



**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**Modelación hidrodinámica y deriva de partículas como sistema de soporte en casos SAR marítimo en Chile: aplicación al accidente aéreo del avión C-212, 2 de septiembre de 2011, archipiélago de Juan Fernández.**

**Pablo Córdova Montecinos**

Oceanógrafo  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Marzo de 2022



**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**Modelación hidrodinámica y deriva de partículas como sistema de soporte en casos SAR marítimo en Chile: aplicación al accidente aéreo del avión C-212, 2 de septiembre de 2011, archipiélago de Juan Fernández.**

Tesis de Grado presentada por

**Pablo Córdova Montecinos**

como requisito parcial para optar al grado de

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Raúl Flores Audibert

Marzo de 2022

TITULO DE LA TESIS:

**Modelación hidrodinámica y deriva de partículas como sistema de soporte en casos SAR marítimo en Chile: aplicación al accidente aéreo del avión C-212, 2 de septiembre de 2011, archipiélago de Juan Fernández.**

AUTOR:

**Pablo Cordova Montecinos**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el **Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Raúl Flores Audibert .....

Patricio Catalán Mondaca .....

Catalina Aguirre Galaz .....

Valparaíso, Chile, marzo de 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Armada de Chile, a la Fuerza Aérea de Chile y a la Dirección Meteorológica de Chile, por la facilitación de datos registrados en la época del accidente y en especial, al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, por la facilitación de datos batimétricos y oceanográficos.

También se agradece a los académicos del observatorio CHIOOS Elías Ovalle y Daniel Brieva por el conocimiento y soporte entregado para las modelaciones mediante FVCOM.

Quisiera agradecer además a mis profesores de Magister Raúl Flores, Patricio Catalán y Patricio Winckler por todo el conocimiento entregado.

Finalmente quisiera agradecer a mi familia por todo su apoyo y en especial a Fernanda Carrasco por la compañía, amor y cariño que hicieron posible este trabajo.



## INDICE

INDICE.....	1
RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
OBJETIVO .....	8
METODOLOGÍA.....	9
1. Zona de estudio y antecedentes del accidente .....	9
2. Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG) y Atmosféricos Globales (MAG).....	12
3. Modelo Hidrodinámico Local (MHL) – FVCOM.....	14
4. Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP) .....	18
5. Propuesta de sistema operativo para emergencias SAR marítimas .....	21
6. Evaluación mediante derivadores medidos el 10 y 14 de septiembre de 2011.....	23
7. Evaluación de derivas desde el punto del accidente.....	26
RESULTADOS .....	27
1. Validación del Modelo Hidrodinámico Local .....	27
2. Trayectorias modeladas para los días 10 y 14 de septiembre .....	31
3. Validación de las trayectorias mediante el registro de hallazgos .....	35
DISCUSIÓN.....	37
1. Metodología .....	37
2. Evaluación cuantitativa de los escenarios.....	37
3. Evaluación cualitativa de los escenarios.....	41
CONCLUSIÓN .....	43
REFERENCIAS .....	45



## RESUMEN

Search And Rescue (SAR) se refiere a toda operación llevada a cabo para encontrar a alguien que se cree perdido, enfermo o herido en áreas remotas o poco accesibles (National Search and Rescue Manual, 1998). Estas operaciones incluyen una gran gama de eventos, desde rescates en zonas terrestres aisladas, como también rescates en zonas marítimas debidas a embarcaciones a la deriva o accidentes aéreos, entre otros.

El sistema satelital de apoyo a emergencias SAR a nivel global COSPAS-SARSAT (2020) estimó que un 41% de los casos totales corresponden a casos marítimos. Según Directemar (2020), el servicio SAR de Chile se activó 708 veces, registrando 16 muertes, 53 desapariciones, 33 heridos y 606 ilesos en ambientes marítimos durante el año 2019.

Actualmente, la Organización Marítima Internacional (IMO) ha desarrollado planes que sugieren estrategias para la prevención, sobrevivencia y la búsqueda y rescate en casos de emergencia, entre los que se encuentra el Manual Internacional de los Servicios Aeronáuticos y Marítimos (IAMSAR por sus siglas en inglés). IAMSAR 2019 (Vols. I y II) hacen referencia a fomentar la investigación y desarrollo asociado a herramientas computacionales que permitan dar más eficacia al proceso de búsqueda y al uso de los datos de modelado numérico como fuente válida de información cuando se carece de datos de campo. Lo último es de gran relevancia si se toma en cuenta que el área de responsabilidad marítima SAR en Chile es de 24.476.004,5 km<sup>2</sup>.

En el presente estudio, se diseñó un sistema operativo de respuesta en apoyo a casos emergencias SAR, tomando como fuente de información Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG) y un Modelo Hidrodinámico Local (MHL), específicamente FVCOM (Chen *et al.*, 2003). Se desarrollan una serie de algoritmos para la lectura, procesamiento y análisis de las salidas de estos modelos, que finalmente son utilizados como input para el Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP) mediante el cual se estiman las zonas de búsqueda. El sistema fue evaluado utilizando los datos recopilados durante la emergencia SAR del 2 de septiembre de 2011, fecha donde el avión C-212 de la Fuerza Aérea de Chile que viajaba rumbo al archipiélago Juan Fernández, terminó estrellándose en el mar entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe.

Los resultados en general muestran una buena relación entre las trayectorias modeladas respecto a las medidas, aunque el grado de exactitud varió caso a caso, asociado principalmente a las condiciones océano atmosféricas presentes en la zona entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe, registrando un mejor desempeño de los modelos con influencia de la marea en épocas de viento en calma y un mejor desempeño de los modelos con influencia del viento, cuando éste superó los 7 km h<sup>-1</sup>.

Lo anteriormente expuesto justificó el uso de diferentes fuentes y metodologías para estimar la trayectoria del objeto a la deriva, cubriendo una gran gama de eventos que influyen en las corrientes modeladas, desde casos más influenciados por el viento, hasta los casos más influenciados por las mareas.



El uso de MHL permitió resolver la circulación incluyendo los efectos orográficos y batimétricos del Archipiélago de Juan Fernández, llegando a resoluciones espaciales mínimas de 46 m cerca de costa, resultando en una mejora en la captura de variabilidad y distribución de las trayectorias modeladas respecto a las trayectorias resultantes de los MHG.

Este trabajo es el primer aporte científico en Chile enfocado a casos de emergencia SAR, y tiene como finalidad dar el primer paso hacia la generación de un sistema operativo con la capacidad de dar soporte de forma rápida y eficaz a las autoridades encargadas de coordinar las emergencias marítimas SAR.



## ABSTRACT

Search And Rescue (SAR) refers to any operation carried out to find someone believed to be lost, ill or injured in remote or inaccessible areas (National Search and Rescue Manual, 1998). These operations include a wide range of events, for example, rescues in isolated land areas, air accidents, cases of human losses due to illegal immigration by maritime means, etc. The global SAR emergency support satellite system COSPAS-SARSAT (2020) estimated that 41% of total cases correspond to maritime cases. According to Directemar (2020), the Chilean SAR service was activated 708 times, registering 16 deaths, 53 disappearances, 33 injured and 606 uninjured in maritime environments during 2019. Currently, the International Maritime Organization (IMO) has developed plans that suggest strategies for prevention, survival and search and rescue in emergencies, among which is the International Manual of Aeronautical and Maritime Services (IAMSAR). IAMSAR 2019 vol I and II refer to promoting research and development associated with computational tools that allow the search process to be more efficient and the use of numerical modeling data as a valid source of information when field data is lacking. The latter is of great relevance takes account that the SAR maritime responsibility area in Chile is 24,476,004.5 km<sup>2</sup>.

In the present study, an efficient response system was designed to support SAR emergencies, taking Global Hydrodynamic Models (MHG) and a Local Hydrodynamic Model (MHL, specifically FVCOM) as a source of information. A series of algorithms are developed for the reading, processing, and analysis of the outputs of these models, which are finally used as input for the Multiple Particle Drift Estimator (EMDP) by means of which the search areas are estimated. The system was evaluated using data collected during the SAR emergency on September 2, 2011, the date when the FACH C-212 plane that was traveling to the Juan Fernández archipelago, ended up crashing into the sea between Santa Clara Island and Robinsón Crusoe Island. This area is governed mainly by the wind when it exceeds 7 km / h and dominated by the tide when there are lower winds (SHOA, 2013).

The results in general show a good relationship between the modeled trajectories with respect to the measurements, a situation dependent on the local and temporal dynamics. The use of MHL allowed solving the circulation including the presence of the Juan Fernández Archipelago, resulting in a substantial improvement in the trajectories with respect to the findings recorded during the accident. The use of different methodologies to estimate the speed of the drifting object allowed evaluating different scenarios from the cases with the greatest influence from the wind to the cases most influenced by currents.

This work is the first scientific contribution in Chile focused on SAR emergencies, and its purpose is to take the first step towards the generation of an integrated system with the ability to support the authorities quickly and effectively in charge of coordinating emergencies maritime SAR.



## INTRODUCCIÓN

Search And Rescue (SAR) se refiere a toda operación llevada a cabo para encontrar a alguien que se cree perdido, enfermo o herido en áreas remotas o poco accesibles (National Search and Rescue Manual, 1998). Estas operaciones incluyen una gran gama de eventos, por ejemplo, rescates en zonas terrestres aisladas, accidentes aéreos, casos de pérdidas humanas debido a la inmigración ilegal por medios marítimos, etc.

El sistema satelital de apoyo a emergencias SAR a nivel global COSPAS-SARSAT (2020) estimó que un 41% de los casos totales corresponden a casos marítimos. Según Directemar (2020), el servicio SAR de Chile se activó 708 veces, registrando 16 muertes, 53 desapariciones, 33 heridos y 606 ilesos en ambientes marítimos durante el año 2019.

Los accidentes ocurridos en el mar, a diferencia de los ocurridos en tierra, suceden en un medio dinámico, a veces caótico, dominado principalmente por el viento, la marea y el oleaje, lo que además implica limitaciones en la cobertura de mediciones instrumentales. Estas características, sumadas a otras asociadas a la sobrevivencia, como el efecto de hipotermia, la salinidad y la escasa disponibilidad de alimento en su superficie, hacen de las emergencias SAR marítima una de las más complejas de resolver, donde la adquisición de datos y la generación de pronósticos, idealmente en tiempo real, se vuelve crítico.

Actualmente, la Organización Marítima Internacional (IMO) ha desarrollado planes que sugieren estrategias para la prevención, sobrevivencia y la búsqueda y rescate en casos de emergencia, entre los que se encuentra el Manual Internacional de los Servicios Aeronáuticos y Marítimos (IAMSAR por sus siglas en inglés). IAMSAR 2019 vol I y II hacen referencia a fomentar la investigación y desarrollo asociado a herramientas computacionales que permitan dar más eficacia al proceso de búsqueda y al uso de los datos de modelado numérico como fuente válida de información cuando se carece de datos de campo. Lo último es de gran relevancia si se toma en cuenta que el área de responsabilidad marítima SAR en Chile es de 24.476.004,5 km<sup>2</sup>.

En Chile no existe evidencia actual sobre el uso de modelos numéricos como soporte ante emergencias SAR. El uso de modelos hidrodinámicos de meso-escala, tales como POM (Princeton Ocean Model) (Blumberg *et al.*, 1987), EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) (Hamrick, 1992) y ROMS (Regional Ocean Modeling System) (Shchepetkin & McWilliams, 2003), se ha enfocado históricamente al estudio a escala regional de la circulación, surgencia y transporte biogeoquímico (Batteen *et al.*, 1995; Mesias *et al.*, 2001, 2003; Leth & Middleton, 2004; Escribano *et al.*, 2004; Aiken *et al.*, 2007; Bair *et al.*, 2007; Renault *et al.*, 2012; Aguirre *et al.*, 2014 y Artal *et al.*, 2019). Otros trabajos han llegado a escala local utilizando el modelo FVCOM, asociado a estudios de caracterización y potencial energético de aguas interiores (Arce, 2014; Villalón, 2014 y Guerra *et al.*, 2017), dadas sus capacidades numéricas que permiten una buena adaptación a la batimetría y orografía del área de interés (Chen *et al.*, 2013).



A nivel internacional, existen variados estudios sobre el uso de modelos hidrodinámicos en casos de emergencia SAR, como el trabajo de Chen *et al.* (2012), en el que se 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) desarrolló y validó un sistema operativo de búsqueda y rescate marítimo para el mar Amarillo y mares este y sur de China, acoplando 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 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).

Una característica general de las herramientas numéricas diseñadas para brindar apoyo ante emergencias SAR marítimas, es su tendencia a la diversificación metodológica asociada a la región donde se desarrolla la emergencia, donde las regiones menos desarrolladas suelen enfocar sus esfuerzos en la seguridad e incorporación de medios y equipamiento de rescate, mientras que las más desarrolladas suelen contar además con sistemas de monitoreo continuo mediante radares HF (ej. IOOS, Integrated Ocean Observing System de EEUU); sistemas acoplados entre modelos atmosféricos y oceánicos previamente validados, generando pronósticos de forma continua (ej. sistema de monitoreo ambiental Copernicus de la Unión Europea); y sistemas de búsqueda satelital de restos y señales (COPAS-SARSAT).

Algo similar ocurre con los métodos para la estimación de trayectorias, los que varían entre métodos empíricos, tales como LEEWAY (Hufford & Broida, 1976), el cual proyecta relaciones empíricas entre los datos de viento a 10 m y la deriva de elementos flotantes conocidos; métodos Determinísticos (Di Maio *et al.*, 2016), que buscan resolver el problema utilizando condiciones iniciales y la física del fenómeno; y métodos indirectos tales como la estimación de TRAPs (Serra *et al.*, 2020).

Dada la diversificación de sistemas y métodos, estos pueden ser más o menos efectivos dependiendo tanto de las fuentes de información, métodos de cálculo y las condiciones ambientales y temporales locales, variables que difícilmente son evaluadas bajo un mismo estándar metodológico.

En un esfuerzo por conjugar fuentes y métodos y evaluarlos indistintamente, el presente trabajo propone un Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP), el cual considera como fuentes de información de corrientes los Modelo Hidrodinámicos Globales (MHG) HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) (Chassignet *et al.*, 2009) de Estados Unidos y MULTIOBS\_015\_004 (Rio *et al.*, 2014) de la Unión Europea; el Modelo Atmosférico Global (MAG) ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020); y el Modelo Hidrodinámico Local (MHL) FVCOM. También considera el cálculo de trayectorias de



forma directa (velocidad directa de la fuente), determinística (velocidad resultante del balance de fuerzas de arrastre) y mediante LEEWAY (Hufford y Broida, 1976).

Los resultados fueron evaluados en comparación a mediciones instrumentales y de hallazgos registrados durante la emergencia SAR del 2 de septiembre de 2011, fecha donde el avión C-212 de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), en el que viajaban 21 personas entre pasajeros y tripulantes, fue autorizado a realizar un vuelo de apoyo a las labores de reconstrucción producto del terremoto del 27 de febrero de 2010 a 150 km al noroeste de Concepción, Chile, vuelo que terminó con la caída del avión al mar, entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe.

Según datos históricos del área (SHOA, 2013), las corrientes entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe muestran que con viento  $< 2 \text{ m s}^{-1}$ , la corriente se comporta de forma reversible según la fase de marea, con un flujo hacia el Sureste y refluo hacia el NW, pero con vientos mayores y sostenidos desde el Noroeste, la corriente superficial presenta una dirección predominante hacia el Sureste.

Este trabajo es el primer aporte científico en Chile enfocado a casos de emergencia SAR, y tiene como finalidad dar el primer paso hacia la generación de una herramienta aplicable en cualquier zona a nivel nacional y global, con la capacidad de dar apoyo, de forma rápida y eficaz, a las autoridades encargadas de coordinar las emergencias marítimas SAR.



## OBJETIVO

El objetivo principal del estudio es proponer un sistema de apoyo a casos emergencias SAR marítima, mediante el uso de MHG, MAG y MHL de alta resolución FVCOM, acoplados a un MDP. El sistema será evaluado utilizando datos del accidente del avión C-212 que cayó al mar frente a isla Robinson Crusoe el 2 de septiembre de 2011. Para lograr este objetivo se definieron los siguientes objetivos específicos.

- Recopilar los antecedentes atmosféricos y oceanográficos de la zona, como también recopilar las mediciones y hallazgos registrados durante la emergencia SAR.
- Recopilar información sobre los métodos utilizados en sistemas de emergencia SAR marítima nacional e internacional.
- Recopilar datos de variados MHG y modelos atmosféricos de libre acceso, con pronósticos y con data disponible de la época del accidente.
- Ejecutar el MHL FVCOM en diferentes escenarios, variando la forzante principal (Marea, Viento y Marea+Viento).
- Crear un EMDP utilizando variados métodos para determinar la trayectoria de las partículas.
- Evaluar los resultados del EMDP para cada escenario respecto a las mediciones y hallazgos registrados durante la emergencia SAR, con la finalidad de medir el desempeño de estos.

## METODOLOGÍA

### 1. Zona de estudio y antecedentes del accidente

La zona en estudio corresponde al archipiélago de Juan Fernández, específicamente las islas Robinson Crusoe y Santa Clara, ubicadas a ~360 MN (~667 km) de la bahía de Valparaíso, Chile. Estas islas son montañosas, de formación volcánica, altas y escarpadas (SHOA, 2013) (Fig. 1).

