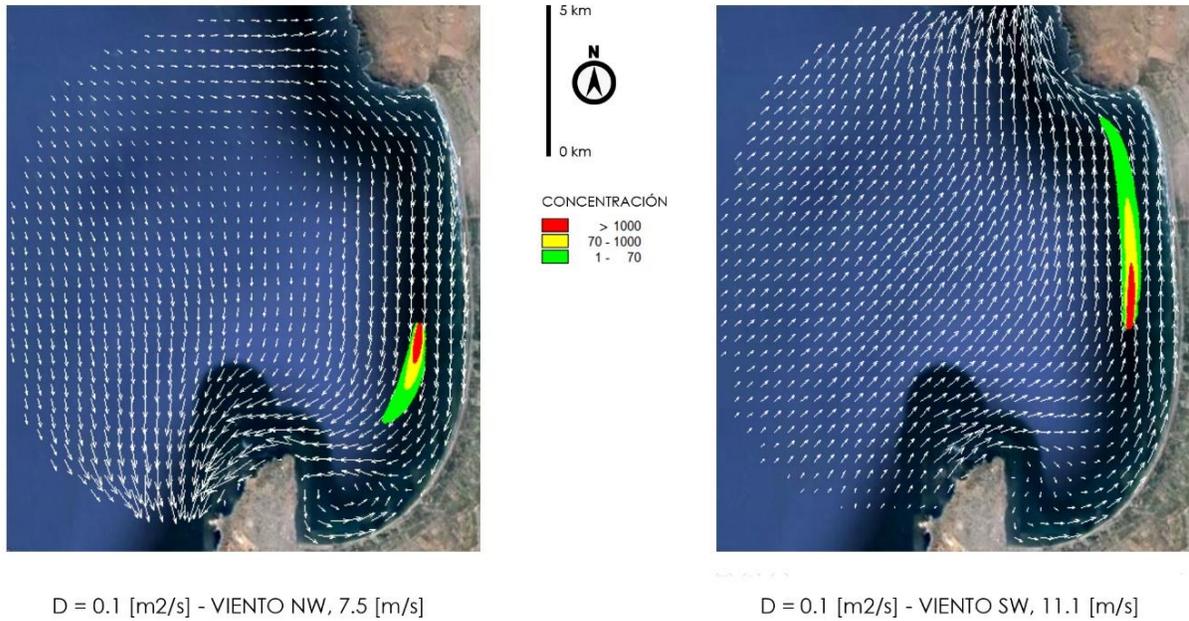
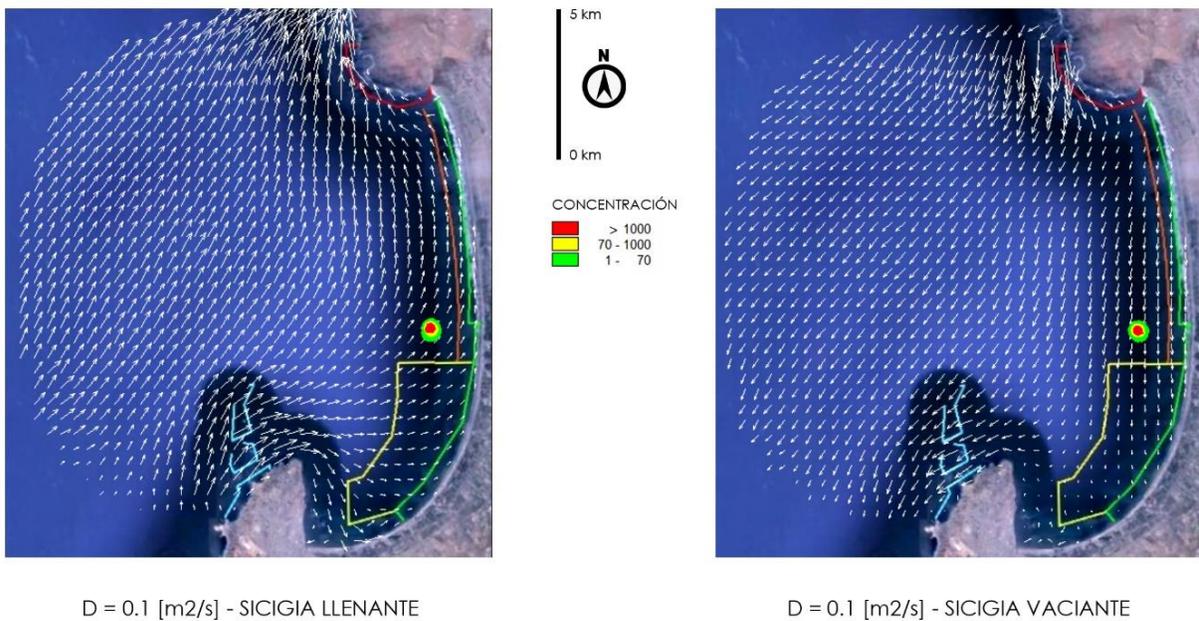
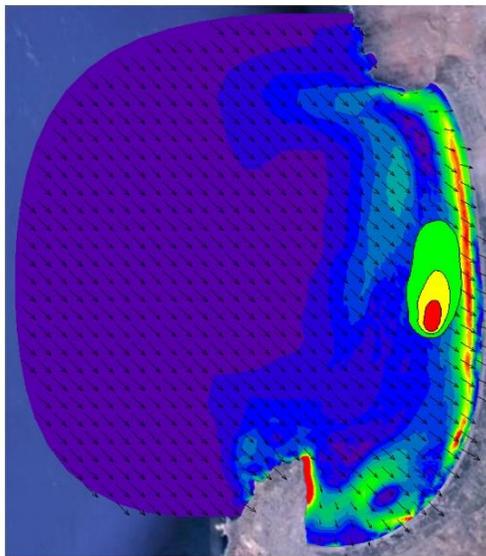


Figura 9: Modelo hidrodinámico de la bahía de Coquimbo, considerando un vertido de pluma de boyantes positiva (aguas servidas) en el centro de la bahía. El forzamiento es para una marea de sicigia y se ilustran instantes de llenante (izquierda) y vaciante (derecha). Se muestra la concentración de coliformes fecales en (nmp/100 ml). Los vectores blancos representan la dirección de la corriente. Adaptado de Herrera (2017).

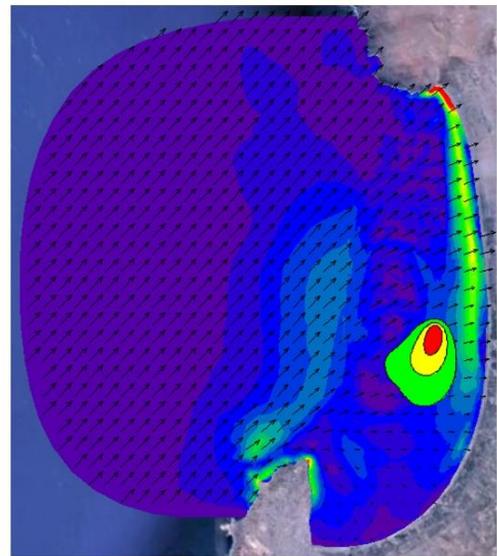


¹² En esta guía se utilizan ejemplos de descargas de aguas servidas como ejemplo de plumas de boyantes positiva.

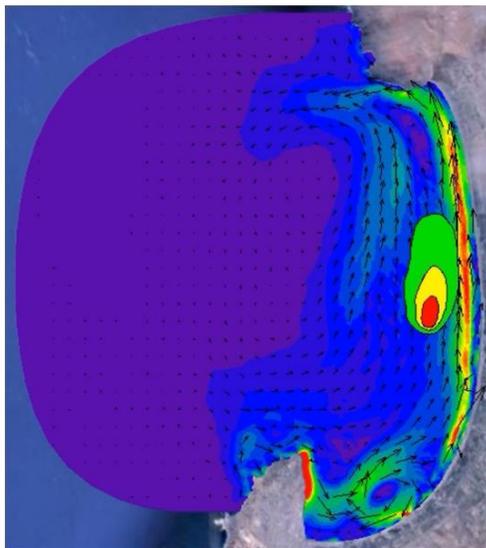
Figura 10: Modelo hidrodinámico de la bahía de Coquimbo, considerando un vertido de pluma de boyantes positiva (aguas servidas) en el centro de la bahía. El forzamiento es para un oleaje del NW (izquierda) y del SW (derecha). Se muestra la concentración de coliformes fecales en (nmp/100 ml). Los vectores representan la dirección del oleaje en los paneles superiores y la dirección de la corriente en los paneles inferiores. Adaptado de Herrera (2017).



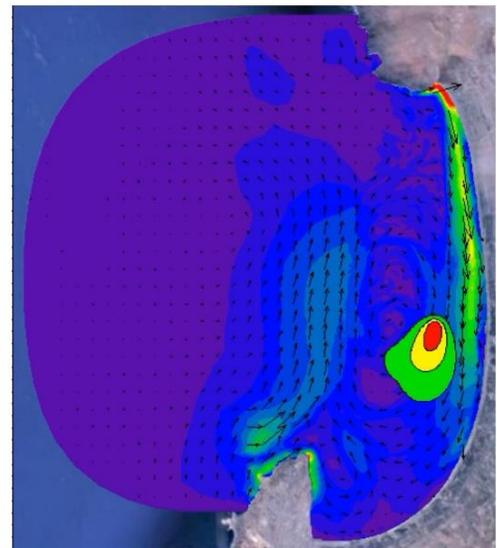
D = 2.0 [m²/s] - OLEAJE NW, Hs = 3 [m], T = 12 [s]



D = 2.0 [m²/s] - OLEAJE SW, Hs = 3 [m], T = 12 [s]



D = 2.0 [m²/s] - OLEAJE NW, Hs = 3 [m], T = 12 [s]



D = 2.0 [m²/s] - OLEAJE SW, Hs = 3 [m], T = 12 [s]

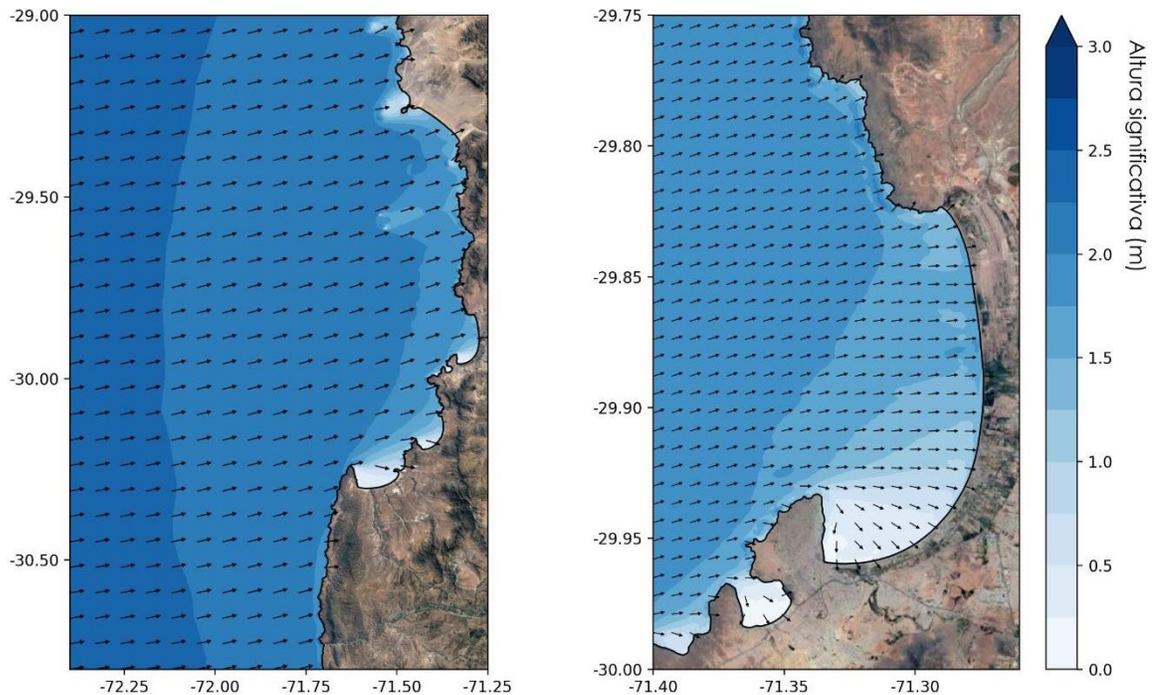
c) Modelos de oleaje

Desde la perspectiva de la modelación de plumas térmicas y salinas, la modelación de oleaje se orienta a calcular las corrientes litorales en la zona rompiente. Usualmente estas corrientes están confinadas a esta zona, pero pueden extenderse a la zona de asomeramiento del oleaje por la difusión de momentum (Longuet-Higgins, 1970b) o corrientes de retorno (*rip currents*). En presencia de oleaje de gran energía, las corrientes litorales pueden ser comparables o mayores a las corrientes inducidas por marea y vientos.

Existen diversas formas de modelar el oleaje, pero para los efectos de esta guía es suficiente recurrir a los modelos que se basan en la ecuación de balance de energía espectral del oleaje, que permiten calcular el campo de oleaje en el tiempo y en el espacio. Estos modelos permiten caracterizar los fenómenos de asomeramiento, refracción y la disipación, pero presentan limitaciones para resolver la en forma adecuada la difracción y omiten la reflexión (que usualmente se producen muy cerca de la costa y en presencia de obstáculos). A partir del espectro de energía se pueden calcular los parámetros espectrales de un estado de mar, como la altura significativa, periodo y dirección medias, y el tensor de radiación¹³, utilizado para calcular la los términos $F_{x,y}^W$ de las ecuaciones (8-9).

La ventaja que tienen estos modelos es que, a un costo computacional bajo, permiten evaluar la magnitud de las corrientes litorales y de esta forma evaluar si son relevantes en el proceso de mezcla de descargas que se ubican usualmente fuera de la Zona de Protección Litoral (ZPL), cuyo ancho es definido en el D.S. N°90. Una referencia para conocer algo más sobre estos modelos es Holthuisen (2010; capítulo 9). La Figura 11 ilustra el ejemplo del patrón de propagación de oleaje generado mediante un modelo espectral (SWAN) en la bahía de Coquimbo. Este oleaje genera corrientes litorales y procesos de mezcla cuyo patrón se muestra en la Figura 10.

Figura 11: Modelo de propagación de oleaje generado mediante un modelo espectral (SWAN) en la bahía de Coquimbo. Gentileza de Andrés Tapia, del Instituto Nacional de Hidráulica.



¹³ Winckler (2021) presenta una explicación del tensor de radiación y su rol en la generación de corrientes litorales y wave setup.

3.2.2 Modelos de mezcla

El estudio de plumas comenzó hace décadas mediante modelos físicos en geometrías simples, centrados en el campo cercano y en condiciones estacionarias. Ejemplos los hay para plumas térmicas (Roberts et al., 2010) y plumas de boyantes negativa (Gungor & Roberts, 2009; Abessi & Roberts, 2014, 2015, Choi et al., 2015). En las últimas décadas, se han realizado experimentos más robustos utilizando técnicas avanzadas para medir el campo de velocidades y concentración que permiten caracterizar la estructura tridimensional de chorros de descarga (Roberts & Tian, 2000, 2004). Algunos de estos experimentos han servido para generar modelos basados en fórmulas empíricas y ecuaciones integradas, o para validar modelos CFD, los cuales se introducen a continuación.

a) Modelos basados en fórmulas empíricas y ecuaciones integradas

En sus inicios, estos modelos físicos dieron pie a fórmulas empíricas bajo diferentes regímenes de la descarga y ecuaciones integradas a lo largo del eje del chorro, que a la postre fueron incluidas en paquetes computacionales como CORMIX (Doneker & Jirka, 2007), Visual PLUMES, NRFIELD (Roberts et al., 1989a, 1989b, 1989c) o briHne (IH Cantabria). La *Tabla 1* muestra algunos ejemplos de estos paquetes. En general, los paquetes basados en fórmulas empíricas (*empirical solutions*, *Tabla 1*) son muy sensibles cerca del límite de regímenes distintos de mezcla¹⁴, por lo que pequeños cambios en los parámetros de entrada pueden inducir grandes diferencias en los resultados (Robinson et al., 2015). Asimismo, su aplicación debiera restringirse a las condiciones para los cuales fueron validados, y que no necesariamente coinciden con la de un proyecto en particular (Zhao et al., 2011). Los modelos que integran las ecuaciones a lo largo del eje del chorro (*Eulerian and Lagrangian jet integral methods*, *Tabla 1*) no modelan la presencia de contornos, reduciéndose su aplicación al campo cercano. El uso de paquetes basados en fórmulas empíricas o ecuaciones integradas a lo largo del eje del chorro es simple en su implementación y requiere de recursos computacionales de fácil acceso. Algunos son comerciales, de acceso restringido mediante claves o de acceso libre. IHA y CEDEX (2011) presentan fichas descriptivas de algunos de paquetes, incluyendo sus capacidades y limitaciones, en tanto que Palomar et al. (2012) muestra el error cometido en resultados experimentales generados por estos modelos en el campo cercano.

