

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

**PRUEBAS EXPERIMENTALES DE LA GENERACIÓN AUTOMATIZADA DE  
GRILLAS NÚMERICAS NO ESTRUCTURADAS Y MODELACIÓN  
HIDRODINÁMICA CON POTENCIAL APLICACIÓN EN EMERGENCIAS  
MARÍTIMAS**

**2023**

**PABLO CÓRDOVA.<sup>1</sup>**  
**RAÚL FLORES.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar de forma experimental la aplicación de algoritmos de automatización desarrollados en Matlab®, para la generación de grillas triangulares no estructuradas de forma rápida y eficiente. Se probaron diferentes escenarios de bordes costeros complejos y la ejecución de un Modelo Hidrodinámico Local MHL (FVCOM), con la finalidad de evaluar su potencial uso en casos de emergencias marítimas. A partir de datos de Modelos Hidrodinámicos Globales MHG (HYCOM y MULTIOBS diario y horario) y locales (FVCOM), se modelaron las trayectorias de las boyas mediante el Modelo de Derivas de Partículas Múltiple MDP+. Para su validación, se tomaron en cuenta 5 boyas derivadoras superficiales del Observing System Monitoring Center (OSMC), perteneciente a Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) de la NOAA, con registros recientes en diferentes zonas oceánicas del mundo (4 Dominios). El desempeño de las trayectorias fue estimado mediante el índice NCLS y NCLSmod. El proceso de automatización permitió generar grillas y forzar el MHL para obtener los campos de corrientes eulerianas. El proceso automatizado completo, incluyendo el MHL, tardó entre 1 y 3 horas, alcanzando resoluciones máximas entre 10 y 40 m, permitiendo obtener campos de corrientes en zonas costeras y aguas interiores. Los resultados muestran un desempeño similar entre el MHL y los MHG, acertando direccionalmente en 3 de los 4 Dominios. Los mayores desempeños fueron registrados para FVCOM en el Dominio 1 (costa oriental de Centroamérica), para MULTIOBS diario en el Dominio 3 (costa occidental de África), y para MULTIOBS horario en los Dominios 2 (costa Sur Australiana), y 4 (costa Sur austral de Suramérica).

---

<sup>1</sup> Encargado de Laboratorio (LabOcéano), Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso - email: [pablo.cordovam@uv.cl](mailto:pablo.cordovam@uv.cl)

<sup>2</sup> Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María - email: [rflores@usm.cl](mailto:rflores@usm.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

La modelación numérica es un aspecto crítico de la investigación científica moderna, contemplando un rango diverso de aplicaciones, desde la implementación de modelos numéricos a la representación gráfica de fenómenos físicos complejos (Engwirda, 2014). Además, la modelación hidrodinámica aplicada a zonas costeras es una de las herramientas más efectivas aplicadas a la reconstrucción de casos históricos, análisis y reanálisis de escenarios, pronóstico a corto plazo y proyección climática de escenarios futuros (Klingbeil *et al.*, 2018).

En la última década, los avances relacionados a la aplicación de la modelación hidrodinámica en el campo de las emergencias marítimas han tomado especial relevancia. Por ejemplo, Chen *et al.* (2012b), utilizó el modelo FVCOM (Finite-Volumen Community Ocean Model) acoplado al modelo atmosférico WRF (Weather Research and Forecasting Model) para estimar la ubicación del accidente del avión Air France 447, accidentado en junio de 2009 en el Océano Atlántico Ecuatorial. Cho *et al.* (2014), por su parte, desarrolló y validó un sistema operativo de búsqueda y rescate marítimo para el mar Amarillo y mares este y sur de China, utilizando un acople entre el modelo hidrodinámico MOHID y el modelo atmosférico WRF. Révelard *et al.* (2021) recientemente propuso una metodología para medir el desempeño de las simulaciones lagrangianas y su aplicación en el servicio de clasificación de datos en tiempo real como sistema integrado de soporte de decisiones ante emergencias SAR de la península Ibérica (IBISAR <http://www.ibisar.es/es/>). Otros sistemas, como el desarrollado por Serra *et al.* (2020), buscan optimizar el proceso de búsqueda mediante la obtención de información relevante a partir de la interpretación de las OECSs (Objective Eulerian Coherent Structures) y la estimación de regiones de acumulación de objetos flotantes en superficie o TRAPs (TRAnsient Attracting Profiles).

Particularmente en Chile, las autoridades encargadas de las emergencias marítimas utilizan softwares tales como OILMAP y SARMAP (RPS Group), para predecir el comportamiento de elementos flotantes en el mar. Dichos softwares son herramientas potentes y operativas, sin embargo, su respuesta depende directamente de modelos globales de amplia cobertura y baja resolución espacial y temporal. Resolver el campo de corrientes con una alta resolución espacial y temporal es un elemento fundamental cuando se atiende una emergencia en zonas costeras o aguas interiores, donde la batimetría y orografía del área se convierten en un factor relevante como condiciones de borde. Cordova & Flores (2022), realizaron un análisis crítico sobre el uso de modelos globales y locales de alta resolución (FVCOM), para estimar la trayectoria de elementos derivados del accidente del avión acontecido el 2 de septiembre del 2011 en las cercanías del archipiélago de Juan Fernández. Entre sus resultados, observaron una mejora en la variabilidad y distribución de las trayectorias modeladas a partir de FVCOM al ser comparadas a MHG y las trayectorias de derivadores medidos y hallazgos del accidente.

La modelación computacional se utiliza una representación discreta de la geometría de un objeto en un dominio determinado, de forma tal que cada elemento se agrupa en un mosaico formando una grilla de elementos y nodos simples en el espacio. La flexibilidad geométrica de dichos elementos depende del método numérico utilizado, siendo el método de elementos finitos el que permite una mayor flexibilidad (Chen *et al.*, 2003), empleando, por ejemplo, grillas triangulares de tamaño arbitrario que pueden adaptarse a la forma irregular de bordes costeros de orografía compleja. En este orden, Chen *et al.* (2003), desarrolló un modelo hidrodinámico tridimensional (FVCOM), utilizando el método de volúmenes finitos (Dick 1994), donde las ecuaciones de gobierno del fluido se expresaron en términos de conservación de momentum, masa y energía en unidad de volumen.