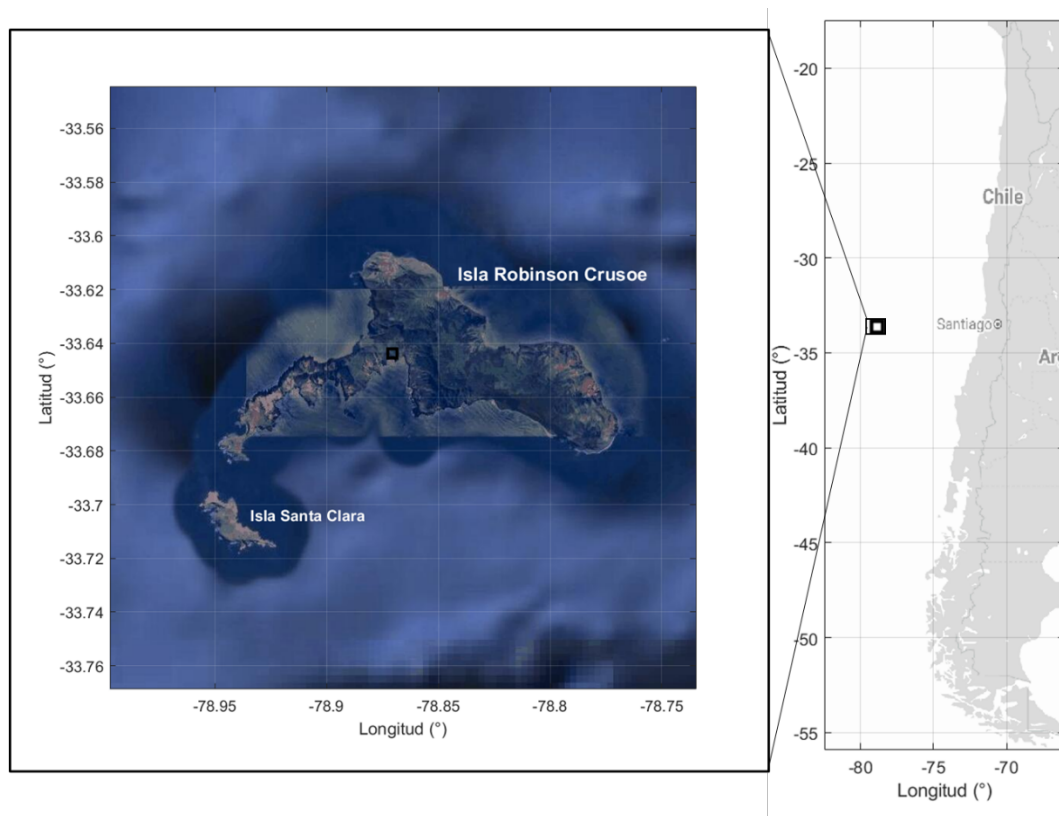


Figura 1. Archipiélago de Juan Fernández.

El avión de transporte táctico ligero y patrulla marítima Casa 212 Aviocar, matrícula 966, operado por el 10° grupo de transporte de la Fuerza Aérea de Chile (FACH), despegó a las 14:00 HL (17:00 UTC) desde el Aeropuerto Arturo Merino Benítez de Santiago, Chile, destino al aeródromo de la Isla Robinson Crusoe (Fig. 1), con 21 personas entre pasajeros y tripulantes. Gracia (2017) concluyó que el accidente fue causado por una pérdida de control cuando éste se perfilaba al aeródromo entre isla Santa Clara e Isla Robinsón Crusoe, a ~200 m de altura, con una trayectoria muy baja (respecto a la altura del aeródromo) a las 17:48 HL (20:48 UTC). En esta zona se presentaban condiciones adversas de viento cortante (wind shear), las que, debido a la orografía del área, son capaces de provocar inestabilidades atmosféricas, fuertes turbulencias y flujos verticales, condiciones que además cambian abruptamente en cortos periodos de tiempo (Gracia 2017).



Durante la emergencia SAR, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), realizó mediciones mediante derivadores superficiales y subsuperficiales (1.5, 10 y 20 m de profundidad, respectivamente) los días 10 y 14 de septiembre de 2011, tanto en marea llenante como vaciante. Las coordenadas de los lances superficiales se indican en la Tabla 1 y Figura 2.

Tabla 1. Coordenadas de origen de los lances de derivadores del día 10 y 14 de septiembre de 2011.

10 de septiembre				14 de septiembre			
Lance	Hora UTC	Longitud (°)	Latitud	Lance	Hora UTC	Longitud (°)	Latitud
1	15:23	-78.948	-33.687	1	12:40	-78.948	-33.687
2	16:58	-78.948	-33.687	2	15:18	-78.945	-33.688
3	19:50	-78.948	-33.687	3	16:07	-78.947	-33.688
4	21:46	-78.946	-33.688	4	17:08	-78.948	-33.687
5	15:30	-78.953	-33.681	5	12:47	-78.952	-33.681
6	15:35	-78.957	-33.693	6	15:25	-78.953	-33.681
7	17:00	-78.933	-33.686	7	17:14	-78.953	-33.682
8	19:53	-78.933	-33.686	8	12:54	-78.957	-33.693
9	17:18	-78.938	-33.696	9	13:49	-78.951	-33.694
				10	15:39	-78.947	-33.695
				11	17:18	-78.949	-33.692
				12	13:03	-78.938	-33.696
				13	17:57	-78.937	-33.698

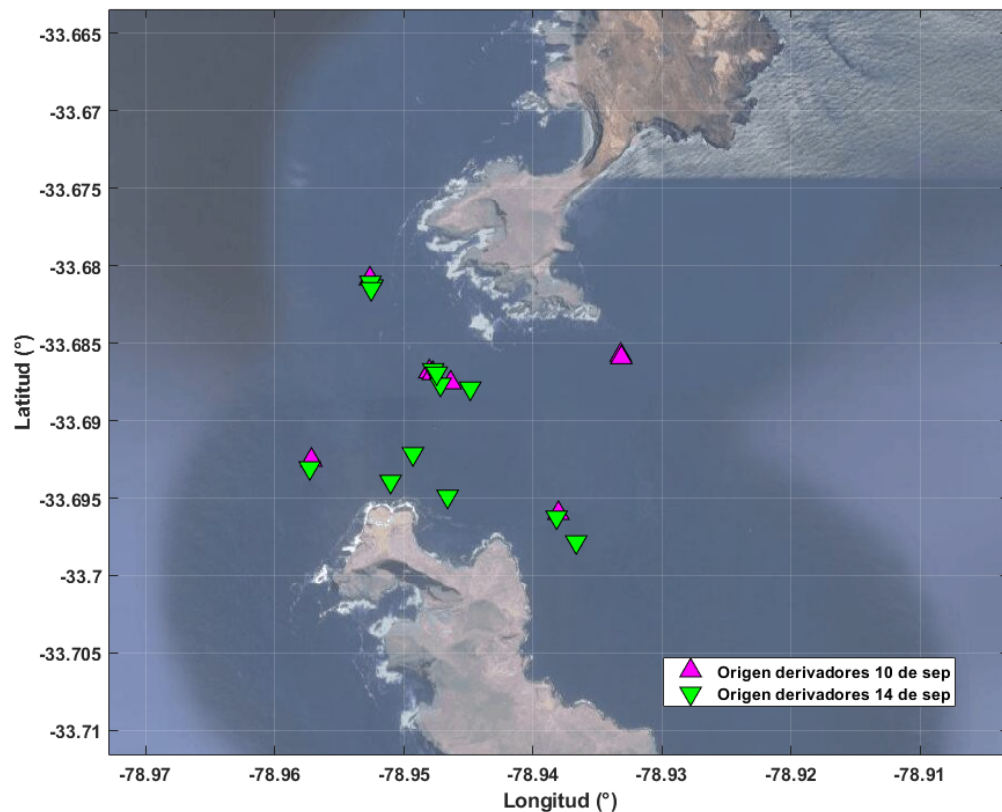


Figura 2. Ubicación geográfica de los lances de derivadores del día 10 y 14 de septiembre de 2011.



Tanto la Armada de Chile como la Fuerza Aérea de Chile (FACH), fueron las encargadas de recopilar los hallazgos encontrados en la época del accidente, los que en general correspondieron a restos poco homogéneos, característicos de un accidente de gran impacto y se situaron principalmente en las bahías de la zona sur de isla Robinson Crusoe (Tabla 2 y Fig. 3).

Tabla 2. Descripción de los hallazgos recopilados por la Armada de Chile y la FACH.

Institución	Fecha	Hora (UTC)	Nº	Hallazgo	Referencia geográfica	
					Latitud	Longitud
FACH	03 de sep	0:40	1	Puerta	-33.668	-78.906
Armada de Chile	3 de sep	9:50	2	Puerta Trasera	-33.675	-78.903
			3	Asiento	-33.667	-78.878
			4	Balsa salvavidas sin activar	A 1 MN de la línea que une el islote Vinillo con islote Chamelos	
			5	Otros	Área definida entre bahía Villagra cerrado por punta Blanco Islote Vinillo - punta Hueca (CN SHOA 5410)	
			6	Restos humanos	al interior de la bahía Tierra Blanca y Playa Larga	
	7 de sep	7:55	7	restos humanos	-33.715	-78.855

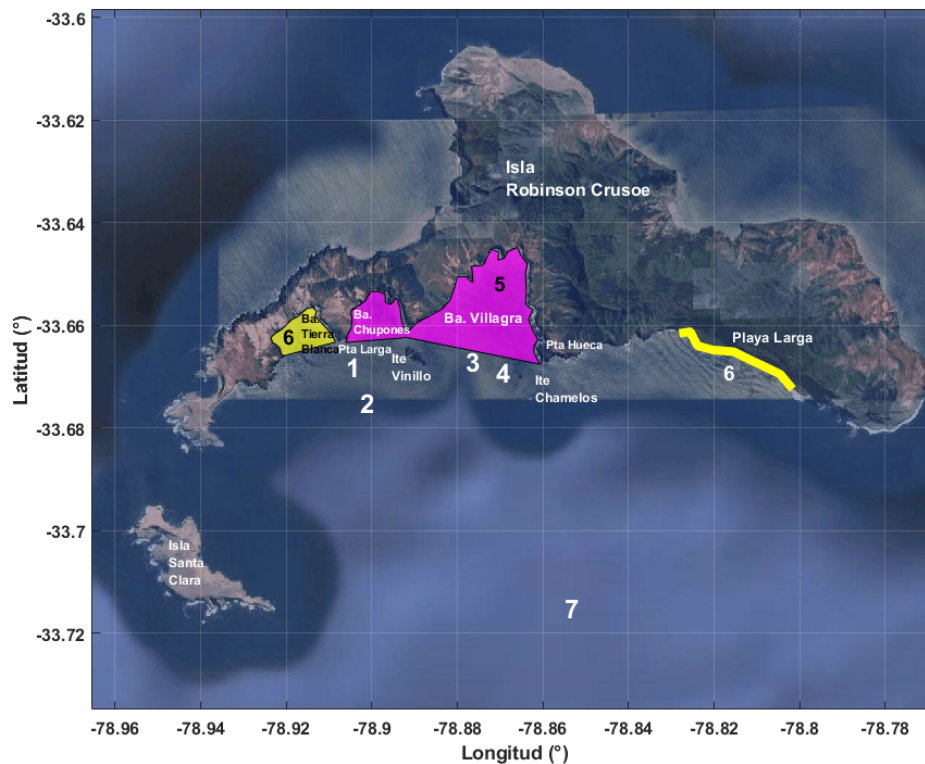


Figura 3. Ubicación geográfica de los hallazgos recopilados por la Armada de Chile y la FACH.



Según datos de la Dirección meteorológica de Chile (DMC) (Fig. 4), entre el 1 y el 14 de septiembre de 2011, se presentaron intensidades de viento promedio de  $4 \text{ m s}^{-1}$  con dirección predominante del Noroeste e intensidades que superaron los  $8 \text{ m s}^{-1}$  desde el Sur el día 4 de septiembre. El día 10 de septiembre, las mediciones con derivadores se realizaron principalmente durante marea llanante, la intensidad del viento fue cercana a valores de calma, virando en dirección desde Sur a Norte. El día 14 de septiembre, la intensidad fue en aumento, alcanzando valores cercanos a los  $2.5 \text{ m s}^{-1}$  al final del día, con dirección predominante Noroeste.

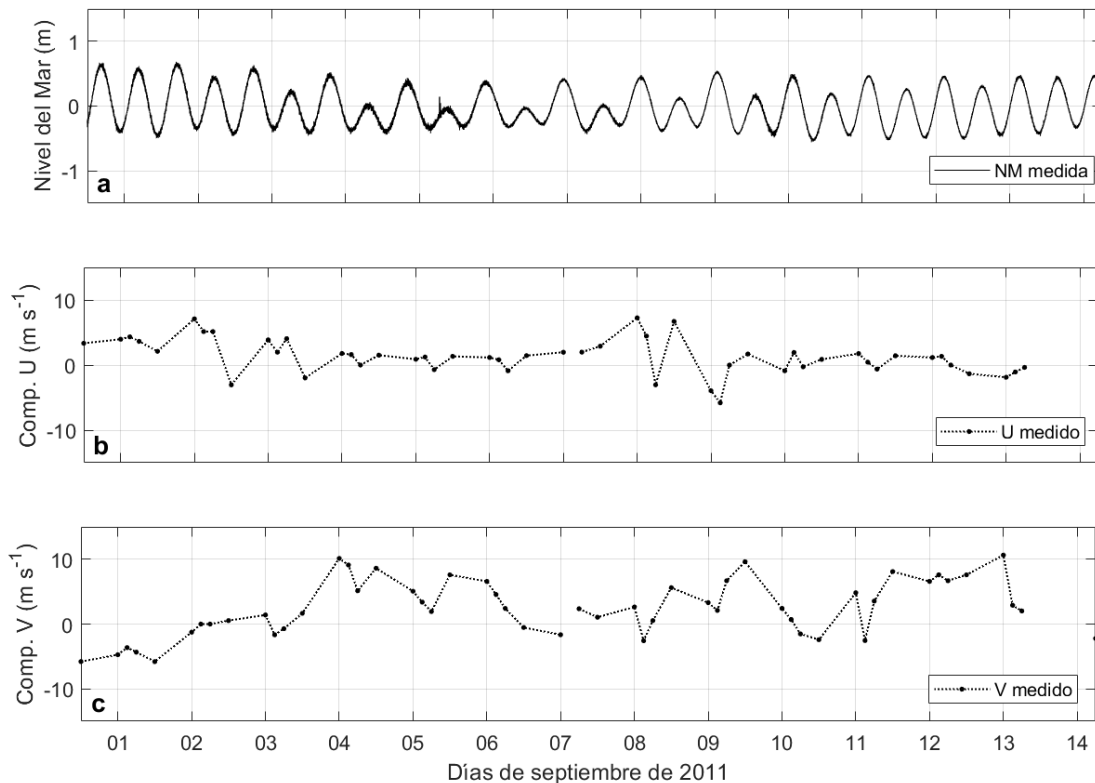


Figura 4. Condiciones de marea y viento entre el 1 y 14 de septiembre de 2011. a) marea medida en bahía Cumberland; b) y c) corresponden a magnitudes U y V, respectivamente, del viento medido en bahía Cumberland.

## 2. Modelos Hidrodinámicos Globales (MHG) y Atmosféricos Globales (MAG)

Los MHG y MAG son productos oceanográficos y atmosféricos elaborados por diferentes agencias internacionales, que proveen gratuitamente al público en general, una serie de variables resultantes de modelación numérica a gran escala, con y sin asimilación de datos reales.

Los MHG Y MAG generalmente se dividen en datos de análisis o nowcast, con información cercana a la fecha actual y consideran los datos de salida directo de los modelos; datos de reanálisis, donde las salidas de los modelos pasan por revisiones y correcciones mediante mediciones reales, por ende, suelen estar retrasados entre días a meses respecto a la fecha actual; y datos de pronóstico o forecast, que suelen desplegar



pronósticos entre 5 a 7 días para los MHG y de 15 a 30 días para los MAG, dependiendo de la fuente de información. La selección de los MHG y MAG se basó en la disponibilidad de datos durante la época del accidente y la disponibilidad actual de pronósticos por parte de la institución encargada de publicar los datos.

Para el análisis de la emergencia SAR de septiembre de 2011, se utilizaron los datos de reanálisis del MHG GOFS 3.1 (identificado como HYCOM) del Centro de Estudios de Predicción Océano-Atmosférico (COAPS por sus siglas en inglés), de Estados Unidos. Este modelo es un acoplamiento entre el modelo global HYCOM (Sigla en inglés de Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas) (Chassignet et al., 2009), y CICE (siglas en inglés de Modelo de Hielo Marino de Los Álamos) (Hunke and Lipscomb, 2008). Ambos modelos se encuentran entrelazados según el Sistema de Marco de Referencia de Modelación Terrestre (ESMF por sus siglas en inglés) (Hill et al., 2004). La forzante atmosférica del modelo proviene del Modelo Global Medioambiental Naval (NAVGEM por sus siglas en inglés). La asimilación de datos instrumentales es realizada a nivel superficial mediante el sistema NCODA (Cummings, 2005), utilizando observaciones de altimetría satelital, concentración de hielo satelital, Temperatura Superficial del Mar (TSM) in situ y satelital; y en perfiles verticales mediante un esquema de análisis Variacional en 3 Dimensiones (3DVAR), usando datos de temperatura y salinidad obtenidos desde batitermógrafos, derivadores Argo y anclajes de boyas. La resolución espacial y temporal resultante de modelo GOFS 3.1 es de  $0.08^\circ$  ( $1/12^\circ$ ) y 3 horas, respectivamente.

También fueron utilizados los datos de reanálisis del MHG MULTIOBS\_015\_004 (Rio *et al.*, 2014) (identificado como MULTIOBS), generados por el Centro de Producción CLS (MULTIOBS-CLS-TOULOUSE-FR) y descargados desde el sistema de monitoreo ambiental COPERNICUS de la Unión Europea. Este modelo es ejecutado en 4 etapas: 1) se estima la anomalía de corriente geostrofica superficial a partir de la información de altimetría satelital del Centro Temático del Nivel del Mar (SEA LEVEL TAC, por sus siglas en inglés) y la Media Dinámica de Topografía climática (CNES-CLS18 MDT, por sus siglas en inglés); 2) se calcula la Capa de Mezcla Profunda (MLD, por sus siglas en inglés) tomando como referencia los datos del modelo MULTIOBS\_015\_012 (Guinehut *et al.*, 2012; Mulet *et al.*, 2012); 3) se determina la corriente de Ekman en superficie y a 15 m de profundidad, a partir de datos de estrés del viento del modelo ERA (Río 2014); y 4) se estima la corriente superficial y a 15 m de profundidad incorporando la componente geostrofica y Ekman. La resolución espacial y temporal resultante de modelo MULTIOBS es de  $0.25^\circ$  ( $1/4^\circ$ ) y 3 horas, respectivamente.

La componente atmosférica utilizada corresponde a datos de viento a 10 m de la superficie proveniente del MAG ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020), este modelo fue utilizado tanto para el forzado del MHL, la estimación de trayectorias mediante LEEWAY y la componente atmosférica para la resolución física de los coeficientes de arrastre del sistema determinístico. Este producto forma parte del Sistema de Pronóstico Integrado (IFS por sus siglas en inglés) del Centro Europeo de Pronóstico del Tiempo de Rango Medio (ECMWF por sus siglas en inglés). La resolución espacial y temporal resultante de modelo ERA5 es de  $0.25^\circ$  ( $1/4^\circ$ ) y 3 horas, respectivamente.