A continuación, se presenta un ejemplo de modelos empíricos de mezcla de una pluma salina en un medio sin velocidad ambiente (Mohammadian et al., 2020). Este tipo de modelos se basa en la caracterización de puntos notables de la pluma en el campo cercano, como los indicados en la *Figura 4b*. La descarga se caracteriza por un jet de diámetro D y ángulo de inclinación θ , descargando un efluente de densidad ρ_o con velocidad U_o . La densidad del efluente es mayor que la del medio ($\rho_o > \rho_a$). La mezcla depende de las propiedades del jet, la diferencia de densidad entre el medio y el ambiente ($\rho_o - \rho_a$), la concentración de la descarga C_o , la intensidad turbulenta del jet I y la profundidad del agua H . El número de Froude densimétrico Fr_d , definido como el cociente entre la inercia y la boyantes, se calcula a partir de la aceleración de gravedad reducida g'_o mediante las expresiones

$$Fr_d = \frac{U_o}{\sqrt{g'_o D}}; \quad g'_o = \left(\frac{\rho_o - \rho_a}{\rho_a} \right) g \quad (10)$$

Las plumas de boyantes negativa son descritas mediante el flujo de la descarga Q_o , el flujo de boyantes B_o y el flujo de momentum cinemático M_o descritos mediante las expresiones

$$Q_o = U_o \pi \frac{D^2}{4}; \quad B_o = B_o g'_o; \quad M_o = U_o^2 \pi \frac{D^2}{4} \quad (11)$$

¹⁴ La caracterización de los diferentes regímenes de mezcla obtenidos mediante modelos físicos se describe en Jirka y Domeker (1991) para descargas de un solo chorro y Jirka y Akar (1991) para descargas mediante difusores.

A medida que asciende, la pluma alcanza su máxima elevación y_t y luego cae debido a su boyantes negativa, impactando el suelo y luego mezclándose como una corriente densimétrica. A partir del análisis dimensional de mecánica de fluidos, una escala característica como y_t (o cualquier otra) puede expresarse como:

$$\frac{y_t}{L_M} = f\left(\frac{L_M}{L_Q}, \theta\right) \quad (12)$$

Donde L_M y L_Q representan las escalas asociadas al flujo de momentum y a la fuente, respectivamente, y f es una función que se determina experimentalmente. La dilución en el punto de retorno S_r o la dilución en el punto medio de la pluma S_m se expresan como:

$$S_r = g(Fr_d, \theta); \quad S_m = h(Fr_d, \theta) \quad (13)$$

Donde g y h son también funciones determinadas mediante estudios de laboratorio. Existe abundante literatura que permite conocer las fórmulas empíricas, que debieran ser de conocimiento del modelador. Por ejemplo, las primeras versiones del paquete CORMIX se fundamentan en el trabajo de Jirka y Domeker (1991a) para descargas de un solo chorro y Jirka y Akar (1991b) para descargas con difusores.

b) Modelos de mezcla tridimensionales (CFD)

El modelo de mezcla de una pluma salina se basa en la ecuación de advección-difusión para la concentración $C(\vec{r}, t)$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (14)$$

Donde D es el coeficiente de difusión turbulenta, considerado en forma simplificada en esta expresión como constante e isotrópico¹⁵, supuestos que parecen razonables, a falta de información detallada del proceso de mezcla¹⁶. El modelo de mezcla para una pluma térmica se define mediante la expresión

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = K_e \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad K_e = \frac{\nu_t}{Pr_t} + \frac{\nu}{Pr} \quad (15)$$

Donde $T(\vec{r}, t)$ es la temperatura del fluido, K_e es el coeficiente de transferencia de calor, Pr es el número de Prandtl y Pr_t es el número de Prandtl turbulento. En las ecuaciones (14) y (15) se asume que los procesos reactivos ocurren a una escala temporal mayor que la contemplada en los procesos de advección y difusión turbulenta. Naturalmente, estas ecuaciones pueden ampliarse para incluir la reacción, por ejemplo, asumiendo que el calor asociado a plumas térmicas se va perdiendo por procesos de mezcla con la atmósfera en la superficie del agua.

¹⁵ En las ecuaciones del tipo RANS, la difusión turbulenta puede caracterizarse de forma más rigurosa, considerando su anisotropía y su dependencia del flujo, de manera análoga a como se efectúa con la viscosidad de remolino. La diferencia entre ambas propiedades es que la difusión turbulenta define la tasa de mezcla de dos sustancias en términos de su masa, en tanto que la viscosidad de remolino define la tasa de mezcla de momentum en el cuerpo de agua. Ambas propiedades se relacionan a través del número de Schmidt.

¹⁶ En la práctica, el coeficiente de difusión turbulenta se determina en terreno mediante trazadores (sección 4.6).

Tabla 1: Software de modelación de plumas térmicas y salinas (Mohammadian et al., 2020).

Models	Mathematical Approaches for Jet/Plume Mixing	Availability	Major Functionalities and Capabilities
CORMIX [11]	Empirical solutions; Eulerian jet integral method	Commercial model	Prediction of jet and (or) plume geometry and dilution in the near field; single or multiple jets
VISJET	Lagrangian jet integral method	Commercial model	
Visual PLUMES	Empirical solutions; Eulerian and Lagrangian jet integral methods	Free package	
NRFIELD	Empirical solutions	Free package	Prediction of jet and (or) plume geometry and dilution in the near field of multipoint diffusers
Sophisticated Multidisciplinary Models			
OpenFOAM	FVM; RWPT method	Free package	Predictions of ocean hydrodynamics; pollutant fate and transport in the near and far fields; water quality; sediment processes
MIKE21/3	FVM; RWPT method	Commercial package	
Delft3D	FDM; RWPT method	Free package	
ANSYS CFX	FVM; RWPT method	Commercial package	
ANSYS Fluent	FVM; RWPT method	Commercial package	
FLOW-3D	FDM; RWPT method	Commercial package	
TELEMAC-2D/3D	FEM; RWPT method	Free package	
EFDC-Hydro	FDM; RWPT method	Free package	Predictions of ocean hydrodynamics; Pollutant dispersion in the far field; Near-field processes using the embedded jet model JETLAG; Suspended sediment transport
HydroQual-ECOMSED	FDM; RWPT method	Free package	Predictions of ocean hydrodynamics; Pollutant fate and transport in the far field; Sediment processes

Notes: FVM: Finite Volume Method, FDM: Finite Difference Method, RWPT: Random Walk Particle Tracking.

3.3 PROPIEDADES DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Los modelos numéricos deben cumplir con una serie de criterios que garantizan su buen desempeño (e.g estabilidad, consistencia, convergencia, conservación y exactitud) y que se detallan en textos avanzados de modelación (e.g. Winckler, 2021). Afortunadamente, desde la perspectiva del usuario de un modelo desarrollado y validado por terceros, es preciso sólo garantizar la estabilidad y la exactitud del resultado. La estabilidad se refiere a que la solución numérica sea acotada y no se amplifique el error numérico¹⁷. Esta se logra, en el caso de las ecuaciones de conservación implementadas en esquemas explícitos o semi-implícitos, garantizando la condición de estabilidad de Courant, que define una relación entre el salto de tiempo temporal y el tamaño de la discretización espacial utilizada;

¹⁷ Un método estable es aquel en que los errores debidos a las aproximaciones se atenúan a medida que la computación procede, en tanto que, en un método inestable, los errores se magnifican conforme el cálculo avanza.

relación que dependerá del esquema numérico. La exactitud se asocia también al esquema numérico utilizado; no obstante, es necesario efectuar tests de convergencia que garanticen que los resultados son independientes del salto de tiempo temporal y el tamaño de la discretización espacial utilizada.

3.4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS

Las etapas de calibración y validación son componentes fundamentales en el proceso de modelado, pues permiten conocer en qué grado el modelo es capaz de reproducir el fenómeno en cuestión. La literatura provee escasa guía para efectuar un proceso de calibración y validación, siendo Williams & Esteves (2017) una referencia imprescindible para definir en forma correcta modelos hidrodinámicos, de oleaje, de transporte de sedimentos y de morfología. A continuación, se indican elementos esenciales del proceso de calibración y validación de modelos de plumas térmicas y salinas¹⁸.

3.4.1 Calibración

La calibración se basa en ajustar los parámetros del modelo, condiciones iniciales y/o condiciones de borde para que los resultados reproduzcan, con un grado de exactitud¹⁹ definido por un criterio cuantitativo, las mediciones en terreno. En las ecuaciones hidrodinámicas, los parámetros corresponden a coeficientes que se utilizan para modelar la rugosidad o fricción de fondo, la fricción del viento actuando sobre la superficie libre del agua o el coeficiente de viscosidad turbulenta (que, en modelos más sofisticados tipo CFD, depende a su vez de otros parámetros para resolver su dependencia de la energía cinética turbulenta y la disipación). Para procesos de mezcla, los parámetros típicos son el coeficiente de difusión turbulenta y el coeficiente de decaimiento (ya sea másico o térmico, dependiendo del proceso en cuestión). El rango de valores de los parámetros debe basarse en la física subyacente (Williams & Esteves, 2017), el juicio experto o, en caso de no tener a priori claridad sobre ello, mediante un análisis de sensibilidad (sección 3.5). La calibración de un modelo depende de la cantidad de parámetros que se incluyen en las ecuaciones de gobierno, condiciones iniciales y de borde; por ende, ésta no es única pues más de una combinación de parámetros puede proveer de un ajuste razonable a las mediciones.

3.4.2 Validación

En validación se utilizan los parámetros calibrados y se compara el modelo con datos en otra ventana de tiempo y/o en otros lugares del espacio. Si el modelo predice en forma adecuada a este nuevo set de datos, no hay razones para pensar que el modelo esté malo (sin embargo, no se puede asegurar que sea adecuado en otras situaciones en que no ha sido validado). Por ende, la calibración y validación forman parte de un ciclo continuo de mejoras en la medida que se expanden en cobertura y física de los procesos modelados. En la Figura 12 se esquematiza la calibración y validación de una función genérica que depende del tiempo $f(t)$ y que podría representar una propiedad del flujo. La

¹⁸ Considerando que la Pub. 3201 (SHOA, 2019) exige campañas de mediciones en invierno y el verano, la calibración se debiera efectuar a partir de los registros obtenidos en la primera campaña, en tanto que la validación se debiera hacer a partir de los registros de la segunda campaña.

¹⁹ La exactitud (accuracy) corresponde a cuán cerca se encuentra el valor medido del valor real. Una medida de la exactitud es el sesgo (bias), que corresponde a la diferencia entre el valor medido y el valor real, ya sea como una información individual o un set de datos. Cuanto menor (mayor) es el sesgo, más (menos) exacta es una estimación (Winckler, 2020). Naturalmente, la exactitud del modelo no puede ser superior a la exactitud de los datos de entrada del modelo (parámetros físicos, batimetría, condiciones iniciales y/o borde).

Figura 13 ilustra a modo de ejemplo, la calibración y validación de un modelo hidrodinámico de mareas (Williams & Esteves, 2017).

Figura 12: Calibración y validación de una variable que depende del tiempo. a) modelo sin calibración. b) modelo calibrado cuya validación es adecuada producto de una buena determinación de los parámetros, condiciones iniciales y/o condiciones de borde. c) modelo calibrado cuya validación es deficiente debido a parámetros y/o condiciones de borde o iniciales que no fueron identificadas como relevantes en la calibración (Winckler, 2021).

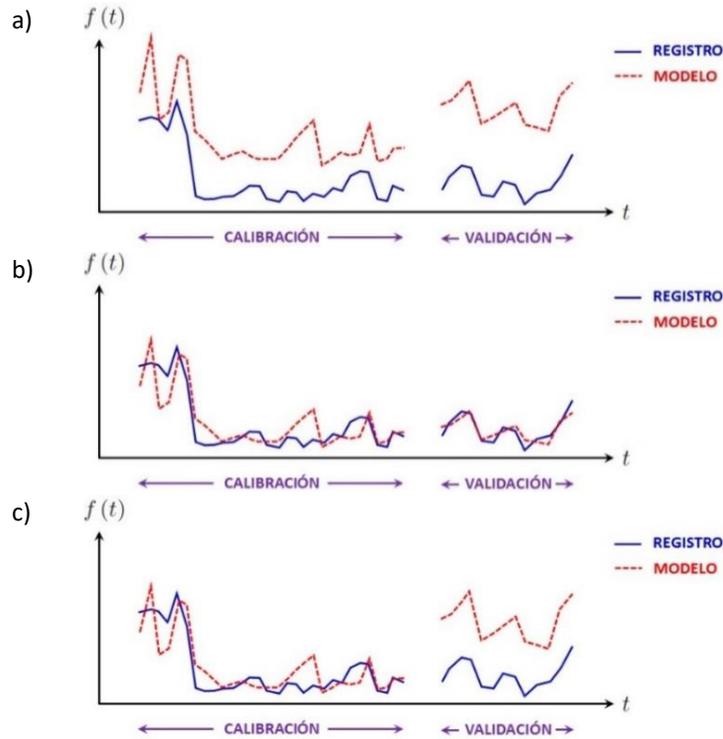
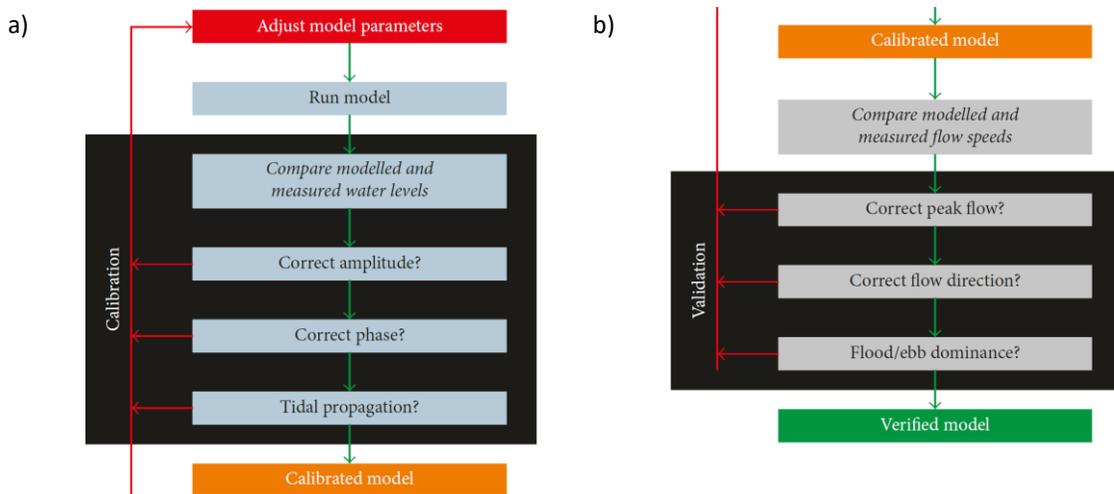


Figura 13: Proceso de a) calibración y b) validación de un modelo hidrodinámico de mareas (Williams & Esteves, 2017). La calibración se basa en calibrar el modelo para en la amplitud, fase y patrón de propagación del flujo en tanto que la fase de validación se enfoca en la magnitud, dirección y dominancia del flujo o reflujos de la marea.



3.4.3 Estadígrafos utilizados para comparar registros y modelos

En la calibración y validación se pueden utilizar criterios cualitativos y cuantitativos para evaluar la exactitud del modelo. Entre los primeros están la comparación visual entre series de tiempo (e.g. nivel del mar), campos escalares (e.g. salinidad o temperatura) o campos vectoriales (vientos, corriente u oleaje), entre otros. Estos métodos pueden ser subjetivos y dependen de la experiencia de quien diseña el modelo (Williams & Esteves, 2017). Los métodos cuantitativos se basan en estadígrafos como los que se describen en la Tabla 2, además de otros convencionalmente usados como el coeficiente de determinación entre el modelo y el registro R^2 .

Tabla 2: Algunos estadígrafos utilizados para comparar registros y modelos (Williams & Esteves, 2017).

Quality index	Example	Formulae
Accuracy	Root mean square error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} (S_i - O_i)^2}$
Bias	Average bias	$Bias = \sum_{i=1}^{N_i} \frac{1}{N_i} (S_i - O_i)^2$
Correlation	Pearson product-moment coefficient: $\bar{O}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} O_i$ and $\bar{S}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} S_i$	$R = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} (S_i - \bar{S}_i)(O_i - \bar{O}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} (S_i - \bar{S}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} (O_i - \bar{O}_i)^2}}$

En caso que el modelo y el registro no sean coincidentes en el tiempo, la calibración y validación se puede hacer mediante la comparación estadística de los parámetros obtenidos para todos los años del hindcast y los correspondientes al registro. En caso de que sí sean simultáneas, la comparación se efectuará para el período de medición. En orden de preferencia, el análisis del error de los parámetros de oleaje debiera hacerse comparando dato a dato (e.g. Figura 14 y puntos grises en la Figura 15), comparación por percentiles (e.g. puntos amarillos en la Figura 15) o comparación por parámetros integrados del error, como los indicados en la Tabla 2.