En dicho estudio, se obtuvieron mejores simulaciones de la marea y corrientes residuales, respecto al modelo de diferencias finitas ECOM-si, especialmente en zonas cercanas a costa y en constricciones orográficas (Chen *et al.*, 2003). Esto último, permite comprender el potencial que tienen herramientas tales como FVCOM, para aumentar la resolución espacial y temporal de las corrientes y mareas en zonas costeras, en un proceso comúnmente denominado Downscaling (Cordova & Flores, 2022). Sin embargo, la estabilidad de los métodos numéricos utilizados es aún dependiente de la correcta configuración de la grilla numérica, el mínimo espaciado entre nodos y el tiempo de resolución interna del modelo, situación que constituye un desafío cuando se desea aplicar este tipo de herramientas en casos de emergencias marítimas, donde el tiempo de respuesta y pronóstico de escenarios es crucial para el correcto manejo de la emergencia.

El objetivo del presente trabajo es la generación de un sistema automatizado para la generación de grillas no estructuradas, acopladas a un MHL (FVCOM), para obtener campos de corrientes de alta resolución en zonas costeras y aguas interiores, en cualquier parte del océano. Las pruebas experimentales realizadas, son un primer avance hacia la obtención de resultados operativos en términos de la atención a las emergencias marítimas, los que consideran, por ejemplo, la robustez del sistema y la velocidad y desempeño de respuesta. El presente estudio está organizado de la siguiente manera: Metodología, en la cual se detalla la selección de Dominios, proceso automatizado de generación de grillas, configuración de FVCOM, configuración del MDP+ y medidas de desempeño; Resultados, donde se evaluará el desempeño de las trayectorias modeladas respecto a las observadas; Discusión, en la que se evaluará el proceso de generación de grillas automatizadas y su potencial uso en emergencias marítimas; y la bibliografía utilizada.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo contempló una serie de procesos en línea para la generación de grillas no estructuradas y la ejecución de un MHL de forma automatizada, donde el único paso de selección manual fue el centro y radio del dominio requerido para la modelación hidrodinámica. Los centros y radio de dominio se escogieron en base a la selección de trayectorias de boyas derivadoras del Observing System Monitoring Center (OSMC) perteneciente a Pacific Marine Environmental Laboratory (PMEL) de la NOAA (Fig. 1), con el objetivo de ser utilizadas para medir el desempeño de las trayectorias a modelar.

Se estudiaron en total 4 dominios, denominados como: Dominio 1 ubicado en la costa oriental de Centroamérica y abarcó el sur de México, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica; Dominio 2 ubicado en la costa Sur Australiana y abarcó el sur de Australia y los alrededores de Tasmania; Dominio 3 ubicado en la costa occidental de África y abarcó Kenia, Tanzania y Mozambique; y el Dominio 4 ubicado en la costa Sur Suramérica y abarcó la zona sur austral de Chile y Argentina (Fig. 1).

Una vez conocidas las áreas de comparación, basadas en la existencia de derivadores del OSMC, se procedió a realizar la descarga de datos de Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG), para cada una de dichas zonas (Fig. 1). Se utilizaron los datos de pronóstico del MHG GOFS 3.1 (Chassignet *et al.*, 2009) (identificado como HYCOM) del Centro de Estudios de Predicción Océano-Atmosférico (COAPS), de Estados Unidos. La resolución espacial y temporal del modelo GOFS 3.1 es de  $0.08^\circ$  y 3 horas, respectivamente. También fueron utilizados los datos de reanálisis del MHG MULTIOBS\_015\_004 (Rio *et al.*, 2014), modelo geostrófico que integra la corriente de Ekman en superficie. Dicho modelo es

generado por el Centro de Producción CLS (MULTIOBS-CLS-TOULOUSE-FR) y descargados desde el sistema de monitoreo ambiental COPERNICUS de la Unión Europea. La resolución espacial y temporal resultante de producto MULTIOBS es de  $0.25^\circ$  y 3 horas, respectivamente.

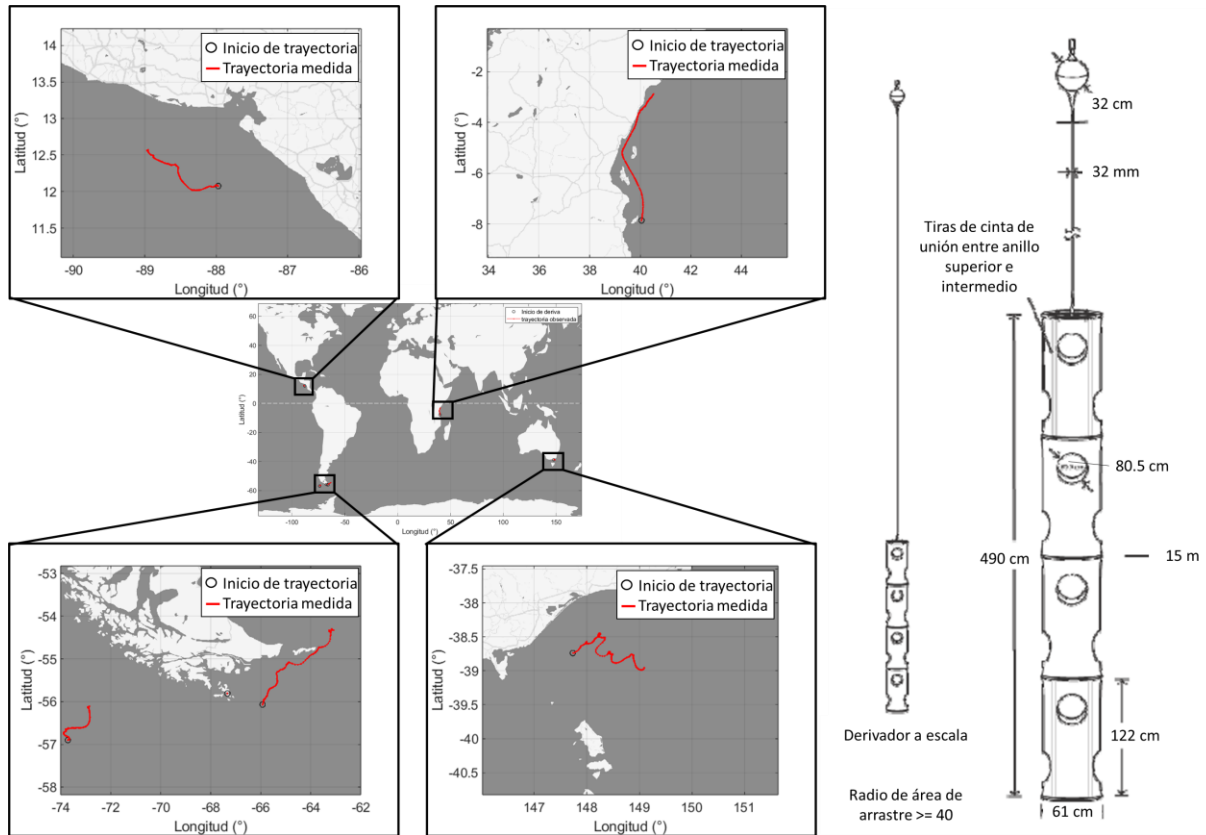


Figura 1. Áreas de análisis escogidas en base a la presencia de derivadores superficiales del OSMC.