Para evaluar el desempeño de los MHG y MAG, se utilizaron dos casos de comparación detallados en los puntos 1, 6 y 7 de la presente sección. El detalle de los modelos y metodologías utilizadas se encuentra en el punto 5, sobre la propuesta de sistema operativo de la presente metodología.

### 3. Modelo Hidrodinámico Local (MHL) – FVCOM

El FVCOM (Finite-Volumen Community Ocean Model) es un modelo tridimensional desarrollado originalmente por Chen *et al.* (2003). El modelo tiene la capacidad de resolver las ecuaciones primitivas de gobierno en coordenadas cartesianas (1) y esféricas, en su forma integral mediante el cálculo de flujos entre volúmenes de control triangulares no sobrepuestos. A continuación, se muestran las ecuaciones de gobierno de momentum y continuidad en coordenadas cartesianas (1):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f u = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial(p_H + p_a)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (1.6)$$

$$\rho = \rho(T, S, p) \quad (1.7)$$

donde  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las coordenadas Este, Norte y vertical, respectivamente, en coordenadas cartesianas;  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las componentes de velocidad de  $x$ ,  $y$  y  $z$ , respectivamente;  $T$  es la temperatura;  $S$  es la salinidad;  $\rho$  es la densidad;  $p_a$  es la presión del aire en la superficie;  $p_H$  es la presión hidrostática;  $q$  es la presión no-hidrostática;  $f$  es el parámetro de Coriolis;  $K_m$  es el coeficiente de viscosidad vertical turbulenta;  $K_h$  es el coeficiente de difusión térmica turbulenta;  $F_u$ ,  $F_v$ ,  $F_T$  y  $F_S$  representan los términos de difusión horizontal de momentum, térmico y de la sal, respectivamente; y  $F_w$  el momentum vertical. En el presente estudio se utilizó la versión 2013 de FVCOM (Chen *et al.*, 2013) y se seleccionó esquema numérico semi-implícito, incorporado en el modelo desde la versión 2008, cuando se incluyeron los algoritmos de discretización no-hidrostática de la presión (Lai, 2009).



En la vertical se utilizaron coordenadas sigmas distribuidas en 20 capas. Tanto la temperatura como la salinidad fueron tomados como perfiles constantes de superficie a fondo, según datos históricos presentes en el área (Rojas & Silva, 1996), de 15° en superficie hasta 2° C en fondo para la temperatura, y de 33.8 en superficie hasta 34.6 en fondo para la salinidad. El motivo de mantener constante la temperatura y la salinidad fue aislar el efecto de las forzantes de mayor variabilidad a corto plazo (horas a días), dadas las condiciones temporales del presente estudio, privilegiando forzantes tales como la marea y el viento. Esto último implica que, durante la modelación, no fueron calculadas las ecuaciones (1.5) y (1.6).

Para resolver  $K_m$  por medio de FVCOM, se seleccionó 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); la energía turbulenta superficial inducida por rotura de olas en superficie debido al viento y la parametrización de onda interna de Mellor & Blumberg (2004); y la parametrización mejorada de covarianza de presión-deformación y la mezcla por corte inducida por inestabilidad en regiones fuertemente estratificadas propuesta por Kantha & Clayson (1994, 2000).

La primera condición de borde utilizada fue la de fondo, definida en la ecuación (2) como:

$$z = -H(x, y) \quad (2)$$

donde  $H$  corresponde a la batimetría del área, la cual fue una conjunción entre datos de mediciones realizadas por el SHOA y datos de GEBCO (2019) (Fig. 5). Cabe señalar que el dato de profundidad de los nodos de áreas de escasa batimetría, se tomaron a partir del dato batimétrico más cercano, para luego ser suavizado mediante funciones de Matlab2021<sup>®</sup> de interpolación lineal de elementos triangulares.

El uso de volúmenes de control triangulares del modelo permite el trabajo con grillas triangulares no estructuradas, capaces de adaptarse a la batimetría y orografía de la zona en estudio, aumentando la resolución espacial en áreas de interés. A partir de los datos batimétricos se generó una grilla no estructurada de 6336 nodos, 12073 vértices, de espaciamiento máximo de ~2,6 km costa afuera y mínimo de ~46 m en costa, utilizando los algoritmos descritos por Engwirda (2014) (Fig. 6).

Una vez generada la grilla (Fig. 6), se seleccionaron nodos para la incorporación de las condiciones de borde frontera y nodos esponja (Fig. 7). 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).

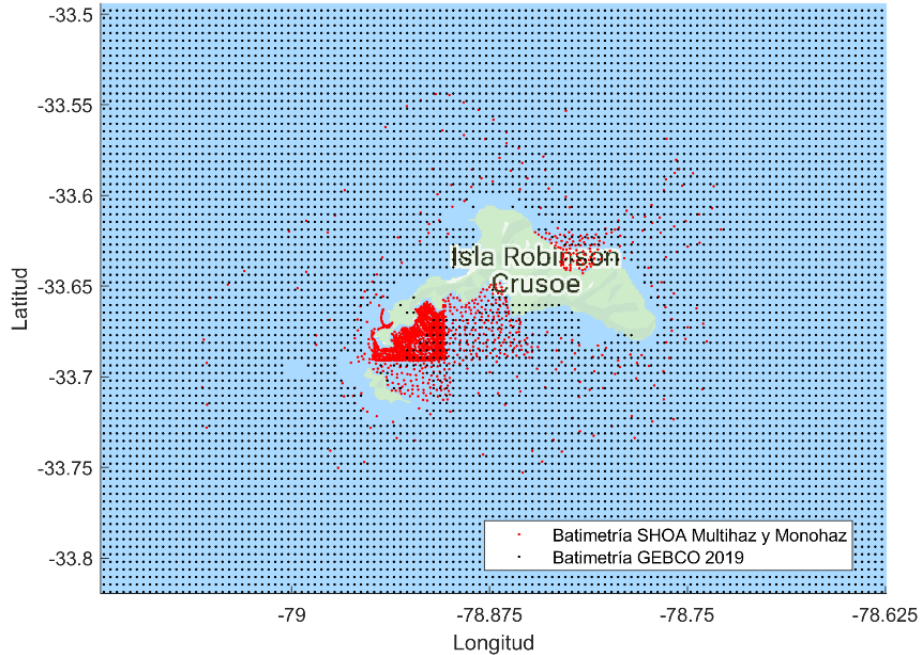


Figura 5. Batimetría utilizada para el forzado de FVCOM. Los puntos negros corresponden a datos de GEBCO 2019 y los puntos rojos corresponden a batimetrías mono y multihaz del SHOA.

La siguiente condición de borde utilizada corresponden a datos de flujo medio ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ), caudal calculado a partir de las componentes de flujo  $u$  y  $v$  del modelo MULTIOBS, tomando como referencia el volumen de cada elemento triangular por capa de profundidad. El flujo medio fue incorporado como forzante en los nodos frontera del modelo (Fig. 7). Para el forzamiento con marea, se obtuvo la amplitud y fase a partir del modelo global de mareas TPXO (Egbert *et al.*, 2002), utilizando como constituyentes armónicas M2, S2, N2, K2 y K1, correspondiente al régimen de marea mixto típico de las costas de Chile (SHOA, 1999).

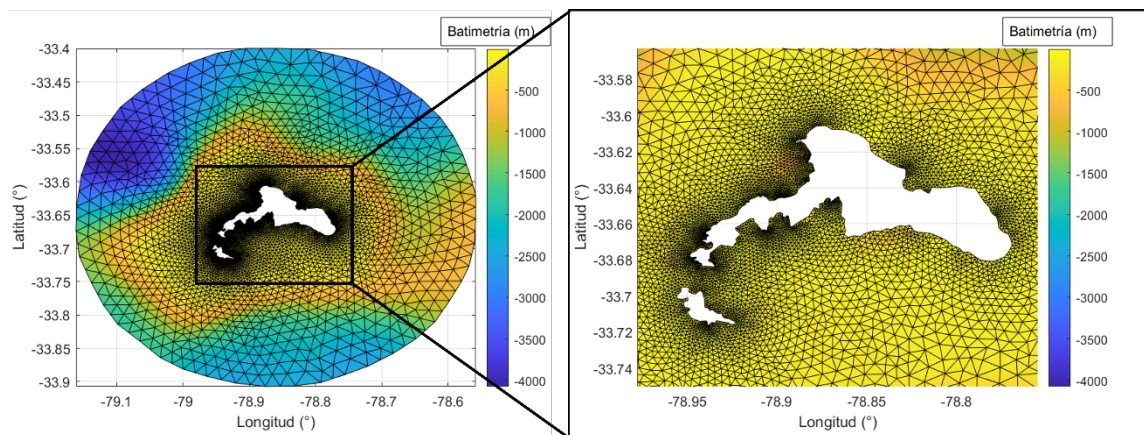


Figura 6. Grilla numérica no estructurada triangular utilizada para la modelación mediante FVCOM.

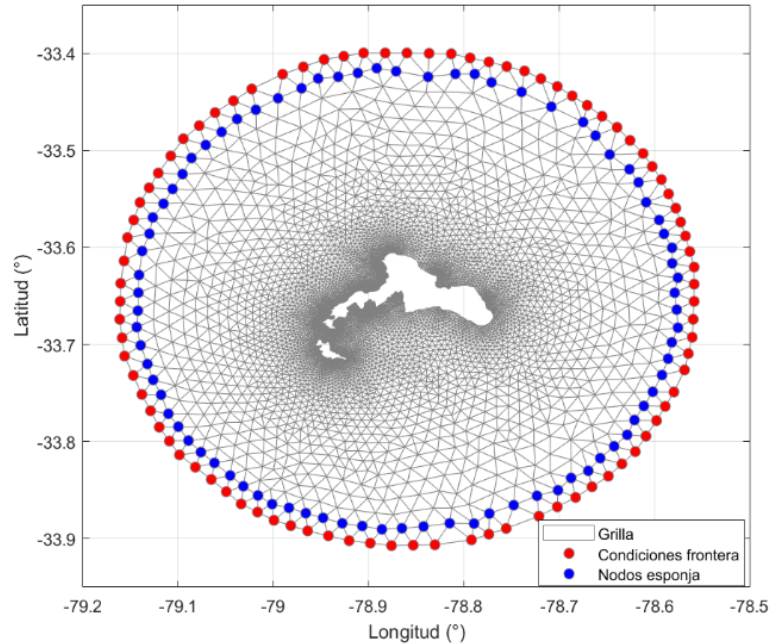


Figura 7. Nodos frontera y esponja de la grilla numérica no estructurada triangular utilizada para la modelación mediante FVCOM.

La última condición de borde utilizada fue el viento resultante del modelo ERA5, incorporados en cada nodo superficial de la grilla. La Figura 8 muestra la comparación entre los datos resultantes de TPXO respecto a datos de marea obtenidos en bahía Cumberland y los datos de ERA5 comparados con los registros de la estación meteorológica de la DGAC, ambos durante la época del accidente.

FVCOM fue configurado para obtener datos a partir de 10 días antes del momento del accidente, periodo utilizado para su estabilización. La resolución temporal de cálculo interno del modelo se configuró cada 1 s, mientras que la resolución de salida fue cada 30 min. Para evaluar el desempeño del modelo se utilizaron dos casos de comparación detallados en los puntos 1, 6 y 7 de la presente sección. Tomando en cuenta los antecedentes atmosféricos y oceanográficos de área (descritos en la sección Introducción), la ejecución de FVCOM se separó en diferentes escenarios: forzado sólo con marea (M), sólo con viento (V) y marea más viento (M+V). El detalle de los escenarios se encuentra en el punto 5, sobre la propuesta de sistema de operativo de la presente metodología.

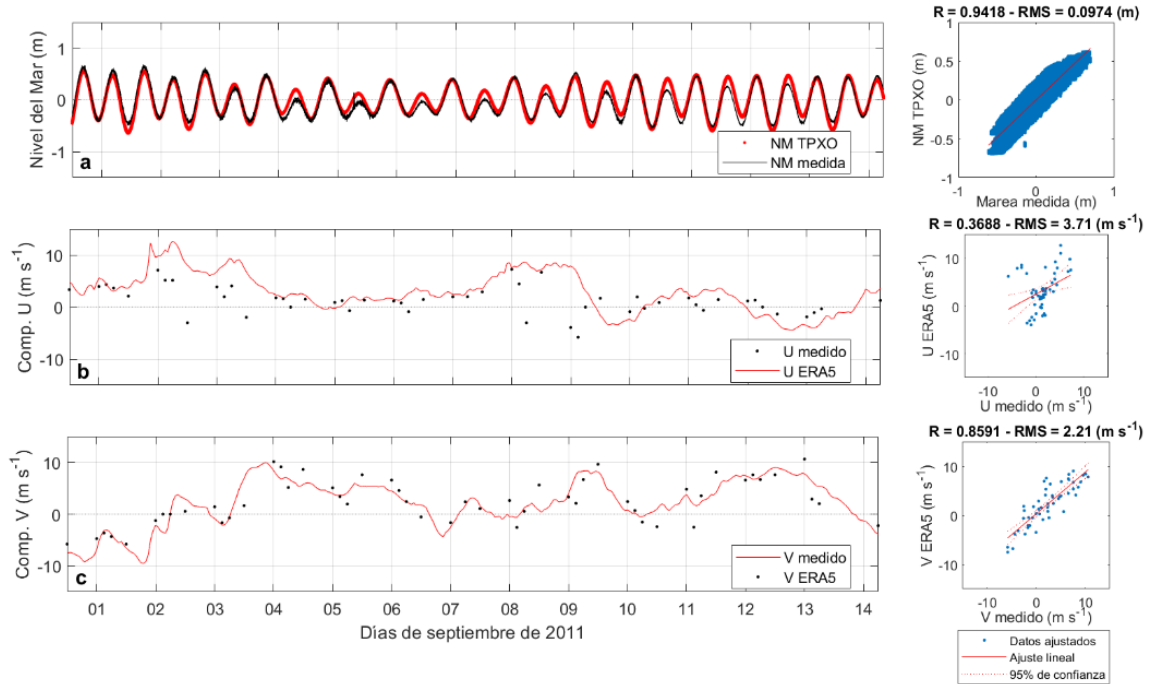


Figura 8. Análisis de las forzantes de borde abierto incorporadas a FVCOM. a) comparación entre la marea obtenida con el modelo TPXO versus la marea registrada en la bahía Cumberland (SHOA); b) y c) corresponden a la comparación entre las componentes interpoladas de viento U y V, respectivamente, del modelo ERA5 versus lo registrado por la estación meteorológica en bahía Cumberland (DGAC).

#### 4. Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP)

Para evaluar las trayectorias de los elementos flotantes medidos y hallados durante la emergencia SAR, se implementó un Estimador Múltiple de Deriva de Partículas (EMDP), que contempla variadas fuentes de información y variadas metodologías para la estimación de la velocidad de una partícula y su trayectoria en el agua. Su fundamento radica en que, durante una emergencia SAR marítima, un escenario de múltiples soluciones sumada a la existencia datos in-situ o hallazgos del origen del accidente, permiten estimar en tiempo casi real, el o los sistemas de mejor desempeño, pudiendo de esta forma orientar y dar apoyo a las autoridades encargadas de la emergencia.

El EMDP se basa en la resolución de la ecuación diferencial ordinaria (EDO):

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v}_{ob}(\vec{x}(t), t) \quad (3)$$

donde  $\vec{x}(t)$  corresponde a la posición inicial de la objeto o partícula y  $\vec{v}_{ob}$  a su velocidad (vectorial).

La  $\vec{v}_{ob}$  fue determinada mediante tres métodos: primero, el método directo, en el que la velocidad empleada fue igual a la velocidad interpolada desde los campos de corriente de los MHG y el MHL:



$$\vec{v}_{ob} = \vec{v}_{im} \quad (4)$$

donde  $\vec{v}_{im}$  corresponde a la velocidad interpolada directamente de los MHG y MHL.

El segundo método correspondió al método determinístico, a partir de la metodología aplicada por Di Maio *et al.* (2016), donde se estimó  $\vec{v}_{ob}$  a partir del balance de las fuerzas de arrastre actuando sobre el objeto simétrico, es decir, despreciando el efecto de levantamiento o “lift” y en estado estacionario:

$$F_p + F_E + F_{Dl} + F_{Da} = 0 \quad (5)$$

donde  $F_p$  es el peso del objeto;  $F_E$  las fuerzas de empuje del objeto;  $F_{Dl}$  es la fuerza de arrastre del líquido sobre el objeto y  $F_{Da}$  es la fuerza de arrastre de aire sobre el objeto.

En el plano vertical, se asumió que  $F_p + F_E = 0$ , es decir, que el cuerpo se mantuvo estático en este plano. Para simplificar el problema, también se asumió como conocida e invariante la proporción de cuerpo emergido y sumergido ( $R_E$  y  $R_S$ , respectivamente) según los diferentes casos de derivadores evaluados según se muestra en los puntos 6 y 7 de la presente sección.

En el plano horizontal, las fuerzas  $F_{Dl}$  y  $F_{Da}$  fueron responsables del transporte superficial de las partículas. Utilizando la aproximación teórica del análisis dimensional según la ley de Stokes (Kundu *et al.*, 2016), para fluidos viscosos con viscosidad dinámica  $\mu$ , se tiene que la  $F_D$  que experimenta una esfera de radio  $R$  y velocidad  $V$  es:

$$F_D = 6\pi\mu RV \quad (6)$$

al reemplazar la ecuación (6) en la ecuación (5) en el plano horizontal y tomando en cuenta la velocidad  $V$  como la velocidad relativa al objeto, resulta:

$$\mu_l R_S (\vec{v}_c - \vec{v}_{ob}) + \mu_a R_E (\vec{v}_a - \vec{v}_{ob}) = 0 \quad (6)$$

considerando la formulación explícita adimensional del coeficiente de arrastre  $C_D$  para un cuerpo sumergido en función del número de Reynolds ( $R_e$ ), despreciando los efectos de compresibilidad (Kundu *et al.*, 2016), la ecuación (6) nos queda:

$$\frac{1}{2} C_{Dw} \rho_w A_S (\vec{v}_c - \vec{v}_{ob})^2 + \frac{1}{2} C_{Da} \rho_a A_E (\vec{v}_a - \vec{v}_{ob})^2 = 0 \quad (7)$$

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. La ecuación (7) se resolvió de forma



numérica para la variable  $\vec{v}_{ob}$ . La formulación resultante fue evaluada mediante parámetros establecidos y detallados en los puntos 6 y 7 de la presente sección.