Figura 14: Comparación de series de tiempo de altura significativa espectral obtenida de la base de datos del Atlas de Oleaje de Chile y la boya SHOA1 (Beyá et al., 2016)

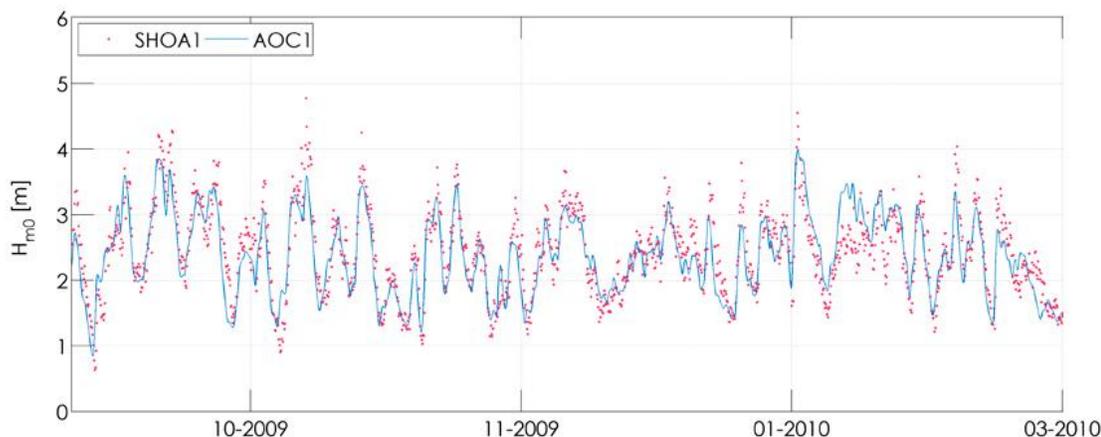
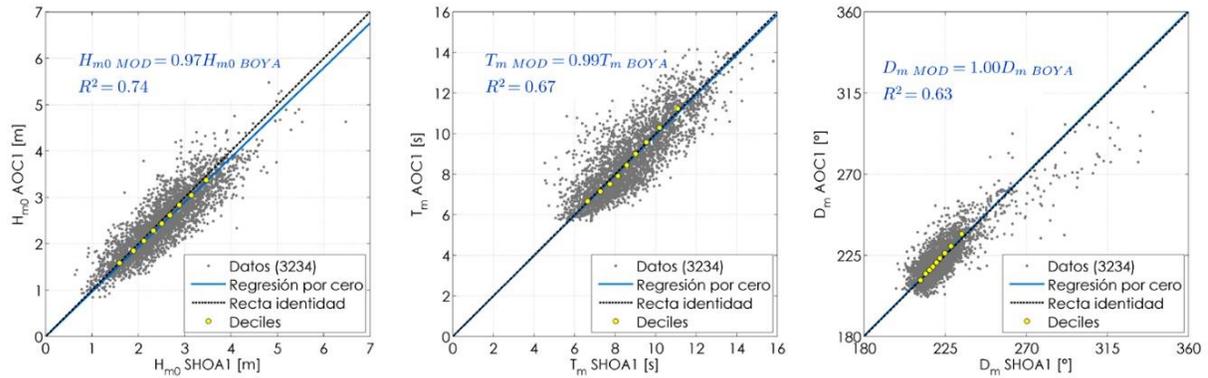


Figura 15: Comparación de series de tiempo de altura significativa espectral, período medio y dirección media obtenida del Atlas de Oleaje de Chile y de la boya SHOA1 (Beyá et al., 2016).



3.4.4 Variables y tolerancias máximas admisibles en la calibración y validación

La Tabla 3 muestra los parámetros, condiciones iniciales y/o condiciones de borde de modelos de oleaje, hidrodinámicos y de mezcla, además de las funciones objetivo que pueden ser utilizadas, en forma individual o agrupada, para calibrar cada modelo. Cabe mencionar que la calibración y la validación puede realizarse en el dominio del tiempo, frecuencia o tiempo-frecuencia (wavelet).

En los modelos hidrodinámicos se debe disponer de mediciones in situ o modelos numéricos de escala mayor de todos los datos de entrada (forzantes, parámetros físicos, condiciones de borde y condiciones iniciales) y salida (función objetivo) antes de efectuar la modelación. En los modelos de mezcla, desafortunadamente, se simulan condiciones con proyecto que no se han materializado. Por ende, se usan trazadores para estimar el coeficiente de difusión turbulenta del medio (sección 4.6). Cabe notar que el uso de trazadores superficiales no necesariamente representa las propiedades difusivas de las plumas salinas en el campo lejano, pues la mezcla ocurre en la porción inferior de la columna de agua. Tampoco representa las propiedades de las plumas térmicas en la profundidad de estratificación (a excepción de casos donde la pluma aflora). Asimismo, el coeficiente de difusión representa al instante específico en que se ejecuta la medición. Por estas razones, la modelación de la difusión turbulenta se basa en un supuesto cuya incertidumbre puede abordarse mediante un análisis de sensibilidad de la función objetivo (e.g. salinidad o temperatura) ante variaciones razonables de los coeficientes de difusión turbulenta o de decaimiento térmico.

Los procesos de calibración y validación se ejecutan hasta que la diferencia entre la función objetivo de un modelo y un registro sea menor que una tolerancia máxima admisible. Williams & Esteves (2017) proponen un acabado set de tolerancias para diferentes variables utilizadas en modelos de oleaje, hidrodinámicos y sedimentológicos para costas y estuarios, que se reproduce en la Tabla 4. Palacio y Toro (2002) y Montoya y Toro (2006) muestran ejemplos de calibración y análisis de sensibilidad del modelo a diferentes parámetros físicos y numéricos.

Cabe notar que las tolerancias propuestas en la Tabla 4 son bastante exigentes para un proyecto de ingeniería²⁰ y

²⁰ Por ejemplo, el Atlas de Oleaje constituía la mejor base de datos del oleaje en aguas profundas a nivel nacional hacia 2017, pues fue calibrado y validado con altimetría satelital en todo el país y boyas de oleaje en la zona centro sur (Beyá et al., 2017). A pesar del extenso proceso de calibración y validación desarrollado en el marco de un proyecto FONDEF Idea de dos años de duración -plazo mucho mayor al de un proyecto de ingeniería-, la altura significativa espectral H_{m0} del clima medio presenta coeficientes de determinación de $R^2 = 0.60$ a 0.87 en aguas profundas (Fig.8, Beyá et al., 2017), siendo los más altos (mejores) comparados

que el cumplimiento de más de un criterio de tolerancia admisible para diferentes variables en forma simultánea puede ser bastante exigente para el desarrollo de un estudio. Cabe notar que los estudios se realizan en el contexto de un proyecto de ingeniería cuya premisa es que los resguardos finales (e.g. factores de seguridad) deben ir de la mano con el nivel de exactitud con que se representa el proceso de mezcla. Así, un modelo con un nivel de exactitud bajo, deberá adoptar resguardos mayores en la definición de la AI que uno que demuestre un mejor nivel de exactitud.

En la calibración y validación de un modelo hidrodinámico es también indispensable tener en cuenta que la resolución espacial y temporal con que se toman los datos de campo (sección 4) afectan la calibración y que entre mayor sea la cantidad de información de campo recolectada, mayores serán los esfuerzos para calibrar del modelo y cumplir con las tolerancias máximas admisibles.

con otras 6 bases de datos de oleaje. Aún más, para el decil mayor (olas relativamente extremas), los coeficientes de determinación de H_{m0} cubren de $R^2 = 0.35$ a 0.45 (Fig.9, Beyá et al., 2017). En caso de utilizar esta base de datos como forzante en aguas profundas, no es esperable lograr valores de R^2 superiores en la costa, pues el error acumulado contempla tanto el asociado a la base de datos en aguas profundas, como a la metodología de modelación utilizada para transformar el oleaje al sitio del proyecto. Este ejemplo, aplicado a oleaje, puede extrapolarse a otras variables utilizadas como forzantes de los modelos hidrodinámicos y de mezcla.

Tabla 3: Ejemplos de parámetros de entrada utilizados en la calibración y validación de modelos.

Modelo	Componente	Parámetro / Condición	Selección de parámetros	Función objetivo
Oleaje local	Parámetros físicos	Forzante de vientos, transferencia no lineal entre frecuencias, tipos de disipación	Definido por usuario	Altura significativa Período medio Período peak Período energético Dirección media Dirección peak Espectro de frecuencias Espectro de direcciones
	Parámetros numéricos	Tamaño de grilla numérica y salto temporal	Definido por usuario. Los resultados deben ser independientes del tamaño de grilla numérica y salto temporal	
	Forzantes	Vientos	Modelo numérico calibrado con registros locales	
		Oleaje en aguas profundas	Modelo numérico calibrado con registros satelitales y boyas	
	Condiciones iniciales	En reposo / Warming up	Definido por usuario	
	Modo de ejecución	Estacionario / Transiente	Definido por usuario	
Hidrodinámico	Parámetros físicos	Coeficiente de fricción de viento	Literatura	Nivel del mar Fase del nivel del mar Magnitud de la corriente Dirección de la corriente Fase de la corriente Espectro de frecuencias Espectro de direcciones Nota: La corriente puede ser puntual o discretizada en la profundidad (ADCP)
		Coeficiente de Manning	Literatura	
		Viscosidad turbulenta constante o mediante modelo de turbulencia	Literatura	
	Parámetros numéricos	Tamaño de grilla numérica y salto temporal	Definido por usuario. Los resultados deben ser independientes del tamaño de grilla numérica y salto temporal	
	Forzantes	Vientos (mediante esfuerzos superficiales)	Modelo numérico calibrado con registros locales	
		Mareas (mediante condiciones de borde)	Modelo numérico calibrado con registros locales (ver punto anterior)	
		Oleaje (tensores de radiación)	Modelo numérico de oleaje local calibrado con registros locales	

Modelo	Componente	Parámetro / Condición	Selección de parámetros	Función objetivo
		Descargas de ríos (mediante momentum)	Registros obtenidos aguas arriba de la descarga	
		Gradientes densimétricos	Modelo numérico calibrado con registros locales	
	Condiciones iniciales	En reposo / Warming up	Definido por usuario	
	Modo de ejecución	Estacionario / Transiente	Definido por usuario	
De mezcla	Parámetros físicos	Caudal y velocidad de descarga (por porta)	Diseño de la planta	Temperatura Densidad Salinidad
		Tipo de operación (secuencia temporal)	Diseño de la planta	
		Salinidad, densidad y temperatura de descarga	Diseño de la planta	
		Salinidad, densidad y temperatura del medio	Medición en terreno	
		Coefficiente de difusión turbulenta	Medición en terreno	
		Coefficiente de decaimiento térmico	Literatura	
	Parámetros numéricos	Tamaño de grilla numérica y salto temporal	Definido por usuario	
	Forzantes	Modelo hidrodinámico	Modelo numérico calibrado con registros locales (ver punto anterior)	
	Condiciones iniciales	En reposo / Warming up	Definido por usuario	
	Modo de ejecución	Estacionario / Transiente	Definido por usuario	

Tabla 4: Propuesta de tolerancias de estadígrafos (Tabla 2) para diferentes variables de modelos de oleaje, hidrodinámicos y sedimentológicos para costas y estuarios (Williams & Esteves, 2017).

Model predictions	RMSE	Bias	R
Bathymetry	±2.5% of the mean water depth	<0.10	>0.95
Water level (coast)	±0.1 m or 10% of the measured level (spring tide); ±15% (neap tide)	<0.10	>0.95
Water level (estuary)	±0.1 m (mouth); ±0.3 m (head) or 10% of the measured level (spring tide); ±15% (neap tide)	<0.20	>0.95
Water-level phase (coast)	±15 minutes	<0.20	>0.90
Water-level phase (estuary)	±15 minutes (mouth); ±25 minutes (head)	<0.25	>0.90
Average current speed	±0.1 m/s or ±10% to 20% of the measured speed	<0.10	>0.95
Peak current speed	Within <0.05 m/s (very good), <0.1 m/s (good), <0.2 m/s (moderate), and <0.3 m/s (poor) of the measured peak speed	<0.15	>0.90
Current direction (coastal)	±10° of the measured direction	<0.25	>0.90
Current direction (estuary)	±15° of the measured direction	<0.30	>0.90
Bed shear stress	±10% N/m ² of the measured mean stress	<0.10	>0.95
Wave height	±10% of the measured mean observed height	<0.15	>0.95
Wave period	±20% of the measured mean observed period	<0.20	>0.90
Wave direction	±30% of the measured mean observed direction	<0.25	>0.90
Mean SPM concentration	±20% of the mean measured SPM concentration	<0.20	>0.90
Accretion based on dredge volumes	±50% of the measured dredge volume	N/A	N/A
Temperature	±0.5°	—	—
Salinity	±1 psu	—	—

3.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad permite a) identificar parámetros físicos, variables o forzantes relevantes que condicionan una función que describe un fenómeno, b) identificar parámetros numéricos relevantes para resolver dicha función²¹, c) sensibilizar y/o optimizar la función ante variaciones en parámetros, variables o forzantes y d) cuantificar efectos de incertidumbre y/o error en el cálculo de la función. El análisis de sensibilidad constituye una herramienta formal de apoyo para calibrar/validar un punto (análisis local) o en varios puntos en forma simultánea (análisis global), cuya selección dependerá de la disponibilidad temporal y espacial de registros con los cuales compararse. Se recomienda revisar Hamby (1994) para conocer diferentes técnicas utilizadas para efectuar análisis de sensibilidad.

Consideremos una función dependiente de n variables mutuamente independientes $F(x_1, \dots, x_n)$, que pueden corresponder al espacio, tiempo, parámetros físicos o forzantes. Del cálculo diferencial, se sabe que el diferencial de la función es

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} dx_n \quad (16)$$

a partir de la cual se puede evaluar cómo varía la función (dF) respecto de variaciones en las variables (dx_i). La dependencia de la función respecto de cada variable independiente ($\partial F/\partial x_i$) es justamente lo que interesa conocer mediante el análisis de sensibilidad.

²¹ Por ejemplo, valuar la sensibilidad del modelo a los parámetros numéricos permite optimizar el intervalo de tiempo y el tamaño de la malla (una malla fina ofrece buenos resultados con un gran esfuerzo computacional y viceversa) de modo que no origine errores de magnitudes comparables con la señal que se busca modelar.

Para considerar múltiples variables, se evalúa la sensibilidad de la función respecto de una variable a la vez, considerando que todas las otras permanecen constantes:

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x_i} dx_i, \quad dx_j = 0, i \neq j \quad (17)$$

Al calcular cuánto varía la función respecto de cambios en cada variable, se puede evaluar cuáles variables son relevantes en su comportamiento, predecir tendencias y direcciones de cambio. Dependiendo de cómo varíe la función, la relación entre ésta y una variable independiente puede ser directamente proporcional ($dF/dx_i > 0$), inversamente proporcional ($dF/dx_i < 0$) o independiente ($dF/dx_i = 0$), como se muestra en la Figura 16. La función puede ser más o menos sensible, dependiendo de en qué región se esté evaluando la variable, pues dF/dx_i puede también depender de x_i . Cuando dos variables sean mutuamente dependientes (es decir, cuando x_i es dependiente de x_j), se puede reducir la cantidad de variables de entrada, simplificando el modelo.

Figura 16: Ejemplos de una función $F(x)$ que es independiente, directamente proporcional, inversamente proporcional o cuya proporcionalidad depende del rango de valores de x .

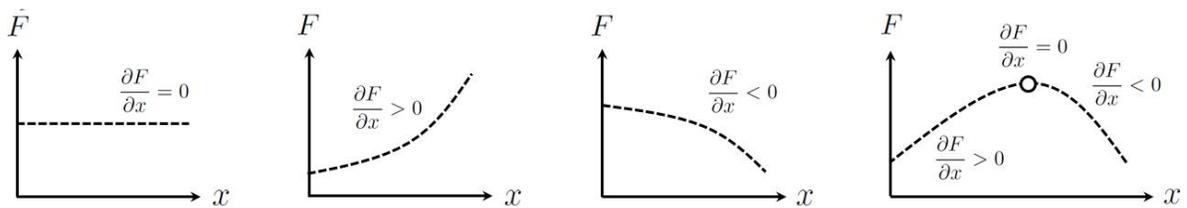
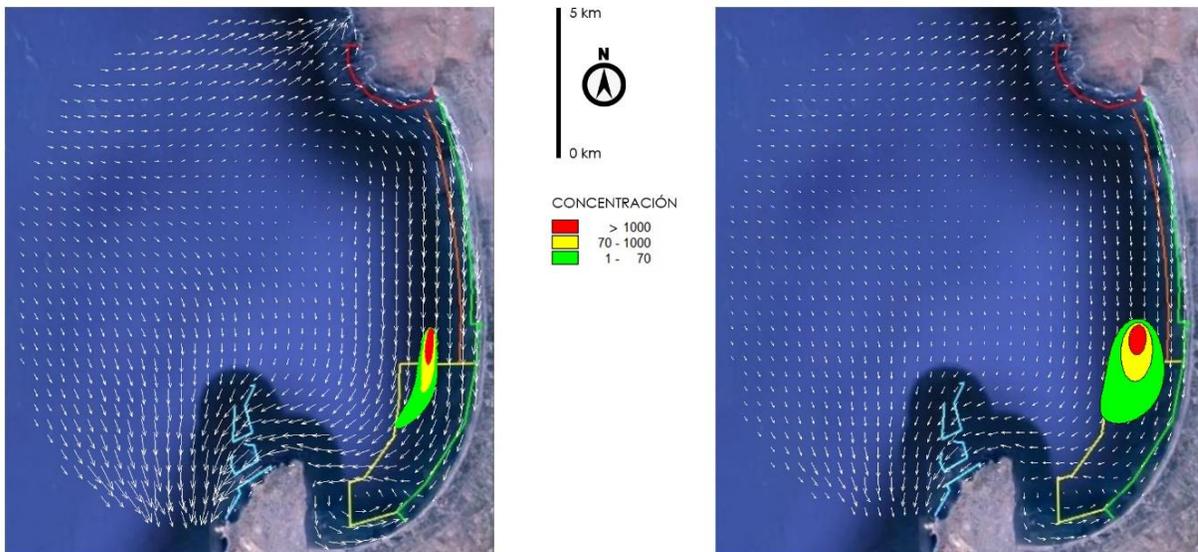


Figura 17: Ejemplo de un análisis de sensibilidad de un modelo acoplado y de mezcla en la bahía de Coquimbo, considerando un coeficiente de difusión de $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ (izquierda) y $2.0 \text{ m}^2/\text{s}$ (derecha). El forzamiento es para un viento constante desde el NW durante una marea de sicigia. Se muestra la concentración de coliformes fecales en (nmp/100 ml). Los vectores blancos representan la dirección de la corriente. Adaptado de Herrera (2017).



$D = 0.1 \text{ [m}^2/\text{s]}$ - SICIGIA - VIENTO EXTREMO NW

$D = 2.0 \text{ [m}^2/\text{s]}$ - SICIGIA - VIENTO EXTREMO NW

3.6 LÍMITES MÁXIMOS ADMISIBLES

Para determinar el AI de la descarga en el medio, se debe comparar la temperatura (pluma térmica) o salinidad (pluma salina) modelada con los límites máximos admisibles establecidos para estas variables, y que se reproducen a continuación. El diseñador debe ubicar y diseñar el difusor para maximizar la dilución en el campo cercano y reducir así el AI. Esta segunda opción considera opciones como optimizar el número y diámetro de las boquillas, la altura respecto al fondo y la inclinación del chorro, entre otros. Esta guía no profundiza en el diseño de estos sistemas, que son se asumen responsabilidad exclusiva del titular del proyecto.

3.6.1 Límites máximos admisibles de salinidad

En Chile no existen criterios normativos que definan un límite máximo para la salinidad proveniente de plantas desaladoras. En concordancia con el Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental (MMA, 2014)²², se recurre a normas internacionales como referencia para evaluar los efectos de estas descargas. A nivel mundial existen pocos estándares para las descargas de salmuera (Tabla 5), que expresan los límites máximos mediante:

- Incrementos absolutos sobre la salinidad del medio,
- Incrementos relativos (%) sobre la salinidad del medio,
- Valores absolutos de salinidad o
- Nivel mínimo de dilución

De una revisión de la literatura, el *State Water Resources Control Board* de California (Jenkins et al., 2012) recomienda un incremento no mayor al 5% de la salinidad base en el medio marino receptor, pues permite dar cuenta de la variabilidad natural, reflejada en la Línea de Base²³. Esta comisión concluye que los efectos varían dependiendo del tipo de comunidad biótica, tipo de concentrado y eficiencia del proceso de dilución²⁴. Palomar y Losada (2011), por otra parte, sugieren un incremento de salinidad menor a 2 psu para el 5% de las observaciones o niveles de fondo. Las Directrices para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima (DIRINMAR, 2015), utilizadas actualmente para evaluar proyectos en Chile, listan las siguientes referencias, sin indicar cuál debe ser utilizada:

- Quality criteria for water (USEPA, 1986), EEUU: Recomienda que, con el objetivo de proteger los hábitats, el aumento de salinidad a partir de su nivel base no debe exceder 4 psu en áreas permanentemente ocupadas por plantas con aptitud para consumo como alimento o formadoras de hábitat, cuando la salinidad natural se ubique en el rango 13,5 y 35 ppt (psu).
- Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica (MOPU, 1988), España: Considera aceptable un incremento no mayor al 10% de la salinidad base en el medio.

²² Artículo 11 (MMA, 2014). Las normas de calidad ambiental y de emisión que se utilizarán como referencia para los efectos de evaluar si se genera o presenta el riesgo indicado en la letra a) y los efectos adversos señalados en la letra b), ambas del artículo 11 de la Ley, serán aquellas vigentes en los siguientes Estados: República Federal de Alemania, República Argentina, Australia, República Federativa del Brasil, Canadá, Reino de España, Estados Unidos Mexicanos, Estados Unidos de América, Nueva Zelanda, Reino de los Países Bajos, República Italiana, Japón, Reino de Suecia y Confederación Suiza. Para la utilización de las normas de referencia, se priorizará aquel Estado que posea similitud en sus componentes ambientales, con la situación nacional y/o local, lo que será justificado razonablemente por el proponente.

²³ Línea de base: descripción detallada del AI de un proyecto o actividad, previa a su ejecución (Ley N° 19.300).

²⁴ Aparentemente, las comunidades bentónicas y pastos marinos son las más sensibles: algunas comunidades parecen ser tolerantes a incrementos de 10 [psu], y otras se ven afectadas por aumentos de sólo 2-3 [psu], valor bajo el cual no se registran impactos (Jenkins et al., 2012).

- Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters (ANZECC, 1992), Australia: establece como estándar ambiental aceptable un incremento no mayor al 5% de la salinidad base en el medio marino receptor²⁵.
- Metodología de diseño de los vertidos al mar de la salmuera, para reducir el impacto ambiental de las plantas desalinizadoras (IHA y CEDEX, 2011), España: establece límites críticos de salinidad exigidos en las más recientes DIAs de plantas desaladoras, que se reproducen en la *Tabla 5*. Las Directrices indican que la concentración de salmuera en la zona donde exista *posidonia oceánica* (fanerógama marina endémica del Mar Mediterráneo, protegida a nivel europeo) no deberá superar los 38.5 psu.

Tabla 5: Límites críticos de salinidad de descargas de salmuera en regulaciones internacionales (modificado de Jenkins et al., 2012). Se han conservado las unidades de cada recomendación de modo de no alterar el espíritu del texto original.

Región/Autoridad	País	Límite Salinidad		Fuente
		Incremento	Valor absoluto	
	Abu Dhabi	≤ 5% en límite zona de mezcla	N.A.	Kastner (2008)
Oakajee Port	Australia	≤ 1 ppt	N.A.	The Waters of Victoria State Environment Protection Policy
Perth EPA		≤ 1.2 ppt a 50 m ≤ 0.8 ppt a 1000 m	N.A.	Wec (2002)
		< 5%	N.A.	ANZECC (1992)
Sydney		≤ 1 ppt a 50-75 m	N.A.	ANZECC (2000)
Gold Coast		≤ 2 ppt a 120 m	N.A.	GCD Alliance (2006)
US EPA	EEUU	≤ 4 ppt	N.A.	USEPA (1986)
Carlsbad, CA		N.A.	≤ 40 ppt a 1,000 ft	San Diego Regional Water Quality Control Board (2006)
Huntington Beach, CA		N.A.	≤ 40 ppt a 1,000 ft ⁽¹⁾	Santa Ana Regional Water Quality Control Board (2012)
	España	< 10%	N.A.	MOPU (1988)
		N.A.	≤ 38,5 psu el 25% de las observaciones	IHA y CEDEX (2011) Sánchez-Lizaso, et al. (2008)
		N.A.	≤ 40 psu el 5% de las observaciones	
Okinawa	Japón	≤ 1 ppt en límite zona de mezcla	N.A.	Okinawa Bureau for Enterprises
	Oman	≤ 2 ppt a 300 m	N.A.	Sultanate of Oman (2005)

(1) Expressed as discharge dilution ratio of 7.5:1

²⁵ Esta publicación fue revisada por ANZECC & ARMCANZ (2000), disponible en www.waterquality.gov.au/anz-guidelines/resources/previous-guidelines/anzecc-armcanz-2000 y sucedida por las revised Water Quality Guidelines, publicada en 2018 como un recurso online disponible en www.waterquality.gov.au/anz-guidelines.

3.6.2 Límites máximos admisibles de temperatura

En el D.S. 90 establece los siguientes límites máximos permisibles de temperatura para la descarga de residuos líquidos²⁶:

- 35°C en cuerpos de agua fluviales (Tabla 1)
- 40°C en cuerpos de agua fluviales considerando la capacidad de dilución del receptor²⁷ (Tabla 2)
- 30°C en cuerpos de agua lacustres (Tabla 3)
- 30°C en cuerpos de agua marinos dentro de la Zona de Protección Litoral (Tabla 4)

El D.S. 90 no establece límites máximos de temperatura para descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua marinos fuera de la Zona de Protección Litoral (Tabla 5).

3.6.3 Límites máximos admisibles de otras sustancias

Además de restricciones a la temperatura y salinidad, la descarga debe cumplir con los requisitos de toxicidad y otros requisitos definidos en el D.S. 90. En esta guía, sin embargo, no se profundiza sobre este particular.

3.6.4 Efectos biológicos sobre especies marinas

En esta guía no se utilizan los efectos biológicos para definir el AI del proyecto; sólo los límites máximos de salinidad y temperatura. Para mayores antecedentes, Roberts et al. (2010), modificado por Jenkins et al. (2012) presentan un acabado resumen de referencias bibliográficas sobre los efectos biológicos de la salmuera sobre diversas especies (pastos marinos, plancton, ascidias, misidáceos, equinodermos, moluscos, peces, comunidades bentónicas), efectuados mediante diversas técnicas (laboratorio, estudio de campo) en diferentes lugares y bajo diferentes condiciones de exposición.

3.7 DEFINICIÓN DE ÁREA DE INFLUENCIA

Para efectos de esta guía, el AI se define como el lugar geométrico, en planta, donde se exceden los límites máximos admisibles de la variable en cuestión (salinidad, temperatura u otras sustancias) definidos en la Sección 3.6.

Esta definición no especifica la probabilidad de excedencia asociada a la combinación de forzantes hidrodinámicos que definen la extensión de la pluma (y las zonas dentro de la misma) que exceden los límites máximos admisibles. Será resorte del consultor justificar la probabilidad en que el AI. En la sección 3.9 se proponen casos de modelación debiera considerar las condiciones medias de operación y aquellas durante las cuales las forzantes son intensas, pero no extremas

²⁶ https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/Documents/DTO_90_07_MAR_2001.pdf

²⁷ Cabe notar que las fuentes emisoras de aguas fluviales podrán aprovechar la capacidad de dilución del cuerpo receptor, incrementando las concentraciones límites establecidas en la Tabla 1, de acuerdo a una fórmula

3.8 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Uno de los problemas más comunes asociados con la calibración de un modelo hidrodinámico se refiere a errores en los datos batimétricos (Williams & Esteves, 2017). Esto es particularmente cierto en la descarga de plumas salinas, donde el campo lejano se desarrolla como una corriente de turbidez que sigue gravitacionalmente el gradiente del fondo²⁸, a lo largo de los valles sumergidos a través de los cuales se espera fluya la salmuera (Figura 23). Para evaluar el AI –especialmente en plumas salinas- se debiera contar con una batimetría de una resolución que sea capaz de capturar dichos valles, que a priori pueden asumirse como áreas potencialmente afectadas. En las plumas térmicas, la resolución del modelo de elevación digital (DEM, *digital elevation model*) es menos relevante pues la pluma deriva en la profundidad de estratificación; con todo se debe garantizar que la estructura vertical del flujo sea bien representada. Actualmente, el efecto de la batimetría en el campo lejano sólo es considerada en modelos numéricos avanzados, puesto que en modelos básicos se consideran la pendiente media del fondo o una pendiente por tramos (IHA y CEDEX, 2011).

3.8.1 Bases de datos batimétricas

Existen diferentes fuentes de batimetría, entre las que destacan las bases de datos a escala oceánica, cartas náuticas electrónicas y de papel, y levantamientos monohaz, multihaz y Lidar (*Light Detection and Ranging*). Las bases de datos a escala oceánica (GEBCO, ETOPO) tienen una resolución a escala de grados, por lo que no son adecuadas para estudios de vertidos de plumas térmicas o salinas. No obstante, pueden servir para la modelación hidrodinámica de procesos a gran escala (e.g. mareas) que son posteriormente utilizados para forzar el modelo de mezcla. Las cartas náuticas²⁹ (SHOA, 2020), por su parte, están destinadas a la navegación, por lo que es poco frecuente contar con ella en el emplazamiento de futuras plantas termoeléctricas o desaladoras. Su uso también se restringe a caracterizar los procesos hidrodinámicos a gran escala o a sitios donde existen instalaciones portuarias, pero en general no tienen buena resolución para modelos de mezcla. Los levantamientos mediante Lidar (e.g. Ma et al., 2020) se encuentran en fase de desarrollo y han demostrado tener una penetración de pocas decenas de metros en aguas muy transparentes (Parrish et al., 2019), razón por la cual en la actualidad no constituyen una fuente de información para modelación de plumas salinas y térmicas.

Para efectos de evaluar el IA, por tanto, se requiere de levantamientos mediante monohaz o multihaz, siendo estos últimos más adecuados por contar con una cobertura continua del lecho marino. Idealmente, para efectos de una modelación, se debiera contar con batimetrías de precisión, indicadas en las Especificaciones técnicas para la ejecución de sondajes³⁰ (SHOA, 2020). En caso de no contar con una batimetría de buena calidad, se recomienda efectuar un levantamiento batimétrico abarcando un área suficientemente grande, del orden o superior a 200×200 [m²], centrado en el difusor, con resolución espacial del orden de 5 [m]. La razón es que los procesos de campo cercano influenciados por la propia descarga, ocurren típicamente a unas pocas decenas de metros de la misma.

²⁸ En la práctica actual es difícil modelar en forma adecuada el campo lejano en plumas salinas, ya que son limitadas las herramientas para reproducir el flujo en fondos irregulares con rugosidades variables.

²⁹ El SHOA dispone de un catálogo de cartas en papel elaboradas desde su fundación en 1874, y cartografía náutica electrónica (CNE) elaborada desde 2000 en el sistema de referencia WGS-84. El sistema GPS trabaja con datum WGS-84, y la cartografía náutica nacional utilizaba hasta 1998, los datum regionales PSAD-56 y SAD-69; los datum locales y cartografía con referencia local o sin datum definido. La transformación entre sistemas de referencia (WGS-84, PSAD-56 o SAD-69) requiere contar con parámetros de transformaciones tridimensionales de siete parámetros establecidos por algún organismo oficial.

³⁰ La resolución espacial definida por SHOA (2020) debiera ser inferior a 5 [m], con una exactitud horizontal de 1 [m] y una exactitud en la profundidad de 0,1 [m] en sondas hasta 10 [m], 0,15 [m] en sondas entre 10 [m] y 20 [m] y 0,20 [m] en sondas superiores a 20 [m].

Asimismo, la selección de fuentes de información debe de preferencia privilegiar levantamientos recientes a antiguos (especialmente en lechos arenosos) y de alta resolución espacial.

En la generación del DEM se debe reportar los siguientes elementos:

- Definición y justificación del dominio de cálculo
- Metodología de estandarización vertical
- Metodología de estandarización horizontal
- Mapa con sondajes originales (Figura 18a)
- Mapa con fuentes batimétricas (Figura 18b,c)
- Mapa con ensamblaje de fuentes batimétricas (Figura 18d)
- Mapa con suavizado del DEM (Figura 18e)
- Mapa con el DEM resultante (Figura 18f)

3.8.2 Elaboración del modelo de elevación digital

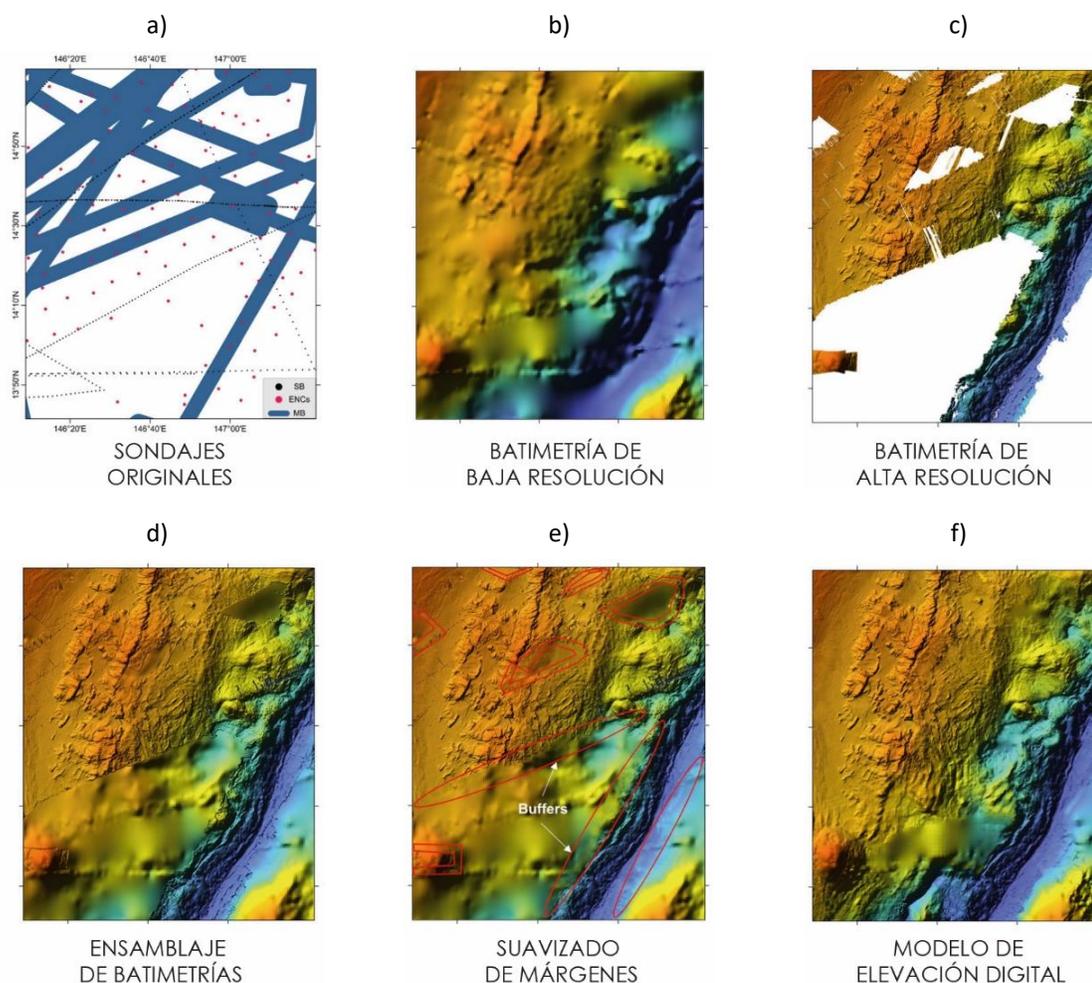
En la generación de un DEM, debe verificarse que las diferentes fuentes de información tengan el mismo dátum altimétrico (NRS) y el dátum planimétrico (WGS 84)³¹. También es útil recurrir a mapas y ortofotos históricas que permitan garantizar que elementos notables como la línea de costa, roqueríos u obras marítimas sean bien representados en el DEM. El primer paso para confeccionar el DEM es integrar las diferentes bases de datos batimétricas y unificar la referencia vertical y horizontal de cada una de ellas. Este proceso deberá garantizar la continuidad de las estructuras morfológicas (e.g. cañones submarinos). De ser necesario, se deberá generar una zona de traslape entre las distintas fuentes, la cual deberá ser de extensión suficiente como para minimizar discontinuidades. Cuidado especial debe tenerse con la línea de costa, que puede presentar ubicaciones distintas entre fuentes producto de diferencias en el sistema vertical de referencia y/o resoluciones espaciales. La Figura 18 ilustra un ejemplo de construcción de un DEM digital a partir de varias fuentes batimétricas.

3.8.3 Definición del dominio de los modelos hidrodinámico y de procesos de mezcla

La definición del dominio de los modelos hidrodinámico y de procesos de mezcla depende de la escala espacial del proceso físico que se quiera modelar. En general, no es posible definir tamaños mínimos o máximos del dominio de integración, pues ellos dependen mucho de la forma de la línea de costa, de la batimetría y de los agentes forzantes. En un modelo hidrodinámico, el tamaño del dominio debe ser lo suficientemente grande para capturar el campo de corrientes y la profundidad instantánea en la zona de mezcla. Se debe procurar, además, que las condiciones de borde no alteren en forma espuria los resultados en el emplazamiento de la descarga. En los modelos de mezcla, el dominio debe englobar los procesos de campo cercano influenciados por la descarga - que ocurren típicamente a unas pocas decenas de metros de la descarga- y los procesos de campo lejano, que se dan en escalas espaciales mayores.

³¹ En caso de existir movimientos sísmicos o desastres naturales, se deberá verificar la validez de los datos de batimetría (i.e. determinación del NRS mediante un estudio de marea), siguiendo la Pub. 3201 (SHOA, 2019).

Figura 18: Ejemplo de construcción de un DEM digital a partir de varias fuentes batimétricas. Se muestran a) los sondeos originales, b) y c) batimetrías de diferente resolución, d) el ensamblaje de dichas batimetrías y f) el DEM. Adaptado de Liu et al. (2019).



3.9 DEFINICIÓN DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN

La definición de los escenarios de modelación debiera considerar las condiciones medias de operación y aquellas durante las cuales las forzantes son intensas, pero no extremas³². Se excluye el análisis de valores extremos (e.g. marejadas), pues su ocurrencia está asociada a períodos de retorno altos de muy corta duración durante los cuales los procesos de mezcla son muy eficientes debido a la turbulencia ambiente. Por ende, se asume que no generan impactos relevantes en el medio biótico, pues estos requieren de una persistencia prolongada en el tiempo y condiciones adecuadas (e.g. baja turbulencia) para que hagan efecto sobre los organismos.

³² Las condiciones extremas se asocian a períodos de retorno del orden de años y se utilizan para el diseño estructural de obras. La determinación de estos valores exige la selección de una muestra de valores extremos de un parámetro (e.g. magnitud del viento, marea meteorológica o altura significativa) y el ajuste de curvas de probabilidad a los mismos. Por ejemplo, para oleaje, la Publicación 3201 (SHOA, 2019) indica que el oleaje extremo "deberá estar basado en /.../ las mayores tormentas ocurridas en cada uno de los 20 años de hindcasting /.../ que arroje una estimación de la altura significativa de la ola con períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años".

3.9.1 Modelo hidrodinámico

La modelación puede contemplar a) escenarios para cada forzante en forma individual y/o b) escenarios con todas las forzantes relevantes en ventanas de tiempo comparables con la operación de la descarga. La modelación de escenarios para cada forzante es poco realista, pero permite evaluar el peso relativo de cada forzante en el proceso de mezcla. Asimismo, puede ser adecuada en procesos de diseño donde se busca optimizar la configuración del difusor de descarga. La modelación de escenarios con todas las forzantes relevantes rescata de mejor manera la naturaleza estocástica de los forzantes. Esta opción parece más adecuada para proveer de antecedentes para definir AI. A continuación, se describen ambos tipos.

a) Escenarios para cada forzante en forma individual

La definición de condiciones medias e intensas depende del tipo de variable en cuestión. A continuación, se presenta una propuesta mínima de condiciones para el modelo para las variables de naturaleza aleatoria (e.g. viento y oleaje):

- Condición sin forzante (caso C_0 en Tabla 6) asociado a baja circulación y turbulencia. Esta condición se asocia a alta concentración cerca de la descarga, pero baja extensión espacial de la pluma.
- Condiciones medias: aquellas en que la magnitud de la variable tiene una probabilidad de excedencia de 50%, o mediana ($V_{50\%}$ y $HS_{50\%}$ para la magnitud del viento y la altura significativa, respectivamente). Esta condición se asocia la operación normal de la descarga.
- Condiciones intensas: aquellas en que la magnitud tiene una probabilidad de excedencia de 1% ($V_{1\%}$ y $HS_{1\%}$ para la magnitud del viento y la altura significativa, respectivamente). Esta condición se asocia a baja concentración cerca de la descarga, pero alta extensión espacial de la pluma.

Asimismo, para variables vectoriales (vientos y oleaje), se debe definir la dirección asociada a esas condiciones medias o intensas. Se recomienda modelar la marea como una función que dependen del tiempo, e.g. $Z_{SIC}(t)$ y $Z_{CUA}(t)$. En caso que se demuestra que el ciclo mareal no es relevante en el proceso de mezcla, se puede utilizar un nivel medio del mar constante.

En una primera etapa, se recomienda analizar cada forzante en forma individual, de modo de evaluar su importancia relativa en el patrón hidrodinámico (e.g. Figura 8 a Figura 10), para luego elaborar casos combinados que generen condiciones complejas. En caso de verificar que alguna de estas forzantes no sea relevante, puede descartarse del análisis. Cabe notar que, el análisis de forzantes de manera individual puede resultar difícil de cotejar con datos de campo donde todas las forzantes coexisten. Además, tiene la limitación de representar en forma poco realista los efectos acumulativos de las descargas en el medio. En la Tabla 6 se muestra una propuesta de casos en los cuales cada forzante se analiza de manera individual, donde se incluye el número un código que describe las variables utilizadas. La dirección del oleaje es sólo una propuesta ilustrativa. El caso C_0 corresponde al caso sin forzante asociado a un campo hidrodinámico de velocidad nula en todo el dominio.

b) Escenarios con todas las forzantes relevantes

Se recomienda evaluar combinaciones de forzantes durante un mes continuo de simulación para condiciones de verano e invierno (consistentes con los requerimientos de la Pub. 3201), o un año de manera continua para proyectos grandes. Para ello, el estudio oceanográfico debe considerar mediciones simultáneas de los forzantes hidrodinámicos y la respuesta (corriente o nivel del mar) que permita calibrar y validar el modelo. La Tabla 6 muestra tres ejemplos de este tipo de escenarios.

Tabla 6: Ejemplo de definición de casos de modelación hidrodinámica.

#	Código	Viento		Marea	Oleaje	
		Magnitud	Dirección		Magnitud	Dirección
C_0	Condición sin forzante	-	-	Constante	-	-
C_1	$V_{50\%/SW}$	$V_{50\%}$	SW	Constante	-	-
C_2	$V_{50\%/W}$	$V_{50\%}$	W	Constante	-	-
C_3	$V_{50\%/NW}$	$V_{50\%}$	NW	Constante	-	-
C_4	$V_{1\%/SW}$	$V_{1\%}$	SW	Constante	-	-
C_5	$V_{1\%/W}$	$V_{1\%}$	W	Constante	-	-
C_6	$V_{1\%/NW}$	$V_{1\%}$	NW	Constante	-	-
C_7	Z_{SIC}	-	-	$Z_{SIC(t)}$	-	-
C_8	Z_{CUA}	-	-	$Z_{CUA(t)}$	-	-
C_9	$HS_{50\%/SW}$	-	-	Constante	$HS_{50\%}$	SW
C_{10}	$HS_{50\%/W}$	-	-	Constante	$HS_{50\%}$	W
C_{11}	$HS_{50\%/NW}$	-	-	Constante	$HS_{50\%}$	NW
C_{12}	$HS_{1\%/SW}$	-	-	Constante	$HS_{1\%}$	SW
C_{13}	$HS_{1\%/W}$	-	-	Constante	$HS_{1\%}$	W
C_{14}	$HS_{1\%/NW}$	-	-	Constante	$HS_{1\%}$	NW
C_{INV}	Mes invierno	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
C_{VER}	Mes verano	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable
$C_{AÑO}$	Año completo	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable

3.9.2 Modelo de mezcla

Dada la gran cantidad de escenarios hidrodinámicos y opciones utilizadas en el diseño de difusores utilizados en plumas térmicas o salinas, no parece adecuado restringir *a priori* la cantidad de casos a modelar en esta guía. Será resorte del titular del proyecto definir los escenarios adecuados para calcular el AI. La Tabla 7 muestra las variables relevantes a considerar en el modelo de mezcla.

Tabla 7: Variables a considerar en el modelo de mezcla. Los superíndices representan elementos que se deben incluir en (1) plano de diseño, (2) plano de layout y (3) plano de elevación, datos obtenidos (4) del modelo numérico o (5) mediciones.

Efluente	Símbolo	Unidad	Observación
Caudal	Q	m ³ /s	Medio horario, diario o instantáneo, máximo horario o diario, retrolavado o condiciones accidentales
Salinidad	s_e	psu	-
Temperatura	T_e	°C	-
Densidad	ρ_e	Km/m ³	-
Difusor	Símbolo	Unidad	Observación
Tipo de difusor ⁽¹⁾	-	-	Sin, con difusor uniforme, telescópico, difusor en V
Tipo de portas ⁽¹⁾	-	-	Verticales, inclinadas, horizontales, alternadas, riser, válvulas check (duckbill)
Número de portas ⁽¹⁾	n_p	-	-
Espaciamiento entre portas ⁽¹⁾	e_p		
Inclinación de las portas ⁽¹⁾	θ_p		
Diámetro interno portas ⁽¹⁾	d_p		
Caudal de las portas	q_p	m ³ /s	-
Tipo de operación	-	-	Continua o discreta
Localización del vertido ⁽²⁾	-	-	-
Distancia a costa ⁽²⁾	-	m	-
Distancia ZPL a la costa ⁽²⁾		m	-
Profundidad ⁽³⁾	-	m NRS	-
Medio receptor	Símbolo	Unidad	Observación
Magnitud de la corriente ⁽⁴⁾	U	m/s	Intensa (1%), media (50%) o medio en reposo.
Nivel del mar ^(3,4)	z	m NRS	Pleamar máxima, mínima, nivel medio
Salinidad ⁽⁵⁾	s_m	psu	-
Temperatura ⁽⁵⁾	T_m	°C	-
Densidad ⁽⁵⁾	ρ_m	Km/m ³	-
Perfil columna de agua ⁽⁵⁾	-	-	Estratificada o sin estratificación

3.10 FORMATO DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La representación de resultados depende de si las variables son escalares (magnitud) o vectoriales (magnitud, dirección y sentido), puntuales o espaciales, instantáneas o permanentes. El análisis de estas variables, asimismo, puede efectuarse en el dominio del tiempo, de la frecuencia o del tiempo- frecuencia. Finalmente, el análisis puede efectuarse a nivel de dato individual o datos agrupados para una sola variable, o cruzando dos o más variables para detectar relaciones causa-efecto. Naturalmente, no existe una sola forma de representar los resultados y dependerá de la experiencia y criterio del diseñador el cómo hacerlo.

La Tabla 8 muestra ejemplos de representación gráfica de datos de variable ambientales y la Figura 19 ilustra un buen ejemplo de representación que integra varios elementos de una variable vectorial como el oleaje. Se recomienda al lector ver los ejemplos de visualización incluidos en el Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2016) y revisar el texto de Contreras-López (2001).

Tabla 8: Tipos de representación gráfica de datos (Beyá et al., 2016) y Contreras-López, 2001).

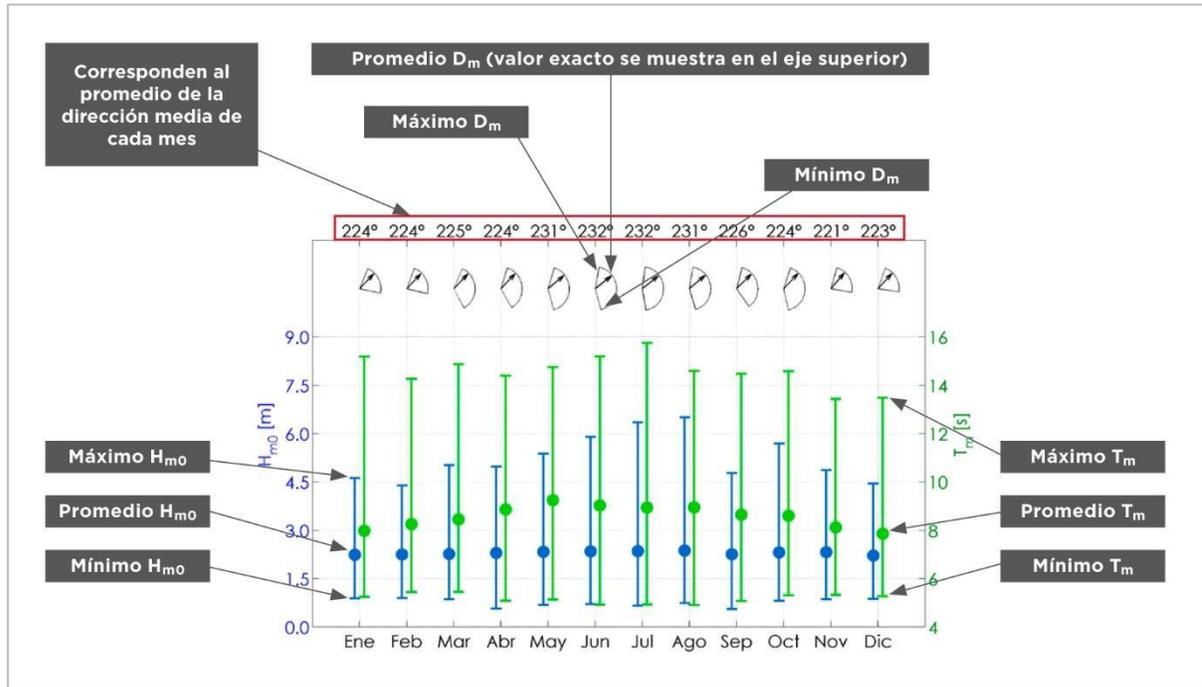
Dominio del tiempo	Escalar	Vectorial
Series de tiempo	✓	
Rosas con datos individuales y datos agrupados		✓
Diagrama de trazos		✓
Histograma de frecuencia relativa y frecuencia acumulada	✓	
Histograma de frecuencia bivariado		✓
Estadígrafos (máxima, mínima, media, mediana)	✓	
Gráficos de dispersión (cruce de variables)		✓
Gráficos de valores extremos		
Componentes principales		✓

Dominio de la frecuencia		
Espectro de frecuencia	✓	
Espectro de dirección	✓	
Espectro bidimensionales (dirección y frecuencia)		✓
Espectro rotatorio		✓
Espectro cruzado		✓

Dominio del tiempo y frecuencia		
Wavelets (ondeletas)	✓	
Escalograma	✓	

Dominio del espacio		
Diagramas de vector progresivo (medición puntual)		✓
Trayectorias lagrangianas (puntuales)		✓
Campos bidimensionales (2D-horizontal o 2D-vertical)		✓
Campos tridimensionales		✓

Figura 19: Gráfico de variación mensual de altura significativa, periodo medio y dirección media, en el cual se grafican valores promedio, mínimos y máximos de estas variables (Beyá et al., 2016). El gráfico se caracteriza por contener gran cantidad de información de una variable vectorial a nivel mensual.



3.11 SÍNTESIS DE RESULTADOS

Dada la gran cantidad de modelaciones necesarias para acotar el comportamiento de las plumas, se recomienda resumir los resultados mediante una tabla que incluya los parámetros de entrada y resultados de los modelos hidrodinámico y de mezcla. La Tabla 9 muestra un ejemplo de este tipo de síntesis. Adicionalmente, se deberían incluir las siguientes gráficas de resultados:

- Campos 2DH (x, y) de oleaje (altura significativa y dirección)
- Campos 2DH (x, y) de corriente (velocidad y dirección)
- Campos 2DH (x, y) de salinidad, indicando el AI
- Campos 2DH (x, y) de temperatura, indicando el AI
- Perfiles 2DV (x, z) de salinidad a lo largo de la pluma, indicando el AI
- Perfiles 2DV (x, z) de temperatura a lo largo de la pluma, indicando el AI

Dada la gran cantidad de casos analizados, es recomendable que sólo las gráficas más relevantes se incluyan en un informe de resultados y que las restantes se incluyan en un soporte digital. Asimismo, se recomienda compilar los resultados en una lámina donde se sinteticen varios casos (y la envolvente), de modo de simplificar la revisión por parte del SEA.

Tabla 9: Distancias o superficies asociadas al AI calculadas para los casos de modelación hidrodinámica y modelado de procesos de mezcla.

Código modelo hidrodinámico	Código modelo de mezcla	Parámetros de entrada					Resultados modelo hidrodinámico		Resultados modelo de mezcla	
		Viento	Marea	Oleaje	Salinidad ambiental	Temperatura ambiental	Velocidad corriente	Dirección corriente	Distancia Campo cercano	Distancia campo lejano
V_{ZMO}	Por completar con un código definido por el titular del proyecto	-	Constante	-						
$V_{50\%/SW}$		$V_{50\%/SW}$	Constante	-						
$V_{50\%/W}$		$V_{50\%/W}$	Constante	-						
$V_{50\%/NW}$		$V_{50\%/NW}$	Constante	-						
$V_{1\%/SW}$		$V_{1\%/SW}$	Constante	-						
$V_{1\%/W}$		$V_{1\%/W}$	Constante	-						
$V_{1\%/NW}$		$V_{1\%/NW}$	Constante	-						
Z_{SIC}		-	$Z_{SIC}(t)$	-						
Z_{CUA}		-	$Z_{CUA}(t)$	-						
$HS_{50\%/SW}$		-	Constante	$HS_{50\%/SW}$						
$HS_{50\%/W}$		-	Constante	$HS_{50\%/W}$						
$HS_{50\%/NW}$		-	Constante	$HS_{50\%/NW}$						
$HS_{1\%/SW}$		-	Constante	$HS_{1\%/SW}$						
$HS_{1\%/W}$		-	Constante	$HS_{1\%/W}$						
$HS_{1\%/NW}$		-	Constante	$HS_{1\%/NW}$						
Mes invierno		Variable	Variable	Variable						
Mes verano		Variable	Variable	Variable						
Año completo		Variable	Variable	Variable						

Por completar con distancias o superficies asociadas al AI

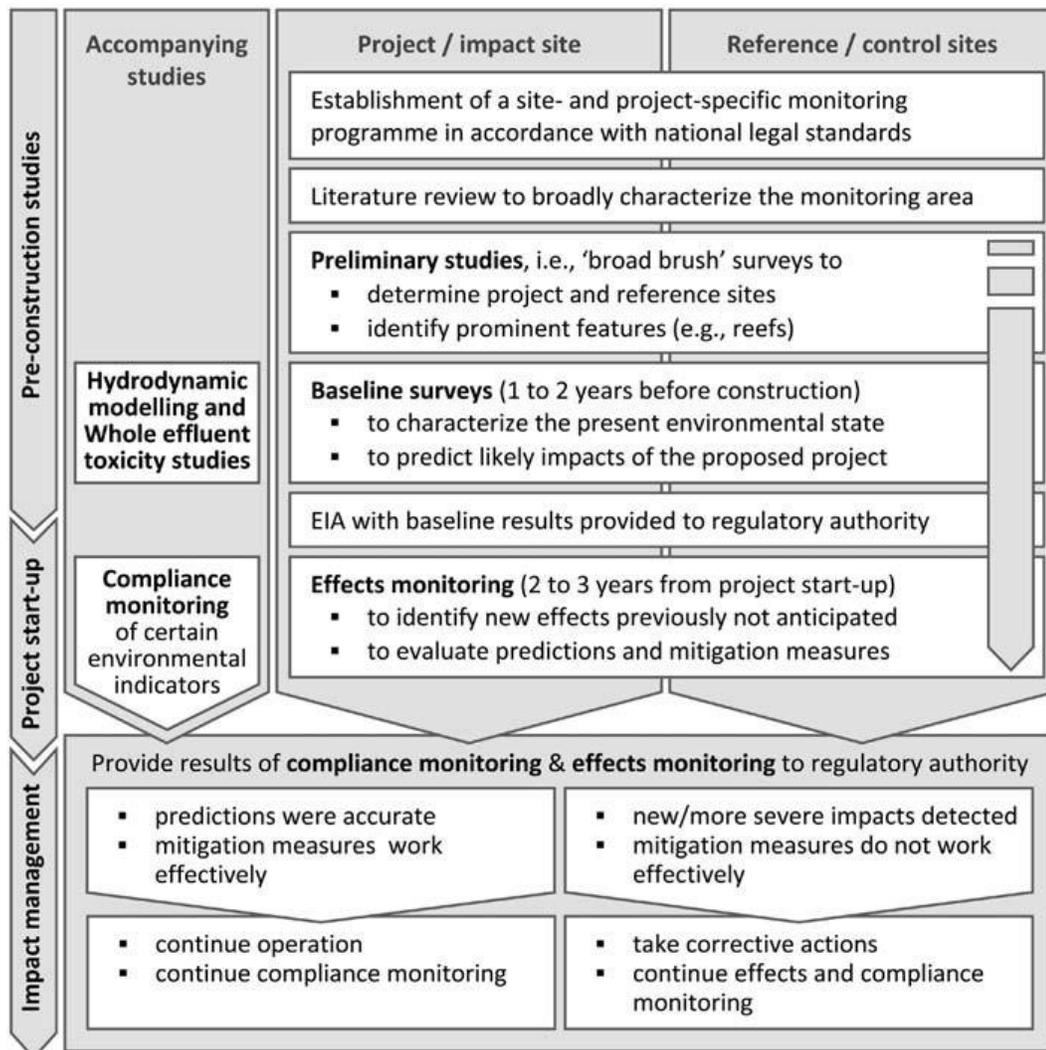
4 MONITOREO DE VARIABLES

4.1 GENERALIDADES

El monitoreo del medio marino forma parte esencial de la gestión de sistemas de descarga de plumas térmicas y salinas, pues permite verificar que, durante la operación, se cumpla con los requerimientos ambientales (esto es, que no se exceda el AI durante la operación). Asimismo, otorga información relevante para planificar expansiones o modificaciones del sistema (Ludwig, 1988). Un programa de monitoreo debe contemplar las fases de levantamiento de la línea base -utilizada en el diseño de la descarga-, construcción, operación, cierre y abandono (Figura 20). Asimismo, debe contemplar el análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos en la descarga, medio receptor, sedimentos, flora y fauna marina en su AI.

En este documento sólo se presentan lineamientos asociados al monitoreo de aquellas variables que definen el comportamiento de plumas térmicas y salinas en el medio, esto es el campo de corrientes y las forzantes que lo definen (viento, oleaje, mareas), la salinidad y temperatura (a partir de las cuales se obtiene la densidad).

Figura 20: Esquema de monitoreo para un proyecto de desalación (Lattemann & Amy (2013)).



Se excluyen de estos lineamientos:

- El monitoreo durante la fase de construcción, cierre y abandono, pues dependerán mucho del método constructivo o de demolición propuesto. Será resorte del titular del proyecto definir los escenarios asociados a estas etapas.
- El monitoreo de variables físico- químicas³³, a excepción de la temperatura y la salinidad. Será resorte del titular del proyecto definir los impactos asociados a otras sustancias que forman parte de la descarga.

Con el fin de homogenizar el procedimiento de medición en el marco de la modelación, se sugiere efectuar las mediciones de variables oceanográficas (olas, vientos, mareas, corrientes), de acuerdo a los requerimientos mínimos establecidos en el Instructivo SHOA 3201 en lo relativo a instalación, estrategia de muestreo, fuentes de datos, validación métodos, duración de la medición, análisis y presentación informe.

4.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MUESTREO (EN PLANTA)

Debido que el proceso de mezcla depende del patrón de corrientes y del emisario³⁴, el programa de monitoreo debe considerar una zona lo suficientemente amplia como para la incluir el AI y las zonas de usos especiales del cuerpo de agua³⁵.

El muestreo busca coleccionar muestras representativas del medio con el propósito de adquirir información que ayude a determinar las propiedades del flujo y el grado en el que las descargas podrían entrar en el ambiente circundante. Una muestra puede definirse como representativa cuando posee las mismas características o propiedades que el medio en estudio, cuyo grado de semejanza depende de las propiedades a estudiar y las técnicas analíticas. El número y/o frecuencia del muestreo deben basarse en el tipo de información estadística deseada y en la naturaleza del material a coleccionar. Finalmente, la muestra debe conservar las propiedades de las condiciones originales en el sitio, durante la colección, transporte y entrega al analista.

El diseño de un muestreo puede ser a juicio, aleatorio o sistemático (Figura 21). El **muestreo a juicio** se presenta cuando los puntos de muestreo se seleccionan mediante un criterio experto³⁶ y constituye la base de una investigación exploratoria. En un **muestreo aleatorio**, todo punto de muestreo tiene la misma probabilidad de ser seleccionado, siendo recomendable para áreas relativamente homogéneas. El **muestreo sistemático** consiste en ubicar las muestras en un patrón regular, de tipo rectangular, polar o de pirámide, en la zona de estudio. Estos diseños pueden llevarse a cabo en superficies de cualquier tamaño, de acuerdo a las dimensiones del cuerpo de agua.

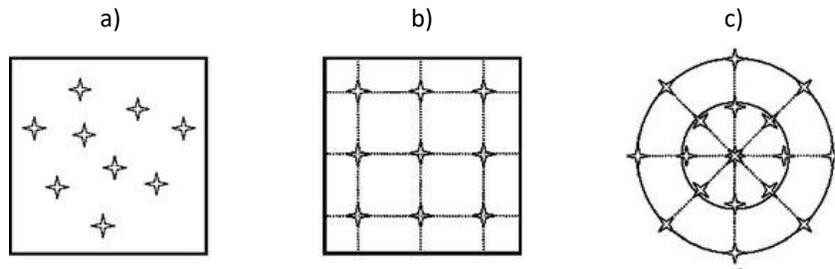
³³ Oxígeno disuelto, nutrientes (P, N), sólidos suspendidos totales, clorofila a, componentes inorgánicos disueltos en agua (Cu, Pb, As, Cd, Hg, otros), microbiológicos (CF, CFT), turbidez (UNT), cloro residual, frecuencia de Brunt-Vaisala, potencial redox y pH. Las metodologías, protocolos de conservación de muestras y sus recomendaciones de muestreo para estas variables se incluyen en Cortés y Silva (2011).

³⁴ Emisario submarino: toda forma de ducto destinado a descargar, en forma submarina o subacuática, a cuerpos de aguas marinas costeras, hasta las 12 millas náuticas, materias, energía o sustancias en estado acuoso, resultantes de un proceso industrial o sanitario (Circular D.G.T.M. Y M.M. Ord. N° A-43/004, 2012).

³⁵ Concesiones y destinaciones marítimas, áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos AMERB, áreas aptas para la acuicultura AAA, áreas marinas costeras, u otras.

³⁶ Por ejemplo, para una descarga de salmuera puede definirse un muestreo con puntos ubicados a lo largo de los valles submarinos donde se espera que se mezcle la salmuera en el campo lejano.

Figura 21: Muestreos a) aleatorio, b) sistemático rejilla rectangular y c) sistemático rejilla polar (Sepúlveda, 2005).



En la medida que la configuración costera lo permita, se proponen los siguientes esquemas para el programa de monitoreo de vientos, corrientes, mareas, oleaje, salinidad y temperatura en la descarga (se incluyen también instrumentos utilizados para caracterizar la captación, pues deben efectuarse en forma simultánea en todas las fases).

- **Monitoreo pre-diseño:** Contempla la medición de un anemómetro, dos correntómetros con sensor de marea dos sensores de temperatura y/o salinidad en la descarga. También se contempla una estación (o estaciones) de referencia fuera de cuerpos de parcial o totalmente protegidos como bahías, golfos y otros cuerpos de agua cerrados (Figura 22a) o a distancias considerables en el caso de zonas costeras expuestas³⁷ (Figura 22b). Se incluye una estación de temperatura y/o salinidad en zonas de usos especiales, ejemplificadas mediante una AMERB en los diagramas.
- **Monitoreo de vigilancia ambiental:** Contempla las mismas estaciones utilizadas en el monitoreo pre-diseño, además de estaciones adicionales de temperatura y/o salinidad que permitirán corroborar si las concentraciones calculadas mediante los modelos se reproducen en terreno. A modo, se pueden utilizar esquemas tipo “rosa” o tipo “grilla”. El esquema tipo rosa contempla un mínimo 9 estaciones para la captación y para el(los) difusor(es) del emisario (Figura 22c,d). Las estaciones debieran distribuirse en forma equidistante, considerando la estación central sobre el difusor y las otras 8 formando una transecta paralela y otra perpendicular a la costa. La distancia entre estaciones debiera ser de ~50 m. El esquema tipo grilla contempla transectos en el AI y la zona donde no habrá impactos (Figura 22e,f).

En el monitoreo de vigilancia ambiental de desaladoras, se debiera medir, además de en aquellos puntos indicados en el punto anterior, a lo largo de los valles sumergidos a través de los cuales fluye la salmuera en el campo lejano. La medición debiera efectuarse lo más cercano al fondo, en la medida que el instrumental (de medición directa o de toma de muestras) lo permita. Para hacer efectivo este plan, se debiera contar con una batimetría de una resolución que sea capaz de capturar dichos valles (sección 3.8), que a priori pueden asumirse como áreas potencialmente afectadas.

Alternativamente, se podrían efectuar ensayos con un trazador inocuo (e.g. rodamina WT) durante el inicio de las operaciones, que permitan identificar la extensión de la pluma de salmuera en el campo lejano. La estimación de la extensión de la pluma podría efectuarse mediante una combinación de mediciones, e inspección con filmaciones submarinas con señalizaciones debidamente georreferenciadas en el fondo marino (e.g. estacas).

Naturalmente, que este tipo de configuraciones puede ser reforzada con más instrumentos en caso que la descarga sea de un caudal considerable o si las condiciones hidrodinámicas locales sean lo suficientemente complejas como para no ser caracterizadas en forma adecuada mediante los esquemas propuestos.

³⁷ El Clean Water Act 316b (US-EPA) recomienda localizar estaciones alejadas de la costa en el veril de 20-25 [m].

Figura 22: Propuestas de posicionamiento de estaciones para el monitoreo para el pre-diseño en a) bahías y b) costas abiertas. c-f) Diferentes esquemas para un programa de vigilancia ambiental.

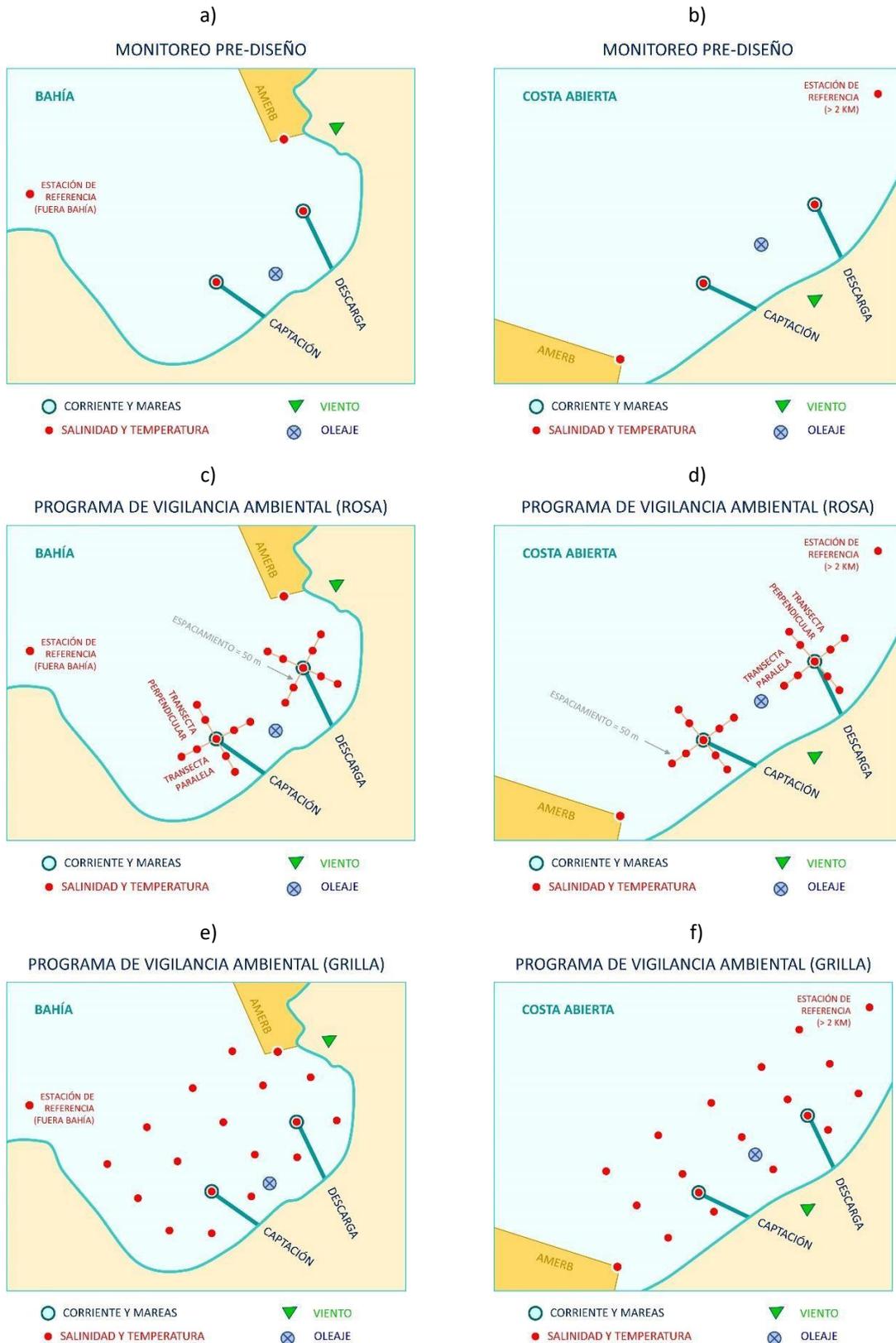
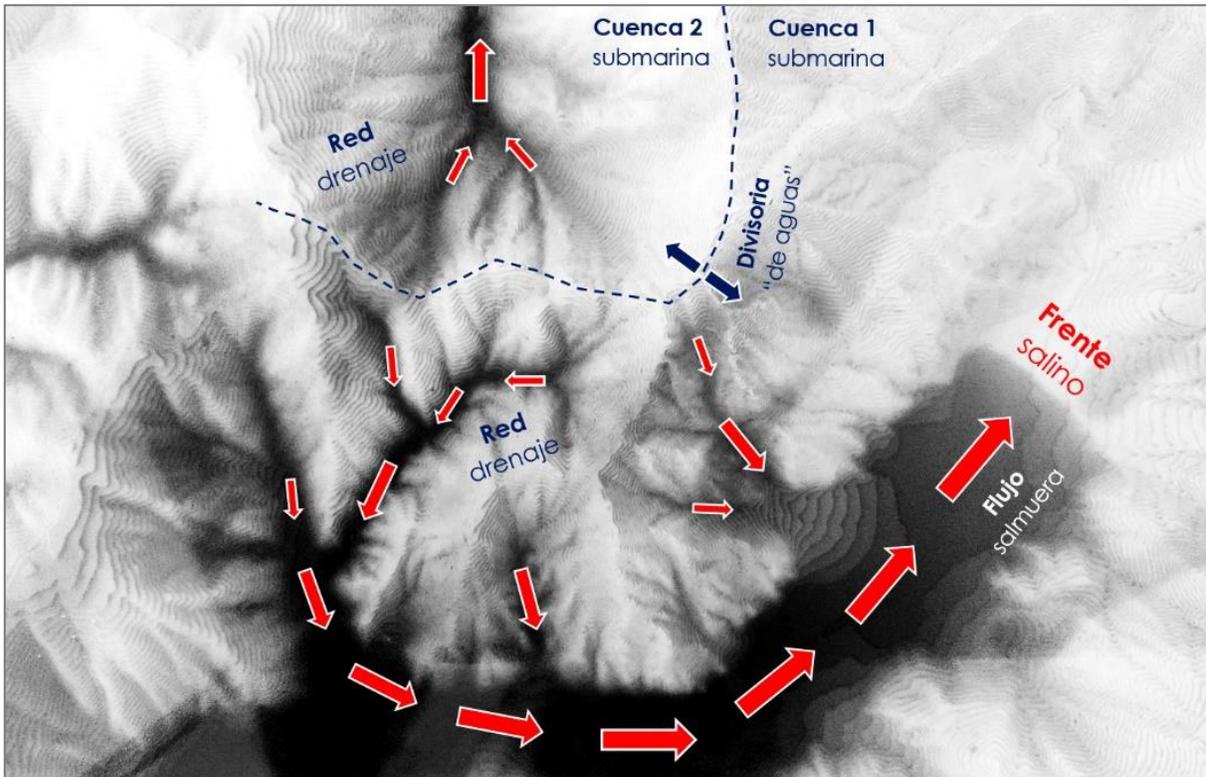


Figura 23: Imagen en modelo físico efectuado en el Laboratorio de Procesos Costeros (Labocéano)³⁸, donde se muestra una pluma de boyantes negativa (salmuera) mezclándose en el fondo como una corriente de densidad. Se observan altas concentraciones de la descarga el avance del frente salino hacia las zonas más bajas. El relieve está caracterizado por curvas de nivel discretas.



4.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL MUESTREO (COLUMNA DE AGUA)

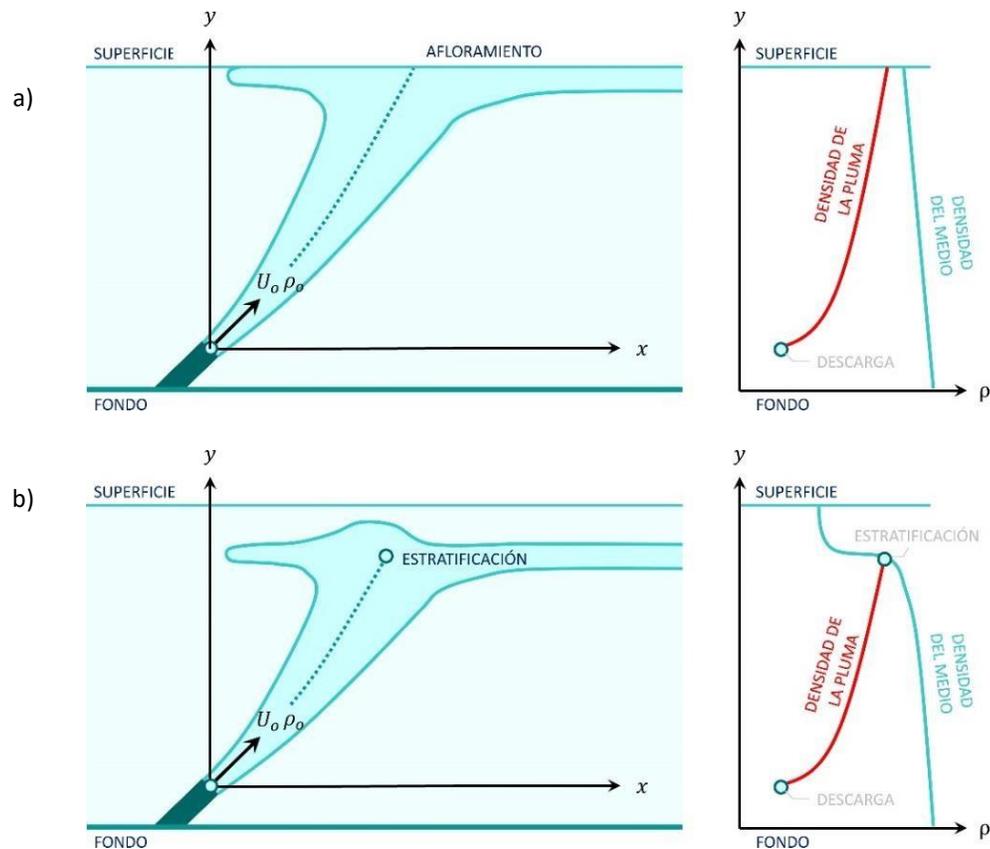
Con el objeto de caracterizar la estructura vertical del medio receptor, es necesario medir perfiles verticales de velocidad y salinidad en diferentes estaciones, que permitan calcular la densidad en la columna de agua. Ello es necesario pues usualmente habrá estratificación máxima en verano y mínima en invierno (Figura 24). La estratificación es sensible para las plumas térmicas que tienden a quedar atrapadas en la picnoclina (capa que exhibe un cambio súbito en su densidad), cuando la densidad de la descarga se iguala a la del medio.

4.4 POSICIONAMIENTO DEL INSTRUMENTAL

El posicionamiento del instrumental utilizado se debiera realizar conforme a las especificaciones técnicas establecidas en la Publicación 3109 (SHOA, 2015) y en la Publicación 3201 (SHOA, 2019). El posicionamiento del instrumental deberá ser vinculado a la Red Geodésica Nacional. A objeto de dar continuidad al programa de monitoreo, se debe garantizar que la posición de los instrumentos de medición que se usan para calibrar y validar el modelo numérico sea replicada en el Programa de Vigilancia Ambiental.

³⁸ <https://ingenieriaoceanica.uv.cl/laboceano>

Figura 24: Descarga de boyantes positiva en condiciones a) no estratificadas y b) estratificadas.



4.5 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DEL MUESTREO

El muestreo debe capturar las fluctuaciones diarias y estacionales que definen un sistema en particular y, eventualmente, proyectar cómo estas afectarán el funcionamiento de la descarga durante su vida útil. En las etapas del monitoreo (Figura 20) las variables deben medirse en forma simultánea a objeto de caracterizar la hidrodinámica y los procesos de mezcla en el campos cercano y lejano en los escenarios estacionales más desfavorables ambientalmente. La Tabla 10 muestra los criterios de duración mínima de registros de campo para variables oceanográficas.

4.6 MEDICIÓN Y CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DIFUSIÓN TURBULENTA

El cálculo del coeficiente de difusión turbulenta se efectúa a partir de estudios de campo, en los cuales se utiliza un trazador. Su cálculo se incluye en la modelación de las plumas de descarga en el campo lejano. El procedimiento se efectúa vertiendo un trazador que puede ser visualizado desde la superficie (Figura 25). El crecimiento de la mancha en la medida que pasa el tiempo se utiliza para estimar el coeficiente de difusión turbulenta, de acuerdo a la teoría incluida en esta sección.

Tabla 10: Recomendaciones de criterios de duración mínima de registros de campo para variables oceanográficas.

Variable	Instrumento	Duración mínima
Temperatura del agua ⁽¹⁾	Termistor (puntual)	12 meses continuos
Temperatura del agua ⁽¹⁾	CTD (perfil vertical)	4 campañas ⁽³⁾
Salinidad ⁽²⁾	CTD (puntual)	12 meses continuos
Salinidad ⁽²⁾	CTD (perfil vertical)	4 campañas ⁽³⁾
Vientos	Anemómetros	12 meses continuos
Mareas	Mareógrafo	30 días continuos ⁽⁴⁾
Corrientes eulerianas	Correntómetro, ADCP	30 días continuos ⁽⁴⁾
Corrientes lagrangianas	Derivadores	2 campañas ⁽⁴⁾
Oleaje	Boya, ADCP	30 días continuos ⁽⁴⁾
Coeficiente de difusión	Trazadores	2 campañas ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Para plumas térmicas.

⁽²⁾ Para plumas salinas.

⁽³⁾ Las campañas deben ser efectuadas idealmente en las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera.

⁽⁴⁾ Las campañas deben ser efectuadas en las estaciones de verano e invierno.

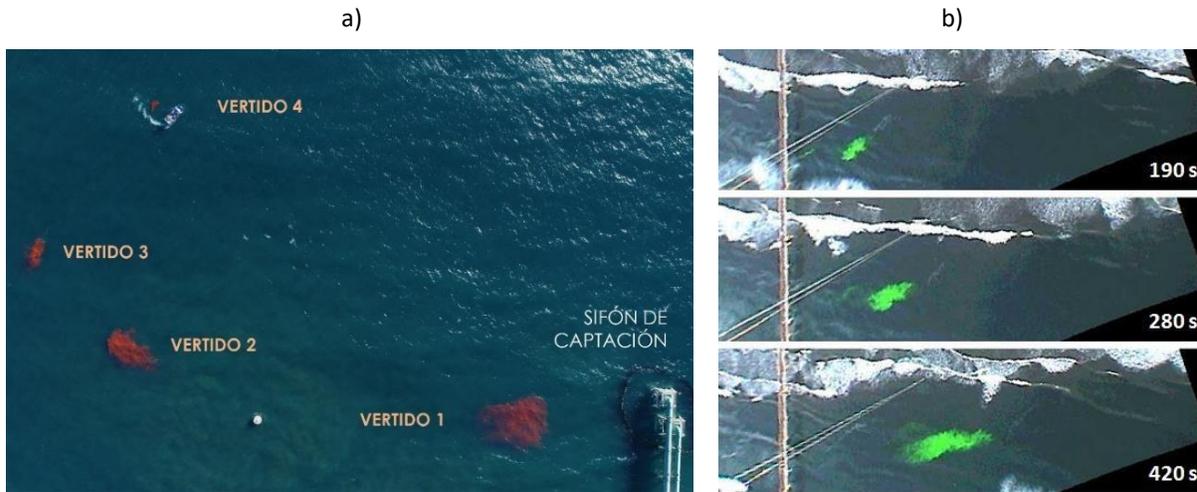
4.6.1 Uso de trazadores

Para caracterizar los procesos de advección y difusión en la superficie del mar, se pueden usar trazadores líquidos o derivadores, siendo los primeros de uso común en la práctica nacional. Dentro de los primeros, destacan los trazadores del tipo fluoresceína y la rodamina.

- La fluoresceína es una sustancia colorante orgánica insoluble, perteneciente al grupo de las xantinas, que produce un color fluorescente verde intenso en soluciones alcalinas (con pH mayor a 7). Cuando se expone a la luz, la fluorescencia absorbe ciertas longitudes de onda y emite luz fluorescente de longitud de onda larga. La fluoresceína es ampliamente usada en mecánica de fluidos experimental como trazador, pero no se utiliza convencionalmente en la práctica nacional.
- La rodamina es un compuesto orgánico heterocíclico fluorescente, basado en el xanteno. Dentro de esta familia de sustancias, la de uso común es la Rodamina WT, que es una solución trazadora de amplio rango, tanto en pH como en salinidad, que, por su intensa coloración roja, permite realizar estudios en aguas marinas y continental (Runkel, 2015). Posee baja toxicidad para los organismos USEPA (2020) y no representa un peligro para el ambiente (Rowinski and Charzanowski, 2010).

Cabe notar que cualquier uso de sustancias en el mar debe estar autorizado previamente por la Autoridad Marítima. En particular, para la Rodamina WT se sugiere revisar el "Protocolo para la utilización del trazador químico Rodamina WT en actividades de fiscalización Ambiental" (D.G.T.M. Y M.M. ORD. 12600/05/608).

Figura 25: Vertido de a) rodamina vertida desde una embarcación y monitoreada con dron (Gentileza de Ecotecnos) y b) fluoresceína vertida desde un muelle y monitoreada desde un globo sonda (Takewaka et al., 2003).



La detección de la mancha puede efectuarse desde la misma embarcación, o mediante vehículos aéreos no tripulados como globos sonda (Takewaka et al., 2003) o drones (Tauro et al., 2016; Powers et al., 2018), siendo estos últimos más adecuados pues permiten un campo visual estacionario. También se pueden usar imágenes satelitales para la detección de plumas de mayor escala (e.g. Islam et al., 2007), pero su resolución en la actualidad, es insuficiente para los propósitos contemplados en estos lineamientos.

4.6.2 Fundamento teórico

Los procesos de mezcla son esencialmente tridimensionales y pueden ser modelados mediante la ecuación de advección-difusión-reacción en coordenadas cartesianas (x, y, z) :

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{\partial C}{\partial t}}_{\text{VARIACIÓN LOCAL}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(uC) + \frac{\partial}{\partial y}(vC) + \frac{\partial}{\partial z}(wC)}_{\text{ADVECCIÓN}} \\
 = & \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right)}_{\text{DIFUSIÓN TURBULENTA}} + \underbrace{R(C)}_{\text{REACCIÓN}}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Donde $C(x, y, z, t)$ es la concentración puntual e instantánea de un constituyente, $V = (u, v, w)$ es el campo de velocidades, $D = (D_x, D_y, D_z)$ es el coeficiente de difusión turbulenta y $R(C)$ representa la reacción, que puede ser modelada de diferentes formas. Para la modelación de procesos de mezcla, se suele utilizar un trazador vertido en superficie (minimizando el momentum vertical) desde una embarcación. La mancha superficial resultante es monitoreada desde la misma embarcación de la cual fue vertida, mediante dron u otra técnica de percepción remota. El objetivo de este seguimiento es permitir una estimación del coeficiente de difusión turbulenta, que será utilizado en la modelación del campo lejano de sustancias. Para estos efectos, la expresión (18) puede simplificarse bajo los siguientes supuestos:

- Para las escalas de tiempo asociadas a estas mediciones, se asume que el trazador no es reactiva (es decir, conserva su masa sin decaimiento o aumento de la misma), por lo que se asume $R(C) = 0$.

- No existe una mezcla vertical que hunda una porción significativa de rodamina a media profundidad. Este supuesto es válido en cuerpos de agua poco turbulentos -sobre todo aquellos donde hay estratificación- como las bahías o costas abiertas lejos de la zona rompiente. Ejemplos donde este supuesto no es válido es en canales mareales (como el canal Chacao), en desembocaduras o en la zona de rompiente.
- Dado que la medición es superficial, no es posible medir la concentración puntual e instantánea en el espacio tridimensional $C(x, y, z, t)$. Si se cumplen los dos supuestos anteriores, se puede reducir la ecuación tridimensional (1) por una ecuación bidimensional en planta, donde se mide la concentración superficial $C_s(x, y, z = 0, t)$.
- Se asume que el proceso de mezcla es isotrópico ($D_x = D_y = D$) y que el coeficiente de difusión es uniforme en el espacio ($\partial D / \partial x = \partial D / \partial y = 0$).

Bajo estos supuestos, la expresión (18) se expresa como:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uC_s) + \frac{\partial}{\partial y}(vC_s) = D \left(\frac{\partial^2 C_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_s}{\partial y^2} \right) \quad (19)$$

Si se efectúa un seguimiento de la mancha a nivel superficial³⁹, se puede simplificar la expresión anterior al sistema de referencia de la misma (x_m, y_m) donde la advección no existe.

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C_s}{\partial x_m^2} + \frac{\partial^2 C_s}{\partial y_m^2} \right) \quad (20)$$

Esta expresión da pie a la medición del coeficiente de difusión usando trazadores superficiales. El procedimiento es verter el trazador en la superficie y seguir la mancha con una embarcación. La solución para una fuente puntual e instantánea es

$$C_s(x_m, y_m, t) = \frac{M}{4\pi\sqrt{D_x D_y}} e^{-\left(\frac{x_m^2}{4D_x t} + \frac{y_m^2}{4D_y t}\right)} \quad (21)$$

Por otra parte, la función de densidad de probabilidad gaussiana para el caso bidimensional es

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right)} \quad (22)$$

Comparando ambas expresiones se obtienen las relaciones

$$4\pi\sqrt{D_x D_y} = 2\pi\sigma_x\sigma_y, \quad \mu_x = 0, \quad \mu_y = 0 \quad (23)$$

Si el proceso de difusión se asume isotrópico, los coeficientes de difusión en ambas direcciones son idénticos. Por

³⁹ Esta ecuación es válida para procesos de mezcla superficiales o en aquellos en que la estratificación. En casos donde hay una clara estratificación, se puede asumir que la escala horizontal de la pluma de descarga es mucho menor que su espesor y por tanto aproximar las ecuaciones a dos dimensiones horizontales donde todas las variables son evaluadas en la profundidad de estratificación. Este es el caso de los vertidos de petróleo, que tienen su fase líquida concentrada en la superficie, o las descargas de aguas servidas en el campo lejano, que usualmente se encuentran a cierta profundidad para evitar que el afloramiento del material orgánico.

tanto, la primera relación se reduce a

$$2D = \sigma^2. \quad (23)$$

Esta expresión es útil para estimar los coeficientes de difusión del contaminante en el agua. La relación entre el cuadrado de la desviación estándar de la concentración y el tiempo es lineal, lo que significa que mediante la medición de las dimensiones de la mancha, el coeficiente de difusión puede calcularse mediante el ajuste de una regresión lineal a una serie de mediciones de (σ^2, t) , cuya pendiente es $2D$.

Para calcular las dimensiones de la pluma debe hacerse un supuesto práctico, ya que la dimensión típica de la mancha se obtiene por medio de observaciones visuales con un error inherente a la definición del contorno. Se asume, por ejemplo, que la distancia entre el borde y el centro de la pluma (esto es el radio característico R) está relacionada con la desviación estándar σ mediante la expresión $R = 2\sigma$. Para obtener el radio, se mide el área de la mancha A y se obtiene el diámetro equivalente mediante la expresión $R = \sqrt{A/\pi}$, suponiendo que la zona es circular. Es claro que estos supuestos son arbitrarios y afectan el valor del coeficiente de difusión; no obstante, dan un orden de magnitud de este parámetro. Asimismo, este procedimiento no es válido para procesos de mezcla que se dan en el espacio tridimensional, ni en flujos cuasi bidimensionales, pero que experimentan afloramientos de agua debido a vórtices.

4.6.3 Información a reportar sobre el coeficiente de difusión turbulenta

Según el Protocolo para la utilización del trazador químico Rodamina WT en actividades de fiscalización ambiental (SMA, 2020), se debe elaborar una representación gráfica georreferenciada que dé cuenta del desplazamiento del efluente de la unidad fiscalizable en el cuerpo receptor identificando, al menos, lo siguiente: unidad fiscalizable, emisario submarino, punto de descarga autorizado, zona de protección litoral y zona con presencia de Rodamina WT.

4.6.4 Información a reportar sobre el programa de monitoreo

Se debe incluir toda la información del monitoreo de vientos, oleaje, marea y corriente que permita efectuar un seguimiento de los cálculos. La Tabla 11 sintetiza lo solicitado en la Pub. 3201 (SHOAa, 2019). En el caso de que se utilicen otras metodologías (además de las indicadas anteriormente), previamente autorizadas por el SHOA, se deberá presentar toda aquella información, digital e impresa (gráficos, perfiles, tablas, etc.) con el mayor detalle posible, con la finalidad de efectuar una completa revisión de los resultados.

Tabla 11: Síntesis de información de un monitoreo, adaptado de Pub. 3201 (SHOAA, 2019)

Item	Viento	Oleaje	Marea	Corriente
Características técnicas del instrumental	✓	✓	✓	✓
Posicionamiento del instrumental (coordenadas UTM, dátum)	✓	✓	✓	✓
Certificados de calibración del instrumental	✓	✓	✓	✓
Corrección magnética utilizada y fuente de la cual fue extraída	✓	✓		✓
Registro de nivelación diferencial efectuada a las cotas de marea			✓	
Monografías de las cotas de marea			✓	
Control al funcionamiento del instrumental, (lecturas comparativas)			✓	
Huso horario empleado en los registros	✓	✓	✓	✓
Intervalo y períodos de muestreo	✓	✓	✓	✓
Fuentes de datos e información adicionales	✓	✓	✓	
Metodología del control de calidad de los registros	✓			
Metodologías de procesamiento y análisis efectuados	✓			
Descripción del software de procesamiento de datos		✓		
Resultados del procesamiento de datos	✓	✓	✓	✓
Conclusiones del procesamiento de datos	✓	✓	✓	✓
Referencias bibliográficas	✓	✓	✓	✓
Memorias de cálculo	✓	✓	✓	✓
Parámetros de extracción de los datos registrados por el equipo	✓	✓	✓	✓
Registros instrumentales (crudos) en formato ASCII	✓	✓	✓	✓
Registros instrumentales (procesados) en formato ASCII	✓	✓	✓	✓

5 ANEXOS

5.1 ACRÓNIMOS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DIRECTEMAR	Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante
DIRINMAR	Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
ELBOF	Estudios de Línea de Base de tipo Oceanografía Física
LB	Línea de base
LES	Large Eddy Simulations
LIF	Laser-Induced Fluorescence
MMA	Ministerio del Medio Ambiente
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds-averaged Navier–Stokes equations
RMS	Error medio cuadrático
SEA	Sistema de Evaluación Ambiental
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada

5.2 CONTENIDOS DE UN INFORME DE MONITOREO Y MODELACIÓN

El informe o capítulo que describe el programa de monitoreo deberá contar con, a lo menos, los siguientes elementos:

- Descripción general del proyecto.
- Descripción de las características oceanográficas del área de emplazamiento emisario
- Descripción de las concesiones marítimas, destinaciones marítimas, áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (AMERBs), áreas aptas para la acuicultura (AAA), áreas marinas costeras protegidas, otras figuras de protección o sitio prioritarios ubicados en las cercanías del sitio.
- Descripción del sistema de tratamiento de aguas (procesos, régimen de operación, etc.)
- Descripción de las características geométricas del emisario (trazado, longitud, diámetro, sistema de difusores, etc.)
- Plano georreferenciado de la batimetría, incluyendo la ubicación del proyecto, de todo el instrumental utilizado en la campaña de monitoreo, los diferentes usos del cuerpo de agua (concesiones y destinaciones marítimas, áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos AMERB, áreas aptas para la acuicultura AAA, áreas marinas costeras) y Zona de Protección Litoral (Circular A-53/004, 3/dic/2012).
- Plano de las características geométricas del emisario (trazado, longitud, diámetro, sistema de difusores, etc.)
- Resoluciones SHOA relativas a los permisos de investigación científico-tecnológica o a aquellas con valor hidrográfico u oceanográfico correspondiente.
- Informe técnico y resolución de determinación del ancho de la Zona de Protección Litoral.
- Información del instrumental indicada en la Tabla 11.

6 REFERENCIAS

ANZECC (1992). Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters. National Water Quality Management Strategy.

Abessi, O., & Roberts, P. J. (2014). Multiport diffusers for dense discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(8), 04014032.

Abessi, O., & Roberts, P. J. (2015). Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015033.

Ahmad, N., & Baddour, R. E. (2014). A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments. *Ocean & coastal management*, 87, 1-7.

Amat, J. (2016). Introducción a la regresión lineal múltiple.

Beyá, J.; Álvarez, M.; Gallardo, A.; Hidalgo, H.; Aguirre, C.; Valdivia, J.; Parra, C.; Méndez, L.; Contreras, C.; Winckler, P.; & Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Cáceres, M., Valle-Levinson, A., Sepúlveda, H. H., & Holderied, K. (2002). Transverse variability of flow and density in a Chilean fjord. *Continental Shelf Research*, 22(11-13), 1683-1698.

Castillo, M. I., Cifuentes, U., Pizarro, O., Djurfeldt, L., & Cáceres, M. (2016). Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with a deep sill: the Reloncaví fjord, Chile. *Ocean Science*, 12(2).

Choi, K. W., Lai, C. C., & Lee, J. H. (2015). Mixing in the intermediate field of dense jets in cross currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(1), 04015041.

Cortés, I. y Silva, A. (2011). Armonización de criterios de muestreo y análisis tendientes a la modelación de la calidad ambiental de estuarios y bahías, elaborado por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA) para el Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Santiago de Chile.

DOP (2013). Guía para el diseño, construcción, operación y conservación de Obras Marítimas y Costeras”, Dirección de Obras Portuarias 7 Ministerio de Obras Públicas / Chile. Primera Edición.

D.S. (M) N°711 de 1975, Reglamento de Control de las Investigaciones Científicas y Tecnológicas Marinas efectuadas en la Zona Marítima de jurisdicción nacional.

D.S. 90 (MINSEGPRES) N° 90. 2000. Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales.

DIRECTEMAR (2012). Resolución D.G.T.M. Y M.M. Ord. N° 12600/315 Vrs. 2021. Circular D.G.T.M. Y M.M. Ord. N° A-53/004, “Establece procedimientos para fijar ancho de la Zona de Protección Litoral (ZPL)”, Armada de Chile. Dirección General del Territorio Marítimo y de marina Mercante.

DIRINMAR (2015). Directrices para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima.

Doneker, R. L., Jirka, G. H. (2007). CORMIX User Manual: A Hydrodynamic Mixing Zone Model and Decision Support System for Pollutant Discharges into Surface Waters. EPA-823-K-07-001.

Foreman (1977). Manual for tide heights and prediction.

Gungor, E., & Roberts, P. J. (2009). Experimental studies on vertical dense jets in a flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(11), 935-948.

Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32:135-154.

Herrera, J. (2017). Estudio de la pluma de descarga generada por un emisario submarino bajo condiciones medias y extremas en la bahía de Coquimbo, IV región, Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico. Universidad de Valparaíso.

Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.

Horsburgh, K., & De Vries, H. (2011). *Guide to storm surge forecasting*. WMO-No. 1076. World Meteorological Organization. ISBN 978-92-63-11076-3.

Islam, A., Wang, L., Smith, C., Reddy, R., Lewis, A., & Smith, A. (2007). Evaluation of satellite remote sensing for operational monitoring of sediment plumes produced by dredging at Hay Point, Queensland, Australia. *Journal of applied remote sensing*, 1(1), 011506.

Jenkins, S., Paduan, J. Roberts, P., Schlenk, D., Weis, J. (2012). *Management of Brine Discharges to Coastal Waters. Recommendations of a Science Advisory Panel Submitted at the request of the State Water Resources Control Board by the Southern California Coastal Water Research Project*. Costa Mesa, CA. Technical Report 694.

Jirka, G. H., & Domeker, R. L. (1991a). Hydrodynamic classification of submerged single-port discharges. *Journal of hydraulic engineering*, 117(9), 1095-1112.

Jirka, G. H., & Akar, P. J. (1991b). Hydrodynamic classification of submerged multiport-diffuser discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(9), 1113-1128.

Lagardère, J. P., Bégout, M. L., Lafaye, J. Y., & Villotte, J. P. (1994). Influence of wind-produced noise on orientation in the sole (*Solea solea*). *Canadian journal of fisheries and aquatic sciences*, 51(6), 1258-1264.

Lattemann, S., & Amy, G. (2013). Marine monitoring surveys for desalination plants—a critical review. *Desalination and Water Treatment*, 51(1-3), 233-245.

Ley N°19.300 de 1994, Sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y su modificación, Ley N° 20417 de 2010, que crea el Ministerio de Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia de Medio Ambiente y su Ley Orgánica.

Liu, Y., Wu, Z., Zhao, D., Zhou, J., Shang, J., Wang, M., ... & Luo, X. (2019). Construction of High-Resolution Bathymetric Dataset for the Mariana Trench. *IEEE Access*, 7, 142441-142450.

Longuet-Higgins, M. S. (1970a). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. *Journal of Geophysical Research*, 75(33), 6778-6789.

Longuet-Higgins, M. S. (1970b). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves: 1. *Journal of Geophysical Research*, 75(33), 6790-6801.

Ludwig, R. G. (1988). Evaluación del Impacto Ambiental. Ubicación y diseño de emisarios submarinos. Informe Número 43 De Marc. Un Documento De EIA. Centro Panamericano De Ingeniería Sanitaria Y Ciencias Del Ambiente (CEPIS). Traducido del inglés por Henry Salas. ISBN 0905918398

IHA y CEDEX (2011). Metodología de diseño de los vertidos al mar de la salmuera, para reducir el impacto ambiental de las plantas desalinizadoras (MEDVSA). Instituto Ambiental de Hidráulica de Cantabria y el Centro de Estudios de Puertos y Costas.

Lykkebo Petersen, K. (2017). Impacts of seawater desalination brine on coastal environments. MSc. In Earth Sciences thesis. University of California, Santa Cruz (p.10).

Ma, Y., Xu, N., Liu, Z., Yang, B., Yang, F., Wang, X. H., & Li, S. (2020). Satellite-derived bathymetry using the ICESat-2 lidar and Sentinel-2 imagery datasets. *Remote Sensing of Environment*, 250, 112047.

MMA (2014). Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. DS (MMA) N°40 de 2013.

Mohammadian, A., Gildeh, H. K., & Nistor, I. (2020). CFD modeling of effluent discharges: a review of past numerical studies. *Water*, 12(3), 856.

Montoya, L. J., & Toro, M. (2006). Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia. *Avances en recursos hidráulicos*, (13).

MOPU (1988). Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo «BOE» núm. 209. BOE-A-1988-20883.

Palacio, C.A., y Toro, F.M. (2002). Metodología para la Validación de un Modelo Hidrodinámico Específico en Zonas Intermareales. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 9: 37•46.

Palomar, P., Lara, J. L., Losada, I. J. (2012). Near field brine discharge modelling Part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, vol. 290, pp. 28 - 42.

Parrish, C. E., Magruder, L. A., Neuenschwander, A. L., Forfinski-Sarkozi, N., Alonzo, M., & Jasinski, M. (2019). Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. *Remote Sensing*, 11(14), 1634.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937.

Powers, C., Hanlon, R., & Schmale, D. G. (2018). Tracking of a fluorescent dye in a freshwater lake with an unmanned surface vehicle and an unmanned aircraft system. *Remote Sensing*, 10(1), 81.

Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.

- Roberts, P. J., Snyder, W. H., Baumgartner, D. J. (1989a). Ocean Outfalls. I: Submerged Wastefield Formation. *J. Hydraul. Eng.*, 115, 1–25.
- Roberts, P. J., Snyder, W. H., Baumgartner, D. J. (1989b). Ocean Outfalls. II: Spatial Evolution of Submerged Wastefield. *J. Hydraul. Eng.*, 115, 26–48.
- Roberts, P. J., Snyder, W. H., Baumgartner, D. J. (1989c). Ocean Outfalls III: Effect of Diffuser Design on Submerged Wastefield. *J. Hydraul. Eng.*, 115, 49–70.
- Roberts, P. J., Tian, X., & Jung, Y. (2010). Physical Model Study of an Alternating Diffuser for Thermal Discharge. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(9), 1027-1036.
- Roberts, P. J., & Tian, X. (2000). Three-dimensional imaging of stratified plume flows. In: 5th International Conference on Stratified Flows, Vancouver, British Columbia, July 10–13, 2000,
- Roberts, P. J., & Tian, X. (2004). New experimental techniques for validation of marine discharge models. *Environmental modelling & software*, 19(7-8), 691-699.
- Roberts, D.A., E.L. Johnston, N.A. Knott. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review of published studies. *Water Research* 44:5117-5128.
- Robinson, D., Wood, M., Piggott, M., Gorman, G. (2015). CFD modelling of marine discharge mixing and dispersion. *J. Appl. Water Eng. Res.* 4, 152–162.
- Rowinski, P. and M. Charzanowski (2010). Influence of selected Fluorescent Dyes on small aquatic Organisms. *Acta Geophysyca*.
- Runkel (2015). On the use of rhodamine WT for the characterization of stream hydrodynamics and transient storage.
- Salcedo-Castro, J., Saldías, G. S., Saavedra, F., & Donoso, D. (2020). Climatology of Maipo and Rapel river plumes off Central Chile from numerical simulations. *Regional Studies in Marine Science*, 38, 101389.
- Sánchez-Lizaso, J., J. Romero, J. Ruiz, E. Gacia, J. Buceta, O. Invers, Y. Torquemada, J. Mas, A. Ruiz-Mateo, and M. Manzanera. (2008). Salinity tolerance of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*: Recommendations to minimize the impact of brine discharges from desalination plants. *Desalination* 221:602- 607.
- SEA (2017). Guía para la descripción del área de influencia “Área de influencia en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental”, Servicio de Evaluación Ambiental.
- Sepúlveda, T. V. (2005). Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. Instituto Nacional de Ecología.
- SHOA (1992). Glosario de marea y corrientes. Pub. 3013., 2ª Ed.
- SHOA (1999). Método Oficial para el Cálculo de los Valores no Armónicos de la Marea. Pub. 3202. 2ª Ed.
- SHOA (2015). Especificaciones Técnicas para el empleo y aplicación del Sistema de Posicionamiento Global en Trabajos Geodésicos o GPS Navegador Pub. 3009.

SHOA (2003) Instrucciones Hidrográficas N°5. Especificaciones técnicas para la ejecución de sondajes. Pub. 3105. 4ª Ed.

SHOA (2019). Especificaciones Técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Pub. 3201. 4ª Ed.

SHOA (2019b). Especificaciones Técnicas y Administrativas para la Ejecución de Batimetrías con Valor Hidrográfico. Pub. 3105. 5ª Ed.

SHOA (2019c). Instrucciones para la Determinación de la Playa y Terreno de Playa en la Costa del Litoral y en la Ribera de Lagos y Ríos. Pub. 3104. 5ª Ed.

SHOA (2005). Especificaciones Técnicas para el Empleo y Aplicación de Tecnología GPS. Pub. 3109. 3ª Ed.

SHOA (2020). Catálogo de cartas y publicaciones náuticas. Pub. 3000.

SMA (2020). Protocolo para la utilización del trazador químico Rodamina WT en actividades de fiscalización ambiental. Verdugo, R., Walker, P., Muñoz, M.I. y Rojo, C.

Takewaka, S., Misaki, S., & Nakamura, T. (2003). Dye diffusion experiment in a longshore current field. *Coastal Engineering Journal*, 45(03), 471-487.

Tauro, F., Porfiri, M., & Grimaldi, S. (2016). Surface flow measurements from drones. *Journal of Hydrology*, 540, 240-245.

USEPA (2020). Drinking Water Contaminant Candidate List (CCL) and Regulatory Determination.

Williams, J.J., & Esteves, L.S. (2017). Guidance on setup, calibration, and validation of hydrodynamic, wave, and sediment models for shelf seas and estuaries. *Advances in Civil Engineering*, 2017.

Winckler, P. (2021). Introducción al modelado de procesos costeros. Apuntes de clases. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso. Disponible en: www.researchgate.net/publication/326943060_Introduccion_al_modelado_de_procesos_costeros

Winckler, P., Mei, C. and Liu, P. (2013) Advective diffusion of contaminants in the surf zone. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean. ASCE*. Volume. 139, Number 6, pp. 139:437-454. November 1, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000196.

Zhao, L.; Chen, Z.; Lee, K. (2011). Modelling the dispersion of wastewater discharges from o shore outfalls: A review. *Environ. Rev.* 2011, 19, 107–120.