Una vez conocidas las áreas de comparación, basadas en la existencia de derivadores del OSMC, se procedió a realizar la descarga de datos de Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG), para cada una de dichas zonas (Fig. 1). Se utilizaron los datos de pronóstico del MHG GOFS 3.1 (Chassignet *et al.*, 2009) (identificado como HYCOM) del Centro de Estudios de Predicción Océano-Atmosférico (COAPS), de Estados Unidos. La resolución espacial y temporal del modelo GOFS 3.1 es de  $0.08^\circ$  y 3 horas, respectivamente. También fueron utilizados los datos de reanálisis del MHG MULTIOBS\_015\_004 (Rio *et al.*, 2014), modelo geostrofico que integra la corriente de Ekman en superficie. Dicho modelo es generado por el Centro de Producción CLS (MULTIOBS-CLS-TOULOUSE-FR) y descargados desde el sistema de monitoreo ambiental COPERNICUS de la Unión Europea. La resolución espacial y temporal resultante de producto MULTIOBS es de  $0.25^\circ$  y 3 horas, respectivamente.

Para el modelado de las trayectorias de los derivadores se utilizaron los datos de campos de corrientes eulerianas provenientes de los modelos HYCOM y MULTIOBS, descritos anteriormente y, además, se incluyeron los campos U y V de la corriente resultantes del modelo FVCOM (Finite-Volumen Community Ocean Model). FVCOM es un modelo

tridimensional desarrollado originalmente por Chen *et al.*, (2003). Tiene la capacidad de resolver las ecuaciones primitivas de gobierno en coordenadas cartesianas y esféricas, en su forma integral, mediante el cálculo de flujos entre volúmenes de control triangulares no superpuestos.

La Figura 2 muestra el detalle gráfico del proceso de generación de grilla no estructurada automática. Los algoritmos desarrollados en Matlab®, se ejecutaron a partir del input de punto de interés y radio de dominio, definiendo el área de trabajo. Posterior a la selección del área, se ejecutaron procesos de lectura de datos de batimetría a partir del producto GEBCO (2023). La matriz de datos batimétricos fue convertida en una Matriz binaria (MB), tal como se muestra en la ecuación (1):

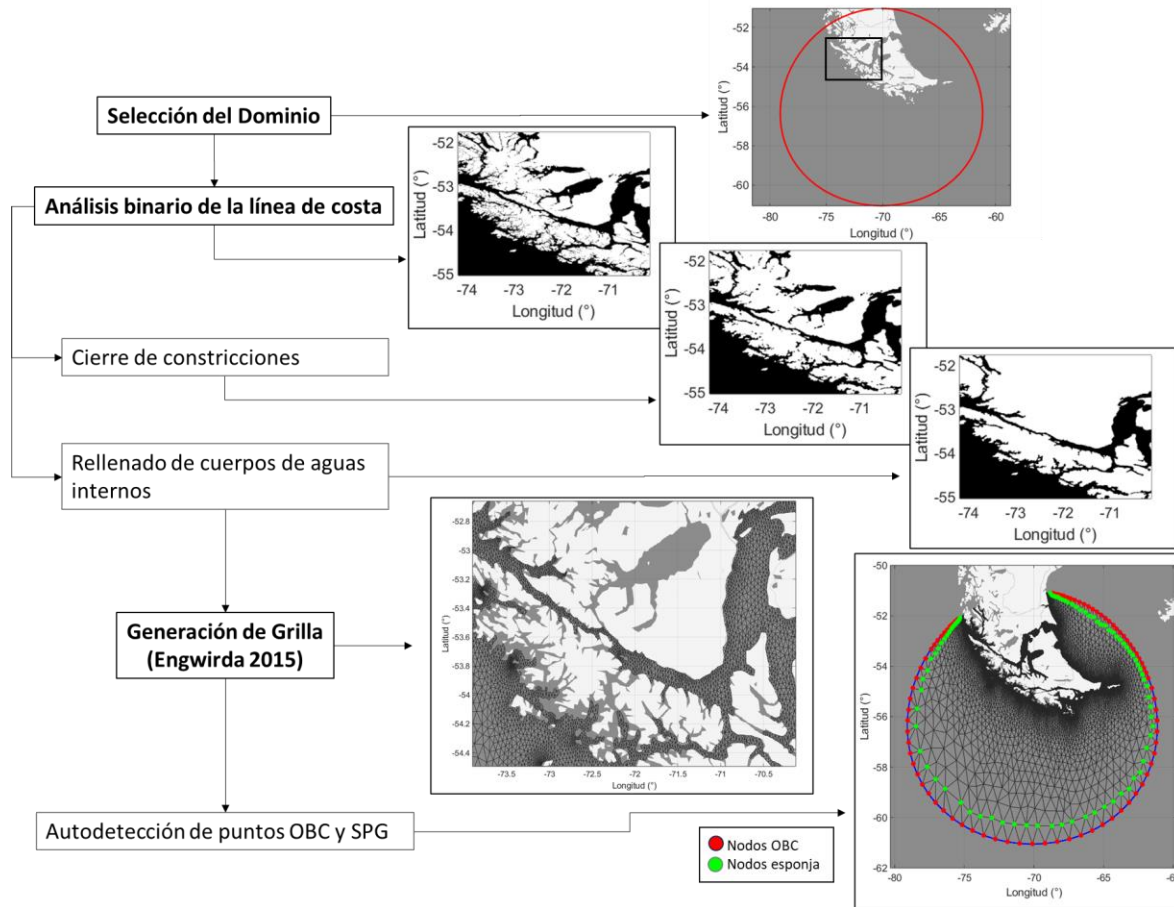


Figura 2. Diagrama de procesos relacionados al sistema de generación de grillas no estructuradas de forma automática.

$$Matriz\ binaria\ (MB) = \begin{cases} z=1; & \forall z > 0; \\ z=0; & \forall z \leq 0; \end{cases} \quad (1)$$

donde  $z$  corresponde a la profundidad/altura respectiva al dato de GEBCO (2023).