Finalmente, se utilizó el método LEEWAY basado en el trabajo de Hufford y Broida (1976) y desarrollado extensamente en los reportes denominados LEEWAY Divergence del Centro de Desarrollo e Investigación de la Guardia Costera de Estados Unidos (Allen, 2005). Este método contempla solo la información de viento a 10 m sobre la superficie, extraído en el presente trabajo desde el MAG ERA5. A partir del viento a 10 m. Se estimaron la componente de reducción vertical (Downwind, DWL) y su componente cruzada (Crosswind, CWL) según las ecuaciones (8) y (9), considerando los valores óptimos de regresión estimados empíricamente y tabulados en Allen (2005), para diferentes categorías de elementos a la deriva:

$$DWL(cm s^{-1}) = m_{DWL}(\%) * W_{10}(m s^{-1}) + b_d(cm s^{-1}) \quad (8)$$

$$CWL(cm s^{-1}) = \pm m_{CWL}(\%) * W_{10}(m s^{-1}) + b_d(cm s^{-1}) \quad (9)$$

donde  $m_{DWL}$  y  $m_{CWL}$  son las pendientes de regresión para los coeficientes DWL y CWL, respectivamente, y  $b_d$  es el intercepto de la regresión. Los valores regresión extraídos de Allen (2005) y utilizados en el presente trabajo se detallan en lo puntos 6 y 7 de la metodología.

La componente CWL actúa en sentido positivo y negativo y opera bajo una función aleatoria con error estándar ( $S_{y/x}$ ) también tabulado en Allen (2005). Sin embargo, el objetivo del presente trabajo fue medir el desempeño de los modelos y métodos respecto a los datos medidos, estimando distancias entre derivadores y su desviación estándar (STD), coeficiente de correlación (R) y error medio cuadrático (RMS), por lo tanto, las trayectorias proyectadas mediante LEEWAY consideraron solo el parámetro DWL de la ecuación (7).

Una vez definida la  $\vec{v}_{ob}$ , la ecuación (3) fue resuelta mediante el esquema numérico Explícito Runge-Kutta (ERK), de cuatro etapas y cuarto orden (Celia & Gray, 1992). Este método es también utilizado por FVCOM para resolver las trayectorias de forma interna (Chen *et al.*, 2013). En el presente estudio, el algoritmo fue resuelto de forma externa al modelo y en dos dimensiones, transformando las coordenadas latitud y longitud en coordenadas UTM Norte y Sur, respectivamente, y asumiendo una velocidad constante y continua para cada intervalo de tiempo, pero variable en el espacio.

A continuación, se muestra la resolución de la ecuación (3) mediante el esquema ERK en una dimensión ( $X^n$ ) con valor inicial conocido, en tiempos discretos definidos como nodos  $t^0, t^1, t^2, \dots, t^n$ , quedando de la siguiente forma:

$$X^* = X^n + \left(\frac{\Delta t}{2}\right) F^n \quad (10a)$$

$$X^{**} = X^n + \left(\frac{\Delta t}{2}\right) F^* \quad (10b)$$

$$X^{***} = X^n + (\Delta t) F^{**} \quad (10c)$$



$$X^{n+1} = X^n + \left(\frac{\Delta t}{6}\right) [F^n + 2F^* + F^{**} + F^{***}] \quad (10d)$$

donde:

$$F^* = v_{ob} \left( X^*, t^n + \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (10e)$$

$$F^{**} = v_{ob} \left( X^{**}, t^n + \frac{\Delta t}{2} \right) \quad (10f)$$

$$F^{***} = v_{ob} (X^{***}, t^n + \Delta t) \quad (10g)$$

En las ecuaciones (10),  $X^*$  y  $X^{**}$  son un predictor y corrector, respectivamente, de  $X^{n+1/2}$ , mientras que  $X^{***}$  y  $X^{n+1}$  son un predictor y corrector de  $X^{n+1}$ , por su parte,  $F^*$  y  $F^{**}$  son estimaciones de  $F^{n+1/2}$  mientras que  $F^{***}$  es una aproximación de  $F^{n+1}$  basado en el valor pronosticado  $X^{***}$  (Celia & Gray, 1992). Es importante notar que  $\Delta t$  corresponde a la resolución temporal de cada modelo utilizado, por lo cual, para asegurar la estabilidad numérica y compensar la baja resolución temporal de los MHG respecto a la duración de las mediciones, la  $\Delta t$  de los MHG fue aumentada 6 veces mediante interpolación lineal en el tiempo, quedando de esta forma, con la misma resolución temporal de las salidas del MHL.

Finalmente, para capturar la dispersión natural de las corrientes de meso y submesoescala, se aplicó un paso aleatorio de distribución normal y de divergencia direccional no mayor a  $20^\circ$ , para cada paso de tiempo. El valor de divergencia direccional corresponde a valores máximos típicos de ángulos de divergencia LEEWAY estimados por Allen and Plourde (1999) para varias categorías de elementos flotantes y se asocian además a valores de dispersión direccional costera registrado por Ohlmann *et al.* (2019), en su estudio sobre la dispersión horizontal relativa de submesoescala mediante derivadores y trazadores lagrangianos, donde registró valores de rotación media de  $\sim 18^\circ$  en 2.5 horas de trayectoria. Este paso aleatorio direccional de distribución normal se aplicó igualmente a todas las trayectorias estimadas, independiente al método utilizado para su estimación.

## 5. Propuesta de sistema operativo para emergencias SAR marítimas

Como parte de la investigación, se propuso un sistema operativo en forma de flujo de procesos entre las fuentes de información y los productos generados por el EMDP (Fig. 9), donde se desarrollaron y optimizaron una serie de rutinas computacionales para el ordenamiento, procesamiento y estimación de la deriva mediante variados métodos, con un enfoque en la automatización, generación de productos y medición del desempeño de las trayectorias estimadas. El diseño programático del sistema se dividió en tres etapas, detalladas a continuación

La primera etapa contempló la adquisición de datos de los MHG y MAG, ya sea mediante acceso directo a la Web, a través de Matlab, para la descarga de un subset de datos (HYCOM y ERA5) o mediante las herramientas del servicio MOTU, utilizando el software Python 2.7.9 integrado a Matlab para el acceso a datos subset de MULTIOBS.



La segunda etapa corresponde a la ejecución del MHL FVCOM, herramienta numérica que se utilizó como reducción de escala temporal y espacial (downscaling) del flujo en 3D a partir de diferentes forzantes (flujo medio, marea, viento y marea+viento). Para su ejecución se adaptaron las funciones presentes en el paquete de herramientas denominadas fvcom-toolbox disponibles en la Web Wiki de la comunidad FVCOM (<https://wiki.fvcom.pml.ac.uk/doku.php?id=tools:fvcom-toolbox>). El detalle del proceso del análisis de las forzantes se encuentra en el punto 3 de la presente sección.

La tercera etapa correspondió al desarrollo y ejecución del EMDP y consistió en la lectura, preproceso, postproceso y generación de productos. Durante la lectura de los datos, se utilizaron las herramientas de NetCDF integradas en Matlab y se extrajeron solo los parámetros necesarios para el análisis (latitud, longitud, u, v y tiempo). Los datos fueron reordenados en variables tipo estructura de Matlab, se guardaron en directorios creados para cada fuente de información y fueron nombrados como datos de preproceso. El paso anterior es importante, dado que este paso suele ser ejecutado solo la primera vez, para posteriormente trabajar sucesivamente sobre el archivo de preproceso ya creado.

Posteriormente, se leyeron los datos de preproceso y se estimaron las trayectorias según lo descrito en el punto 4 de la presente sección. Las trayectorias estimadas fueron corregidas mediante un proceso de interacción con la costa, utilizando polígonos correspondientes a la línea de costa del área de interés, eliminando las trayectorias que se desplazaron dentro o a través de los polígonos y asumiendo como arribo a costa la intersección entre el borde del polígono y la trayectoria de la partícula. Una vez generadas y corregidas las trayectorias, estas fueron guardadas al igual que los archivos de preproceso, pero esta vez nombradas como archivos de postproceso, los que también cumplen la función de permitir trabajar en los pasos posteriores sin tener que repetir los pasos anteriores.

Finalmente, se generaron herramientas para la generación de variados productos gráficos, en formato de imágenes y videos, en los cuales se muestra el trazado de las trayectorias y el desempeño de estas cuando existen mediciones in-situ, ya sean derivadores y/o hallazgos.

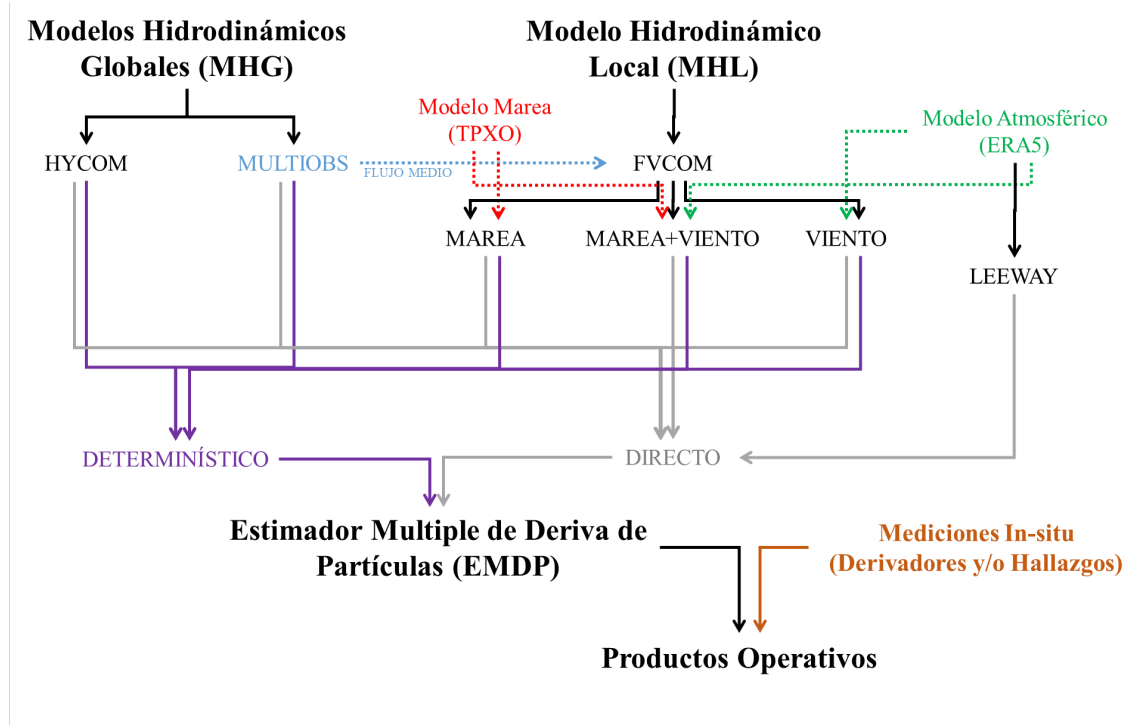


Figura 9. Flujo de procesos desde las fuentes de información, métodos de estimación de trayectoria, EMDP y los productos operativos.

## 6. Evaluación mediante derivadores medidos el 10 y 14 de septiembre de 2011.

Esta evaluación correspondió al análisis cuantitativo del desempeño de las trayectorias estimadas, donde se compararon las derivas modeladas respecto las derivas medidas en terreno durante la campaña de mediciones realizadas por el SHOA los días 10 y 14 de septiembre durante la emergencia SAR, en la que se liberaron derivadores superficiales en diferentes puntos entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe (Fig. 2 y Tabla 1).

Debido a la corta extensión de las mediciones (entre 1 a 4 horas), levemente superior a la resolución temporal de los MHG (sin aumento de resolución) y la escasa cantidad de mediciones (varios registros con menos de 4 mediciones), las comparaciones entre derivadores medidos y modelados se realizó solo con las mediciones con más de 3 muestras y con una extensión temporal mayor a 2 horas (Fig. 10). Lo último tuvo como finalidad de proporcionar la mayor robustez estadística en la medida de desempeño.

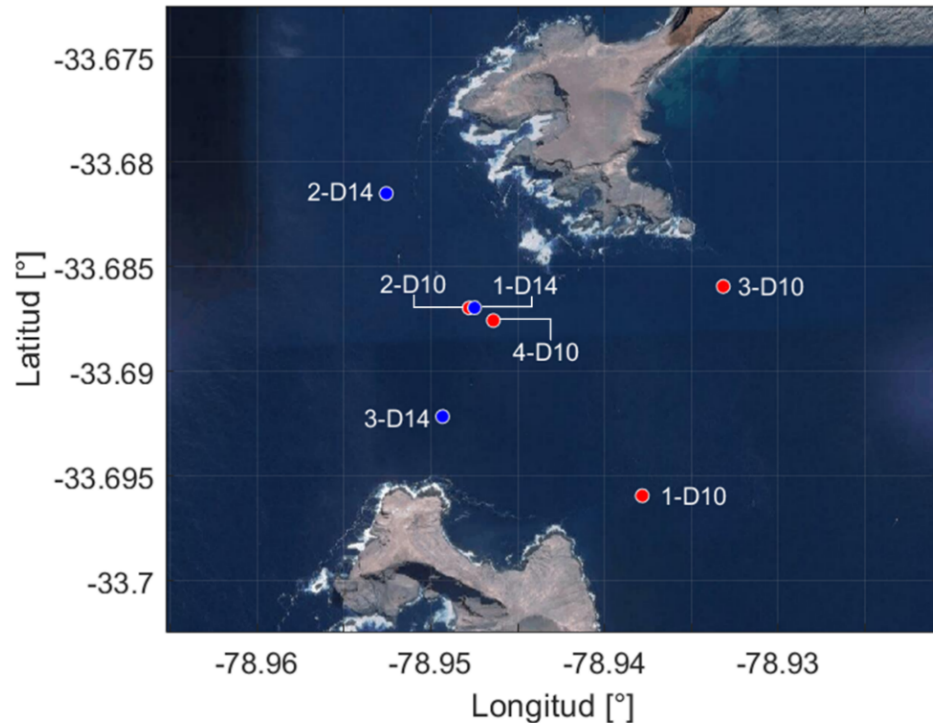


Figura 10. Derivadores seleccionados mediante criterio de extensión temporal y de número de mediciones, medidos in-situ los días 10 (rojo) y 14 (azul) de septiembre de 2011.

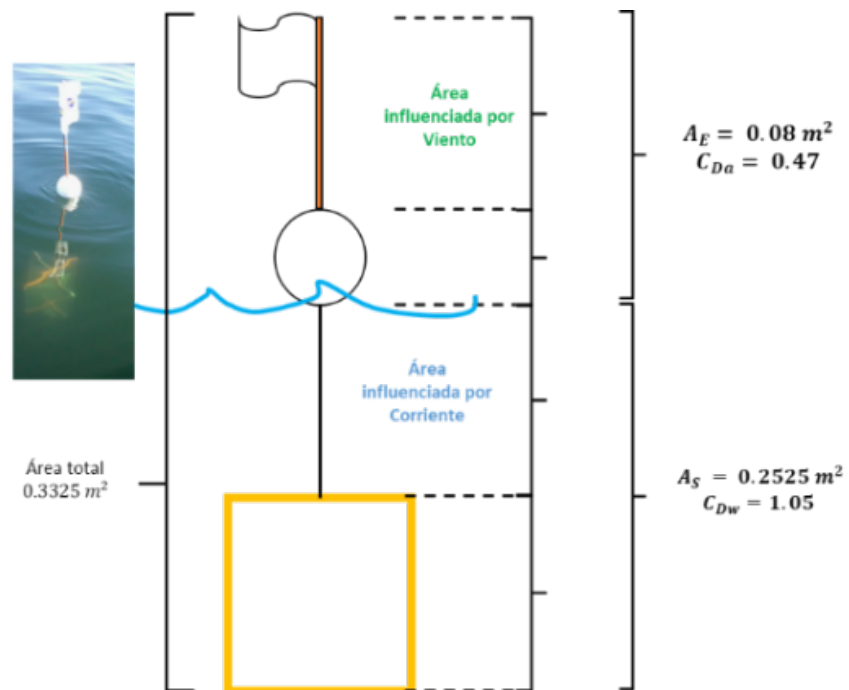


Figura 11. Esquema de los derivadores liberados por el SHOA (10 y 14 de sep. 2011)



Considerando el diagrama indicado en la Figura 11, se definieron los parámetros  $A_E$  ( $0.08 \text{ m}^2$ ) y  $A_S$  ( $0.25 \text{ m}^2$ ) para el análisis determinístico de las trayectorias. Los coeficientes de arrastre utilizados corresponden a los propuestos por Hoerner (1965), para cuerpos en interacción con flujos turbulento ( $Re$  entre  $10^4$  y  $10^6$ ). Tomando en cuenta la forma predominante del objeto, en superficie, se utilizó el  $C_{Da}$  de una esfera igual a 0.47 y en subsuperficie se utilizó  $C_{Dw}$  de un cuadrado igual a 1.05. Cabe señalar que el número crítico de  $Re$  utilizado en Di Maio *et al.* (2016) varió entre 165000 y 168000 ( $1.65 \cdot 10^5$  y  $1.68 \cdot 10^5$ ). Finalmente, para el análisis mediante LEeway se utilizaron los valores tabulados en Allen (2005), para una persona flotando en la superficie del mar (PIW, Person In the Water por sus siglas en inglés), en postura sentada (dada la similitud con la geometría de la boya, respecto a los otros elementos tabulados), para la cual  $m_{DWL}$  correspondió a un 1.06 % y  $b_d$  a  $8.3 \text{ cm s}^{-1}$ .

Tabla 3. Derivadores seleccionados mediante criterio de extensión temporal y de número de mediciones, medidos in-situ los días 10 y 14 de septiembre de 2011.

1-D10			1-D14		
Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)
10-09-2011 19:59	-33.6959	-78.9378	14-09-2011 17:08	-33.6869	-78.9475
10-09-2011 20:17	-33.6954	-78.9394	14-09-2011 17:25	-33.6884	-78.9454
10-09-2011 20:40	-33.6951	-78.9406	14-09-2011 17:40	-33.6894	-78.9437
10-09-2011 21:19	-33.6950	-78.9379	14-09-2011 18:15	-33.6903	-78.9392
10-09-2011 22:01	-33.6966	-78.9331	14-09-2011 18:17	-33.6904	-78.9390
10-09-2011 22:21	-33.6978	-78.9306	14-09-2011 18:58	-33.6909	-78.9358
10-09-2011 22:38	-33.6987	-78.9285			
2-D10			2-D14		
Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)
10-Sep-2011 19:50	-33.6870	-78.9478	14-09-2011 17:14	-33.6815	-78.9526
10-Sep-2011 20:08	-33.6867	-78.9531	14-09-2011 17:29	-33.6832	-78.9521
10-Sep-2011 20:25	-33.6859	-78.9560	14-09-2011 17:46	-33.6849	-78.9509
10-Sep-2011 21:30	-33.6840	-78.9616	14-09-2011 18:21	-33.6876	-78.9474
			14-09-2011 18:50	-33.6886	-78.9452
3-D10			3-D14		
Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)	Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)
10-09-2011 19:53	-33.6859	-78.9332	14-09-2011 17:18	-33.6921	-78.9493
10-09-2011 20:15	-33.6872	-78.9356	14-09-2011 17:36	-33.6935	-78.9465
10-09-2011 20:44	-33.6889	-78.9384	14-09-2011 17:51	-33.6947	-78.9439
10-09-2011 21:17	-33.6907	-78.9381	14-09-2011 18:08	-33.6952	-78.9414
10-09-2011 22:00	-33.6938	-78.9339	14-09-2011 18:33	-33.6958	-78.9389
10-09-2011 22:22	-33.6949	-78.9300	14-09-2011 19:25	-33.6951	-78.9384
10-09-2011 22:40	-33.6954	-78.9267			
10-09-2011 23:14	-33.6952	-78.9226			
4-D10					
Fecha	Latitud (°)	Longitud (°)			
10-09-2011 21:46	-33.6876	-78.9464			
10-09-2011 21:56	-33.6877	-78.9441			
10-09-2011 22:28	-33.6865	-78.9347			
10-09-2011 22:45	-33.6847	-78.9297			
10-09-2011 22:52	-33.6835	-78.9284			
10-09-2011 23:24	-33.6803	-78.9286			



## 7. Evaluación de derivas desde el punto del accidente.

Este análisis correspondió a una evaluación cualitativa de las trayectorias, donde se liberaron un total de 260 partículas en un radio de 300 m alrededor del punto del accidente de coordenadas  $33^{\circ} 41' 32.64''$  S y  $78^{\circ} 56' 09.0''$  W.

Las partículas fueron liberadas cada 30 min durante 6 hrs desde el momento del accidente y se evaluó el desplazamiento de estas durante los siguientes 6 días. Con la intención de simular la dispersión natural de las corrientes de meso y submesoescala, se aplicó un paso aleatorio de distribución normal y divergencia direccional no mayor a  $20^{\circ}$  en cada paso de tiempo (Allen and Plourde, 1999 y Ohlmann *et al.*, 2019), tal como se detalla en el punto 4 de la metodología.

Para la estimación de las trayectorias mediante el método determinístico, se asumió un cilindro de  $A_S$  igual a  $A_E$  igual a  $0.5 \text{ m}^2$  y  $C_{Da}$  igual a  $C_{Dw}$  igual a 0.82 (Hoerner, 1965). Para la estimación mediante el método LEEWAY, se asumió nuevamente los parámetros de regresión tabulados en Allen (2005), para una PIW en posición sentada ( $m_{DWL}$  igual 1.06% y  $b_d$  a  $8.3 \text{ cm s}^{-1}$ ).

La evaluación cualitativa se efectuó mediante la comparación directa de las trayectorias modeladas y las zonas donde se registraron hallazgos durante la emergencia SAR (Fig. 3 y Tabla 2). Para dicha comparación, las áreas de hallazgos fueron transformadas en polígonos, al igual que los hallazgos puntuales asumiendo un radio de 200 m a la redonda (Fig. 3), donde el éxito de las trayectorias se basó en el arribo de las partículas en dichos polígonos.

## RESULTADOS

### 1. Validación del Modelo Hidrodinámico Local

Tomando en cuenta las fechas en las cuales fue realizada la modelación hidrodinámica mediante FVCOM y su corta duración, para la validación de los resultados se dispuso sólo de información de nivel del mar proveniente de la Estación de Nivel del Mar (ENM) perteneciente al SHOA; Estación Meteorológica perteneciente a la DGAC, ambas ubicadas en la bahía Cumberland de la isla Robinson Crusoe (Fig. 12); y los derivadores y hallazgos registrados durante la emergencia. Estos últimos se describen en los puntos 2 y 3 de la presente sección.

Considerando la limitación descrita anteriormente, la validación cuantitativa de las salidas del modelo FVCOM se realizó solo para los escenarios forzados mediante Marea y Marea+Viento, los que fueron comparados con los registros de marea de bahía Cumberland (Figs. 13 y 14). También fue considerado un análisis cualitativo de las mareas y corrientes e indirecto entre las corrientes y viento modelado en las cercanías del punto del accidente (Figs. 15, 16 y 17).

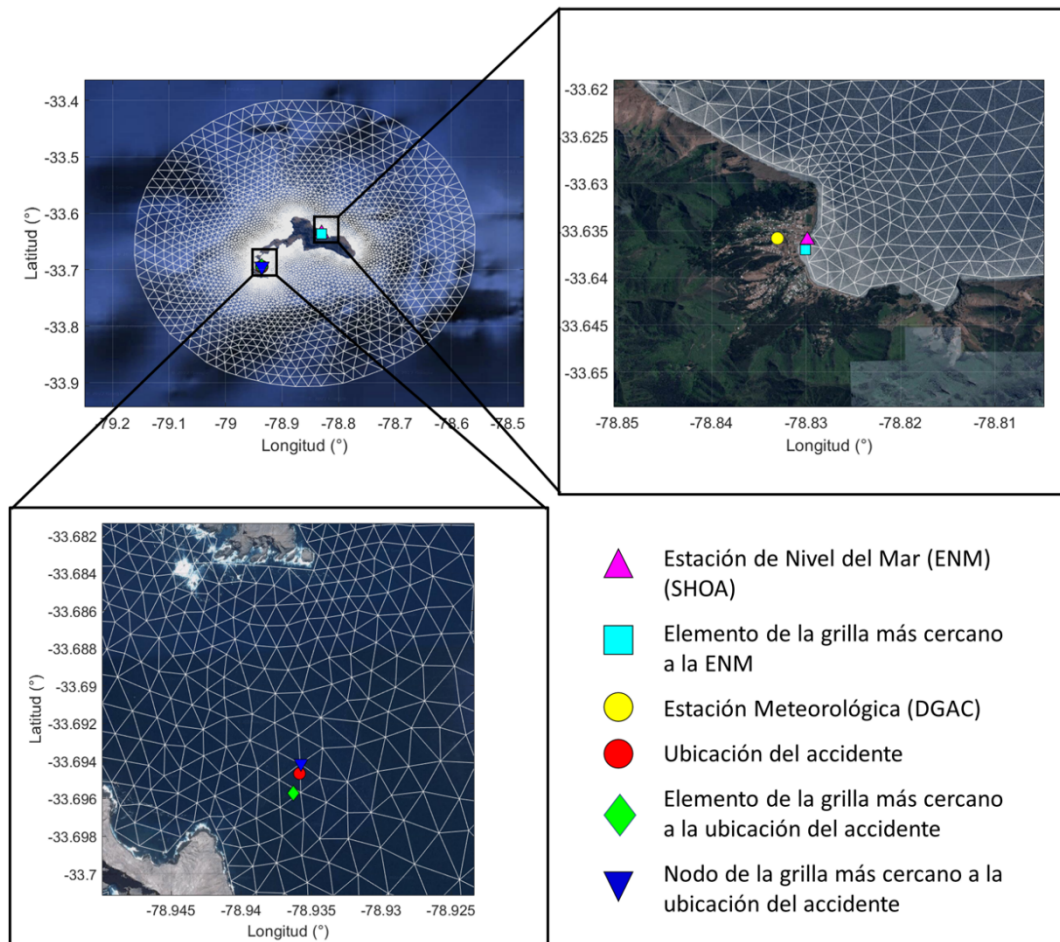


Figura 12. Ubicación de los instrumentos de medición y puntos de extracción de datos del modelo FVCOM.

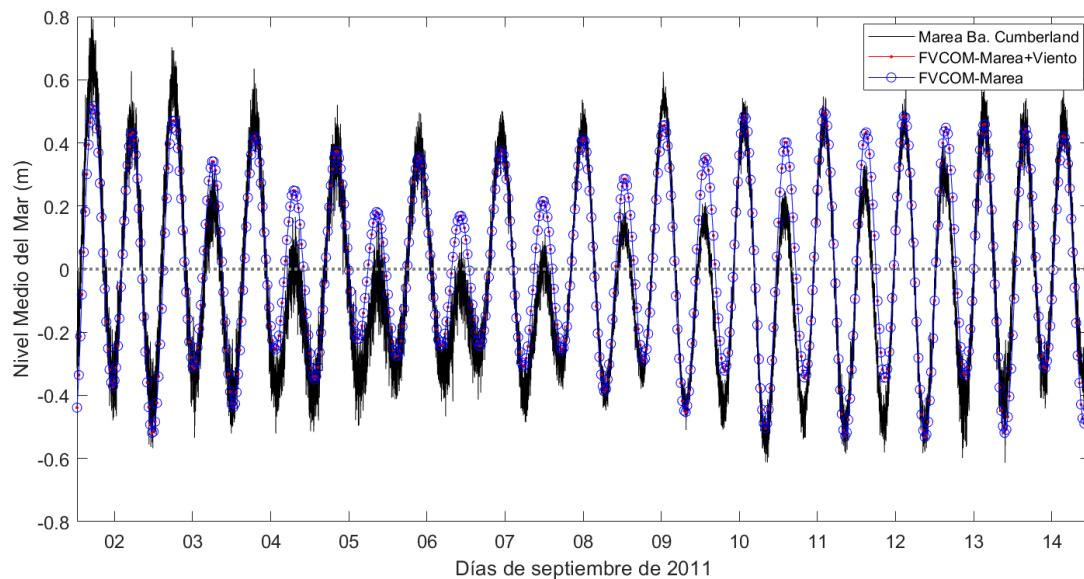


Figura 13. Comparación entre series de tiempo de nivel del mar de la ENM (SHOA) y las salidas de las modelaciones de FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento.

La comparación entre las series de tiempo de nivel del mar de la ENM (SHOA) y las resultantes de las modelaciones realizadas mediante FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento, evidencian en primera instancia una baja diferenciación entre las salidas del modelo en ambos escenarios. Esto queda también en evidencia cuando se comparan dichos resultados con los datos medidos por la ENM, donde se registran diferencias mínimas en sus respectivos coeficientes de correlación, donde para FVCOM-Marea versus ENM se registró un R de 0.9022 y para FVCOM-Marea+Viento versus ENM se registró un R de 0.9023 (Fig. 14).

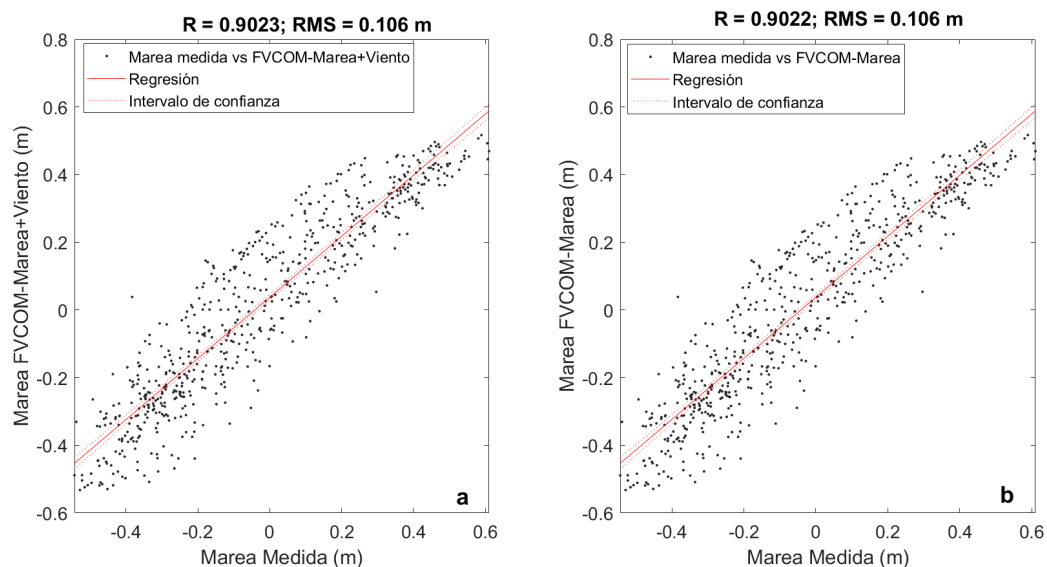


Figura 14. Análisis de correlación entre las series de tiempo de nivel del mar de la ENM (SHOA) y las salidas de las modelaciones de FVCOM-Marea+Viento (a) y FVCOM-Marea (b).

Respecto a la relación entre las modelaciones y los datos medidos, se puede apreciar un buen desempeño de los modelos en épocas de sicigia, situación que se reduce en épocas de cuadratura, donde los modelos tendieron a sobrevalorar la desigualdad diurna de la marea (Fig. 13). Cabe señalar que este error puede tener su origen en la fuente de generación de la forzante marea para el MHL mediante el modelo TPXO, como se observa en la Figura 8.

En las cercanías al punto del accidente, los datos resultantes de los modelos (FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento), al igual que en bahía Cumberland, son muy similares (Fig. 15). Bajo estos escenarios fue posible recrear corrientes reversibles en la zona entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe, acorde a las fases de marea llenante y vaciante en épocas de sicigia. Dicha relación entre las fases de marea y los flujos y reflujos de la corriente se reduce en épocas de cuadratura, especialmente cuando se aprecia la mayor desigualdad diurna de marea, afectando principalmente a la marea de menor amplitud (Fig. 15).

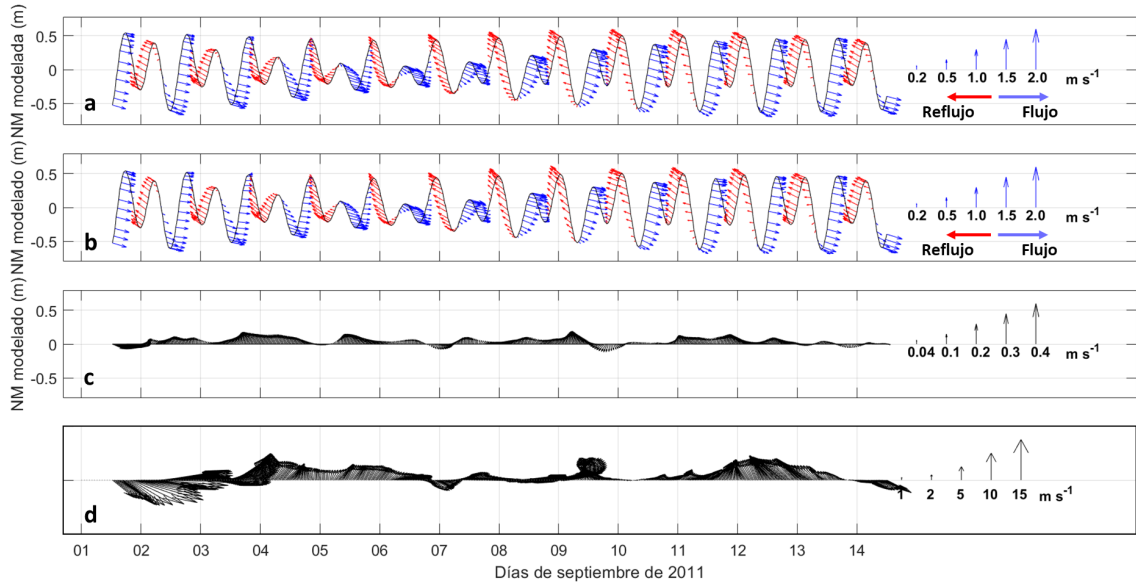


Figura 15. Análisis de datos resultantes en las cercanías del punto de accidente entre el 01 al 14 de septiembre de 2011. a) marea y corriente obtenida mediante FVCOM-Marea; b) marea y corriente obtenida mediante FVCOM-Marea+Viento; c) marea y corriente obtenida mediante FVCOM-Viento y d) viento interpolado de ERA5.

Como era de esperarse, el escenario FVCOM-Viento no arrojó resultados de marea (Fig. 15), dado que no fue forzado con esa variable. Los resultados muestran que la magnitud de la corriente superficial obtenida mediante FVCOM-Viento es al menos 5 veces menor que las obtenidas con el forzamiento de marea (FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento). En la Figura 16 se puede apreciar que el escenario FVCOM-Marea generó una corriente rotatoria con dirección preferente Noroeste-Oeste y Este-Sureste, al igual que el escenario FVCOM-Marea+Viento, aunque este último presentó variaciones en dirección que resultaron en una desviación del efecto rotatorio. El escenario FVCOM-Viento magnitudes bajas respecto a los escenarios forzados con marea, sin una clara dirección preferente (Fig. 16).

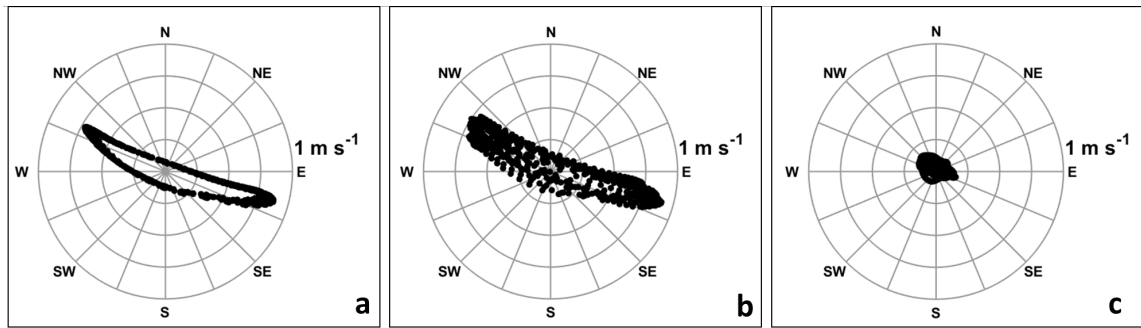


Figura 16. Diagrama polar de los datos de corrientes superficial modelados con FVCOM entre el 01 al 14 de septiembre de 2011. a) corriente obtenida mediante FVCOM-Marea; b) corriente obtenida mediante FVCOM-Marea+Viento; c) corriente obtenida mediante FVCOM-Viento.