Para asegurar la estabilidad numérica de la grilla por generar, se utilizó un límite de inferior de tamaño de elementos no fijo, dependiente de la MB y el área geográfica en estudio. El primer paso se realizó mediante los algoritmos de procesamiento de imágenes descritos en Haralick & Shapiro (1992), con el objetivo de cerrar constricciones lo suficientemente

estrechas (~1.5 km) y rellenar los cuerpos de agua interiores. A partir de la MB resultante del proceso anterior, se determinó la frontera o línea de costa según los algoritmos propuestos por Gonzalez *et al.* (2004), la cual fue suavizada mediante un el filtro polinomial Savitzky-Golay de suavizado digital o filtro de suavizado de mínimos cuadrados (Orfanidis, 1996).

Una vez definido el dominio mediante el radio inicial, definida la línea de costa a través del procesamiento de la MB y con la misma base de datos batimétricos de GEBCO (2023), se generaron las grillas no estructuradas para cada una de las áreas de comparación (Fig. 3), utilizando los algoritmos descritos por Engwirda (2014). Posteriormente, se identificaron de forma automática los nodos de borde abierto OBC (Open Boundary Condition) y los nodos esponja. Estos últimos cumplen la función de evitar que la energía se acumule y propague desde la frontera del modelo hacia el interior (Chen *et al.*, 2013). Con toda la información recopilada, se construyeron los archivos inputs de entrada de FVCOM.

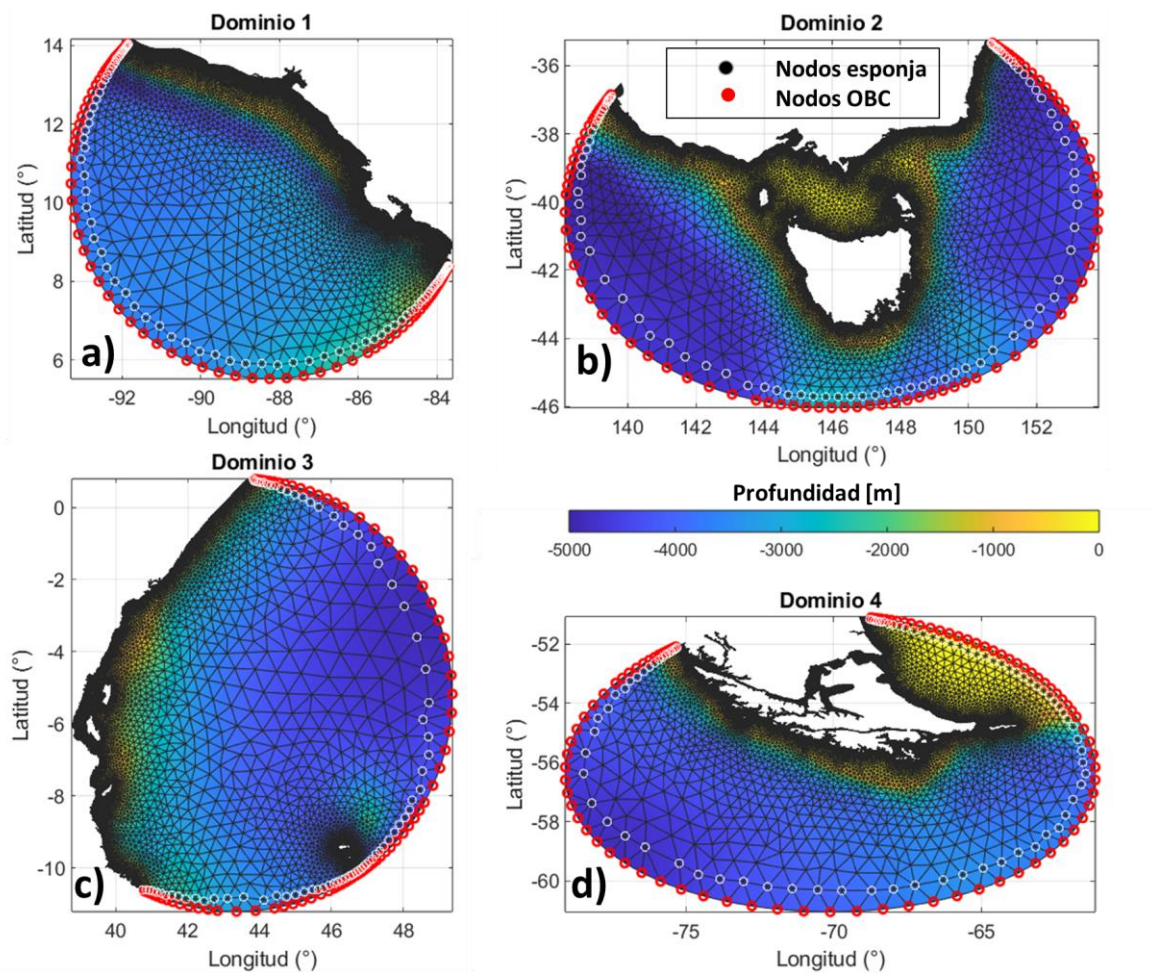


Figura 3. Grillas no estructuradas obtenidas de forma automática. a) Dominio 1; b) Dominio 2; c) Dominio 3; y d) Dominio 4.

El modelo FVCOM fue forzado con marea y viento de forma simultánea. La forzante de marea fue impuesta a nivel superficial, en cada nodo OBC de la grilla. Para dicha forzante se utilizaron datos locales de la amplitud y fase de las constituyentes armónicas M2, S2, N2, K2 y K1, obtenidas del modelo global de marea TPXO (Egbert & Erofeeva, 2002). Por su parte, el forzante

viento fue impuesto a nivel superficial en cada nodo de la grilla numérica. Los datos fueron extraídos del modelo atmosférico GFS (Saha *et al.*, 2014), del Centro Nacional de Predicción Medioambiental (NCEP).

Para resolver la turbulencia de pequeña escala, FVCOM fue configurado para utilizar el modelo de cierre turbulento del tipo  $q - ql$  Mellor & Yamada (1982) de nivel 2.5 (MY-2.5), donde  $q$  es la energía cinética turbulenta y  $l$  es la macroescala turbulenta. MY-2.5 en FVCOM incluye las funciones de estabilidad de los límites superior e inferior propuestas por Galperin *et al.* (1988).

Una vez obtenido los campos de corrientes eulerianas desde los MHG y el MHL (FVCOM), se estimaron las trayectorias modelo con punto de inicio asociado al primer dato de deriva de las boyas derivadoras observadas (Tabla 1). Para el seguimiento de los elementos, se utilizó el Modelo de Deriva de Partículas Múltiple MDP+, desarrollado por Cordova & Flores (2022), aplicando el método determinístico de resolución de la trayectoria. Para obtener la velocidad del objeto ( $\vec{v}_{ob}$ ) relativa a las velocidades de la corriente ( $\vec{v}_c$ ) y del viento ( $\vec{v}_a$ ) en cada punto analizado, se aplicó el balance de fuerzas de arrastre horizontales de la ecuación (2):

$$\frac{1}{2} C_{Dw} \rho_w A_S (\vec{v}_c - \vec{v}_{ob})^2 + \frac{1}{2} C_{Da} \rho_a A_E (\vec{v}_a - \vec{v}_{ob})^2 = 0 \quad (2)$$

donde:  $C_{Dw}$  es el coeficiente de arrastre del objeto bajo el agua;  $\rho_w$  es la densidad del agua;  $A_S$  es el área sumergida del objeto;  $\vec{v}_c$  es la velocidad de la corriente;  $C_{Da}$  es el coeficiente de arrastre del objeto emergido;  $\rho_a$  es la densidad del aire;  $A_E$  es el área emergida del objeto y  $\vec{v}_a$  es la velocidad del viento. Los valores de los parámetros antes descritos se detallan en la Tabla 1, considerando las configuraciones temporales del MHL y las dimensiones de las boyas del sistema OSMC.

Una vez definida la  $\vec{v}_{ob}$ , la ecuación (2) fue resuelta mediante el esquema numérico Explícito Runge-Kutta (ERK), de cuatro etapas y cuarto orden (Celia & Gray, 1992), y en dos dimensiones, transformando las coordenadas latitud y longitud en coordenadas UTM Norte y Este, respectivamente, y asumiendo una velocidad constante y continua para cada intervalo de tiempo, pero variable en el espacio. En la Tabla 1, se detallan las configuraciones asociadas a la selección de dominio, resoluciones de los MHG, configuraciones para FVCOM y configuraciones del MDP+.

El desempeño cuantitativo de las trayectorias obtenidas fue estimado a partir del cálculo de NCLS (Normalized Cumulative Lagrangian Separation) (Liu and Weisberg, 2011; Révelard *et al.*, 2021) y su versión modificada (Cordova & Flores 2022) (ecuaciones 3 y 4, respectivamente):

$$NCLS = \frac{\sum_{i=1}^N D_i}{\sum_{i=1}^N L_{obs\ i}} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$NCLS_{mod} = \frac{\sum_{i=1}^N (\frac{\alpha_i}{\alpha_{ref}} + D_i)}{\sum_{i=1}^N L_{obs\ i}} \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

donde  $N$  es el número de observaciones;  $D_i$  es la distancia puntual entre derivadores modelados y observados y  $L_{obs\ i}$  es el recorrido del derivador observado. La versión modificada

( $NCLS_{mod}$ ), integra la proporción angular  $\alpha_i/\alpha_{ref}$ , como cuantificador de la orientación de las trayectorias, donde  $\alpha_i$  es el ángulo formado entre las trayectorias observadas y modeladas respecto al origen de la deriva; y  $\alpha_{ref}$  es una cantidad angular de calibración que permite ajustar los órdenes de magnitud entre distancias y ángulos. En el presente trabajo, la proporción angular  $\alpha_i/\alpha_{ref}$  fue ajustada con un  $\alpha_{ref} = 1^\circ$ , considerando las escalas espaciales estudiadas.

Tabla 1. Configuraciones generales de dominio, MHG, FVCOM y MDP+ (\* Coeficientes de arrastre obtenidos a partir de la clasificación de Hoerner (1965), para cuerpos en interacción con flujos turbulentos ( $Re$  entre  $10^4$  y  $10^6$ ).

Dominio	N°		1	2	3	4
	Punto central	Longitud [°]		-88.2511	145.9839	43.7375
Latitud [°]			10.5266	-40.037	-6.5	-56.0447
Radio		[°]	6°	6°	6°	5°
Resolución de los MHG	HYCOM	Temporal	3 horas			
		Espacial	0,08 [°]			
	MULTIOBS	Temporal	3 horas - 1 día			
		Espacial	0,25 [°]			
FVCOM	N° de nodos		23658	12877	12670	15711
	Resolución espacial	Mínima	10 m	40 m	40 m	10 m
		Máxima	595 m	802 m	929 m	738 m
	Periodo de modelado	Inicio	25/06/2023	12/07/2023	16/07/2023	17/07/2023
		Término	08/07/2023	27/07/2023	25/07/2023	27/07/2023
		N° de días	13	15	9	10
		N° días de calentamiento	6	3	3	2
	dt interno	[s]	2 s	2 s	2 s	2 s
	Duración de modelado	[HH:MM]	03:13	02:11	01:06	01:31
	Perfil Cte de T y S	[° C y psu]	14° y 33 psu			
Rugosidad de fondo	[m]	0,001 m				
MDP+	Periodo de modelado	Inicio	01/07/2023	15/07/2023	19/07/2023	19/07/2023
		Término	07/07/2023	22/07/2023	26/07/2023	24/07/2023
		N° de días	6	7	7	5
		N° días de pronóstico	5	6	7	2
	Coeficientes de arrastre	Cda*	0.47			
		Cdw*	1.15			
	Área	Emergida [m <sup>2</sup> ]	1 [m <sup>2</sup> ]			
		Sumergida [m <sup>2</sup> ]	40 [m <sup>2</sup> ]			
	Densidad	Aire [kg/m <sup>3</sup> ]	1 [kg/m <sup>3</sup> ]			
		Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	1027 [kg/m <sup>3</sup> ]			
	Paso aleatóreo	[°]	20 [°]			
	N° de partículas		20			
	Radio de inicio	[km]	5 km			
Repeticiones		3 cada 1 hora				

### 3. RESULTADOS

El proceso automatizado de generación de grillas no estructuradas permitió generar todos los inputs necesarios para la correcta ejecución del MHL, a partir de la selección de un punto central y un radio alrededor del mismo. Solo se evidenciaron algunos problemas en el proceso automatizado de selección de nodos OBC y esponja, cuando el borde oceánico del modelo se solapó con la isla Mayotte en el Dominio 3 (costa occidental de África). Dicha situación que fue reparada ajustando levemente hacia el sur el punto central del Dominio, con la finalidad de evitar el solapamiento.

El análisis gráfico de las trayectorias observadas y modeladas (Fig. 4), muestra, en general,

comportamiento direccional similar entre las trayectorias modeladas, tanto con el MHL como mediante los MHG. El MHL sobrevaloró el desplazamiento observado en el Dominio 1 y 2, y subvaloró por arriba anticipado en el Dominio 3 y 4. Variaciones importantes en direccionamiento respecto al derivador medido se observaron en el Dominio 2, donde el desplazamiento general de las trayectorias modeladas fue con orientación NE mientras que el derivador medido evidenció un desplazamiento E-SE (Fig. 4b).

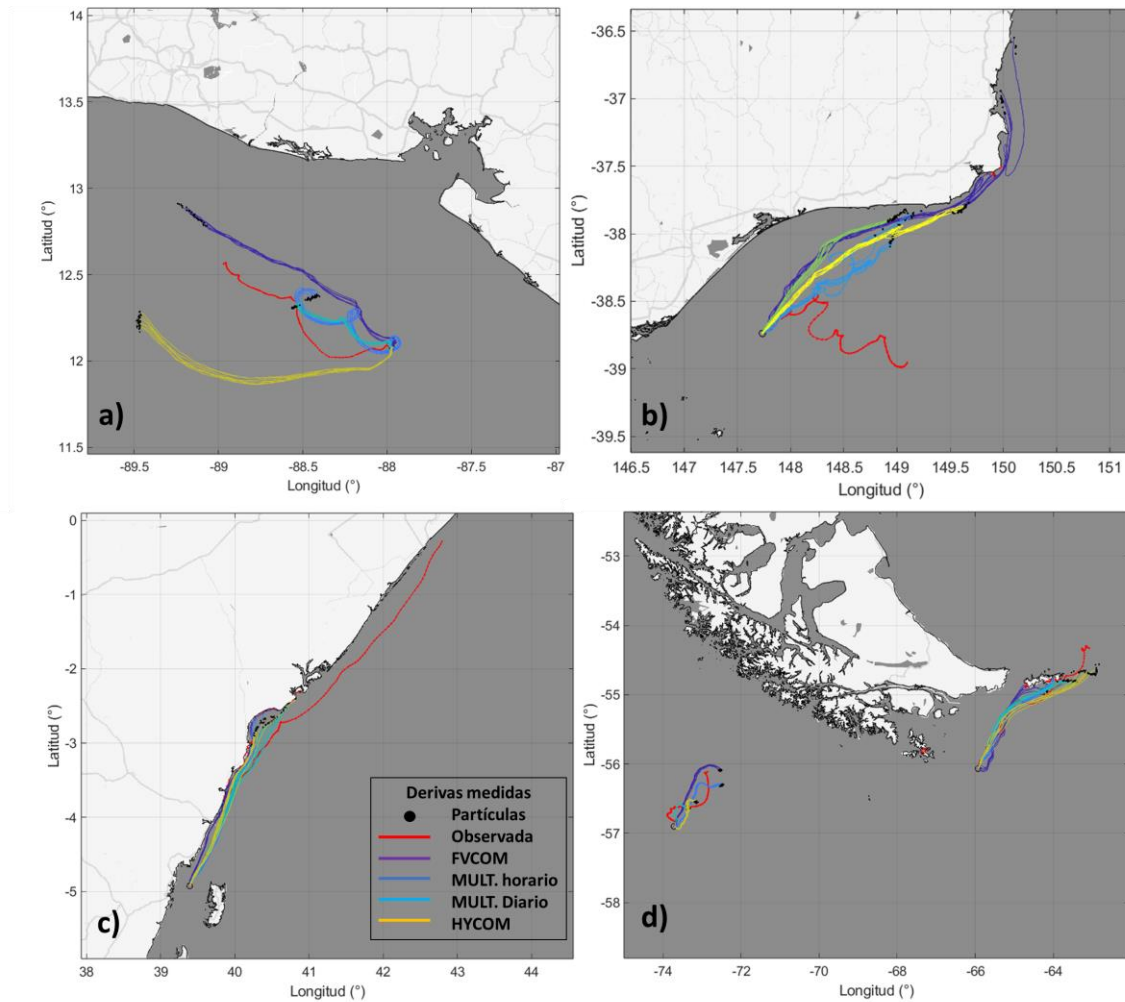


Figura 4. Comparación entre trayectorias modeladas y observadas. a) Dominio 1; b) Dominio 2; c) Dominio 3; y d) Dominio 4.

Las medidas de desempeño se muestran en la Figura 5. Se observaron medidas de desempeño de variación similar entre las resultantes del MHL y los MHG, las que, en su mayoría, disminuyeron con la progresión de días de simulación. Al comparar el resultado de las medidas de desempeño de todos los modelos, para cada dominio analizado, se observó que la máxima desviación estándar entre ellos se presentó en el Dominio 2, registrando en los primeros 6 días de simulación entre 4 y 38 para NCLS y entre 13 y 43 para NCLS<sub>mod</sub>, caso en el cual todos los modelos evidenciaron el máximo error en orientación de las trayectorias modeladas (Fig. 4b). En el resto de los casos, evidenciaron desviaciones estándar entre 1 y 7 para de NCLS y entre 2 y 32 para el NCLS<sub>mod</sub>, en los primeros 6 días de simulación.

En complemento, en el Dominio 1 se observó el mejor desempeño mediante el MHL (FVCOM), con NCLS final de 24 y  $NCLS_{mod}$  de 204 en el séptimo día de simulación. El Dominio 2 registró a MULTIOBS horario como el modelo de mayor desempeño, con NCLS final de 31 y  $NCLS_{mod}$  de 158 en el octavo día de simulación. El Dominio 3 registró a MULTIOBS diario como el modelo de mayor desempeño, con NCLS final de 22 y  $NCLS_{mod}$  de 65 en el octavo día de simulación. El Dominio 4, tanto para el derivador 1 como para el derivador 2, el modelo de mayor desempeño fue MULTIOBS horario, registrando NCLS de 5 y 16, respectivamente y de 72 y 170, respectivamente, en el sexto día de simulación (Fig. 5).

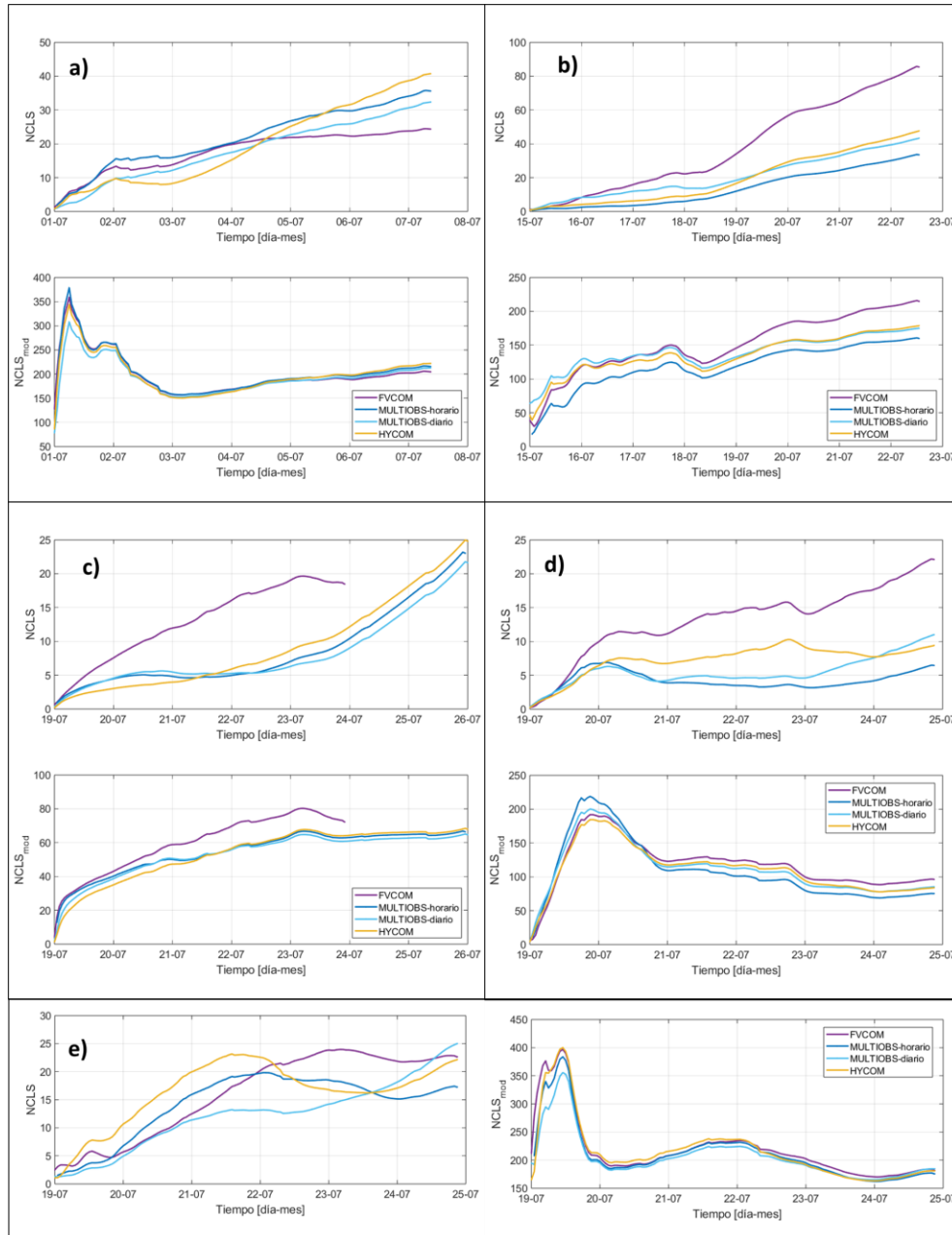


Figura 5. Medidas de desempeño obtenidas mediante NCLS y  $NCLS_{mod}$ . a) Dominio 1; b) Dominio 2; c) Dominio 3; d) Dominio 4 derivador 1; y e) Dominio 4 derivador 2.

#### 4. DISCUSIÓN

El presente trabajo es una prueba experimental de la ejecución de modelación hidrodinámica local de forma automatizada, a través de un proceso lineal de algoritmos de creación de grillas triangulares no estructuradas y generación de archivos de entrada elaborados en Matlab®, con potencial uso en emergencias marítimas.

El proceso de generación de grillas automatizadas se realizó mediante un proceso de análisis binario de matrices de borde costero obtenidos a partir de datos de GEBCO (2023). Para asegurar la estabilidad del modelo hidrodinámico FVCOM (Chen *et al.*, 2012b; Engwirda 2014), se cerraron constricciones geográficas estrechas y se realizó un suavizamiento del borde costero, proceso que posiblemente indujo errores que no fueron analizados en el presente estudio, pero que deben ser considerados en futuros estudios, al igual que los niveles de sensibilidad que se pudiesen aplicar, es decir, lograr una mayor refinamiento cerca de costa en desmedro de la operatividad del sistema. Sin embargo, las trayectorias estudiadas se ubicaron en zonas oceánicas, donde la influencia del refinamiento pudo no ser muy importante en el modelado de las trayectorias.

Si bien, el proceso automático de generación de grillas acoplado al MHL permitió obtener resultados de alta resolución, concordantes a los obtenidos mediante los MHG y en un corto periodo de tiempo, estos resultados no son suficientes para evaluar el potencial que ésta posee en cuanto a la obtención de datos y pronósticos en aguas interiores y bahías cerradas, características importantes para evaluar su potencial uso en casos de emergencias marítimas. Para cumplir con este objetivo, es necesario realizar validaciones de trayectorias en zonas costeras y aguas interiores.

Se debe considerar, además, que las desviaciones de las trayectorias modeladas obedecen a una serie de errores, tales como errores intrínsecos a la modelación numérica; la interpolación de datos puntuales; las simplificaciones asociadas al balance de fuerza del método determinístico utilizado en el MDP+ y a la aproximación explícita para la resolución de la EDO de la trayectoria de partículas (Cordova & Flores 2022). Este tipo de errores y las incertidumbres asociadas a la integridad del derivador desplegado en el océano pueden verse exacerbados en el bajo desempeño de todas las modelaciones en el Dominio 3. Por su parte, los MHL generalmente producen estructuras de mesoescala de mayor definición, sin embargo, también suelen contener efectos de menor escala que no están presentes en la realidad o desplazados en el espacio o tiempo (Sperrevik *et al.*, 2017; Aguiar *et al.*, 2020; Révelard *et al.*, 2021). Además, los modelos de alta resolución tienden a crear dinámicas mucho más energéticas (Révelard *et al.*, 2021; Cordova & Flores 2022), favoreciendo el desplazamiento y separación de las trayectorias, como lo observado en los Dominios 1 y 2 analizados.

Finalmente, la obtención de resultados a través del proceso automatizado de modelación hidrodinámica local, en tiempos de aproximadamente entre 1 y 3 horas, es un claro avance hacia el uso de este tipo de herramientas en casos de emergencias marítimas, considerando la gran cantidad de nodos analizados (12670 y 23658) y la alta resolución espacial alcanzada (10 a 40 m). A futuro, se requiere realizar más pruebas, variando la resolución de la grilla, incorporando forzantes en los nodos OBC, tales como caudal, temperatura y salinidad, y realizando validación en zonas más cercanas a costa y aguas interiores.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece el financiamiento entregado por ANID mediante el instrumento VIU. Al Dr. Chen, por aprobar el uso de FVCOM para fines de emprendimiento Científico-Tecnológico. Al equipo del CCTVal de la USM, quienes están operativizando el sistema para ser desplegado como SaaS y en especial a Jorge Rojas Zepeda, por el desarrollo del Frontend y a Christopher Mora Araneda por su apoyo en emprendimiento del proyecto.

## **REFERENCIAS**

- Aguiar, E., Mourre, B., Juza, M., Reyes, E., Hernández-Lasheras, J., Cutolo, E., et al. (2020). Multi-platform model assessment in the Western Mediterranean Sea: impact of downscaling on the surface circulation and mesoscale activity. *Ocean Dynam.* 70, 273–288.
- Celia, M.A. & Gray, W.G., (1992). *Numerical Methods for Differential Equations*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 436 pp.
- Chassignet, E.P., H.E. Hurlburt, E.J. Metzger, O.M. Smedstad, J.A. Cummings, G.R. Halliwell, R. Bleck, R. Baraille, A.J. Wallcraft & C. Lozano, (2009): US GODAE Global Ocean Prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Oceanography* vol 22, 64-75.
- Chen, C.; Beardsley, R.; Cowles, G.; Qi, J.; Lai, Z.; Gao, G.; Stuebe, D.; Xu, Q.; Xue, P.; Ge, J.; et al. (2012a) *An Unstructured-Grid, Finite-Volume Community Ocean Model: FVCOM User Manual*; Sea Grant College Program; Massachusetts Institute of Technology: Cambridge, MA, USA.
- Chen, C., Limeburner, R., & members of the UMASS-D FVCOM Group. et al. (2012b). FVCOM model estimate of the location of Air France 447. *Ocean Dynam.*, 62, 943–952.
- Chen C., H. Liu & R. Beardsley, (2003). An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries, *J. Atmos. Oceanic Technol.* 20 159–186.
- Cho, K.-H., Li, Y., Wang, H., Park, K.-S., Choi, J.-Y., Shin, K.-I., & Kwon, J.-I. (2014). Development and Validation of an Operational Search and Rescue Modeling System for the Yellow Sea and the East and South China Seas. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 31(1), 197–215.
- Córdova, P.; Flores, R.P. (2022). Hydrodynamic and Particle Drift Modeling as Support System for Maritime Search and Rescue (SAR) Emergencies: Application to the C-212 Aircraft Accident on September 2, 2011, in the Juan Fernández Archipelago, Chile. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1649.
- Dick, E., (1994). Introduction to finite-volume techniques in computational fluid dynamics. *Computational Fluid Dynamics*, J. F. Wendt, Ed., Springer-Verlag, 271–297.
- Egbert, G.D., & S.Y. Erofeeva, (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J.*

Atmos. Ocean. Technol., 19(2), 183-204.

Engwirda, D. (2014). Locally optimal Delaunay-refinement and optimisation-based mesh generation. PhD Thesis. Faculty of Science, School of Mathematics and Statistics. The University of Sydney.

Galperin, B., L. H. Kantha, S. Hassid, & A. Rosati, (1988). A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows. *J. Atmos. Sci.*, 45, 55-62.

Gonzalez, R. C., R. E. Woods, and S. L. Eddins (2004). *Digital Image Processing Using MATLAB*, New Jersey, Pearson Prentice Hall.

Haralick, Robert M., and Linda G. Shapiro (1992). *Computer and Robot Vision*, Vol. 1, Addison-Wesley.

Hoerner, S. F. (1965). *Fluid-Dynamic Drag*. Hoerner Fluid Dynamics, Brick Town, N. J., USA

Klingner, B. M. (2008). *Tetrahedral Mesh Improvement*. PhD thesis, Berkeley, California.

Liu, Y.; Weisberg, R.H. Evaluation of trajectory modeling in different dynamic regions using normalized cumulative Lagrangian separation. *J. Geophys. Res. Ocean.* **2011**, 116, C09013

Sperrevik, A.K., Röhrs, J., and KH. Christensen, (2017). Impact of data assimilation on Eulerian versus Lagrangian estimates of upper ocean transport. *J. Geophys. Res. Oceans* 122, 5445–5457.

Mellor, G. L. & T. Yamada, (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. *Rev. Geophys. Space. Phys.*, 20, 851-875.

Orfanidis, Sophocles J. (1996). *Introduction to Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Révelard A, Reyes E, Mourre B, Hernández-Carrasco I, Rubio A, Lorente P, Fernández CDL, Mader J, Álvarez-Fanjul E. & J. Tintoré, (2021). Sensitivity of Skill Score Metric to Validate Lagrangian Simulations in Coastal Areas: Recommendations for Search and Rescue Applications. *Front. Mar. Sci.* 8:630388.

Rio, M.-H., S. Mulet, & N. Picot, (2014). Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents, *Geophys. Res. Lett.*, 41.

Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H.-y., Iredell, M. et al. (2014), 'The ncep climate forecast system version 2', *Journal of climate* 27(6), 2185–2208

Serra, M., Sathe, P., Rypina, I. et al., (2020). Search and rescue at sea aided by hidden flow structures. *Nat. Commun.*, 11, 2525.