La Figura 17 muestra la relación entre el viento interpolado del MAG ERA5 y las corrientes obtenidas en el escenario FVCOM-Viento ( $R$  de 0.72 para la componente  $U$  y 0.63 para la componente  $V$ ). También se observa la pérdida de relación viento y corriente superficial cuando se incorpora la forzante marea en el MHL para el escenario FVCOM-Marea+Viento (Fig. 17).

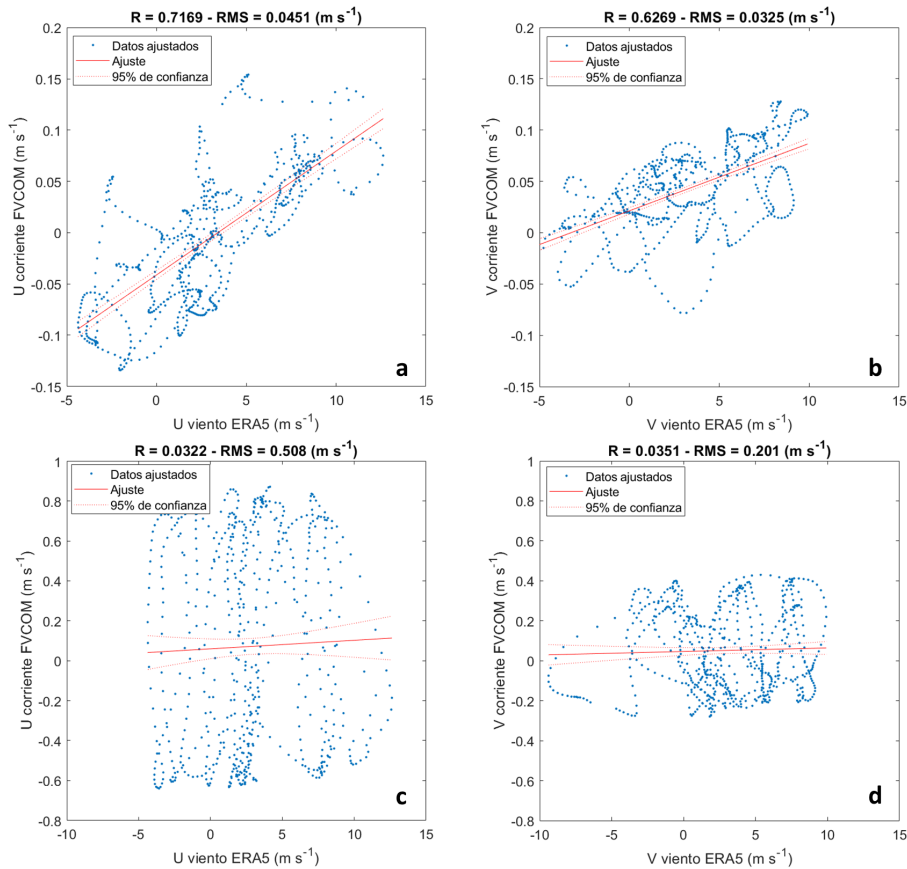


Figura 17. Análisis de correlación entre las componentes  $U$  y  $V$  del viento interpolado desde ERA5 y las corrientes modeladas con FVCOM. a) y b) son la componente  $U$  y  $V$ , respectivamente, obtenida del escenario FVCOM-Viento; c) y d) son la componente  $U$  y  $V$ , respectivamente, obtenida del escenario FVCOM-Marea+Viento

## 2. Trayectorias modeladas para los días 10 y 14 de septiembre

El análisis cuantitativo del desempeño entre derivas medidas y modeladas durante las mediciones del 10 y 14 de septiembre, se muestran esquemáticamente en la Figuras 18, 19 y 20. Se utilizaron los datos de derivadores medidos con al menos cuatro muestras y por al menos 2 horas de medición (Fig. 11 y Tabla 3).

En la Figura 18 se muestra la variación geográfica de las derivas medidas y modeladas, donde se puede apreciar la dirección preferente hacia el SE de los derivadores medidos, durante ambos días de medición, a excepción del derivador 2 del día 10 de septiembre (2-D10). Cabe destacar que las mediciones realizadas el 10 de septiembre tuvieron, en general, un mayor desplazamiento geográfico respecto a los medidos el 14 de septiembre. Las derivas modeladas con mayor influencia mareal (MHL con Marea y Marea+Viento) parecen representar de mejor forma el movimiento en sentido Este-Oeste medido el día 10 de septiembre, respecto a los modelos con mayor influencia del viento (MHL con Viento, MHGs y LEEWAY), sin embargo, el día 14 de septiembre, los modelos asociados a la marea se ajustaron levemente sólo al movimiento Norte-Sur, mientras que los modelos asociados al viento, tuvieron un mejor ajuste en ambas componentes geográficas (Fig. 18).

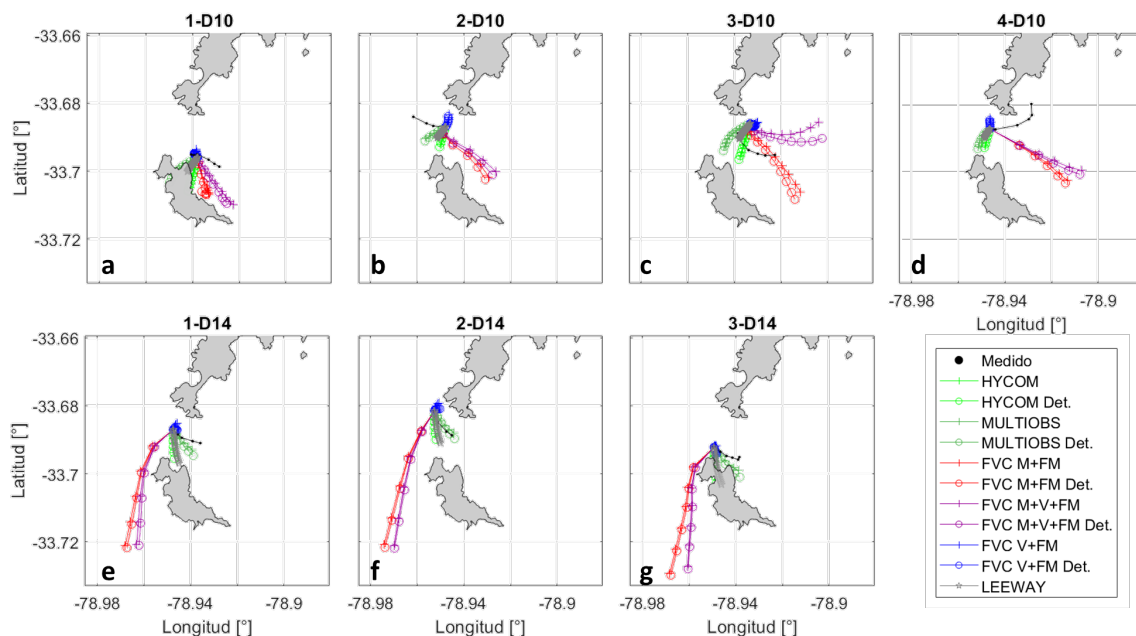


Figura 18. Comparación geográfica entre derivadores medidos y modelados para ambos días de muestreo y para todos los escenarios ejecutados. Los paneles a, b, c y d muestran las derivas medidas y modeladas durante el 10 de septiembre 2011. Los paneles e, f y g muestran las derivas medidas y modeladas durante el 14 de septiembre de 2011. FVC=FVCOM; M=Marea; V=Viento; FM=Flujo Medio y Det=Determinístico.

La diferencia de posición o distancia entre los derivadores medidos y modelados se muestra en la Figura 19, asociada al desplazamiento acumulado del derivador medido (negro). La idea de representar el desplazamiento acumulado del derivador medido fue destacar las trayectorias modeladas que tuvieron una baja variación y que su diferencia



estimada es muy similar al desplazamiento acumulado del derivador medido, Es decir, las trayectorias modeladas sobre y bajo la curva negra representan una peor y mejor modelación, respectivamente, mientras que las curvas cercanas a la curva negra representan modelos de escasa varianza.

En general, el desplazamiento acumulado de los derivadores medidos varió entre 1092 m y 2377 m, en ambos días de medición. Durante el 10 de septiembre el desplazamiento acumulado del derivador medido varió entre 1487 m y 2377 m, mientras que el día 14 de septiembre varió entre 1092 y 1198 m.

El día 10 de septiembre, las derivas modeladas mediante FVCOM-Viento (directo y determinístico) y LEEWAY mostraron una baja tasa de movimiento, no representativa del recorrido realizado por el derivador medido (Fig. 18), lo que explica su comportamiento similar al desplazamiento acumulado del derivador medido en la Figura 18. En relación a las diferencias entre derivadores medidos y modelados (Fig. 19), y descartando el modelo de escasa variación, los modelos de mejor desempeño para el derivador 1D10 (1487 m acumulados) fue FVCOM-Marea-directo (974 m) seguido de FVCOM-Marea-Determinístico (1051 m) en 3 horas de medición; para el derivador 2D10 (1337 m acumulados) fue MULTIOBS-Directo (904 m) seguido de MULTIOBS-Determinístico (913 m) en dos horas de medición; para el derivador 3D10 (2377 m acumulados) fue FVC-Marea-directo (1056 m) seguido de FVCOM-Marea-Determinístico (1176 m) en 4 horas de medición; y finalmente para el derivador 4D10 (2140 m acumulados) fue HYCOM-Directo (2174 m) seguido de HYCOM-Determinístico (2223 m) en 2 horas de medición.

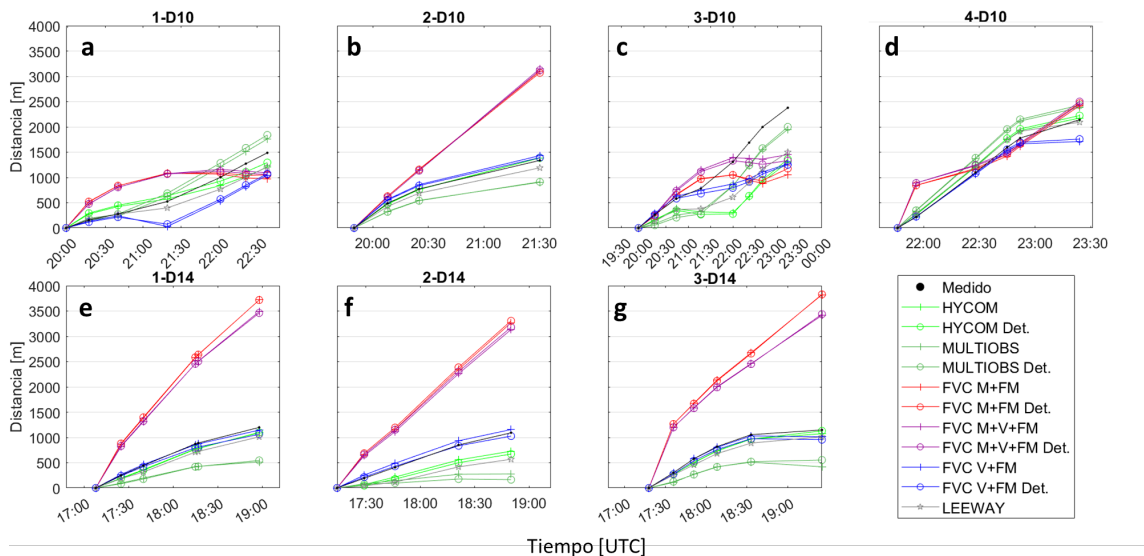


Figura 19. Distancia entre derivadores medidos y modelados (coloreada), y recorrido acumulado del derivador medido (negro). Los paneles a, b, c y d muestran las distancias obtenidas durante el 10 de septiembre 2011. Los paneles e, f y g muestran las distancias obtenidas durante el 14 de septiembre de 2011. FVC=FVCOM; M=Marea; V=Viento; FM=Flujo Medio y Det=Determinístico.

El día 14 de septiembre, las derivas modeladas mediante FVCOM-Viento (directo y determinístico) mostraron una baja tasa de movimiento, no representativa del recorrido realizado por el derivador medido, lo que explica su comportamiento similar al desplazamiento acumulado del derivador medido en la Figura 18. En relación a las diferencias entre derivadores medidos y modelados (Fig. 19), y descartando los modelos de escasa variación, los modelos de mejor desempeño para el derivador 1D14 (1198 m acumulados) fue MULTIOBS-Directo (528 m) seguido de MULTIOBS-Determinístico (545 m) en 2 horas de medición; para el derivador 2D14 (1092 m acumulados) fue MULTIOBS-Determinístico (165 m) seguido de MULTIOBS-Directo (278 m) en dos horas de edición; finalmente, para el derivador 3D14 (1148 m acumulados) fue MULTIOBS-Directo (418 m) seguido de MULTIOBS-Determinístico (553 m) en 2 horas de medición.

Con la finalidad de evaluar en forma general el desempeño de las trayectorias modeladas, los datos de las trayectorias medidas y modeladas fueron concatenados en un vector de datos de largo igual al Número de mediciones y los registros de posiciones fueron separados en desplazamiento Este-Oeste (E-O) y Norte-Sur (N-S) y en magnitud ( $m s^{-1}$ ) (Fig. 20). Una vez ordenado los datos, se estimó su desviación estándar (STD), coeficiente de correlación (R) y error medio cuadrático (RMS), lo cuales se muestran en forma de diagramas de Taylor (Fig. 20).

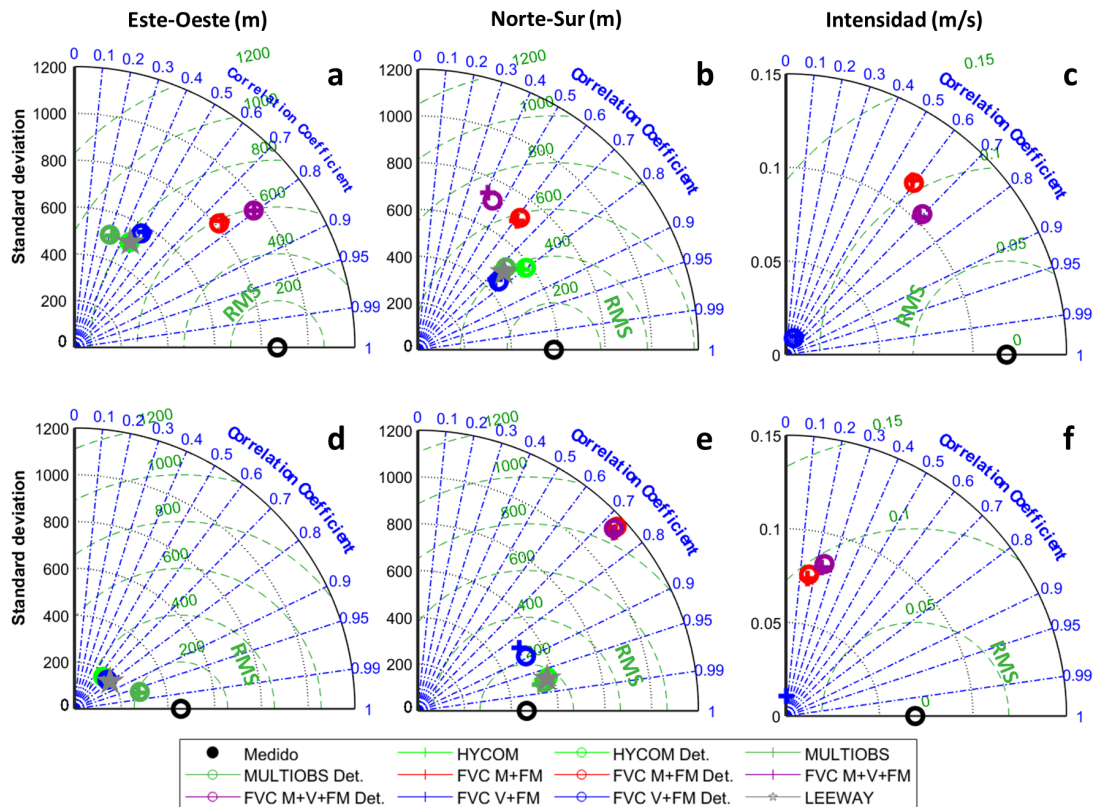


Figura 20. Comparación entre derivadores medidos y modelados. Los desplazamientos y velocidades fueron concatenados de forma sucesiva como número de mediciones. Los paneles a, b, c y d muestran los resultados obtenidos para el 10 de septiembre 2011. Los paneles e, f y g muestran los resultados obtenidos para el 14 de septiembre de 2011. FVC=FVCOM; M=Marea; V=Viento; FM=Flujo Medio y Det=Determinístico.



Los resultados para el día 10 de septiembre (Fig. 20), indican que, para su componente E-O, los mayores desempeños se lograron mediante FVCOM-Marea con R de 0.76 (Directo y Determinístico), RMS de 586 m (Determinístico) y 591 m (Directo) y STD de 832 m (Dir.) y 815 m (Determinístico) respecto al STD medido de 868 m. Este desempeño fue seguido muy de cerca por los obtenidos mediante FVCOM-Marea+Viento (Directo y Determinístico), que alcanzaron valores similares de R y RMS, pero registrando una STD de 965 en ambos casos.

Para la componente N-S (Fig. 20), los mayores desempeños se lograron mediante el modelo HYCOM con R de 0.8 (Directo y Determinístico), RMS de 370 m (Directo y Determinístico) y STD de 563 m (Directo) y 581 m (Determinístico) respecto al STD medido de 582 m. Este desempeño fue seguido muy de cerca por los obtenidos mediante LEEWAY, FVCOM-Viento (Directo y Determinístico) y MULTIOBS, dejando atrás a los modelos asociados a Marea. Finalmente, en magnitud solo se observaron valores leves de desempeño para FVCOM-Marea+Viento con R de 0.7, RMS de 0.09 m s<sup>-1</sup> (Directo y Determinístico) y STD de 0.102 m s<sup>-1</sup> (Directo) y de 0.105 m s<sup>-1</sup> (Determinístico) respecto al STD medido de 0.118 m s<sup>-1</sup>. Este desempeño fue seguido de cerca por el obtenido mediante FVCOM-Marea (Directo y Determinístico), dejando atrás al resto de los modelos.

Para la Magnitud (Fig. 20), el mejor desempeño fue alcanzado por el modelo FVCOM-Marea+Viento (Directo y Determinístico), alcanzando valores para ambos casos de 0.70 para R, con un RMS de 0.09 m s<sup>-1</sup> y STD de 0.082 y 0.084 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, respecto a la STD medida de 0.069 m s<sup>-1</sup>. Este desempeño fue seguido de cerca por el modelo FVCOM-Marea (Directo y Determinístico), con R de 0.59 para ambos casos; RMS de 0.106 y 0,104 m s<sup>-1</sup>, respectivamente; y STD de 0.115 y 0.114 m s<sup>-1</sup>, respectivamente. El resto de los modelos obtuvo resultados lejos de lo observado.

Los resultados para el día 14 de septiembre (Fig. 20), indican que, para su componente E-O, los mayores desempeños se lograron mediante MULTIOBS con R de 0.97 (Directo y Determinístico), RMS de 190 m (Determinístico) y 194 m (Directo) y STD de 283 m (Directo) y 289 m (Determinístico), respecto al STD medido de 455 m. Este desempeño fue seguido muy de cerca por los obtenidos mediante LEEWAY y FVCOM-Viento (Directo y Determinístico) ambos con escaso aporte de STD (< 192 m).

Para la componente N-S (Fig. 20), los mayores desempeños se lograron mediante el modelo MULTIOBS con R de 0.98 (Directo y Determinístico), RMS de 124 m (Directo) y 145 m (Determinístico) y STD de 531 m (Directo) y 557 m (Determinístico) respecto al STD medido de 477 m. Este desempeño fue seguido muy de cerca por los obtenidos mediante HYCOM, LEEWAY y FVCOM-Viento, todos medidos tanto de forma Directa como Determinística, dejando atrás a los modelos asociados a Marea. Finalmente, en magnitud se observaron valores muy bajos asociados a los modelos ejecutados mediante FVCOM.



Para la Magnitud (Fig. 20), se registraron muy bajos de desempeño, pudiendo destacar solo los valores de STD cercanos a lo observado para los modelos FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento.

Considerando lo expuesto en IAMSAR (2019), se puede asociar proporcionalmente la probabilidad de éxito con el Ancho de Barrido (AB) de búsqueda de un medio de busca. En el caso de la búsqueda de una persona en el agua, en condiciones meteorológicas ideales, el AB de un buque mercante sería de 1.3 km y de una aeronave a baja altura (150 m) sería de 0.2 km. Basado en el parámetro de AB, el mejor desempeño fue obtenido con los MHG, FVCOM-Viento y LEEWAY, donde en el mejor de los casos (165 m 2D14 MULTIOBS Determinístico) el modelo se encuentra dentro de 1 ancho de barrido y en el peor de los casos (2381 m 4D10 MULTIOBS Determinístico) el modelo se encuentra dentro de 11 barridos de aeronave y 2 barridos de buque.

En el mismo sentido, los casos modelados con FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento obtuvieron un peor desempeño, donde en el mejor de los casos (974 m 1D10 FVCOM-Marea Directo) el modelo se encuentra a 5 barridos en aeronave y 1 en buque, mientras que en el peor caso (3829 m 3D14 FVCOM-Marea Determinístico), el modelo obliga a realizar 19 barridos en aeronave y 3 barridos en buque.

Realizando el mismo ejercicio, pero tomando en cuenta los valores de RMS, podemos evidenciar que ni uno de los escenarios evaluados supera un ancho de barrido por buque. Considerando el movimiento E-O, el mejor y peor desempeño se obtuvo mediante MULTIOBS Determinístico (190 m) y FVCOM-Marea Directo (896 m) obligando a realizar 1 y 5 barridos con aeronave, respectivamente. Para el movimiento N-S, el mejor y peor desempeño se obtuvo mediante MULTIOBS Directo (124 m) y FVCOM-Marea Determinístico (876 m), obligando a realizar 1 y 5 barridos con aeronave, respectivamente.

### 3. Validación de las trayectorias mediante el registro de hallazgos

El análisis cualitativo de desempeño (Fig. 21) fue realizado mediante la comparación de las trayectorias modeladas respecto a áreas donde se registraron hallazgos durante la emergencia SAR de la época, según lo descrito en el punto 7 de la metodología.

Los resultados obtenidos a partir de los MHG muestran una tendencia hacia los polígonos ubicados al centro y Oeste de la isla Robinson Crusoe, mientras que, al aplicar el sistema determinístico, los arribos se desplazaron a los polígonos ubicados al Este de la isla (Fig. 21), alejándose de los polígonos más cercanos. El método LEEWAY mostró derivas hacia los polígonos del centro y Este de la isla (Fig. 21), con poco éxito en arribos a los polígonos destacados. Los resultados obtenidos mediante el MHL-Directo, muestra una baja relación entre el modelo forzado con marea y los hallazgos, mientras que los forzados con Viento y Marea+Viento tuvieron una tendencia hacia los polígonos del lado Oeste y centro de la isla. La aplicación del método determinístico generó una mejora en la distribución de los arribos en todos los casos ejecutados con FVCOM (Fig. 21).

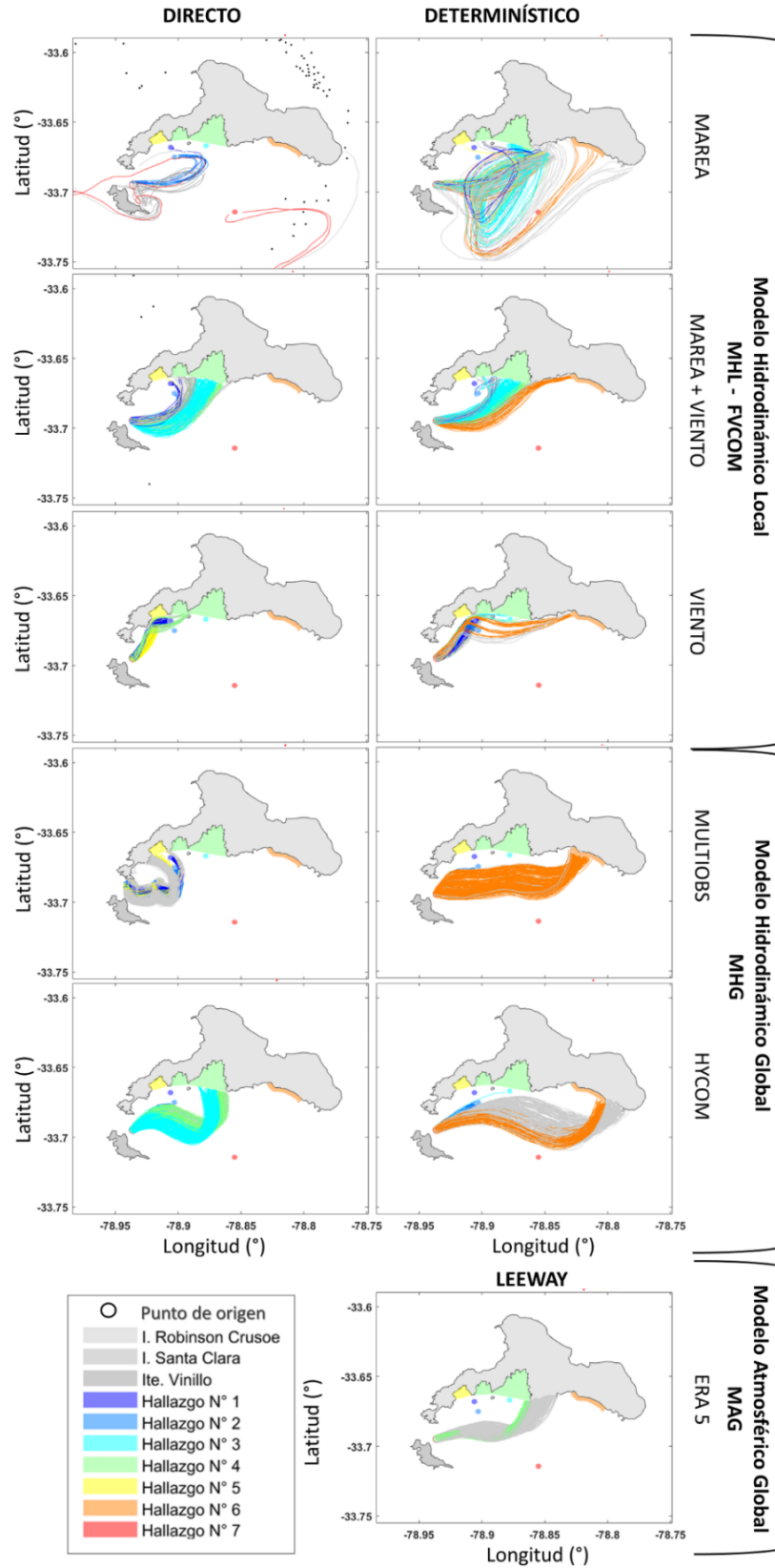


Figura 21. Trayectoria de partículas durante la emergencia SAR (MHL, MHG y LEEWAY) entre el 02 y 08 de septiembre de 2011.



## DISCUSIÓN

### 1. Metodología

La metodología aplicada en el presente estudio tiene varias aristas, debido a la aplicación de variadas fuentes de información y metodologías de estimación de trayectorias. Si bien, fue posible determinar su desempeño por separado (forma directa y LEEWAY) y conjugado (determinístico), el error en el desempeño estimado finalmente es una sumatoria de los errores asociados a la modelación numérica; la interpolación de datos puntuales; las simplificaciones asociadas al balance de fuerza del método determinístico y a la aproximación explícita para la resolución de la EDO de la trayectoria de partículas.

Para comprender de mejor forma la proporción del error en el desempeño, podemos asumir que el error asociado a la resolución de la EDO mediante el algoritmo Runge-Kutta y el error debido a la interpolación puntual de datos es proporcional para todos los escenarios estudiados, dado que fue aplicado de forma indistinta para cada caso. Así también el error asociado a las simplificaciones del método determinístico fue proporcional a todos los escenarios en los cuales fue aplicado y puede ser comparado al error de desempeño mediante aplicación directa, dado que utilizan las mismas fuentes de información, siendo este último, el error más próximo a la fuente de información.

Basado en lo anteriormente expuesto, el método LEEWAY posee más complicaciones a la hora de evaluar su desempeño en comparación al resto de las fuentes y métodos utilizados, principalmente dadas por el uso directo del MAG y las relaciones empíricas extraídas de Allen (2005) para una Persona En el Agua (PIW por sus siglas en inglés), elemento escogido por la similitud geométrica respecto a los derivadores medidos durante la época del accidente.

Por lo tanto, el análisis del desempeño realizado en el presente estudio se realizará en primera instancia, mediante comparación de los escenarios evaluados de forma directa, tanto MHG como MHL, con la finalidad de evaluar el desempeño directo de las fuentes de información. Posteriormente se evaluará el desempeño de los escenarios evaluados de forma determinística, con la finalidad de evaluar el efecto de este método en el desempeño de las trayectorias. Finalmente se evaluará el desempeño obtenido mediante LEEWAY y su comparación con el resto de los escenarios.

### 2. Evaluación cuantitativa de los escenarios

Para una buena interpretación de los resultados, es necesario considerar las condiciones locales del área en la cual se realizaron los estudios mediante derivadores. La zona entre isla Santa Clara e isla Robinsón Crusoe se caracteriza por presentar corrientes con influencia mareal del tipo reversible, con flujo hacia el Sureste y refluo hacia el NW cuando se presentan vientos con intensidad  $< 2 \text{ m s}^{-1}$ , pero cuando existen vientos



mayores y sostenidos desde el Noroeste, la corriente superficial presenta una dirección predominante hacia el Sureste (SHOA, 2013). Este comportamiento reversible de las corrientes en el canal fue capturado por los escenarios modelados con FVCOM forzado con Marea y Marea+Viento.

Es necesario destacar, además, que en la zona entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe, dadas las condiciones orografía del área y en presencia de condiciones adversas de viento (como las reportadas durante el accidente), pueden dar lugar a inestabilidades atmosféricas, fuertes turbulencias y flujos verticales, condiciones que además cambian abruptamente en cortos periodos de tiempo y que según Gracia (2017), dieron el origen al accidente del avión C-212. Este tipo de eventos no pueden ser capturados a partir de los resultados presentes en el MAG, debido a la limitación en resolución espacial y temporal de los campos de viento, lo cual sugiere que, en dicha zona, los vientos podrían estar subvalorados.

Lo último cobra relevancia cuando se observan las magnitudes obtenidas en el punto del accidente mediante el escenario FVCOM-Viento, el cual es al menos 5 veces menor que los obtenidos por los escenarios FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento, atribuible a una subvaloración del viento forzante. Esto puede tener origen tanto en la escala global del MAG, la cual debiese ser reducida antes de ser ingresada al MHL y a la representatividad de estos, tomando en cuenta que el MAG tuvo una buena relación con los datos capturados en bahía Cumberland, la hipótesis sugiere que los vientos en el canal pudiesen actuar de forma distinta y más intensa debido a la orografía del área.

Durante las fechas de muestreo, 10 y 14 de septiembre del 2011, se observaron diferentes patrones de marea y viento. El día 10 de septiembre, las mediciones de los derivadores escogidos según criterio de N° de muestreo y tiempo, se realizaron principalmente en baja mar y marea llenante, con viento de baja intensidad ( $< 0.5 \text{ m s}^{-1}$ ). En cambio, el día 14 de septiembre, las mediciones de los derivadores escogidos según los criterios antes mencionados, se realizaron principalmente durante marea vaciante, con vientos que alcanzaron los  $5.2 \text{ m s}^{-1}$  en dirección desde el Noroeste.

Por lo tanto, según los antecedentes del área, es de esperar que durante el día 10 de septiembre los derivadores medidos y los modelos de mayor influencia de la marea (FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento), tuviesen una mayor relación considerando condición de flujo mareal en el canal predominantemente hacia el Este-Sureste. Esta relación también fue apreciable en el análisis por componente, específicamente en la componente E-O, donde los modelos FVCOM-Marea y FVCOM-Marea+Viento tuvieron un mejor desempeño en R, RMS y STD, respecto al resto de los modelos.

Por su parte, los derivadores medidos durante el 14 de septiembre mostraron una dirección general hacia el Sureste a pesar de haber sido sembrados en fase de marea vaciante, lo cual puede estar asociado a la presencia de vientos de gran intensidad ( $> 2 \text{ m s}^{-1}$ ) con dirección predominante desde el Noroeste durante las horas de medición. Considerando los antecedentes del área (SHOA, 2013), es posible que, debido a la intensidad del viento, se haya producido un transporte generalizado de los derivadores



en dirección Sureste. Este movimiento fue capturado por las trayectorias obtenidas a partir de los modelos y escenarios con mayor influencia del viento (MHG, LEEWAY y FVCOM-Viento), registrando valores de R, RMS y STD muy superiores a los estimados con los modelos influenciados por marea.

Este tipo de comportamiento de los modelos en general ha sido observado en otros estudios (Révelard *et al.*, 2021), destacando la dependencia en el desempeño de los modelos a las condiciones dinámicas que se pueden presentar un área particular y que difieren de otras localidades. En el presente estudio se observó una conjunción de escenarios dominados por marea y/o viento, dependiente de la intensidad y continuidad del viento reinante (SHOA, 2013) y las inestabilidades atmosféricas que este puede llegar a ocasionar en el canal entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe (Gracia, 2017). Se esperaba que el MHL FVCOM forzado con Marea+Viento pudiese resolver dicha interacción entre la marea y el viento, sin embargo, la influencia del viento en el MHL parece haber sido subvalorada en el área donde se midieron los derivadores (canal entre isla Santa Clara e isla Robinson Crusoe), lo que además quedó en manifiesto en el análisis de la relación entre el viento y las corrientes superficiales para FVCOM-Viento y FVCOM-Marea+Viento, evidenciando una pérdida importante de relación viento-corriente cuando fue incluida la forzante Marea.

Cabe señalar que, durante el 10 de septiembre, se apreció el mayor desplazamiento de derivadores medidos respecto al día 14 de septiembre, a pesar de que el rango de marea en ambos días fluctuó aproximadamente 1 m, pudiendo establecer que el transporte de las corrientes superficiales debido a la marea, en el canal, puede ser más efectivo que el producido por el viento. Bajo esa misma hipótesis, los modelos asociados directamente a la marea (FVCOM-Marea y Marea+Viento), alcanzaron e incluso excedieron la variabilidad observada en ambos días de muestreo, siendo los únicos modelos en representar, con cierta proximidad, la magnitud del movimiento registrado por los derivadores medidos el día 10 de septiembre. El resto de los modelos no alcanzaron a representar la variabilidad medida, esto debido, posiblemente, a la baja resolución temporal de la forzante atmosférica obtenida del MAG ERA5, haciendo recomendable, para este tipo de casos, incorporar un Modelo Atmosférico Local en el análisis.

Respecto al uso del método determinístico, se registraron diferencias poco significativas en comparación a los resultados con el método directo, del orden de metros a pocas decenas de metros respecto a las trayectorias modeladas de forma directa. Esto es apreciable también en las medidas de R, RMS y STD, donde solo se observan diferencias de metros a pocas decenas de metros. Lo anterior se debe a que, dada la formulación determinística empleada y tomando en cuenta elementos de baja exposición al viento, tales como los derivadores modelados, se deban presentar altas intensidades de viento para generar una influencia notable en las trayectorias. Lo anterior sumado a la baja representatividad de la variabilidad de los datos de viento presentes en el canal, permite inferir que la influencia del viento en el método determinístico fue subvalorada.

El uso del MHL en el presente estudio, funcionó como aumento de resolución temporal y espacial de las corrientes en el área de estudio, denominado comúnmente como Downscaling, tomando como input los datos desde una grilla global hacia una grilla no



estructurada de carácter local, permitiendo, a diferencia de los MHG, resolver la circulación incluyendo los efectos topográficos y orográficos del Archipiélago Juan Fernández. Los resultados indicaron que no siempre el uso del MHL garantiza mejores resultados en las trayectorias calculadas, debido probablemente a efectos de escala pequeña no resueltos o presentes e inexistentes en la realidad y/o desfasados espacial y temporalmente (Révelard *et al.*, 2021). Una de las formas para reducir los efectos de escala pequeña es realizar la calibración del modelo en base al escalamiento de las forzantes acordes a las condiciones dinámicas del medio, lo que implicaría realizar sucesivas corridas hasta encontrar el desempeño óptimo, lo que a su vez iría en desmedro a dar una rápida respuesta ante las emergencias SAR.

La solución propuesta en el presente estudio es la utilización de variadas forzantes de forma aislada (Marea o Viento) y mezclada (Marea+Viento), donde la selección del mejor escenario dependerá del conocimiento previo del área, la selección de la variable dominante y la evaluación en conjunto con los hallazgos e idealmente mediciones in-situ en tiempo real.

Es importante considerar la resolución temporal y espacial de los MHG, en perspectiva a la duración de las mediciones, donde para cortos periodos de tiempo (menor a 2 días) (Sutherland *et al.*, 2020), es recomendable reproducir el movimiento en una alta frecuencia, en nuestro caso, mediante el uso del MHL y/o el aumento en la resolución temporal de los MHG mediante interpolación. Este último caso es solo una solución matemática, no representativa del medio natural, ya que no reproducirá las variaciones de alta frecuencia presentes en la naturaleza. En cambio, el MHL, debido a la capacidad de resolver las ecuaciones de gobierno a menor escala que los MHG, otorga la capacidad de reproducir eventos de mayor frecuencia, pero limitado en algunos casos por la resolución temporal y espacial de las forzantes aplicada, como lo registrado con el uso del MAG ERA5 para forzar FVCOM.

Durante la época del accidente, se realizaron varias mediciones mediante derivadores de corta duración y se registraron los datos de la estación de nivel del mar y estación meteorológica del área. En el ideal de los casos, este tipo de emergencias debiese ir acompañada de mediciones mediante derivadores de largo plazo (recomendable con señal gps), mediciones puntuales de corrientes, marea y presión atmosférica, además de la instalación de sensores de presión para la medición de mareas y estaciones meteorológicas. Su finalidad sería verificar las forzantes de ingreso al MHL, realizar el análisis de desempeño en tiempo real y mejorar los métodos de estimación de trayectoria a posteriori.

Finalmente, mediante el análisis del AB propuesto por IAMSAR (2019), la mayor probabilidad de éxito de rescate estuvo asociada en general a los escenarios forzados por el MHG MULTIOBS, mientras que la menor probabilidad de éxito de rescate se asoció al MHL FVCOM-Marea. Estos resultados deben ser evaluados con precaución, dado que, en el presente trabajo, una menor distancia entre derivador y modelo también implicó una menor representatividad de la variabilidad observada.



### 3. Evaluación cualitativa de los escenarios

Se sabe que, durante el accidente se presentaban condiciones adversas de viento, las cuales fueron capaces de generar inestabilidades atmosféricas que provocaron fuertes turbulencias y flujos verticales, los cuales provocaron la entrada en baja del avión C-212, causando su accidente a las 20:48 horas UTC (Gracia 2017). Se sabe además que en ese momento la marea se encontraba en fase de marea vaciante hasta aproximadamente las 03:00 horas UTC del día 03 de septiembre, hora de bajamar, previo a la fase de marea llanante. También se presentaban fuertes rachas de viento, alrededor de los  $7 \text{ m s}^{-1}$ , en dirección desde el Suroeste, favoreciendo el arribo de elementos flotantes a la isla Robinson Crusoe durante las primeras horas desde el accidente. Esta condición de viento varió a dirección desde el Noroeste entre la noche del 03 de septiembre y la madrugada del 04 de septiembre, para luego perdurar en los días siguientes, en dirección desde el Sur y Suroeste, con rachas que superaron los  $10 \text{ m s}^{-1}$  el día 04 de septiembre, manteniéndose con esta dirección hasta el 06 de septiembre. Lo anteriormente expuesto permite inferir que era esperable que bajo dichas condiciones los hallazgos registrados se concentraran en las bahías cercanas, ubicadas al Noreste del punto del accidente.

El análisis de desempeño cualitativo de los escenarios evaluados registró en la mayoría de los casos evaluados de forma directa, tanto con MHG, MHL y LEEWAY, una concentración de arribos en las islas más cercanas al Noreste del punto del accidente. Principalmente en los puntos 1 y 2 frente a bahía Villagra, en la misma bahía Villagra y en bahía Tierra Blanca (la más cercana al accidente). Esto a excepción de los escenarios modelados con FVCOM-Marea, el que registró solo algunos arribos en los puntos 1, 2 y 7, pero su mayoría fue en dirección hacia el océano, debido probablemente a la nula representatividad del viento de este escenario, lo cual permite inferir sobre la importancia del viento local en esta zona.

La aplicación del método determinístico en estos casos produjo diferencias más notorias respecto a las halladas en el análisis cuantitativo, debido posiblemente a la duración de las trayectorias evaluadas (del orden de 2 a 6 días). El efecto provocado fue una mejora en la distribución de arribos modelados por el MHL, acorde a lo obtenido por Di Maio *et al.* (2016), registrando arribos en la mayoría de los polígonos de hallazgos evaluados. También se observa una notable mejora en los resultados mediante FVCOM-Marea, logrando que la mayoría de sus arribos se ubicaran en los polígonos objetivo, pero con una importante presencia de trayectorias en zonas oceánicas. Respecto a los MHG, el uso del método determinístico provocó un intercambio de arribos desde las bahías más cercanas al accidente hacia la playa Larga, objetivo más al Este del punto del accidente. Esto es atribuible a que, a pesar del aumento de resolución temporal, tanto los MHG como el MAG no son capaces de reproducir la variabilidad de alta frecuencia esperable del área en estudio, provocando que el efecto conjunto solo sea el desplazamiento generalizado de las trayectorias.

Cabe señalar que estos resultados deben ser analizados con precaución, dado a las incertidumbres relacionadas a la geometría, densidad y peso del elemento, trayectoria real del elemento hallado, los tiempos de residencia del elemento, la profundidad de



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

deriva y el detalle mismo sobre el hallazgo. El reunir este tipo de información en reales sería de gran importancia, tanto para la investigación, como para la selección de los escenarios de mayor desempeño durante una emergencia SAR.



## CONCLUSIÓN

El trabajo realizado corresponde al análisis de trayectorias modeladas a partir de fuentes de información de corrientes superficiales (HYCOM, MULTIOBS y FVCOM) y de viento (ERA 5). Las velocidades obtenidas fueron impuestas de forma directa al elemento flotante y de forma determinística, resolviendo el balance de fuerzas de arrastre horizontal impuestas por el viento y las corrientes. El resultado obtenido representó una nube de trayectorias modeladas bajo distintos escenarios que contemplan el uso de: MHG (HYCOM y MULTIOBS), FVCOM forzado solo con marea, viento y marea+viento. También se obtuvieron resultados mediante el uso del método LEEWAY a partir de los coeficientes tabulados en Allen (2005) y datos de viento de ERA 5. Las trayectorias obtenidas fueron comparadas con derivadores medidos y hallazgos registrados durante la emergencia SAR de la época, determinando bajo las condiciones observadas, el desempeño de cada escenario modelado.

Los MHG, a pesar de su baja resolución espacial y temporal, son una fuente válida de información ante eventuales emergencias SAR en áreas dominadas por el viento (día 14 de septiembre), especialmente el MHG MULTIOBS, y es aún más valiosa considerando su gran cobertura espacial y su fácil y rápido acceso. Su principal limitación es la escala temporal y espacial, por lo que sus resultados deben ser analizados con resguardo ante la falta de información de alta frecuencia y en zonas cercanas a costa, donde la influencia de otras forzantes, la intensificación del viento local y la interacción con costa pudiesen generar grandes diferencias respecto a lo observado.

El uso del MHL permitió reproducir eventos de mayor variabilidad, de forma notable en los casos forzados con Marea y Marea+Viento, donde la variabilidad modelada fue equiparable a la medida (incluso sobrevalorada en algunos escenarios). Esto generó una mejora en la distribución espacial de las derivas, incorporando el efecto topográfico y orográfico del área en estudio.

El uso de variados escenarios utilizados mediante el MHL permitió que sus resultados abordaran diferentes condiciones oceanográficas presentes en la zona del archipiélago de Juan Fernández, en algunos casos dominado por marea (10 de septiembre) y en otros por el viento (14 de septiembre).

El canal entre isla Santa Clara e Isla Robinson Crusoe, es una zona de alta variabilidad e inestabilidad atmosférica, la cual no pudo ser capturada por el MAG ni por los MHG. El MHL, al ser forzado con datos del MAG, tampoco logró reproducir estos eventos, resultando en una baja representatividad en variabilidad de los escenarios influenciados por viento cuando se compararon las derivas medidas y modeladas.

La influencia del método determinístico es dependiente del tiempo de medición, donde para mediciones de corto plazo (en este caso  $< 4$  horas) las diferencias respecto al método directo no fueron significativas, mientras que para mediciones de largo plazo (días), se registraron diferencias significativas. Este efecto también puede estar asociado



a la baja resolución temporal y falta de variabilidad MAG detallado en los puntos anteriores.

El método LEEWAY al igual que los MHG están fuertemente influenciados por el viento, alcanzando buenos desempeños en las fechas asociadas a la dominancia del viento (14 de septiembre). Su principal desventaja es la asociación con el elemento flotante, desconocido en primera instancia o, por ejemplo, en el presente estudio, no tabulado.

Lo anteriormente expuesto, permite concluir que la redundancia de fuentes de información y metodologías dan amplia cobertura ante diferentes escenarios naturales y variados elementos a la deriva, brindado la posibilidad de evaluar múltiples escenarios hipotéticos de forma rápida mediante los MHG y MAG, y en caso de zonas costeras o de influencia mareal, mediante la ejecución de un MHL. La selección de los escenarios más probables debe realizarse mediante comparación entre las proyecciones modeladas y mediciones y/o hallazgos, siendo estos registros y/o mediciones fundamentales para la evaluación de los resultados y la subsecuente generación de áreas de rebusca.



## REFERENCIAS

- Aiken, C.M., S.N. Navarrete, M.I. Castillo & J.C. Castilla. 2007. Along-shore larval dispersal kernels in a numerical ocean model of the central Chilean coast. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 339, pp. 13-24.
- Aguirre, C., R.D. Garreaud & J.A. Rutllant. 2014. Surface ocean response to synoptic-scale variability in wind stress and heat fluxes off south-central Chile. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, Vol. 65, pp. 64-85.
- Allen, A. A. 2005. Leeway Divergence Report, Tech. rep., US Coast Guard Research and Development Center, 2082 Shennecossett Road, Groton, CT, USA, CMEMS-MOB-QUID-015-004:  
<http://marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MOBQUID-015-004.pdf>
- Allen, A. A., and J. V. Plourde, 1999: Review of leeway: Field experiments and implementation. U.S. Coast Guard Research and Development Center Tech. Rep. CG-D-08-99, 351 pp.
- Arce, D. 2014. Caracterización en terreno y por modelación numérica de la hidrodinámica del estuario del río maule, Chile (Tesis para optar al grado de Magister). Universidad de Chile. Santiago.
- Artal, O., H.H. Sepúlveda, D. Mery & C. Pieringer. 2019. Detecting and characterizing upwelling filaments in a numerical ocean model *Computers and Geosciences*, Vol. 122, pp. 25-34.
- Baird, M.E., O. Leth & J.H. Middleton. 2007. Biological response to circulation driven by mean summertime winds off central Chile: A numerical model study. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, pp. 15 C07031.
- Batteen, M.L., H. Chih-Ping, J.L. Bacon & N. Craig. 1995. A numerical study of the effects of wind forcing on the Chile current System. *Journal of Oceanography*, Vol. 51, pp. 585-614.
- Blumberg, A. F. & G. L. Mellor, 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. *Three-Dimensional Coastal ocean Models*, edited by N. Heaps, 208 pp., American Geophysical Union.
- 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., 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.
- Chen, C., Limeburner, R., & members of the UMASS-D FVCOM Group. et al. 2012. FVCOM model estimate of the location of Air France 447. *Ocean Dynamics* 62, 943–952. <https://doi.org/10.1007/s10236-012-0537-5>
- 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. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(1), 197–215. doi:10.1175/jtech-d-13-00097.1
- Di Maio, A., Martin, M. V., & Sorgente, R. 2016. Evaluation of the search and rescue LEEWAY model in the Tyrrhenian Sea: a new point of view. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), 1979–1997. doi:10.5194/nhess-16-1979-2016
- Directemar 2019, Boletín estadístico marítimo.  
[https://www.directemar.cl/directemar/site/artic/20190701/asocfile/20190701140538/beam2019\\_baja.pdf#page=111](https://www.directemar.cl/directemar/site/artic/20190701/asocfile/20190701140538/beam2019_baja.pdf#page=111)
- 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.
- Escribano, R., S.A. Rosales & J.L. Blanco. 2004. Understanding upwelling circulation off Antofagasta (northern Chile): A three-dimensional numerical-modeling approach. *Continental Shelf Research*, Vol. 24, pp. 37-53.
- 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.
- Gracia 2017. Links for a successful investigation: C-212 Robinson Crusoe Island Accident Case. Airbus Defense & Space. Military Aircraft.
- Guerra, M., R. Cienfuegos, J. Thomson & L. Suarez. 2017. Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile, *International Journal of Marine Energy*.
- Hamrick, J.M., 1992. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects. Virginia Institute of Marine Science, Special Report 317, 63pp.



- Hill, C., C. DeLuca, V. Balaji, M. Suarez & A. da Silva, 2004: The Architecture of the Earth System Modeling Framework. Computing in Science and Engineering, Vol. 6, pp 18-28.
- Hoerner, S. F. 1965. Fluid-Dynamic Drag. Hoerner Fluid Dynamics, Brick Town, N. J., USA
- Hunke, E.C. & W. Lipscomb, 2008: CICE: The Los Alamos sea ice model, documentation and software user's manual, version 4.0. Tech. rep. LA-CC-06-012, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM. (<http://oceans11.lanl.gov/drupal/CICE>).
- Kantha, L. & C. A. Clayson, 1994. An improved mixed layer model for geophysical applications. J. Geophys. Res., 99 (C12), 25,235-25,266.
- Kantha, L. & C. A. Clayson, 2000. Numerical models of oceans and oceanic processes. International Geophysics, 66, Academic Press, San Diego, CA 2000. 976pp.
- Kundu, P. & I. Cohen, 2016: Fluid Mechanics. 6 ed. Elsevier Academic Press
- Lai, Z., 2009. A non-hydrostatic unstructured-grid finite-volume coastal ocean model system (FVCOM-NH): development, validation and application. Ph.D. thesis. University of Massachusetts-Dartmouth, p.155.
- IAMSAR manual 2019: International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual. London: IMO
- Leth, O. & J.F. Middleton. 2004. A mechanism for enhanced upwelling off central Chile: Eddy advection, Journal of Geophysical Research. 109, C12020, doi:10.1029/2003JC002129.
- Mellor, G. L. & T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problem. Rev. Geophys. Space. Phys., 20, 851-875.
- Mellor, G. L. & A. Blumberg, 2004. Wave breaking and ocean surface layer thermal response. J. Phys. Oceanogr., 34, 693-698.
- Mesías, J.M., R.P. Matano & P T. Strub. 2001. A numerical study of the upwelling circulation off central Chile. Journal of Geophysical Research-Oceans, Vol. 19, pp. 611-623.
- Mesías, J.M., R.P. Matano & P.T. Strub. 2003. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. Journal of Geophysical Research-Oceans 108, C3, 3085 DOI:101029/2001JC 001135.
- National Search and Rescue Manual B-GA-209-001/FP-001 – DFO 5449. 1998.



- Ohlmann, J. C., Romero, L., Pallàs-Sanz, E., & Perez-Brunius, P. 2019. Anisotropy in coastal ocean relative dispersión observations. *Geophysical Research Letters*, 46,879–888. <https://doi.org/10.1029/2018GL081186>
- Renault, L., B. Debitte, P. Marchesiello, S. Illig, V. Echevin, G. Cambon, M. Ramos, O. Astudillo, P. Minnis & J.K. Ayers. 2012. Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the October 2000 event, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, C02030, doi:10.1029/2011JC007446.
- Révelard A, Reyes E, Mourre B, Hernández-Carrasco I, Rubio A, Lorente P, Fernández CDL, Mader J, Álvarez-Fanjul E. & Tintoré J. 2021. Sensitivity of Skill Score Metric to Validate Lagrangian Simulations in Coastal Areas: Recommendations for Search and Rescue Applications. *Front. Mar. Sci.* 8:630388. doi: 10.3389/fmars.2021.630388
- 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, doi:10.1002/2014GL061773.
- Rojas, R. & N. Silva. 1996. Atlas Oceanográfico, Vol. 1 (18° 21' S a 50° 00' S), Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Valparaíso, Chile.
- Serra, M., Sathe, P., Rypina, I. et al. Search and rescue at sea aided by hidden flow structures. *Nat Commun* 11, 2525 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16281-x>
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 1999. Instrucciones Oceanográficas N° 2: Método oficial para el cálculo de los valores No Armónicos de la marea, 2° Edición. Publicación 3202.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, 2013. Derrotero de la costa de Chile. Volumen I. De Arica a Canal Chacao, 10° Edición. Pub. SHOA 3001.
- Shchepetkin, A. F., & J. C. McWilliams, 2003: A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.
- Staneva, J., Ricker, M., Carrasco Alvarez, R., Breivik, Ø. & C. Schrum, 2021. Effects of Wave-Induced Processes in a Coupled Wave–Ocean Model on Particle Transport Simulations. *Water*, 13, 415. <https://doi.org/10.3390/w13040415>
- Sutherland, G.; Soontiens, N.; Davidson, F.; Smith, G.C.; Bernier, N.; Blanken, H.; Schillinger, D.; Marcotte, G.; Röhrs, J.; Dagestad, K.-F.; et al. 2020. Evaluating



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

the Leeway Coefficient of Ocean Drifters Using Operational Marine Environmental Prediction Systems. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 37, 1943–1954

Villalón, L. 2014. Assessment of the power potential extraction in the chilean chacao channel (Tesis para optar al grado de Magister). Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago.