



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Implementación de un modelo de riesgos operacionales mediante un sistema Big Data de datos Metocean para su uso en operaciones navales*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Carlos Campos Calero

**DIRECTORES:** Milagros Fernández Gavilanes

Carlos Pérez Collazo

**CURSO ACADÉMICO:** 2024-2025

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Implementación de un modelo de riesgos operacionales mediante un sistema Big Data de datos Metocean para su uso en operaciones navales*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



## RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado destaca la importancia de la evaluación del riesgo operacional derivado de las condiciones METOC en la Armada. Por ello, haciendo uso de las nuevas tecnologías, se desarrolla un sistema de evaluación de riesgos operacionales navales basado en datos *MetOcean*, capaz de apoyar la toma de decisiones del mando mediante la generación de mapas visuales de impacto ambiental METOC.

El sistema está alimentado por datos capturados en tiempo real mediante un sistema Big Data en el servidor POSEIDON del Centro Universitario de la Defensa. Se compone de un *backend*, una base de datos PostgreSQL para almacenar los datos *MetOcean* y un *frontend* como aplicación web interactiva. En ella, el usuario puede consultar el riesgo METOC asociado a una operación mediante la visualización de celdas hexagonales H3 codificadas por colores, cuya resolución se puede adaptarse dinámicamente.

El modelo desarrollado ha sido validado mediante simulaciones y comparado con herramientas oficiales como SIAAMETOC, demostrando su aplicabilidad en escenarios reales y su valor como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Este trabajo constituye una propuesta tecnológica innovadora que integra herramientas de visualización y automatización en la evaluación del riesgo en el entorno operativo naval.

## **PALABRAS CLAVE**

Evaluación de riesgo, METOC, mallado H3, POSEIDON, predicción MetOcean.

# AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que han hecho posible este proyecto.

A mis tutores, Milagros y Carlos, por su incansable trabajo y disposición.

Al Instituto Hidrográfico de la Marina, por su colaboración en la validación del sistema desarrollado.

A toda mi familia, a mis padres, a mi hermana Paula, a mi chica Marta y en especial, a mis abuelos. Por su predisposición, apoyo incondicional, paciencia y aliento.

A todos ellos, ¡gracias de corazón!



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	4
Índice de Tablas .....	7
Tabla de acrónimos .....	9
1 Introducción y objetivos.....	10
1.1 Contexto y motivación.....	10
1.2 Objetivos.....	10
1.3 Estructura del documento .....	11
2 Estado del arte .....	13
2.1 Meteorología en el ámbito de las Fuerzas Armadas .....	13
2.1.1 Antecedentes e importancia del apoyo meteorológico en las Fuerzas Armadas.....	13
2.1.2 Estado actual del apoyo meteorológico a las FAS. ....	15
2.1.3 Productos para la evaluación de riesgos y apoyo a la toma de decisiones.....	16
2.2 Impacto METOC en operaciones navales .....	19
2.2.1 Importancia del estudio METOC en las operaciones navales.....	19
2.2.2 Evaluación del riesgo operacional en el entorno marítimo .....	20
2.2.3 Límites de impacto meteorológico y categorización por niveles de riesgo .....	21
2.2.4 SIAAMETOC.....	23
2.3 Gemelos Digitales.....	25
2.3.1 Antecedentes y evolución.....	25
2.3.2 Necesidad de empleo de gemelos digitales en las FAS.....	27
2.3.3 El Gemelo Digital Oceanográfico .....	28
2.3.4 GDO aplicado al entorno operativo naval .....	30
2.4 Discretización del entorno para el desarrollo de un GDO.....	31
2.4.1 Introducción al Método de elementos finitos y su aplicación en un GDO.....	31
2.4.2 Aproximaciones para realizar el mallado .....	32
2.4.3 Mallado de MeteoGalicia .....	34
2.4.4 Mallado H3 de Uber .....	35
2.4.5 Comparación entre enfoques de discretización .....	36
2.5 Fuentes de datos integrables en un GDO.....	37
2.5.1 Datos MeteoGalicia.....	37
2.5.2 Datos de EMODnet .....	38

2.5.3 Datos de Puertos del Estado .....	39
2.6 Sistemas <i>Big Data</i> integrados en gemelos digitales con interfaz SPA .....	40
2.6.1 Antecedentes .....	40
2.6.2 Dimensiones y ciclo Big Data .....	41
2.6.3 Bases de datos y sus tipos.....	42
2.6.4 Base de datos PostgreSQL .....	43
3 Materiales y métodos .....	45
3.1 Software y herramientas empleadas .....	45
3.1.1 Lenguaje Python.....	45
3.1.2 Microframework Flask .....	47
3.1.3 Lenguaje Javascript .....	47
3.1.4 Librerías React.js y Leaflet.js.....	48
3.1.5 IDE PyCharm 2024 .....	49
3.1.6 PostgreSQL con extensión PostGIS .....	50
3.2 Arquitectura del sistema .....	52
3.2.1 Sistema Big Data .....	53
3.2.2 Submódulo “backend”.....	55
3.2.3 Submódulo “frontend” .....	57
3.3 Metodología e implementación del sistema .....	58
3.3.1 Inicio y configuración del frontend y backend.....	59
3.3.2 Interacción con la interfaz y envío de parámetros desde el frontend al backend.....	60
3.3.3 Definición de límites de impacto operacional y umbrales de parámetros METOC.....	64
3.3.4 Extracción de parámetros operacionales del archivo “operaciones.csv” .....	70
3.3.5 Recepción de petición POST y posterior de datos MetOcean en la base de datos.....	71
3.3.6 Evaluación de riesgo y procesamiento de colores.....	76
3.3.7 Envío de resultados al módulo frontend y visualización final en la interfaz. ....	78
4 Validación de resultados .....	80
4.1 Visualización de resultados y simulaciones .....	80
4.2 Comparativa de resultados con la plataforma SIAAMETOC .....	87
4.2.1 Contextualización de la comparación y adaptación de modos de evaluación.....	87
4.2.2 Funcionamiento de SIAAMETOC y comparación de sistemas .....	88
4.2.3 Comparación de resultados en operaciones MCM.....	90
4.2.4 Comparación de resultados en operaciones hidrográficas .....	94
5 Conclusiones y líneas futuras.....	98
5.1 Conclusiones.....	98
5.2 Cumplimentación de objetivos .....	100

5.3 Limitaciones al modelo desarrollado .....	100
5.4 Líneas futuras.....	101
6 Bibliografía .....	103
Anexo I: Implicaciones Económicas y Ambientales .....	110
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....	114
Anexo III: Instalación, configuración y descripción de interfaz de SIAAMETOC.....	115
Anexo IV: Códigos y archivos de texto .....	120
Anexo V: declaración de uso de IA .....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Napoleón derrotado por el invierno ruso, de Adolph Northen. Fuente: [3].	13
Figura 2-2 Mapa sinóptico (1300 GMT, 3 de junio, 1944) 3 días antes del día D. Fuente.	14
Figura 2-3 Servicios meteorológicos de apoyo a las FAS de varios países. Fuente: elaboración propia.	15
Figura 2-4 Matriz de impacto meteorológico D+24H en operaciones marítimas para el 28 de mayo de 2024 durante la misión Dédalo24. Fuente: elaboración propia.	17
Figura 2-5 Deltas para evaluación de riesgo en vuelos de cazas en la región de Murcia. Fuente: [13].	18
Figura 2-6 Información de aeropuertos alternativas para la evaluación de operaciones de vuelo de aeronaves. Fuente: [13].	18
Figura 2-7 Proceso de gestión de riesgo empleado en el planeamiento operativo. Fuente: [21].	21
Figura 2-8 Lista de comprobación de parámetros METOC de apoyo en operaciones OTAN. Fuente: [14].	21
Figura 2-9 Límites operaciones RAS marcados por la AD80-034. Fuente: [14].	22
Figura 2-10 Producto de evaluación de impacto en operaciones navales, codificado según operación e impacto. Fuente: [13].	23
Figura 2-11 Producto de SIAAMETOC-OM: porcentaje de impacto por horas sobre operaciones MCM con ROV. Fuente: [24].	24
Figura 2-12 Matriz de impacto asociada al informe generado por la interfaz de SIAAMETOC. Fuente: [22].	25
Figura 2-13 Idea conceptual de espacios real y virtual para PLM por Michael Grieves. Fuente: [26].	25
Figura 2-14 Crecimiento en USD del mercado de gemelos digitales en América del Norte. Fuente [32].	27
Figura 2-15 Motivaciones más valoradas para el desarrollo de GD en la industria militar. Fuente: [38].	28
Figura 2-16 Esquema de funcionamiento del EDITO por la Comisión Europea. Fuente: [44].	29
Figura 2-17 Esquema gráfico del concepto militar REP. Fuente: [2].	30
Figura 2-18 Captura de la interfaz web de acceso a los datos del servidor POSEIDON. Fuente: [53].	31
Figura 2-19 Malla estructurada hexaédrica del tipo crecimiento estructurado. Fuente: [54].	32
Figura 2-20 Evolución de mallado no estructurado del tipo frente de avance. Fuente: [54].	33
Figura 2-21 Ejemplo de mallado multibloque en software CAD. Fuente: [58].	33
Figura 2-22 Celda hexagonal del modelo H3 con 7 (aprox.) contenidas de forma jerárquica. Fuente: [64].	35
Figura 2-23 Distancias de celdas a sus vecinas en los diferentes mallados. Fuente: [61].	36
Figura 2-24 Interfaz gráfica web de MeteoGalica. Modelo de predicción numérica WRF. Fuente: [69].	38
Figura 2-25 Interfaz gráfica web de EMODnet. Batimetría de la ría de Pontevedra. Fuente: [72].	39
Figura 2-26 Interfaz gráfica web de Puertos del Estado. Consulta del mareógrafo de Marín. Fuente: [75].	40

Figura 2-27 Ciclo Big Data. Fuente: [81].	42
Figura 2-28 Interfaz de una base de datos estructurada (SQL), PostgreSQL. Fuente: elaboración propia.	43
Figura 2-29 Encuesta <i>Stack Overflow</i> sobre el uso de bases de datos siendo PostgreSQL la más apreciada a nivel internacional por programadores profesionales. Fuente: [85].	44
Figura 3-1 Logo de Python. Fuente: [91].	46
Figura 3-2. Logo de JavaScript. Fuente: [95].	48
Figura 3-3 Interfaz del IDE PyCharm. A la izquierda, todos los elementos integrados en el software del modelo. A la derecha, uno de los <i>scripts</i> del código fuente. Fuente: elaboración propia.	49
Figura 3-4 Logo de PyCharm por JetBrains. Fuente: [99].	50
Figura 3-5 Menú lateral de la interfaz de <i>pgAdmin4</i> . Fuente: propia.	51
Figura 3-6 Logo de PostgreSQL. Fuente: [86]	51
Figura 3-7 Arquitectura modular del modelo de evaluación de riesgos operacionales. Fuente: propia.	52
Figura 3-8 Lista de relaciones de la base de datos estructurada POSEIDON. Fuente: elaboración propia.	54
Figura 3-9 Arquitectura de la tabla <i>meteogalicia_swan_forecast_table</i> . Fuente: elaboración propia.	54
Figura 3-10 Arquitectura de la tabla <i>meteogalicia_wrf_forecast_table</i> . Fuente: elaboración propia.	54
Figura 3-11 Arquitectura de la tabla <i>meteogalicia_ww3_forecast_table</i> . Fuente: elaboración propia.	55
Figura 3-12 Arquitectura de la tabla <i>meteogalicia_mohid_forecast_table</i> . Fuente: elaboración propia.	55
Figura 3-13 Arquitectura de la tabla <i>meteogalicia_geometria_forecast_table</i> . Fuente: elaboración propia.	55
Figura 3-14 Interfaz del modelo de evaluación METOC de riesgos operacionales desarrollada en el <i>frontend</i> . Fuente: elaboración propia.	57
Figura 3-15 Diagrama de flujo del sistema de consulta y análisis de datos. Fuente: propia.	59
Figura 3-16 Menú desplegable para la selección de fecha de predicción. Fuente: elaboración propia.	61
Figura 3-17 Menú desplegable para la selección de hora de predicción. Fuente: elaboración propia.	61
Figura 3-18 Menú desplegable para la selección de operación. Fuente: elaboración propia.	62
Figura 3-19 Menú desplegable para la selección de resolución de las celdas H3. Fuente: elaboración propia.	62
Figura 3-20 Interfaz. Dibujo de las celdas que cubren todo el polígono seleccionado. Su color es gris por defecto hasta recibir la respuesta del <i>backend</i> . Fuente: elaboración propia.	63
Figura 4-1 Momento de representación de celdas en la interfaz de forma asíncrona previo a haberse generado todas las contenidas en el polígono. Fuente: elaboración propia.	81
Figura 4-2 Actualización final del color de las celdas según la evaluación de riesgo efectuada por el sistema. Fuente: elaboración propia.	81
Figura 4-3 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones aéreas de un helicóptero a las 0500UTC del día 18 de febrero de 2025. Fuente: elaboración propia.	83

Figura 4-4 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de despliegue de sonoboyas por un MPA a las 0500UTC del día 18 de febrero de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	83
Figura 4-5 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de buceadores EOD a las 1300UTC del día 14 de febrero de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	84
Figura 4-6 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de pequeñas embarcaciones con una resolución de celda seis. Fuente: elaboración propia.....	85
Figura 4-7 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de pequeñas embarcaciones con una resolución de celda nueve. Fuente: elaboración propia. ....	86
Figura 4-8 Interfaz de SIAAMETOC -OM para la evaluación del impacto METOC sobre diferentes operaciones navales. Fuente: elaboración propia.....	89
Figura 4-9 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de caza de minas a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	91
Figura 4-10 Resultados finales propios de la evaluación del impacto sobre operaciones de caza de minas a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	91
Figura 4-11 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones con ROV a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.....	92
Figura 4-12 Resultados finales propios de la evaluación del impacto sobre operaciones con ROV a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	92
Figura 4-13 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones con buceadores EOD a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	93
Figura 4-14 Resultados finales propios de la evaluación de impacto de sobre operaciones con buceadores EOD a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	93
Figura 4-15. Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de izado y arriado de botes a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	94
Figura 4-16 Resultados finales propios de la evaluación de impacto sobre operaciones de izado e arriado de botes a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	95
Figura 4-17 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de batimetría con botes hidrográficos a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	95
Figura 4-18 Resultados finales propios de la evaluación de impacto sobre trabajos batimétricos con botes a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	96
Figura 4-19 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de batimetría con buque hidrográfico a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	96
Figura 4-20 Resultados finales propios de la evaluación de impacto de sobre operaciones de batimetría con buque hidrográfico a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia. ....	97
Figura 5-1 Función de <code>SideBar.js</code> que permite convertir la hora UTC seleccionada en el desplegable a la hora de <i>Europe/Paris</i> . Fuente: elaboración propia.....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Encuesta de valoración de necesidad del apoyo meteorológico en las FAS. Fuente: [13].....	19
Tabla 2-2 Evolución de la definición de Gemelo Digital (incluye una última orientada a su aplicación en modelos de predicción meteorológica). Fuente: elaboración propia. ....	26
Tabla 2-3 Modelos de predicción numérica según mallado de MeteoGalia. Fuente: elaboración propia. ....	35
Tabla 2-4 Área de mallado de MeteoGalia en algunas fuentes seleccionadas y su equivalencia en H3 con la resolución que más se ajusta. Fuente: [52].....	37
Tabla 3-1 Bibliotecas empleadas en el módulo <i>frontend</i> .....	59
Tabla 3-2 Librerías empleadas en el archivo principal del <i>backend</i> . Fuente: elaboración propia. ....	60
Tabla 3-3 Petición HTTP tipo POST realizada desde el <i>frontend</i> (React) hacia el <i>backend</i> (Flask). Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 3-4 <i>Endpoint</i> en Flask, que responde a peticiones POST realizadas al <i>backend</i> . Fuente: elaboración propia. ....	60
Tabla 3-5 Función para generación de celdas H3 dentro de un rectángulo dibujado en el mapa. Fuente: elaboración propia.....	63
Tabla 3-6 Ejemplo de petición POST del <i>frontend</i> en formato JSON. Fuente: elaboración propia. ....	64
Tabla 3-7 Criterios de evaluación de riesgo METOC codificados a color. Fuente: [14] .....	65
Tabla 3-8 Límites operacionales METOC para evaluación de riesgo. Fuente: [14].....	70
Tabla 3-9 Definición de columnas y primeras filas del archivo “operaciones.csv”. Fuente: elaboración propia. ....	70
Tabla 3-10 Función empleada para leer el archivo “operaciones.csv” y convertir sus columnas en una lista de parámetros. Fuente: elaboración propia.....	71
Tabla 3-11 Función de conexión a la base de datos Poseidon. Fuente: elaboración propia. ....	71
Tabla 3-12 Librerías y función para convier una lista de celdas H3 en un polígono WKT. Fuente: elaboración propia.....	72
Tabla 3-13 Función que obtiene la celda "padre" de resolución 7 de las celdas de <code>h3cells</code> . Fuente: elaboración propia.....	72
Tabla 3-14 Consulta SQL para una resolución seleccionada de celda 8. Fuente: elaboración propia....	73
Tabla 3-15 Consulta SQL para una resolución seleccionada de celda 6. Fuente: elaboración propia....	74
Tabla 3-16 Consulta SQL para una resolución seleccionada de celda 9. Fuente: elaboración propia....	74
Tabla 3-17 Función para hallar las celdas de <code>h3cells</code> de resolución 8 tras consultar por el valor de sus celdas “padre”. Fuente: elaboración propia. ....	76
Tabla 3-18 Función que determina el color según el valor consultado y un rango de valores de comparación. Fuente: elaboración propia. ....	76
Tabla 3-19 Ejemplo de líneas del archivo “operaciones.csv”. Fuente: elaboración propia.....	76

Tabla 3-20 Diccionario de asignaciones de color, valor y variable a cada celda H3. Fuente: elaboración propia. ....77

Tabla 3-21 Asignación de prioridad para cada color. Fuente: elaboración propia .....77

Tabla 3-22 Función para la selección del color de mayor impacto por cada celda H3. Fuente: propia. 77

Tabla 3-23 Estructura de resultados finales de variable y color por celda H3. Fuente: elaboración propia. ....77

Tabla 3-24 Recepción y asignación de colores de *frontend* (React). Fuente: elaboración propia. ....78

Tabla 3-25 Asignación del color según el nivel de riesgo o de “gris” por defecto. Fuente: elaboración propia. ....78

Tabla 3-26 Función de creación de colores hexadecimales para codificación del impacto. Fuente: elaboración propia.....78

Tabla 3-27 Renderizado en el mapa de celdas H3 con sus colores definitivos. Fuente: elaboración propia. ....79

Tabla 4-1 Límites operativos METOC con variables cruzadas integrados en SIAAMETOC. Fuente: elaboración propia.....88

## TABLA DE ACRÓNIMOS

AAW	<i>Anti-Air Warfare</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
APCLO	<i>Air Power Contributions to Land Operations</i>
APCMO	<i>Air Power Contributions to Maritime Operations</i>
ASW	<i>Anti-Submarine Warfare</i>
DBMS	<i>Database Management System</i>
EDITO	<i>European Digital Twin Ocean</i>
EO	Electroóptico
IR	Infrarrojo
FAS	Fuerzas Armadas
FAS	<i>Fueling At Sea</i>
FLT	<i>Flight</i>
GD	Gemelo Digital
GDO	Gemelo Digital Oceanográfico
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HT	Humidex Temperature
IHM	Instituto Hidrográfico de la Marina
JISR	<i>Joint Intelligence, Surveillance and Reconnaissance</i>
LCM	<i>Landing Craft Mechanized</i>
METOC	<i>Meteorological and Oceanographic</i> (término militar)
MetOcean	<i>Meteorológico y Oceanográfico</i> (referido exclusivamente a datos)
MCM	Mine CounterMeasures
MIW	<i>Mine Warfare</i>
MPA	<i>Maritime Patrol Aircraft</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OPS	Operaciones
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
RAS	<i>Replenishment At Sea</i>
REP	Robotic Experimentation and Prototyping
ROMS	<i>Regional Ocean Modeling System</i>
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i>
SIAAMETOC	Sistema Integrado de Apoyo Automático METOC
SQL	<i>Structured Query Language</i>
SWAN	<i>Simulating Waves Nearshore</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting Model</i>
WW3	<i>Wave Watch III</i>

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Contexto y motivación

En el marco de las operaciones militares en el entorno marítimo, el estudio METOC (*Meteorological and Oceanographic*) desempeña un papel crítico para la planificación, evaluación de riesgos operacionales y eficacia de diversas misiones navales. Las condiciones ambientales pueden suponer tanto una oportunidad como una amenaza, afectando significativamente la operatividad de las plataformas navales, la seguridad del personal y la capacidad de los sistemas. Esta realidad ha llevado a un creciente interés por desarrollar herramientas de apoyo a la toma de decisiones que integren, de forma automatizada y en tiempo real, datos meteorológicos y oceanográficos para evaluar el riesgo operacional.

Actualmente, sistemas como SIAAMETOC, en fase de desarrollo por el Instituto Hidrográfico de la Marina, han demostrado la utilidad de estas herramientas. Sin embargo, siguen existiendo limitaciones en cuanto a flexibilidad, capacidad de adaptación a diferentes operaciones, fuentes de datos y visualización interactiva de los resultados. Es por ello, que el desarrollo de un modelo de evaluación de riesgos operacionales interactivo, eficaz y con evaluaciones automatizadas, se ha convertido en una necesidad creciente en el entorno operativo naval.

En este contexto, surge la propuesta de desarrollar un modelo con capacidad de diseminación por la flota, con características que lo hagan idóneo para su aplicación en el escenario operativo: rapidez, automatización, simplificación, flexibilidad, integrador y de arquitectura escalable. En búsqueda de este objetivo, se plantea la siguiente propuesta de un modelo de evaluación de riesgos METOC que permita la gestión del riesgo de forma automatizada en operaciones navales mediante la integración de múltiples fuentes de datos a través de un sistema Big Data y una interfaz interactiva basada en celdas geoespaciales (mallado H3). Este proyecto, por tanto, busca ofrecer una solución tecnológica que contribuya a mejorar la seguridad operativa y la eficacia del planeamiento mediante la representación visual y codificada del riesgo asociado a los factores ambientales.

## 1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es desarrollar un modelo interactivo de evaluación de riesgos operacionales en operaciones navales, que automatice el proceso de evaluación de riesgos METOC, alimentado por sistema Big Data que integra datos MetOcean (datos Meteorológicos y Oceanográficos) (MetOcean) de diversas fuentes. El resultado es una aplicación que representa su impacto mediante una interfaz geográfica codificada por colores según los umbrales establecidos.

Para alcanzar este propósito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Implementar una base de datos estructurada que permita la ingesta, almacenamiento y consulta eficiente de datos MetOcean.
- Integrar datos de predicción meteorológica y oceanográfica provenientes de diferentes modelos numéricos de predicción accesibles a través de MeteoGalicia en una base de datos PostgreSQL con extensión PostGIS.
- Desarrollar un modelo capaz de recibir solicitudes del usuario, consultar datos del servidor POSEIDON y procesarlos en base a los límites operacionales definidos por la OTAN.
- Definir y estructurar los umbrales de impacto METOC para distintas operaciones navales, codificándolos mediante colores (verde, amarillo y rojo) en función del riesgo (favorable, marginal, severo).
- Crear una interfaz web tipo SPA (*Single Page Application*) que permita al usuario seleccionar una zona geográfica a evaluar para una operación en concreto y en una fecha y hora determinadas. Y de esta forma, visualizar el riesgo asociado a dicha operación en un mapa segmentado en celdas H3.
- Implementar un sistema de discretización geoespacial basado en el mallado H3 de Uber, aprovechando su estructura jerárquica para adaptar dinámicamente la resolución de las celdas en función del tamaño del área seleccionada por el usuario, optimizando así la precisión y eficiencia del análisis del riesgo METOC.
- Validar el modelo mediante simulaciones, comparando los resultados obtenidos con los ofrecidos por plataformas oficiales como SIAAMETOC, para verificar su fiabilidad y utilidad en escenarios operativos reales.

### 1.3 Estructura del documento

Tras contextualizar el marco en el que se encuentra el proyecto a desarrollar, y efectuar una breve descripción de los objetivos que se persiguen, en este apartado se pretende ofrecer una breve explicación de los diferentes apartados que componen el trabajo. El presente documento se divide en cuatro apartados, finalizando con una bibliografía y una serie de anexos necesarios para el entendimiento del proyecto. Secuencialmente, los apartados de la memoria son:

- En primer lugar, “Estado del arte”, donde se contextualiza el papel de la meteorología en el entorno militar, se analizan los productos de evaluación METOC actuales, el impacto en operaciones navales, y se introducen conceptos como el Gemelo Digital Oceanográfico, los sistemas Big Data y los sistemas de mallado como el mallado H3 Uber.
- En segundo lugar, “Materiales y métodos”, donde se detallan las herramientas empleadas para el desarrollo del modelo, la arquitectura del sistema, los módulos de *frontend* y *backend* y el flujo completo de ejecución desde la interacción con la interfaz hasta la visualización del resultado, donde se irán introduciendo partes del código fuente del sistema para su mejor comprensión.
- En tercer lugar, “Prueba y validación de resultados”, donde se presentan simulaciones de uso del sistema en un entorno operativo, su validación frente a modelos existentes como SIAAMETOC del IHM (Instituto Hidrográfico de la Marina), y la comparación de resultados según operación y resolución espacial.
- En cuarto lugar, “Conclusiones y líneas futuras”, donde se recogen las conclusiones del proyecto, sus limitaciones actuales y se proponen mejoras o ampliaciones para futuros desarrollos.
- En quinto lugar, la bibliografía de todas las fuentes consultadas para la realización del trabajo.
- Por último, los Anexos a la presente memoria, que recogen tanto los aspectos éticos y sociales del trabajo, las implicaciones ambientales del mismo, la información relativa a la instalación de

SIAAMETOC y descripción de esta, el código fuente desarrollado, y finalmente una declaración de uso de IA para el proceso de programación.

Por otro lado, a lo largo del presente trabajo se emplean numerosas siglas y acrónimos, muchos de ellos de uso común en el ámbito militar y naval. Su uso es habitual. Por ello, el autor, además de formular la “Tabla de acrónimos” inicial, se ha esforzado en definir cada uno de ellos la primera vez que aparecen en el texto, con el fin de garantizar la claridad y accesibilidad del documento para cualquier lector.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Meteorología en el ámbito de las Fuerzas Armadas

#### 2.1.1 Antecedentes e importancia del apoyo meteorológico en las Fuerzas Armadas

La meteorología desempeña un papel crucial en el ámbito de la defensa y las operaciones militares. Desde los inicios de la civilización, las condiciones atmosféricas han sido determinantes en el éxito o el fracaso de incontables campañas militares [1]. Como cuenta el reputado meteorólogo español, Ángel Alcázar Izquierdo, en la publicación [2], la meteorología en el escenario bélico ha sido uno de los factores más concluyentes a lo largo de la historia. Desde las invasiones de Italia por Aníbal, de China por Gengish Kahn, hasta las operaciones militares más sofisticadas de la actualidad, pasando por el fracaso de la invasión de Rusia por Carlos XII, el calvario de frío y nieve de las tropas napoleónicas (como se observa en la Figura 2-1) en el mismo territorio, o las numerosas acciones de la Segunda Guerra Mundial en las que la meteorología marcó el devenir de la guerra.

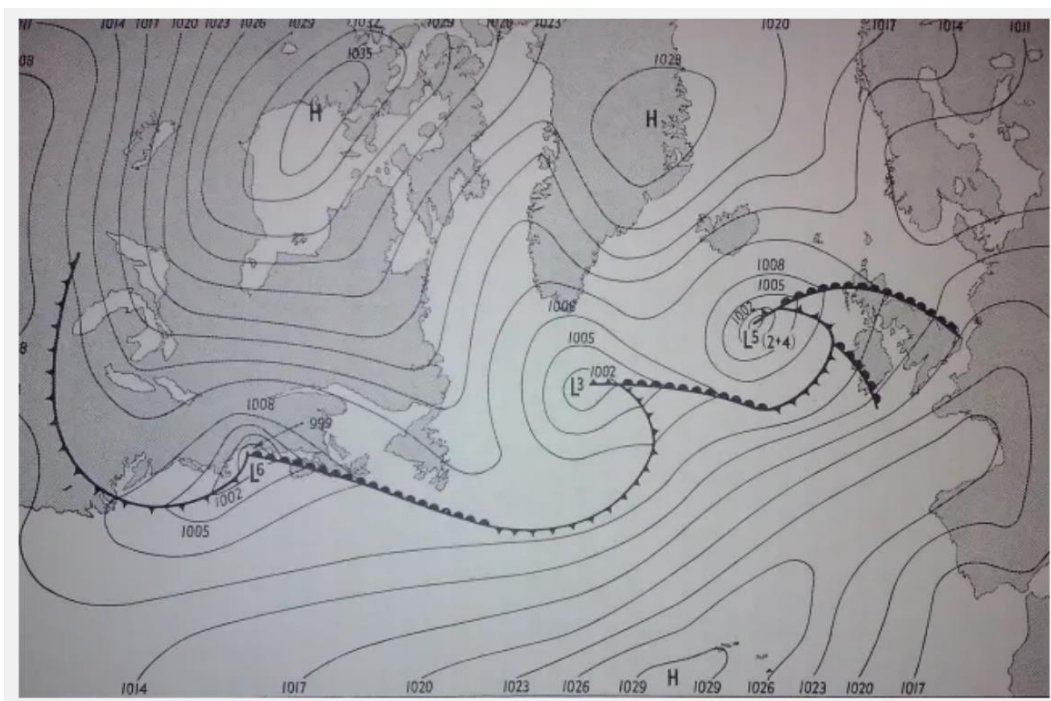


Figura 2-1 Napoleón derrotado por el invierno ruso, de Adolph Northen. Fuente: [3].

Algunos de estos ejemplos en los que la meteorología jugó un papel clave durante la segunda guerra mundial, fueron ya expuestos en numerosas publicaciones, artículos, y boletines informativos años después de la guerra. Es el caso de “La meteorología y la guerra” [4] del, entonces, capitán de corbeta

chileno don R. Montero, donde se expone de manera contundente la categórica influencia meteorológica en la IIGM en eventos como la batalla de Dunkerque (1940), donde la neblina inclinó la balanza en favor de los aliados, impidiendo a la Luftwaffe operar con seguridad para evitar la evacuación británica. También, en Pearl Harbour (1941), donde la escuadrilla de aviones japoneses avanzó ocultando su presencia tras un frente frío que avanzaba con rapidez hacia el Este, invisibles hasta el momento del bombardeo, o en la Campaña de las islas Gilbert y Marshall, RAID anfibia cuyo proceso de planeamiento tuvo en gran consideración los vientos dominantes, los tipos de nubosidad y el “*pressure pattern flying*” para la elección de una ruta que ofreciese la mayor ventaja posible en relación a las condiciones meteorológicas probables.

Por todo ello, y como sucede con otros campos, la guerra ha impulsado desde hace décadas la meteorología y el estudio de la atmósfera, llegando a permitir descubrimientos meteorológicos como el *jet stream*, estudiado durante el bombardeo de los B-29 americanos sobre Japón [1]. Llegó a tomar un papel tan crucial en la década de 1940 que muchos historiadores hablan de la *Weather War*, como don Ángel Alcázar Izquierdo [2]. En el marco de la guerra, muchas naciones comenzaron a desarrollar servicios meteorológicos, muchas veces integrados en las Fuerzas Armadas, como la *Meteorological Office* de apoyo a la Royal Marine que, con el primer pronóstico a medio plazo elaborado en campaña, obligaron al general Ike Eisenhower a posponer en un día el desembarco de Normandía por las condiciones meteorológicas (obsérvense, en la Figura 2-2, los frentes y borrascas que supusieron un intenso debate entre los servicios meteorológicos al servicio del general). Esta decisión fue clave en el devenir de la batalla del día D [5].



riesgos operacionales en entornos marítimos y terrestres, y ofrecer productos específicos (Sección 162.1.3) para el apoyo a operaciones militares.

### 2.1.2 Estado actual del apoyo meteorológico a las FAS.

En la terminología militar, hablamos de “inteligencia” a todo el volumen de información y datos, de carácter trascendente para evaluar una misión. Entre todo este conocimiento formulado para la misión, se encuentra la información meteorológica, como expone el autor, don Ángel Alcázar, en otra de sus publicaciones [6], donde también introduce las complicaciones de integrar el apoyo METOC en la toma de decisiones operativas.

Como se comentaba en el apartado anterior, a nivel global, los ejércitos de todo el planeta han integrado servicios meteorológicos para la obtención de productos de predicción, precisa y actualizada. En el caso de Estados Unidos, este apoyo lo ofrece el *Naval Meteorology & Oceanography Command*, NMOC<sup>2</sup>, conformado por oficiales de carrera y con sus propios departamentos de servicios especializados. En Reino Unido, el apoyo METOC lo ofrece *Met Office*, a través de una división especializada llamada *Defence Services*<sup>3</sup>, con una larguísima trayectoria y unidades meteorológicas móviles (MMU) integrables en despliegues y operaciones militares. Además de otros como, el *Deutscher Wetterdienst* (DWS)<sup>4</sup> alemán o el Departamento de Meteorología Militar<sup>5</sup> argentino.



Figura 2-3 Servicios meteorológicos de apoyo a las FAS de varios países. Fuente: elaboración propia.

En España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) es la responsable de suministrar la información meteorológica necesaria a las Fuerzas Armadas para el cumplimiento de sus misiones (contrato recientemente renovado en julio de 2024<sup>6</sup>). Es el único país occidental donde el apoyo meteorológico lo realizan civiles y no militares como en EE.UU. o Reino Unido, y se integran en el Mando de Operaciones (MOPS) a través del Centro Español de Meteorología para la Defensa (CEMD), Oficinas Meteorológicas de Defensa (OMD) que ofrecen sus servicios en campañas militares, y una unidad de Apoyo Meteorológico OTAN que representa a España en los grupos de trabajo de la OTAN [12].

Varios de los componentes del CEMD, entre ellos, la experimentada meteoróloga doña Beatriz Sanz (con la que el autor de este trabajo tuvo la oportunidad de compartir misión embarcados en el Juan Carlos I en la operación Dédalo24), cuentan en [13] lo específicos que son los productos de apoyo a la toma de

<sup>2</sup> Para más información sobre el NMOC, consultar: [7]

<sup>3</sup> Para más información sobre el servicio de defensa de Met Office, consultar: [8]

<sup>4</sup> Para más información sobre el DWS, consultar: [9]

<sup>5</sup> Para más información sobre el Departamento de Meteorología Militar de Argentina, consultar: [10]

<sup>6</sup> Para consultar las cláusulas del contrato de las FAS con AEMET, consultar: [11]

decisiones (Sección 2.1.3). Estos, se recogen en el “Catálogo de datos, productos y servicios meteorológicos para Defensa”, CATDEF, y sirven para evaluar el riesgo de operaciones militares muy calculadas (mapas de impacto de niebla en operaciones de vuelo según el tipo de aeronave, productos para la evaluación de tormentas de arena en Irak, datos de altura para el Ejército del Aire, productos de evaluación de impacto del oleaje en diferentes buques, etc.). Además, las OMD ofrecen toda esta información de la manera más humanizada y comprensible posible para agilizar el entendimiento entre meteorólogos y mandos militares que evalúan la acción operativa en concreto.

Por otro lado, la OTAN, regula los servicios METOC para operaciones conjuntas de los aliados (*Allied Command Operations*, ACO) en la publicación [14]: “*AD80-34 NATO METOC Services for Allied Command Operations*”. Esta, es de uso *UNCLASSIFIED* y establece, entre otras cosas, la integración del apoyo METOC en todos los dominios de las operaciones (aire, tierra, mar, ciberespacio y espacio) siguiendo el principio “*One theatre, One Forecast*” asegurando una única predicción meteorológica. Para ello, se establece, como también explica don Ángel Alcázar Izquierdo en [2], una “Nación Líder”, que asume la responsabilidad de suministrar los productos necesarios para el desarrollo de la operación a través de portales propios de la entidad o plataformas como ACOMEX o NATO METOC *Data Hub* (NMDH). Por ejemplo, en el marco de la operación Dédalo24, Suecia asumió este papel a nivel meteorológico, empleando el *Metoc Portal*<sup>7</sup> de la *Försvarsmakten* o Fuerzas Armadas Suecas. La OMD embarcada en el Juan Carlos I, empleaba estos productos para asesorar al mando y elaborar los productos derivados de análisis de impacto en las operaciones.

### 2.1.3 Productos para la evaluación de riesgos y apoyo a la toma de decisiones

La obtención de productos de predicción, con los que el usuario puede interactuar, son fruto de un proceso que abarca desde la observación y obtención de datos, hasta la elaboración de productos de predicción derivados. Para comprenderlo mejor, el lector puede consultar la presentación del Director de Producción e Infraestructuras de AEMET don Fernando Belda en su presentación [15].

Siguiendo este proceso, los organismos de apoyo meteorológico, mencionados en la Sección 2.1.2, elaboran productos de predicción para su uso en la toma de decisiones operativas, tanto predicciones generadas internamente como productos elaborados por otros servicios especializados. Para ello, emplean distintos modelos numéricos de predicción (NWP, *Numerical Weather Prediction*) a diferentes escalas, incluyendo modelos globales como el GFS (*Global Forecast System*) del NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o el ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), modelos regionales como HARMONIE (*HIRLAM ALADIN Regional Mesoscale Operational NWP In Europe*) o SREPS (*Short-Range Ensemble Prediction System*), así como modelos oceánicos y climáticos como los utilizados en el EUCP (*European Climate Prediction System*) y el NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*, del NOAA).

Estos modelos numéricos se alimentan de datos recopilados por una extensa red de sistemas de observación que incluyen satélites meteorológicos, boyas oceánicas, mareógrafos, radares atmosféricos y estaciones meteorológicas terrestres. Dichos sistemas están integrados en programas de observación global como EuroGOOS (*European Global Ocean Observing System*), C3S (*Copernicus Climate Change Service*), GOOS (*Global Ocean Observing System*) y GLOSS (*Global Sea Level Observing System*), entre otros. Además, otras fuentes de datos fundamentales provienen de buques de observación voluntaria (VOS, *Voluntary Observing Ships*), redes de boyas como el *Global Drifter Program* (GDP) o el sistema de flotadores autónomos del Programa Argo. Muchos de estos programas no solo proporcionan datos de observación en tiempo real, sino que también disponen de interfaces de consulta y visualización, desde donde es posible extraer productos derivados para la predicción METOC.

De esta forma, y como se explica en la AD80-034 [14], el apoyo METOC en campaña, tiene como resultado productos de carácter operativo, siendo la “matriz de impacto” el más influyente, por sintetizar

---

<sup>7</sup> Portal accesible solo con clave y usuario en: <https://metoc.se/portal/>. Accedido el 06/02/2025.

la información de mayor relevancia incluyendo umbrales de impacto y definiendo restricciones operacionales. Esta, es de gran utilidad para el mando, ofreciéndole soporte para desarrollar, durante el planeamiento de la operación, el proceso de *Risk Management* (manejo del riesgo). Estos productos se presentan en formatos como videoconferencias o *briefings* de mando (que se introducen en la Sección 2.2.2). En la siguiente Figura 2-4, se presenta una “matriz de impacto” elaborada por el oficial METOC del LHD Juan Carlos I, extraída de uno de los “*briefing* de mando” durante el transcurso de la operación Dédalo24. En ella, se puede ver, codificado en color, el impacto de la meteorología en diferentes operaciones y acciones tácticas. Así como, el parámetro ambiental que supone un riesgo en dicha acción: “SS” para el estado de la mar, “P” para precipitaciones, “W” para el viento, etc.

		28MAY		
		06-12	12-18	18-24
ASUW				
ASW				
AAW				
NAVAL REFUEL (RAS)		SS	SS	SS
RHIB		W/SS	W/SS	SS
AMPHIBIOUS OPS	LAND CRAFT	SS	SS	SS/W
	SCAT	SS	SS	SS
	PERSONNEL			
	VEHICLES			
AIR OPS	CVS STOVOL		SS	SS
	AV8B OPS	SS/C	SS/C	SS/C
	HELO OPS			

LEYENDA		
FAVORABLE - MINIMO IMPACTO	MARGINAL - MODERADO IMPACTO	DESFAVORABLE - SEVERO
P - PRECIPITACIONES SS - ESTADO MAR W - VIENTOS C - NUBES V - VISIBILIDAD T - TORMENTA BK - ROMPIENTE		

Figura 2-4 Matriz de impacto meteorológico D+24H en operaciones marítimas para el 28 de mayo de 2024 durante la misión Dédalo24. Fuente: elaboración propia.

Los productos para llevar a cabo esta evaluación del impacto meteorológico, siguen el concepto REP (*Recognized Enviromental Picture*), explicado más adelante, para la presentación de información METOC, acompañada de la información geoespacial o topográfica, siendo el Gemelo Digital Oceanográfico la herramienta idónea para este cometido [13].

Además, por norma general estos productos que permiten desarrollar la matriz de impacto son de uso oficial (en el caso de los productos desarrollados por el CEMD, son únicamente accesibles a través de la intranet del Ministerio de Defensa o enviados a las unidades de manera oficial en el transcurso de la operación). Sin embargo, en A. A. Palacio et al. [13], se presentan la Figura 2-5 y Figura 2-6, ejemplos de otros tipos de productos para la evaluación de riesgos y apoyo a la toma de decisiones.

En la Figura 2-5 se presenta información meteorológica de altura, como deltas de cizalladura y otras variaciones significativas del viento, además de nubes de importancia para el vuelo de cazas, superpuesta a un mapa geográfico que incluye las zonas de operaciones aéreas.

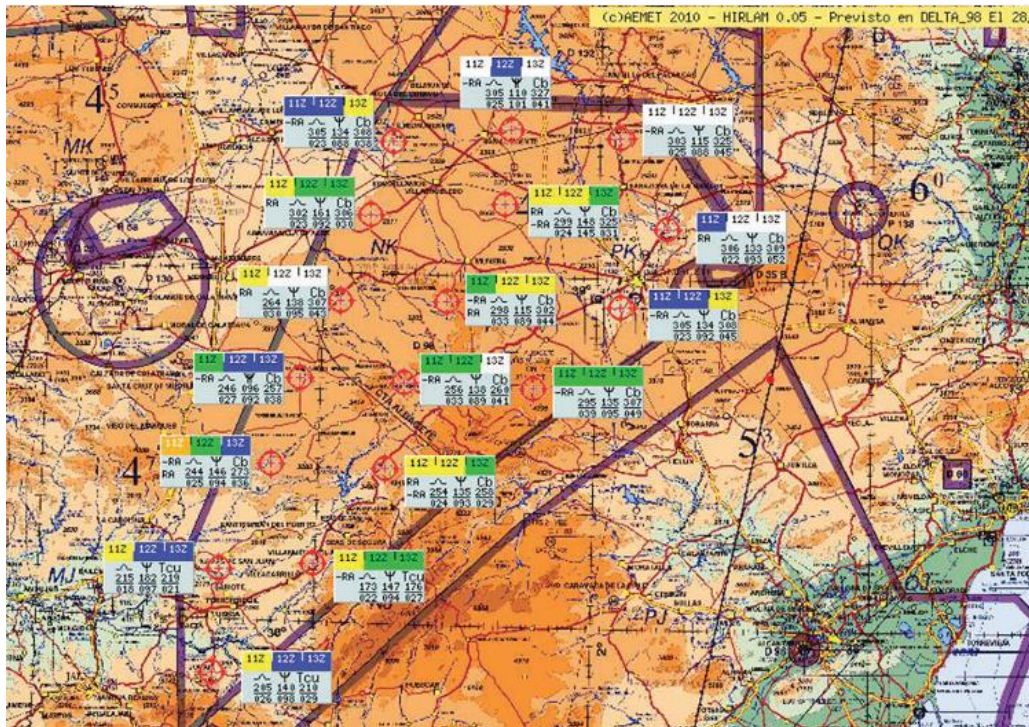


Figura 2-5 Deltas para evaluación de riesgo en vuelos de cazas en la región de Murcia. Fuente: [13].

En la Figura 2-6 se presenta la información de los aeropuertos evaluados como tomas alternativas para aeronaves. Se encuentran codificados a color según los estándares OTAN en función de los parámetros de visibilidad y techos de nubes, cruciales para tomas en visual o instrumentales de diferentes aeronaves.



Figura 2-6 Información de aeropuertos alternativos para la evaluación de operaciones de vuelo de aeronaves. Fuente: [13].

## 2.2 Impacto METOC en operaciones navales

Habiendo analizado la integración del estudio meteorológico en las FAS, es importante incidir, de manera exclusiva, en el determinante papel que tienen las condiciones (METOC) en la planificación y ejecución de las operaciones navales, afectando la movilidad, seguridad y eficacia de las unidades en el mar. En este apartado, se abordará exclusivamente el impacto del entorno METOC en las operaciones marítimas, analizando su influencia en la evaluación del riesgo operacional, la navegación y el uso de diferentes sistemas. Se analizarán los límites de impacto meteorológico en unidades navales y la categorización de niveles de riesgo.

### 2.2.1 Importancia del estudio METOC en las operaciones navales

*“Mientras el tiempo siga siendo un factor importante en las operaciones navales, aquellos jefes que no sepan usarlo adecuadamente cuando se presenten las ocasiones, seguirán en la condición de simples aficionados en el juego de la guerra. Cada fase de la guerra naval moderna está influida por las condiciones del tiempo. Hoy día la ciencia de la meteorología proporciona medios para ponderar el factor tiempo. La evaluación del efecto del tiempo en las operaciones navales es responsabilidad del comandante. A él le corresponde transformar este conocimiento en una ventaja táctica” - Cdr. M.A. Iiams, de la US Navy.*

De esta magnífica forma, remarcaba el comandante de la *US Navy*, durante el curso "*Naval Command Course for Senior Officers*", la importancia del conocimiento meteorológico en las operaciones navales militares, según los “Apuntes de historia y de meteorología aplicada a la táctica” del capitán de corbeta chileno don Fernando Le Dantec Gallardo en [16].

En el mismo documento, se narra la elaboración del primer estudio meteorológico aplicado con fines navales por parte del astrónomo Leverrier, en 1855, bajo las órdenes del emperador Napoleón. También, da cuenta del inicio del uso táctico de la meteorología en la II Guerra Mundial. De esta forma, don Fernando Le Dantec hace hincapié en el factor decisivo que supone el estudio de la meteorología en las operaciones navales y la importancia de su consideración en el planeamiento estratégico.

De hecho, el apoyo METOC en las operaciones marítimas de la Armada, supone un factor mucho más necesario que en los ejércitos terrestre y aéreo. Así lo expone el coronel Luis Fernando Ruano en su estudio sobre la percepción que tienen los componentes de las Fuerzas Armadas del apoyo meteorológico a las operaciones, accesible en [13]. El coronel, presenta la Tabla 2-1, donde se exponen los resultados de sus encuestas realizadas a personal militar, siendo considerada, la Armada, el ejército con mayor necesidad de apoyo meteorológico.

Necesidad	Ejército de Tierra	Armada	Ejército del Aire	Total encuestados
<b>Mucha</b>	75,93%	95,56%	93,10%	84,91%
<b>Relativa</b>	22,22%	4,35%	6,9%	14,15%
<b>Poca</b>	1,85%	-	-	0,94%
<b>Ninguna</b>	-	-	-	-

Tabla 2-1 Encuesta de valoración de necesidad del apoyo meteorológico en las FAS. Fuente: [13].

Por otro lado, la Escuela Náutica de Cataluña explica en [17], la importancia del estudio METOC en la mar como factor decisivo en la navegación, tanto en el ámbito militar, como en la navegación comercial y deportiva. Más allá de la operatividad de un buque, su propia seguridad, es uno de los requerimientos más importante a mantener y uno de los más impactados por las condiciones METOC.

Sin embargo, los avances en predicción meteorológica y la incorporación de estudios METOC en profundidad para desarrollar operaciones marítimas han permitido mejorar la planificación de rutas en tiempo y espacio para preservar la seguridad de los buques a nivel global.

Por otro lado, el estudio METOC en el ámbito operativo naval es de vital importancia por la cantidad de fenómenos que afectan a la navegación. Entre estos fenómenos, estudiados y recogidos en trabajos y múltiples fuentes como [17], [18] y [19], se encuentran: el viento, el oleaje, la corriente, la presión atmosférica, las precipitaciones, la visibilidad, la nubosidad (altura y tipo de nube), las mareas, etc. Además, fenómenos meteorológicos y oceanográficos como las formaciones de hielo, *fetch* de viento<sup>8</sup> o eventos costeros como las brisas terrestres y demás fenómenos regionales. Es tanta su influencia, que desde siglos pasados se han desarrollado escalas en el ámbito marítimo para determinar con medidas empíricas la intensidad de fenómenos combinados como el viento o el estado de la mar (Escala Beaufort y escala Douglas)<sup>9</sup>.

### 2.2.2 Evaluación del riesgo operacional en el entorno marítimo

En la Sección 2.1.3, se mencionaron algunos de los productos que se presentan al mando para la evaluación del riesgo y la asistencia a la toma de decisiones. Para comprender la necesidad de implementar productos de predicción específicamente diseñados para dicho cometido en múltiples operaciones militares, es necesario comprender el concepto de *Tactical Decision Aids* (TDA). Las TDA, cuentan don Ángel Alcázar Izquierdo en [2] o Antonio A. Palacio et al. en [13], son sistemas de ayuda a la decisión táctica para el apoyo al proceso de planeamiento de una operación militar. En el marco del apoyo METOC, son productos meteorológicos que se presentan al mando “traducidos” al impacto que tendrían en las operaciones militares a desarrollar. Además, como veremos en la Sección 2.2.3, ofrecen rangos de parámetros que se categorizan en función de la limitación que generan sobre la acción militar en cuestión.

Una vez analizado el riesgo y categorizado por nivel de impacto, siguiendo el proceso de *Risk Managment*, introducido en la Sección 2.1.3, el mando evalúa las posibles acciones de mitigación de riesgos. Como explica el capitán de navío chileno don Rodrigo Pelayo González en un artículo para la Revista de Marina, accesible en [21], el proceso de gestión de riesgos implica (como se puede ver en la Figura 2-7):

- **La identificación de amenazas:** en el marco meteorológico, aquellos factores que supongan una amenaza al desarrollo de una operación naval.
- **La evaluación de riesgos:** realizada por los órganos de apoyo a través de la presentación de productos METOC derivados. Como ya se ha comentado, este asesoramiento se lleva a cabo en *briefings* de mando, con carácter predictivo D + 72h [12].
- **La “mitigación del riesgo”:** uno de los principios fundamentales en el planeamiento operativo militar, que, en este caso, debido a la imposibilidad de modificar el que induce la amenaza (el tiempo meteorológico) supondría la evaluación de un cambio en espacio y tiempo de las operaciones navales, o su desarrollo de manera parcial. En caso de que las condiciones ambientales no fuesen completamente restrictivas, se podrían implementar medidas de seguridad personal para minimizar el impacto (restricciones de movilidad por cubiertas exteriores en buques o aumento en el filado de cadena en una operación de fondeo, por ejemplo).

---

<sup>8</sup> Fenómeno sobre la superficie del mar en la que el viento sopla con la misma dirección de manera ininterrumpida a lo largo de una gran distancia. Cuanto mayor es el *fetch*, más energía puede transferirse al oleaje, generando olas más altas y largas. Es un parámetro fundamental en la formación de la mar de viento

<sup>9</sup> Para más información sobre dichas escalas numéricas, consultar: [20]

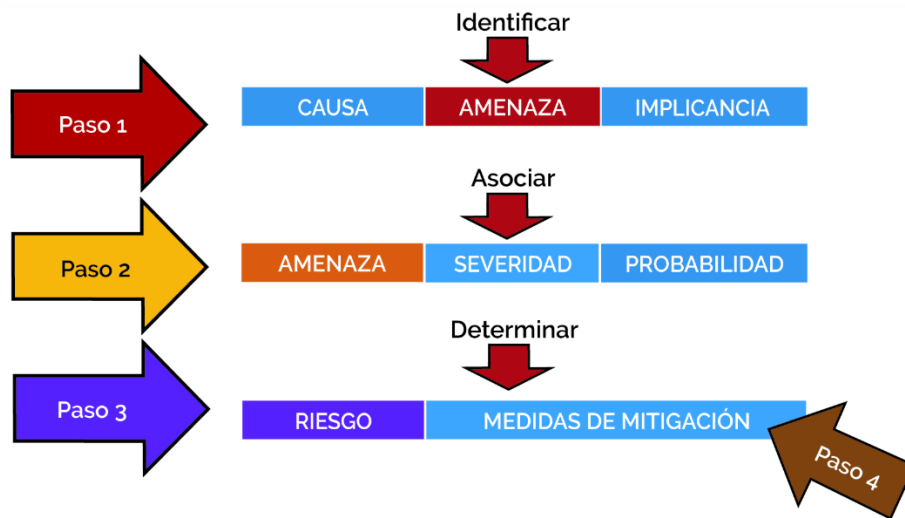


Figura 2-7 Proceso de gestión de riesgo empleado en el planeamiento operativo. Fuente: [21].

### 2.2.3 Límites de impacto meteorológico y categorización por niveles de riesgo

Como se adelantaba en el epígrafe 2.2.1, son muchos los parámetros METOC cuyo análisis es necesario para determinar el riesgo operacional de distintas acciones navales. En la Figura 2-8 se puede ver una tabla de la AD80-34 que recoge todos los parámetros METOC de obligado análisis para desarrollar productos de cara a una operación aliada conjunta de la OTAN.

No.	Name of the Product:	Check if "yes"
20	<b>Oceanographic products in support of Maritime operations:</b> (to be specified at various depths and for various frequencies to the requirements if applicable)	
21	<b>Water temperature</b>	<input type="checkbox"/>
22	<b>Currents</b>	<input type="checkbox"/>
23	<b>Wind</b>	<input type="checkbox"/>
24	<b>Sea state</b>	<input type="checkbox"/>
25	<b>Sea Ice:</b>	
25.1	Frequency of occurrence	<input type="checkbox"/>
25.2	Type	<input type="checkbox"/>
25.3	Thickness	<input type="checkbox"/>
26	<b>Visibility impacts</b>	<input type="checkbox"/>
27	<b>Tropical storms</b>	<input type="checkbox"/>
28	<b>The underwater Acoustic Parameters:</b>	
28.1	Sound Speed Profile (SSP)	<input type="checkbox"/>
28.2	SSP gradient	<input type="checkbox"/>
28.3	Sonic layer depth	<input type="checkbox"/>
28.4	Shallow sound channel axis	<input type="checkbox"/>
28.5	Ambient noise	<input type="checkbox"/>
29	<b>Ice coverage</b>	<input type="checkbox"/>
30	<b>Sea state/wave height</b>	<input type="checkbox"/>
31	<b>Salinity</b>	<input type="checkbox"/>
32	<b>Swell:</b>	
32.1	Height	<input type="checkbox"/>
32.2	Direction	<input type="checkbox"/>
32.3	Period	<input type="checkbox"/>
33	<b>Current Charts (bottom)</b>	<input type="checkbox"/>
34	<b>Current Charts (u, v, z)</b>	<input type="checkbox"/>
35	<b>Tides</b>	<input type="checkbox"/>

Figura 2-8 Lista de comprobación de parámetros METOC de apoyo en operaciones OTAN. Fuente: [14].

Analizando la influencia de todos estos parámetros en las diferentes unidades navales que operan bajo distintos escenarios ambientales, la OTAN define, de manera muy específica, en dicha publicación (AD80-34) los umbrales operacionales que determinan los límites de impacto sobre las capacidades de

distintas plataformas. Se estudian, límites de riesgo en operaciones de superficie, en operaciones submarinas debido al impacto sobre la propagación acústica que tienen los cambios de temperatura del agua, operaciones de guerra antiaérea u operaciones anfibias enormemente afectadas por la batimetría, la altura de la ola o la visibilidad.

De esta forma, se establecen umbrales de riesgo en función de 3 parámetros: la plataforma, la operación y los factores METOC relevantes. Dando como resultado tres umbrales de impacto operacional a los que se asocia un color:

- **Condiciones favorables (verde):** umbral que indica un nivel de riesgo bajo, en el que las condiciones METOC son favorables para la operación de las unidades navales sin restricciones significativas. Las actividades pueden ejecutarse con normalidad, y no se prevé impacto sobre los sistemas de armas, sensores o capacidades de navegación.
- **Condiciones marginales (amarillo):** umbral que indica un nivel de riesgo medio donde las condiciones METOC pueden comenzar a impactar algunas operaciones, reduciendo la efectividad de ciertas capacidades navales y requiriendo adaptaciones en la ejecución de las misiones. Se deben tomar precauciones adicionales y considerar planes de mitigación de riesgos.
- **Condiciones severas (rojo):** umbral que indica un nivel de riesgo elevado. Las condiciones METOC tienen un impacto significativo en la ejecución de operaciones navales, generando una degradación operativa importante. Se pueden presentar riesgos críticos para el personal, los sistemas y las plataformas navales.

En la siguiente Figura 2-9, podemos observar los límites operacionales que la OTAN define, por ejemplo, para la realización de un RAS (*Replenishment At Sea*), o reaprovisionamiento en la mar, por parte de dos buques OTAN:

REPLENISHMENT AT SEA (RAS)	Sea State < 5 Wind < 20 kts Significant Wave Height <2.5m	Sea State = 5 Wind 20-30 kts Significant Wave Height 2.5-4m	Sea State > 5 Wind > 30 kts Significant Wave Height >4m
----------------------------	---	---	---

**Figura 2-9 Límites operaciones RAS marcados por la AD80-034. Fuente: [14].**

Esta codificación a color tiene sus claras ventajas a la hora de representar productos como los analizados en la Sección 162.1.3. En la siguiente Figura 2-10, podemos ver uno de los productos ofrecidos por el CMD en el marco de la operación Atalanta, donde además de codificar a color el impacto METOC sobre las operaciones navales de fragatas, se codifica (mediante rayas) el impacto sobre embarcación tipo FPB (*Fast Patrol Boats*) empleadas por los piratas somalíes. Lo que da lugar a un producto de apoyo a la toma de decisiones tácticas de gran valor.

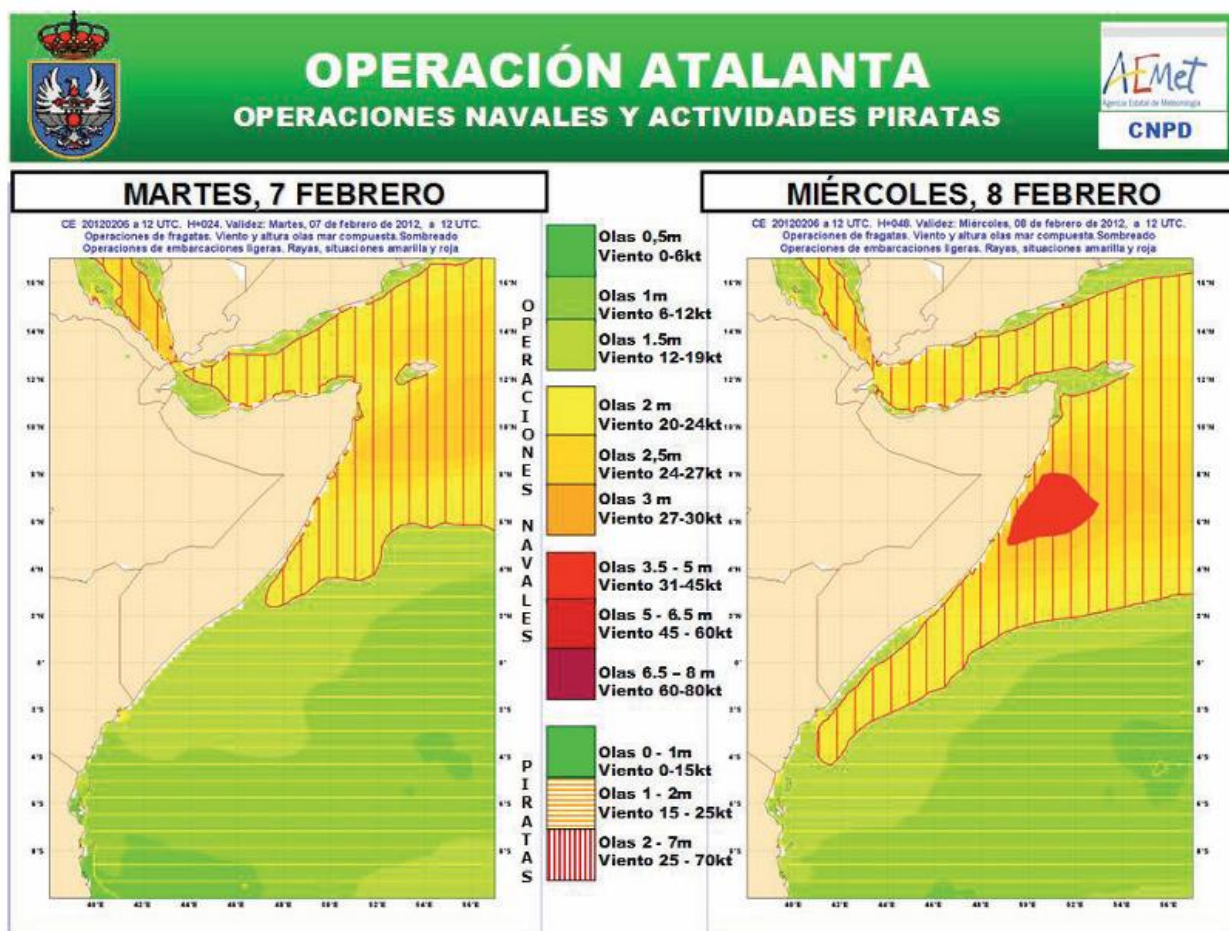


Figura 2-10 Producto de evaluación de impacto en operaciones navales, codificado según operación e impacto. Fuente: [13].

### 2.2.4 SIAAMETOC

En España, con el objetivo de adaptar e interpretar los datos meteorológicos para facilitar la elaboración de productos de carácter operacional, se encuentra en avanzado desarrollo, el Sistema Integrado Automático de Apoyo Meteorológico-Oceanográfico para Operaciones Marítimas (SIAAMETOC).

De esta forma, SIAAMETOC se está convirtiendo en la herramienta fundamental para la identificación, análisis y explotación de datos METOC en los buques de la Armada, con el propósito de optimizar la toma de decisiones en operaciones militares mediante automatización avanzada y el uso de modelos de predicción. Ha sido desarrollado por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) en colaboración con el IHM [22].

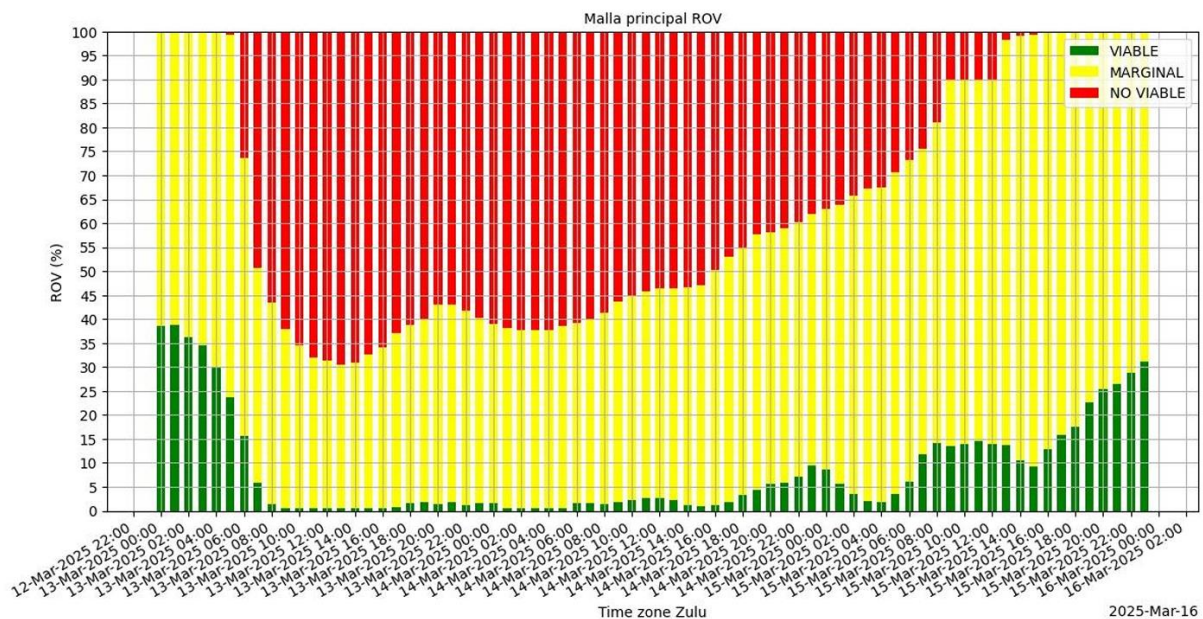
El sistema se estructura en varios módulos especializados:

- **SIAAMETOC-MCM (Mine Countermeasures):** proporciona información ambiental para la toma de decisiones en operaciones de guerra de minas e incluye modelado de corrientes, oleaje y sedimentación en áreas de interés.
- **SIAAMETOC-SUP (operaciones de superficie):** genera información METOC para trabajos hidrográficos y adquisición de datos batimétricos.

- **SIAAMETOC-AUT (vehículos autónomos):** apoya la planificación y operación de drones marinos (*Unmanned Surface Vehicles, USV*) para la recolección de datos en zonas costeras y oceánicas.

Ha sido empleado en los entornos operacionales reales ejercicios y operaciones GRUFLEX, FLOTEX, DÉDALO, BALTOPS, SPMINEX, DYNAMIC MARINER, MARE APERTO, etc. y probado con éxito en más de 20 ejercicios militares integrado en el planeamiento de ejercicios anfibios, de caza de minas o acciones de superficie [23].

En [24], se estudia en profundidad el sistema SIAAMETOC. Este sistema integra un gestor climático basado en una plataforma web de acceso restringido, que permite la selección y descarga de fuentes de datos METOC relevantes (nivel del mar, viento, oleaje, corrientes, temperatura y salinidad del agua, batimetría). Utiliza datos de organismos reconocidos como Puertos del Estado, Copernicus, NOAA y DWD, asegurando cobertura global. El sistema descarga y empaqueta periódicamente la información según los parámetros definidos, enviándola automáticamente a los usuarios. Además, dispone de una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) que busca reproducir un escenario operacional incluyendo área geográfica, fuentes de datos, información batimétrica, definición de mallas de cálculo, horizontes temporales, establecimiento de límites operacionales, etc. En ella, se ejecutan los módulos comentados anteriormente dando lugar a informes de resultados en PDF con productos específicos para el apoyo a la toma de decisiones tácticas, tal y como se puede ver en la Figura 2-11. De esta forma, el asesoramiento METOC en los buques se simplifica enormemente, pudiendo extraer de SIAAMETOC, productos tan sintetizados como, por ejemplo, informes en formato de matriz de impacto mostrado en la Figura 2-12.



**Figura 2-11 Producto de SIAAMETOC-OM: porcentaje de impacto por horas sobre operaciones MCM con ROV. Fuente: [24].**

Matriz Impacto Climática Embarcaciones Menores MK5 P2												
MANIOBRAS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
VIABLE	100.00	100.00	100.00	100.00	91.60	100.00	100.00	98.69	100.00	96.94	78.65	100.00
MARGINAL	0.00	0.00	0.00	0.00	3.97	0.00	0.00	1.14	0.00	2.96	14.55	0.00
NO VIABLE	0.00	0.00	0.00	0.00	4.44	0.00	0.00	0.17	0.00	0.10	6.81	0.00
Matriz Impacto Climática LCM1-E P2												
MANIOBRAS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
VIABLE	100.00	100.00	100.00	100.00	97.72	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.83	100.00
MARGINAL	0.00	0.00	0.00	0.00	2.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
NO VIABLE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Matriz Impacto Climática Ataque de Cayucos P2												
MANIOBRAS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
VIABLE	100.00	100.00	100.00	100.00	91.60	100.00	100.00	98.69	100.00	96.94	78.65	100.00
MARGINAL	0.00	0.00	0.00	0.00	3.97	0.00	0.00	1.28	0.00	3.06	14.83	0.00
NO VIABLE	0.00	0.00	0.00	0.00	4.44	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	6.53	0.00
Matriz Impacto Climática Ataque Pirata de Buques Nodriza P2												
MANIOBRAS	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
VIABLE	100.00	100.00	100.00	100.00	97.72	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.83	100.00
MARGINAL	0.00	0.00	0.00	0.00	2.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00
NO VIABLE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 2-12 Matriz de impacto asociada al informe generado por la interfaz de SIAAMETOC. Fuente: [22].

## 2.3 Gemelos Digitales

Habiendo realizando un análisis de la importancia del apoyo meteorológico en las Fuerzas Armadas y en el entorno operacional marítimo, y habiendo presentado la situación actual de dicho apoyo por parte de diversos organismos que desarrollan múltiples productos para apoyar al mando en la toma de decisiones, es conveniente analizar, una de las herramientas comentadas que más proyección tienen en el marco en el que nos encontramos: el Gemelo Digital y, en particular, el Gemelo Digital Oceanográfico.

### 2.3.1 Antecedentes y evolución

El concepto de Gemelo Digital (GD) fue introducido por Michael Grieves en 2002 en la Universidad de Michigan durante su conferencia sobre la gestión del ciclo de vida del producto (*Product Lifecycle Management*, PLM). Michael Grieves propuso su “*Mirrored Space Model*” como un sistema con tres componentes o espacios [25]: el espacio virtual, el real y un mecanismo de enlace para el intercambio de información entre ambos, tal y como se puede observar en la Figura 2-13. En 2006, el modelo de Grieves pasó a llamarse “*Information Mirroring Model*”, destacando la bidireccionalidad de ese flujo de datos entre los dos espacios, así como la posibilidad de enlazar múltiples espacios virtuales a un mismo espacio real [26].

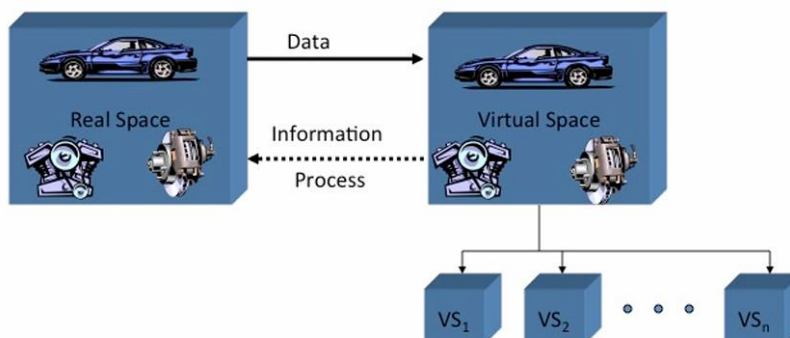


Figura 2-13 Idea conceptual de espacios real y virtual para PLM por Michael Grieves. Fuente: [26].

Sin embargo, múltiples fuentes ([25], [26], [27]) fijan su primer el primer uso documentado de un GD (Gemelo Digital) en la misión Apolo XIII de la NASA, en 1970, donde se empleó una versión primitiva de un GD como un conjunto de simuladores para la preparación y el análisis de la misión.

Desde entonces, a medida que la tecnología y las capacidades computacionales han ido avanzando, el desarrollo y la definición del GD lo han hecho de la misma forma. La doctora Jacqueline Le Moigne (directora del programa *Advanced Information Systems Technology*, ESTO<sup>10</sup>) en su presentación del *Earth System Digital Twins* (ESDT) [28], expuso la evolución de la definición del GD que recopila la siguiente Tabla 2-2.

<b>Año</b>	<b>Autor</b>	<b>Definición</b>
2002	Michael Grieves	Concepto que representa un modelo de espacios reflejados (virtual y real) como un modelo conceptual que sirve de base para la gestión del ciclo de vida del producto.
2010	John Vickers (NASA)	Conjunto de construcciones de información virtuales que describen completamente un producto físico manufacturado, ya sea potencial o real, desde el nivel micro atómico hasta el nivel macro geométrico. En su estado óptimo, cualquier información que pudiera obtenerse mediante la inspección de un producto físico manufacturado puede obtenerse a partir de su Gemelo Digital. <sup>11</sup>
2020	IBM	Representación virtual de un objeto o sistema que abarca todo su ciclo de vida, se actualiza con datos en tiempo real y utiliza simulación, aprendizaje automático y razonamiento para facilitar la toma de decisiones.
2020	Bauer-ESA	Sistema de información que proporciona a los usuarios una réplica digital del estado y la evolución temporal del sistema terrestre, basada en las observaciones disponibles y las leyes de la física.
2021	ECMWF- DestE Position	Réplica digital de una entidad física, ya sea viva o inanimada. (...) Esto incluirá modelos climáticos, predicción meteorológica, evolución de huracanes, entre otros. Los gemelos digitales se basan en la integración de observación continua, modelado y simulación de alto rendimiento, lo que permite generar predicciones altamente precisas sobre desarrollos futuros.

**Tabla 2-2 Evolución de la definición de Gemelo Digital (incluye una última orientada a su aplicación en modelos de predicción meteorológica). Fuente: elaboración propia.**

A medida que las capacidades computacionales han ido avanzando, el GD ha ido integrándose en diferentes sectores, formando parte de un pilar fundamental en la evolución de la industria 4.0, cobrando especial entre algunas de las tecnologías emergentes [30], como el Big Data, el Internet de las Cosas (IoT) y la Inteligencia Artificial (IA). Estas herramientas han permitido desarrollar representaciones digitales precisas aplicadas a la industria. Por ello, en los últimos años, el uso de los GD en el entorno industrial está creciendo a gran velocidad. La consultora tecnológica *Hexagon AB* analiza en [31], el crecimiento del gemelo digital proyectado al mercado en 2024 y analizando los resultados de *Fortune Business Insight* prevé una tasa de crecimiento anual compuesto del 39,8% hasta 2032. En su informe, presentan el gráfico del crecimiento del GD en el mercado norteamericano (Figura 2-14):

<sup>10</sup> ESTO: programa de la *Advanced Informtion Systems* (AIST) de la NASA.

<sup>11</sup> Para más información sobre el trabajo del Johon Vickers junto a Michael Grieves. Consultar [29]

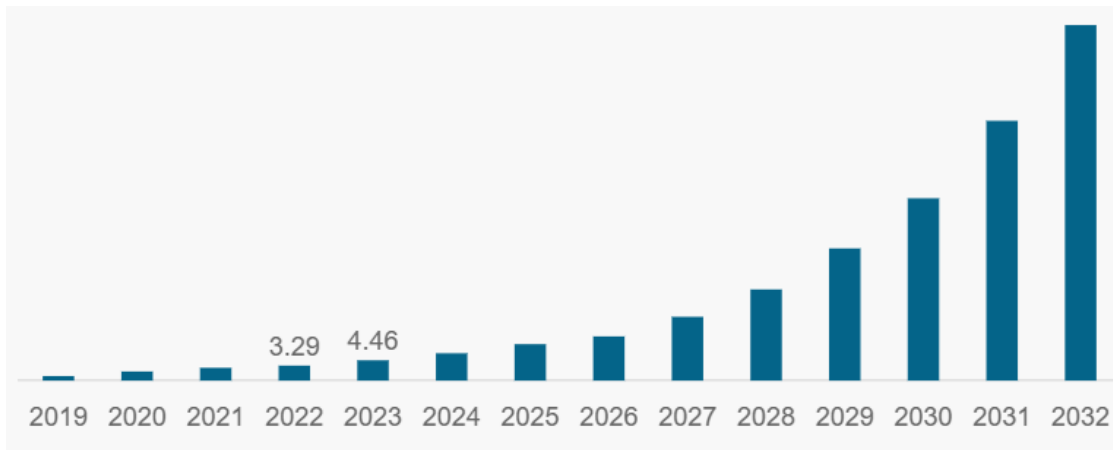


Figura 2-14 Crecimiento en USD del mercado de gemelos digitales en América del Norte. Fuente [32].

De la misma forma, la consultora *Capgemni Research Institute*, a través de la publicación [33], prevé un crecimiento medio del 36% en el despliegue de gemelos digitales en los próximos 5 años. También, expone las significativas mejoras de organizaciones que ya utilizan gemelos digitales, como una mejora media del 15% en ventas o rendimientos de sistema superiores al 25%. De esta forma, este tipo de tecnología se ha convertido en una herramienta de gran proyección para numerosos sectores de la industria.

### 2.3.2 Necesidad de empleo de gemelos digitales en las FAS

En el ámbito militar, los gemelos digitales se han convertido en un elemento clave en la transformación digital de los ejércitos de todo el mundo. Como muestra el análisis de *Hexagon AB* ([31]) (con datos del estudio encargados a la compañía de investigación de mercado *Forrester Consulting*), el 24% de las organizaciones aeroespaciales y de defensa dan prioridad a los GD para optimizar el ciclo de vida de sus productos, siendo un 73% el porcentaje de organizaciones de este sector que plantean una estrategia de utilización de gemelos digitales. En la misma línea, como sentencia el estudio de *Capgemini Research Institute* ([33]), la industria aeroespacial y de defensa, tienen fijado para 2025 un 2,7% de sus ingresos a gemelos digitales (un 40% más que el año anterior) y revela datos tan sorprendentes como el ahorro de la Fuerza Aérea de EE.UU.: 7,47 millones de euros en pruebas de túnel de viento para el caza F-22 empleando un gemelo digital CFD [34].

En la Armada, la tecnología de un GD se planteó, por primera vez, en 2017 a través de la publicación elaborada por el Estado Mayor de la Armada, “Apoyo Logístico 4.0”. De esta forma, en 2018, Navantia publicó el “Documento de Definición de MD/GD F-110” como primer hito de la carrera por la implantación de gemelos digitales en las FAS. Es por ello, que la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2020), consultable en [35], de la Dirección General de Armamento y Material, establece como prioridades la digitalización de procesos y la simulación avanzada, siendo esenciales para garantizar la superioridad operativa en entornos cada vez más complejos.

El impacto que tienen los GDs en la industria de defensa, con un impacto significativo en los nuevos programas de adquisición de material y unidades militares se debe, entre muchos de los beneficios y elementos de valor que aportan los gemelos digitales a las Fuerzas Armadas, a las siguientes características:

- Simulación avanzada para el entrenamiento y estudio de operaciones, replicando condiciones de combate reales, escenarios complejos o maniobras navales sin implicación de personal para evitar riesgos [36].

- Apoyo a la decisión del mando, mejorando la toma de decisiones en combate permitiendo simular y predecir escenarios operacionales, analizando en tiempo real múltiples variables operativas (como condiciones climáticas adversas), ayudando a la planificación estratégica y a la evaluación de riesgos [30].
- Optimizar el diseño de sistemas, reduciendo en la industria tiempo de inactividad, costos de mantenimiento y demoras en la fase de producción de material militar [37].
- Mayor seguridad y resiliencia operativa, integrando múltiples fuentes de datos en tiempo real, detectando anomalías y amenazas y facilitando la implementación de estrategias de defensa que aseguren la integridad de los sistemas de comunicación militar [36].
- Optimización del mantenimiento predictivo, utilizando modelos de gemelos digitales para simular fallos estructurales y planificar intervenciones antes de que ocurran fallos críticos [37].

De todas ellas, como se puede observar en la siguiente Figura 2-15, las ventajas más valoradas son la posibilidad de probar productos y servicios en escenarios reales o la simulación para llevar a cabo entrenamientos inmersivos.

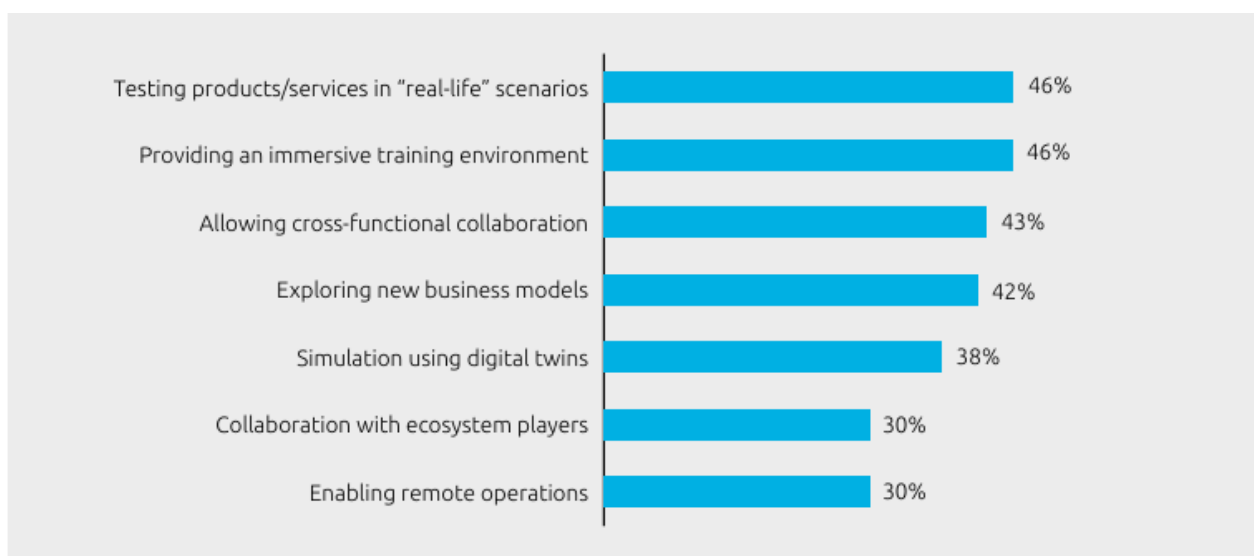


Figura 2-15 Motivaciones más valoradas para el desarrollo de GD en la industria militar. Fuente: [38].

El caso de implementación de un GD en España más relevante es el programa de las fragatas F-110 desarrolladas por Navantia, que incorpora un Gemelo Digital de Plataforma para mejorar la eficiencia operativa y el mantenimiento de estos buques de última generación. De hecho, la herramienta quiere extenderse a otros buques como el submarino S80 y plataformas ya en servicio como las fragatas F-100 o los cazaminas clase Segura [39]. Para mayor información sobre el empleo de este Gemelo Digital, se recomienda al lector visitar la "Guía de orientación sobre Gemelo Digital" [40].

### 2.3.3 El Gemelo Digital Oceanográfico

El Gemelo Digital Oceanográfico (GDO) es una aplicación del concepto de GD que se aplica al ámbito marítimo. Su desarrollo responde a la creciente necesidad de disponer de sistemas de información geoespacial avanzados, orientados a la predicción y que integren datos meteorológicos y oceanográficos, en tiempo real y con el objetivo de asistir a la navegación, la planificación y ejecución de operaciones navales y civiles, como se explica en [30].

Desde una perspectiva tecnológica, el Dr. Azad M. Madni explica en [41], las características de un GD que los hacen ideales para efectuar una representación dinámica y en tiempo real de un sistema físico como el entorno oceánico y atmosférico integrando datos operacionales. El Dr Azad explica cómo mediante tecnologías propias de la "Revolución 4.0" como *Digital Thread* e *IoT* se posibilitan

actualizaciones continuas y optimización predictiva de un GD, lo que sería imprescindible en un modelo oceánico.

En este contexto, surgen iniciativas de importancia. La más relevante y con mayor grado de desarrollo es el *European Digital Twin Ocean*<sup>12</sup> (EDITO) de la Unión Europea, desarrollado principalmente por la organización Mercator Ocean International (MOI)<sup>13</sup>. Como se explica en su misma web [43], el modelos de simulación oceánica, desarrollado por la UE, proporciona una descripción del entorno oceanográfico de alta resolución, multidimensional y en tiempo real. Y lo hace gestionando la integración de grandes cantidades de datos de miles de sensores en los diferentes océanos y numerosos satélites (como se puede ver en la Figura 2-16). De esta forma, han conseguido la creación de un GDO capaz de mejorar la comprensión de los entornos marinos, predecir la respuesta de los océanos, o simular escenarios futuros para evaluar el impacto de la acción humana.

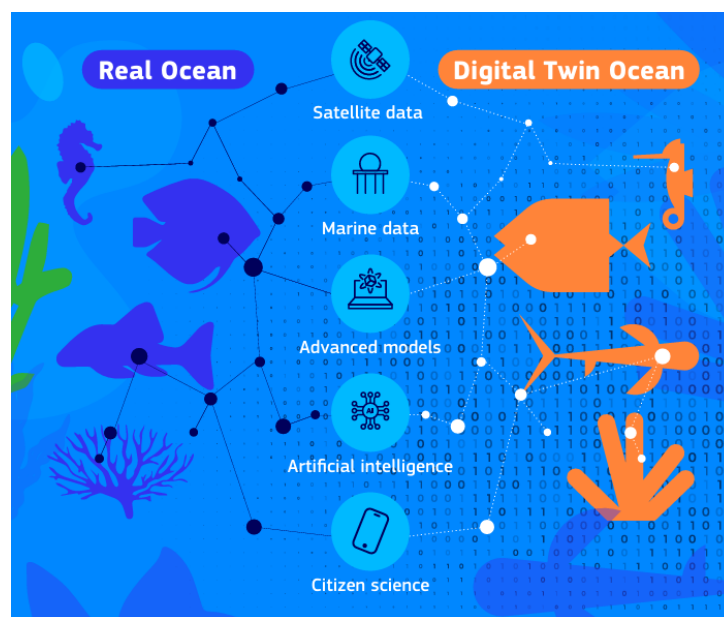


Figura 2-16 Esquema de funcionamiento del EDITO por la Comisión Europea. Fuente: [44].

Una de las razones fundamentales por las que el proyecto EDITO es tan reseñable como GDO, es su gran desempeño en lo que a integración de fuentes se refiere. Pues, es imprescindible para el desarrollo de un GDO contar con una red de servicios y fuentes que alimenten al modelo. Y en este sentido, EDITO, consigue una integración de fuentes variada y muy completa a través de las propias infraestructuras, proyectos y servicios de observación y datos de la Unión Europea [45], incluyendo Copernicus<sup>14</sup>, EMODnet<sup>15</sup>, EuroGOOS<sup>16</sup> e infraestructuras de investigación marina. Además, EDITO es compatible con GDs de las organizaciones de predicción meteorológica más prestigiosas del mundo, como el GD DestinE de la ESA, EUMETSAT y ECMWF, el cuál puede consultar el lector en [48].

Por todo ello, queda justificada la gran evolución que han alcanzado los GDO al servicio de múltiples aplicaciones globales. En el siguiente apartado, hablaremos de los GDO aplicados al entorno operativo naval, una herramienta fundamental en el futuro para apoyar la toma de decisiones en las operaciones navales.

<sup>12</sup> Para mayor información sobre EDITO, consultar: <https://www.edito.eu/>. Accedido por última vez: 20/02/25

<sup>13</sup> Para mayor información sobre *Mercator Ocean International* consultar [42]

<sup>14</sup> Para más información sobre el proyecto Copernicus, consultar: [45]

<sup>15</sup> Para más información sobre EMODnet, consultar: [46]

<sup>16</sup> Para más información sobre el sistema EuroGOOS, consultar: [47]

### 2.3.4 GDO aplicado al entorno operativo naval

Como se comentaba brevemente en el apartado anterior, el proyecto EDITO se encuentra orientado a la gestión sostenible del océano, mitigar la acción humana, mejorar la gestión del riesgo de desastres, restaurar los hábitats marinos y su biodiversidad y adaptarse al cambio climático [49]. Sin embargo, propone una herramienta aplicable y de gran utilidad en el entorno operativo. Por ello, es un recurso integrado en proyectos como el *G7 Future of the Seas and Ocean Initiative*, incrementando las capacidades de los países miembros del G7 en términos de observación oceánica, mejora de los sistemas de predicción oceánicos mundiales, interoperabilidad de sistemas de datos, apoyo a la colaboración internacional en la mar, mejora de los productos de apoyo para toma de decisiones y evaluación del océano o la cooperación política, etc., entre otros aspectos clave [50].

Por otro lado, la necesidad de un conocimiento del entorno integral en el entorno operativo naval ha propiciado la aparición del concepto REP o Imagen de Reconocimiento Ambiental, para hablar del conglomerado de información de distinto tipo (como la información meteorológica) que describe todas las características del entorno operacional (Figura 2-17). De esta forma, el mando, como apoyo a la toma de decisiones, debería tener a su disposición un Sistema de Información Geográfica (SIG), donde entre las muchas capas de información (hidrológica, aeronáutica, topográfica, etc.) se encuentre la oceanográfica, la hidrográfica y la meteorológicas. En este sentido, el GDO, es la herramienta interactiva idónea para el levantamiento del REP, como explica don Ángel Alcázar Izquierdo en [2].

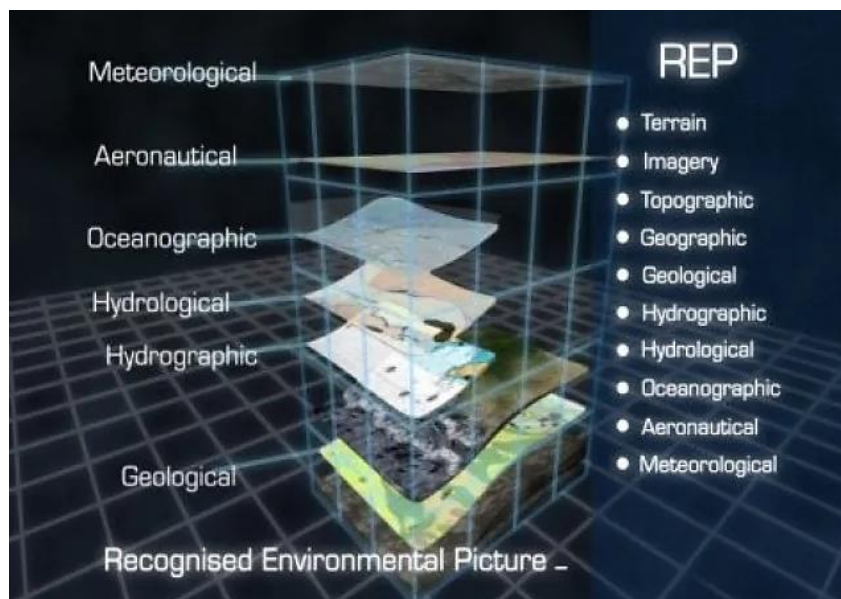


Figura 2-17 Esquema gráfico del concepto militar REP. Fuente: [2].

Todo ello, convierte al GDO en una excepcional herramienta de obtención de los productos de apoyo a la toma de decisiones operativas comentados en la Sección 2.1.3, que ofrece significativas ventajas a las operaciones navales representando una revolución en la planificación y ejecución de misiones marítimas. Pues, la capacidad del GDO para procesar información en tiempo real y generar predicciones precisas permite optimizar la toma de decisiones en entornos operativos de alta complejidad.

En este contexto y con dichas ambiciones, surge POSEIDON en el Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar, desarrollado en colaboración con el IHM, el cual busca validar la aplicabilidad del GDO en operaciones de la Armada Española. Este proyecto ha permitido implementar una plataforma capaz de integrar datos de múltiples fuentes y representarlos en tiempo real a través de una interfaz (Figura 2-18) [51].

Para desarrollar este proyecto se desarrolla un GDO alimentado con datos en tiempo real y de predicción de EMODnet y MeteoGalicia, proporcionando predicciones precisas sobre fenómenos como

la temperatura del mar, oleaje, presión atmosférica y corrientes marinas [52]. Además, el proyecto plantea la implementación de una arquitectura de modelado multinivel, basada en el uso de mallas geoespaciales eficientes, con capacidad de ajustar la resolución, como el mallado H3 de Uber, del que se hablará en detalle en la Sección 2.4.4.

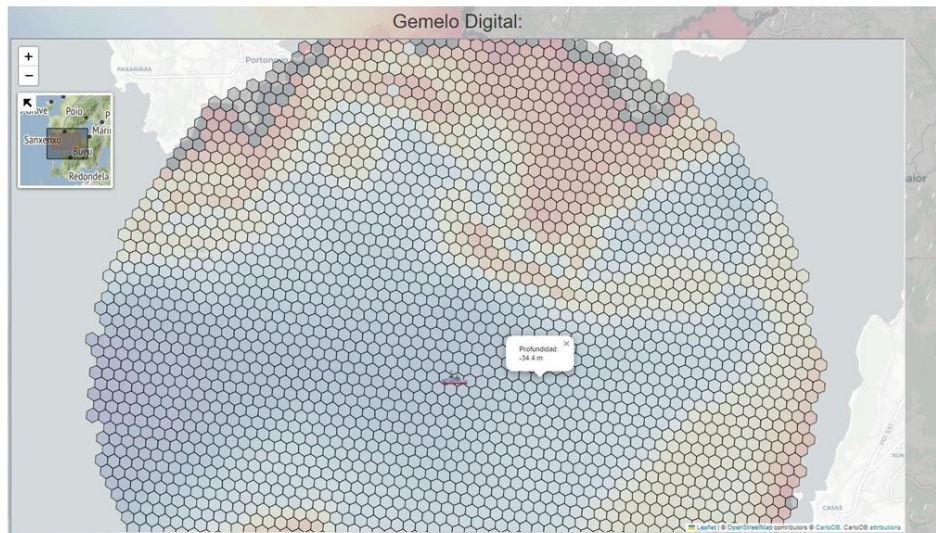


Figura 2-18 Captura de la interfaz web de acceso a los datos del servidor POSEIDON. Fuente: [53].

## 2.4 Discretización del entorno para el desarrollo de un GDO

Tras analizar el estado actual del desarrollo de los gemelos digitales, y en concreto, los GDOs, es de crucial importancia estudiar la discretización del entorno como paso fundamental en la construcción de un GDO, ya que permite representar el espacio marítimo en una estructura de datos eficiente y manejable. Para ello, se emplean diferentes enfoques de mallado que dividen la superficie en celdas, facilitando la interpolación y análisis de datos METOC. En este apartado, se analizarán las principales metodologías utilizadas, incluyendo las mallas tradicionales de MeteoGalicia y el sistema H3 de Uber, evaluando sus ventajas y aplicabilidad en el ámbito naval.

### 2.4.1 Introducción al Método de elementos finitos y su aplicación en un GDO

El “Método de los elementos finitos” (MEF), como explica el Dr. Olgierd Cecil Zienkiewicz, en [54], es el proceso por el cual se divide un sistema de estudio global complejo en un número finito de elementos más sencillos, para evaluarlos por separado, de tal forma que uniendo el resultado del análisis de dichos elementos por separado se pueda obtener un resultado conjunto del sistema completo. A esto se le conoce como discretizar el sistema en elementos llamados “discretos”.

Matemáticamente, el MEF supone una técnica numérica en la que se resuelven Ecuaciones Derivadas Parciales (EDP) de subdominios finitos de un dominio de estudio. El Dr. Alejandro Díaz Morcillo explica en [55], las fases de un proceso de aplicación del MEF:

- Discretización del dominio para dividir el mismo en una malla formada por elementos más pequeños, como celdas en dos dimensiones o tetraedros en tres dimensiones (dependiendo de las dimensiones del dominio).
- Elección de funciones de interpolación más simples dentro de cada elemento, cuya combinación representa la función desconocida que se quiere resolver.

- Formulación del sistema de ecuaciones multiplicando la ecuación original por funciones prueba, integrándolas en todo el dominio. De esta forma, el problema original, con infinitos grados de libertad, queda bajo un sistema de ecuaciones con un número finito de incógnitas.
- Resolución del sistema de ecuaciones organizándolas en una matriz que relaciona los valores de la función desconocida en los diferentes discretos de la malla. La matriz es resuelta mediante métodos numéricos, como la eliminación gaussiana o métodos iterativos.
- Posprocesamiento, tras resolver el sistema, que permite visualizar y analizar los resultados obtenidos. En algunos casos, se emplean técnicas de refinamiento adaptativo, en las que se ajusta la malla para mejorar la precisión en las zonas donde la solución presenta mayores variaciones.

La introducción de este apartado sobre la discretización del entorno oceanográfico de estudio tiene su explicación si entendemos que, en el desarrollo de un GDO, es necesario implementar el MEF en el entorno para representar con precisión el medio y poder explotar los datos oceanográficos. Para ello, el mallado es la técnica imprescindible a través de la cual se divide un dominio continuo, como lo es el océano, en celdas finitas (discretos). De esta forma, se consigue una representación precisa del entorno marino asegurando la interpolación de los datos MetOcean, sin perder demasiada precisión en la simulación. Algunos de los sistemas de mallado más utilizados son *Geohash*, H3, S2 y *Bing*. En la presente memoria se introduce el mallado H3 de Uber, por su gran relevancia en el desarrollo del GDO objetivo. Sin embargo, se recomienda consultar el trabajo de Sergio Ramírez Morán [56] para más información sobre sistemas de mallado útiles en la representación de modelos geográficos.

#### 2.4.2 Aproximaciones para realizar el mallado

Los enfoques para la discretización del entorno pueden dividirse en varias categorías, tal y como se desarrolla en [58]. Estas categorías son: mallas estructuradas, mallas no estructuradas y mallas híbridas o multibloque. La elección de uno u otro depende de la complejidad del dominio y de los requisitos computacionales del modelo que se pretende estudiar.

- **Mallas estructuradas:** se caracterizan por seguir una conectividad fija y predecible, siguiendo un patrón reticular, generalmente en forma de cuadrículas rectangulares en 2D o cúbicas en el caso tridimensional. A partir de estos, se puede reducir el tamaño de los discretos si fuese necesario. A pesar de resultar una técnica más sencilla y requerir menor uso de la memoria a nivel computacional, tiene ciertos inconvenientes. Entre ellos, la dificultad de la malla para adaptarse al contorno de geometrías más irregulares, como puede ser la costa geográfica, o el refinamiento del mallado en algunas regiones en las se requeriría una mayor resolución para mejorar la calidad de la solución. Entre los tipos de generación de mallas estructuradas se encuentran los métodos algebraicos, basados en EDPs, de superposición y de crecimiento estructurado (como el que podemos ver a continuación, en la Figura 2-19).

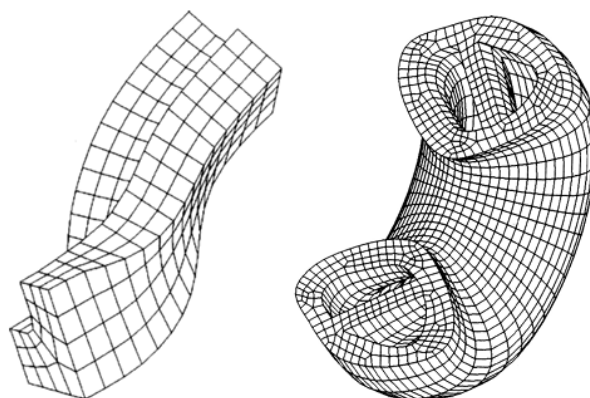


Figura 2-19 Malla estructurada hexaédrica del tipo crecimiento estructurado. Fuente: [54].

- **Mallas no estructuradas:** a diferencia de las anteriores, las mallas no estructuradas no presentan una conectividad fija, un patrón determinado. Este método puede adaptarse a geometrías complejas empleando igualmente elementos triangulares 2D o tetraédricos 3D dependiendo de las dimensiones del dominio a estudiar. A pesar de que permiten modelar con mayor precisión regiones irregulares y facilitar la implementación de técnicas de refinamiento adaptativo (comentadas en la etapa final de postproceso del Método del MEF, este tipo de mallado puede presentar algunas desventajas [57]. Por ejemplo, una mayor complejidad a nivel computacional por el almacenamiento de información adicional sobre la conectividad entre las celdas o discretos. Entre los tipos de generación de mallas no estructuradas se encuentran los métodos de Delaunay-Voronoi, por generación de mallas cuadriláteras o hexaédricas o de frente de avance (como el que podemos ver a continuación, en la Figura 2-20).

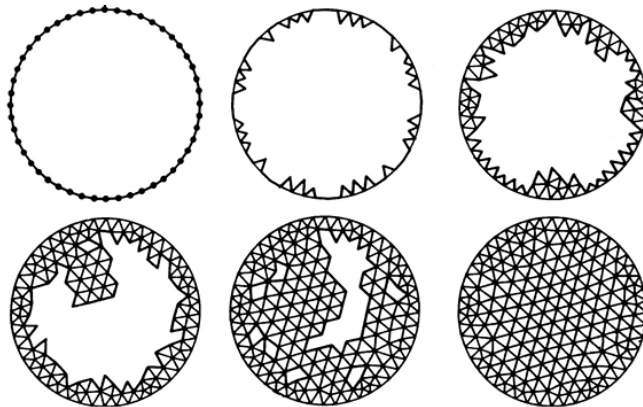


Figura 2-20 Evolución de mallado no estructurado del tipo frente de avance. Fuente: [54]

- **Mallado híbrido o multibloque:** se trata de una técnica más compleja utilizada para discretizar dominios más complicados en su geometría, dividiéndolos en bloques más sencillos que se mallan por separado. Cada bloque se procesa con un método de mallado adecuado, estructurado o no estructurado, y, posteriormente, se unen para formar la malla híbrida final del dominio completo, como se puede observar en la Figura 2-21. Este enfoque es especialmente útil cuando un dominio presenta distintas propiedades o condiciones de contorno, asignando un bloque independiente a cada zona para preservar sus características. Sin embargo, el éxito de este método depende de la correcta creación de los bloques y de la gestión de las interfaces entre ellos para asegurar una unión coherente.

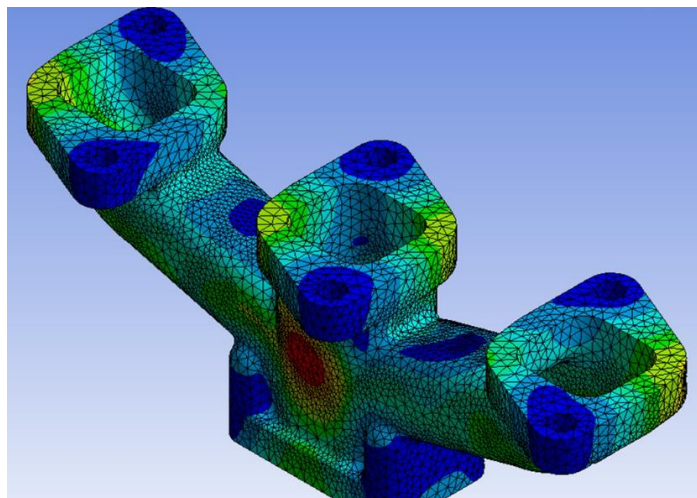


Figura 2-21 Ejemplo de mallado multibloque en software CAD. Fuente: [58].

### 2.4.3 Mallado de MeteoGalicia

MeteoGalicia emplea una combinación de modelos numéricos oceanográficos y atmosféricos basados en diferentes mallas de resolución variables, es decir, con capacidad de adaptar la resolución a regiones más críticas que requieran mejorar la precisión. Además, sus modelos de mallado superficial emplean técnicas de interpolación avanzada para garantizar una correcta transición entre las diferentes escalas de resolución. Los diferentes mallados, dan lugar a los diferentes modelos de predicción numérica de MeteoGalicia, los cuales se pueden consultar en la guía de su API (*Application Programming Interface*) del MeteoSix para el acceso a información meteorológica y oceanográfica a través de la web de forma gratuita [59].

Los mallados cuadriculares empleados por MeteoGalicia utilizan dos tipos diferentes de proyecciones [53]:

- Mallado rectangular empleado en modelos como el WRF (*Weather Research and Forecasting*), que emplea una perspectiva plana<sup>17</sup> en la cual, la distancia entre nodos se mide en kilómetros. Cada celda del mallado tiene asociada su correspondiente área cubierta, la cual depende, no solo de la distancia de separación entre nodos, sino de la proyección plana de las celdas en la superficie curvada de la tierra. Como podemos observar en la Tabla 2-3, esta área proyectada sobre la esfera terrestre es prácticamente igual al área plana sobre el que inicialmente se idean las celdas del mallado.
- Mallados basados en coordenadas geográficas de los modelos de predicción empleados por MeteoGalicia. En este tipo de mallado, la distancia entre nodos se mide en grados de latitud y longitud, lo que permite mantener una separación uniforme entre nodos independientemente de la ausencia de planitud en la superficie terrestre. La relación entre la distancia entre nodos y el área efectiva que cubre cada celda del mallado varía con la latitud debido a la propia curvatura terrestre. Este mallado es el que presentan algunos modelos como WW3 (*Wave Watch III*) o SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), presentados a continuación en la Tabla 2-3 Modelos de predicción numérica según mallado de MeteoGalicia. Fuente: elaboración propia. Tabla 2-3, la cual resume los modelos de predicción de MeteoGalicia disponibles y el mallado superficial que presentan.

Modelo	Cobertura	Resolución malla [km]	Área promedio por celda [km <sup>2</sup> ]
<b>WRF</b>	Ártabro	1	1,69
	Rías Baixas	1	1,69
	Norte de Portugal	1	1,69
	Galicia	4	16
	Península Ibérica	12	144
	Atlántico Norte	36	1296
<b>WW3</b>	Galicia	0,05°	21,44
	Península Ibérica	0, 25°	~ 570
	Atlántico Norte	0, 5°	~2200

<sup>17</sup> Para mayor información sobre los tipos de proyecciones para la representación de la superficie terrestre sobre una superficie plana, consultar [60]

<b>SWAN</b>	Costas de Galicia	0,003°	0,09
<b>ROMS</b>	Galicia	0,02°	4
<b>MOHID</b>	Ártabro	0,003°	0,09
	Arousa	0,003°	0,09
	Vigo	0,003°	0,09

Tabla 2-3 Modelos de predicción numérica según mallado de MeteoGalicia. Fuente: elaboración propia.

#### 2.4.4 Mallado H3 de Uber

El mallado H3, desarrollado por la empresa Uber, es un método de discretización espacial de la superficie terrestre que permite la indexación jerárquica del espacio mediante el uso de hexágonos en lugar de cuadrículas tradicionales. El ingeniero de software Isaac Brodsky, explica en [61] la necesidad que tiene un sistema de cuadrícula global de una proyección cartográfica para transformar ubicaciones tridimensionales de un esferoide a un mapa bidimensional para luego superponer una cuadrícula. El método más común para hacerlo es la proyección Mercator con una cuadrícula cuadrada, pero presenta ciertas desventajas, como se expondrá en “2.4.5 Comparación entre enfoques de discretización”.

Por otro lado, el concepto de “indexación jerárquica”, se refiere a la capacidad de este tipo de discretización de proporcionar múltiples resoluciones que facilitan la agregación, modelado y análisis de datos geospaciales en distintas escalas. Como se detallará en el presente trabajo, este sistema H3 es el que se seguirá para el desarrollo del modelo de riesgos operacionales. Pues es un sistema ampliamente adoptado en aplicaciones de movilidad, logística y meteorología, y una herramienta fundamental en el desarrollo del Gemelo Digital Oceanográfico del AN Pablo García Valera, consultable en [53], basado en el sistema *Big Data* del que parte este trabajo.

La propia compañía *Uber Technologies, Inc.* desarrolla en [62] toda la información relevante a los principios del mallado H3, explicando que se trata de un modelo de indexación geoespacial (concepto que explicaremos en las siguientes líneas), de código abierto y bajo licencia de Apache 2. Consultando los resúmenes de la misma web [63], [64], [65] y [66], es posible entender la superioridad técnica de este modelo. Pues, la resolución jerárquica del mallado implica que cada celda hexagonal pueda subdividirse en siete hexágonos más pequeños, permitiendo una transición fluida entre diferentes escalas de análisis. H3 presenta hasta 16 escalas. Esta organización, mejora la precisión en comparación con los sistemas tradicionales de mallas cuadradas, ya que los hexágonos tienen una mejor proporción entre área y perímetro, lo que minimiza los efectos de distorsión espacial [67].



Figura 2-22 Celda hexagonal del modelo H3 con 7 (aprox.) contenidas de forma jerárquica. Fuente: [64].

### 2.4.5 Comparación entre enfoques de discretización

Por todo lo comentado sobre los mallados anteriores. Se considera necesario analizar la comparativa entre ambos modelos de discretización para entender el empleo del mallado H3 para el desarrollo de un GDO [53].

Como se ha comentado anteriormente, el método más común para trabajar con modelos de representación geoespacial se basa en la utilización de la proyección Mercator con una cuadrícula cuadrada. Sin embargo, las celdas hexagonales H3 ofrecen ventajas significativas sobre las cuadradas. Mientras las celdas que presentan un mallado de cuadrículas son celdas desiguales, tal y como sucede con el mallado de MeteoGalicia (mencionado en la Sección 2.4.3), las hexagonales mantienen una distribución de tamaño más uniforme en la superficie terrestre. Por otro lado, la diferencia en distancias que presentan las celdas cuadradas con sus vecinas en el mallado, como se puede ver en la Figura 2-23, es desigual. Por ello, las celdas cuadradas, comparten con las vecinas aristas (direcciones cardinales) y con otras, solo vértices (diagonales), lo que complica su análisis y uso en modelos numéricos. Sin embargo, los hexágonos tienen seis vecinos equidistantes, facilitando operaciones espaciales como el cálculo de proximidad y agrupamiento [61].

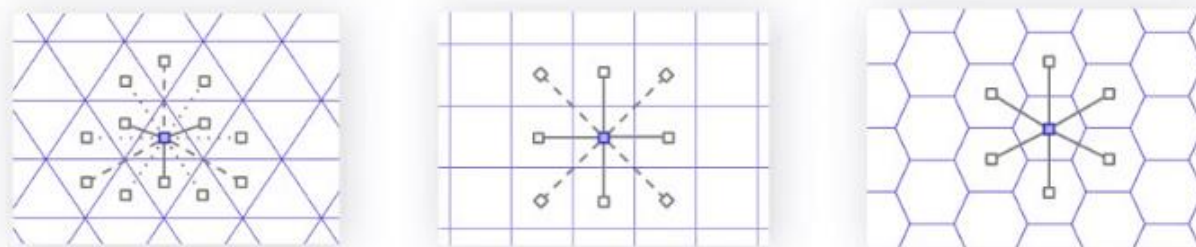


Figura 2-23 Distancias de celdas a sus vecinas en los diferentes mallados. Fuente: [61]

H3 aprovecha su característica de indexación jerárquica para aproximar círculos, algo que las cuadrículas cuadradas logran de forma menos precisa, y así poder adaptarse a contornos irregulares mejor que los mallados con celdas cuadradas. De esta forma, H3 permite reducir la cantidad de hexágonos necesarios para representar una misma área sin perder resolución significativa, a diferencia de las celdas cuadradas que no se agrupan de manera eficiente. En [53], se muestra la siguiente Tabla 2-4 la relación entre la superficie de celda del mallado de los modelos numéricos de predicción de MeteoGalicia (solo de algunas variables del GDO desarrollado) y el área promedio de la resolución de celdas H3 que más se ajusta. De esta forma, presentan cuál sería la equivalencia entre ambos modelos de mallado.

Variable	Ancho [km] / área [km <sup>2</sup> ]	Escala H3	Área promedio H3 [km <sup>2</sup> ]
<b>WRF ((módulo o dirección del viento, temperatura, humedad, etc.)</b>	1,3 / 1,69	7	~5,18
		8	~0,74
	4 / 16	6	~36,27
		7	~5,18
	12 / 144	5	~253,9
		6	~36,27

<b>SWAN (dirección, altura del oleaje, etc.)</b>	0,3 / 0,09	9	~ 0,11
		10	~0,01
<b>WW3 (dirección, altura del oleaje, etc.)</b>	4,63 / ~21,44	6	~36,27
		7	~5,18
<b>ROMS (profundidad, salinidad, etc.)</b>	2 / 4	7	~5,18
		8	~0,74
<b>MOHID (profundidad, salinidad, marea, etc.)</b>	0,1 / 0,01	9	~0,11
		10	~0,01

Tabla 2-4 Área de mallado de MeteoGalicia en algunas fuentes seleccionadas y su equivalencia en H3 con la resolución que más se ajusta. Fuente: [52].

## 2.5 Fuentes de datos integrables en un GDO

Un GDO necesita nutrirse de datos procedentes de múltiples fuentes. En la Sección 2.1.3 se mencionan numerosas plataformas de obtención de datos MetOcean que nutren los modelos numéricos integrados en un GDO. La selección de estas fuentes de datos debe fundamentarse en un análisis técnico que considere diversos factores y prioridades. Entre ellos, destacan la accesibilidad a la información, diferenciando entre fuentes públicas y privadas; nacionales o de ámbito global; la fiabilidad de los datos, evaluando los márgenes de error asociados; y los aspectos económicos, valorando los costos derivados del uso de dichos servicios. El proyecto POSEIDON integra, las principales fuentes de datos MetOcean que se explicarán a continuación.

### 2.5.1 Datos MeteoGalicia

A pesar de haber introducido con anterioridad el mallado empleado por MeteoGalicia (2.4.3), es necesario analizar su origen y los datos que ofrece este organismo, perfectamente adaptables en un Gemelo Digital Oceanográfico. MeteoGalicia es un organismo creado en el año 1999 mediante un convenio entre la Consejería de Medio Ambiente y la Universidad de Santiago de Compostela (USC), con la finalidad de desarrollar un sistema avanzado de predicción meteorológica en Galicia. Actualmente, depende de la Consejería de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Xunta de Galicia y gestiona una red de 156 estaciones meteorológicas distribuidas por las cuatro provincias gallegas [68].

Como se puede ver en su página web [69], MeteoGalicia se organiza en cuatro áreas principales:

- **Predicción operativa:** Elaboración de pronósticos meteorológicos en tiempo real.
- **Predicción numérica:** Desarrollo de modelos de simulación para proyecciones meteorológicas de alta precisión.
- **Visualización:** Representación gráfica y acceso a datos para su análisis.
- **Climatología:** Gestión y análisis de registros históricos y tendencias climáticas.

Tecnológicamente, los avances en predicción meteorológica de MeteoGalicia se han visto potenciados por el Centro de Supercomputación de Galicia (CESGA), lo que ha permitido aumentar la resolución de los modelos numéricos y mejorar la fiabilidad de las previsiones. Además, cuenta con un

radar Doppler de polarización dual que opera en la banda C (4-8 GHz), ubicado en el Monte Xesteiras (Pontevedra). Este radar ofrece una cobertura óptima para el monitoreo de frentes meteorológicos procedentes del océano Atlántico, mejorando la precisión en la predicción de eventos meteorológicos adversos [51].

Por otro lado, como se estudiado en la Sección 2.4.3, dedicado al mallado empleado por MeteoGalicia, sus sistema emplea múltiples modelos de predicción numérica, consultables en [70], cada uno optimizado para diferentes aplicaciones y escalas espaciales:

- **WRF:** desarrollado por el NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), con capacidad para simular variables atmosféricas en escalas que van desde unos pocos hasta miles de kilómetros, utilizando datos reales o condiciones atmosféricas idealizadas.
- **WW3:** Sistema desarrollado por la NOAA, especializado en la predicción del oleaje oceánico y marítimo, ampliamente utilizado en estudios de dinámica de olas.
- **SWAN:** Modelo creado para la simulación de la evolución del oleaje en zonas costeras, mejorando la precisión en predicciones de dinámica litoral.

Estos modelos permiten obtener información meteorológica, oceanográfica y de oleaje con alta resolución espacial y temporal, a través de su interfaz (Figura 2-24), siendo clave para aplicaciones en seguridad marítima y planificación de operaciones en entornos costeros. Y es por eso, que MeteoGalicia se ha consolidado como una fuente de referencia en la obtención de datos meteorológicos en las Rías Baixas y será la principal fuente de datos para la implementación del GDO desarrollado en el proyecto POSEIDON.

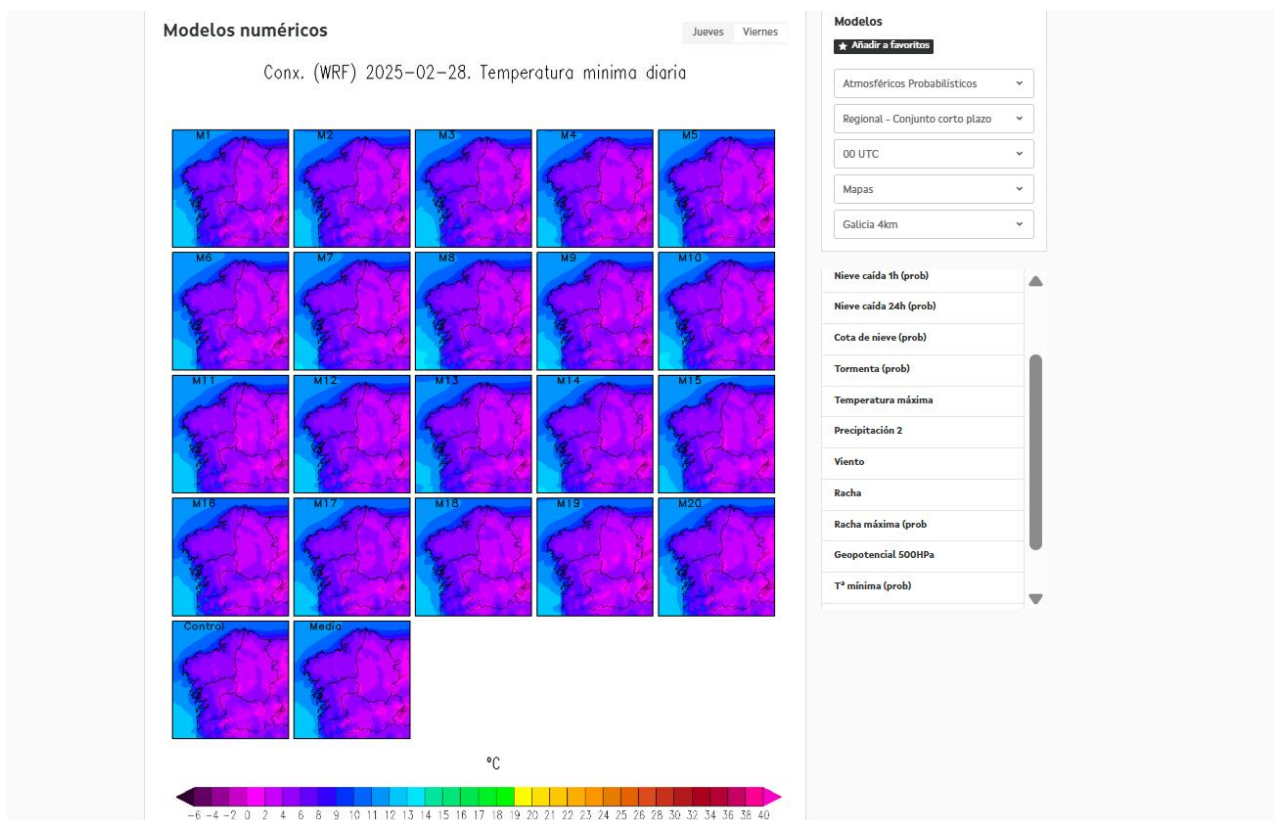


Figura 2-24 Interfaz gráfica web de MeteoGalicia. Modelo de predicción numérica WRF. Fuente: [69].

### 2.5.2 Datos de EMODnet

La Red Europea de Observación e Información Marina (EMODnet, por sus siglas en inglés), es el servicio de datos MetOcean de la Comisión Europea (CE) y el Fondo Europeo Marítimo y de Pesca. Como es posible comprobar en su web [46], fue creada en 2009 y se ha convertido en una plataforma

clave para el acceso a datos marinos *in situ*. Actualmente, colabora con más de 120 organizaciones para mejorar la recopilación, procesamiento y validación de datos.

Estos datos, metadatos y productos son accesibles a través de su portal web<sup>18</sup> e involucran una gran cantidad de información sobre el medio ambiente marino y actividades humanas en siete disciplinas bien diferenciadas: batimetría, geología, física, química, biología, hábitats de los fondos marinos y actividades humanas. Entre estas disciplinas, la batimetría es la más relevante para el desarrollo del GDO de POSEIDON, proporcionando datos batimétricos y productos derivados. Entre los cuales, destaca su producto insignia: el Modelo Digital de Terreno (*Digital Terrain Model, DTM*). Este modelo cubre todas las regiones marítimas de Europa con una resolución de malla estandarizada y se actualiza cada dos años mediante la integración de datos provenientes de oficinas hidrográficas, institutos de investigación y entidades del sector industrial [51].

Como se comentaba anteriormente, todos estos datos son accesibles a través de su interfaz web (Figura 2-25), la cual no se limita a representar la profundidad media registrada, sino que también proporciona información complementaria, como la fecha de adquisición del dato, la fuente de origen y diversas referencias de la línea de costa, lo que lo convierte en una herramienta integral para el análisis y modelado del entorno marino.

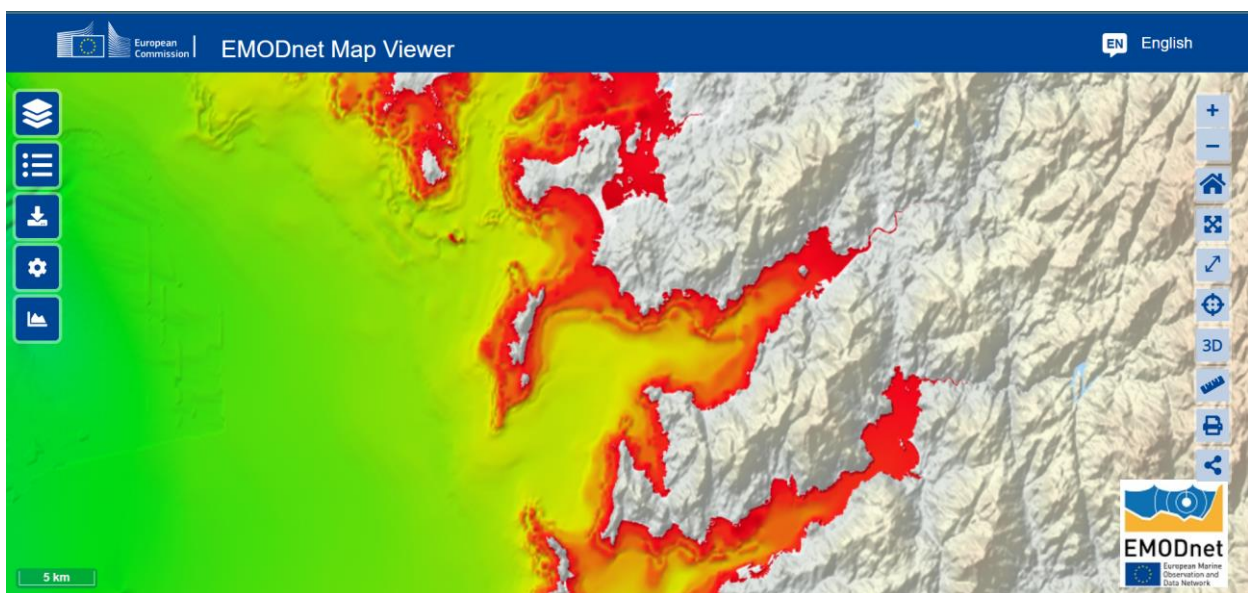


Figura 2-25 Interfaz gráfica web de EMODnet. Batimetría de la ría de Pontevedra. Fuente: [72].

### 2.5.3 Datos de Puertos del Estado

Puertos del Estado es un organismo, dependiente del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, que gestiona, coordina y apoya la actividad de cuarenta y seis puertos diferentes. Entre sus responsabilidades, consultables a través de su web [73], se encuentran: la formación y promulgación de investigación y desarrollo tecnológico relacionados con las actividades portuarias, así como de la gestión del correspondiente sistema de señalización marítima española.

El organismo, ofrece un surtido de datos MetOcean históricos, de observación y predicción integrables en un Gemelo Digital Oceanográfico: oleaje, viento, salinidad, nivel del mar, etc. El objetivo de Puertos del Estado es asistir a los centros portuarios nacionales proporcionando todos estos datos para su explotación. La red de sistemas de adquisición de datos y monitorización viene definida en [74], y

<sup>18</sup> Para acceder toda la información relativa a la descarga de datos de EMODnet, consultar: [71]

está compuesta por boya con capacidad de procesado de datos y transmisión a tierra, mareógrafos son sensores de presión hidrostática, o radares de alta frecuencia para la detección de precipitaciones y monitoreo de corrientes marinas. Todos los elementos de esta red son consultables a través de su interfaz web (Figura 2-26) en [75].

Por otro lado, Puertos del Estado emplea el Sistema de Información del Medio Ambiente Marino (SIMAR) para la obtención de datos oceanográficos. El conjunto de datos SIMAR se compone de series temporales de parámetros generadas mediante modelado numérico, por lo que se trata de datos simulados y no de mediciones directas. Para ello, se seleccionan un subconjunto de 3.800 puntos, cuya información se encuentra almacenada en el Banco de Datos de Puertos del Estado. Gracias a la combinación de estos datos históricos con mediciones en tiempo real, es posible desarrollar modelos predictivos de alta fiabilidad.

En cuanto a la descarga y al formato de los datos, los usuarios pueden seleccionar una boya específica para acceder a la información deseada, obteniendo los datos en formato .csv, el cual puede ser posteriormente convertido y procesado. El procedimiento detallado para la descarga y tratamiento de estos datos se puede encontrar en [76].

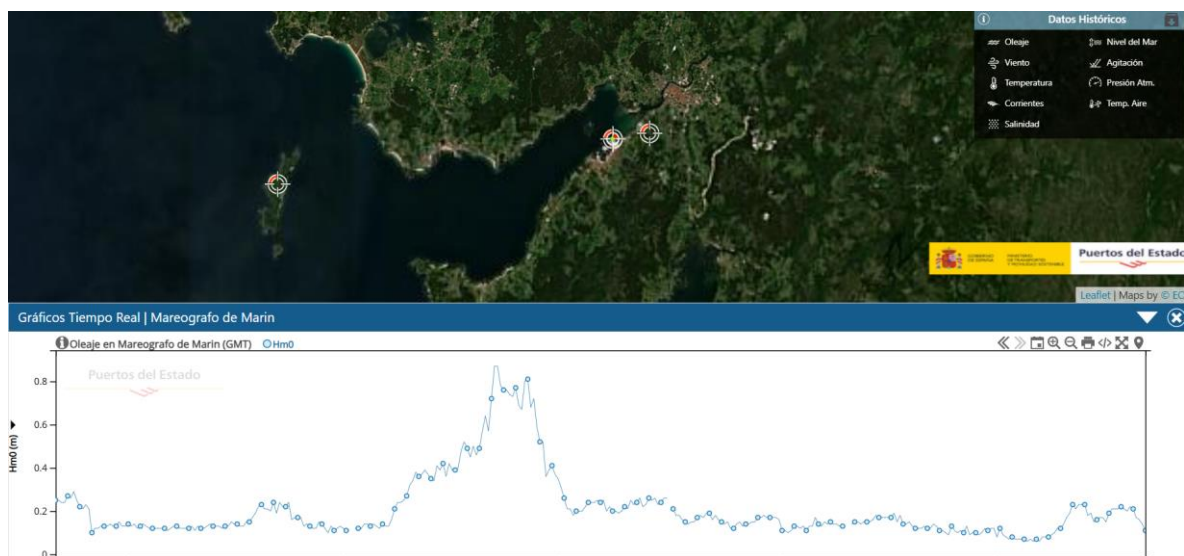


Figura 2-26 Interfaz gráfica web de Puertos del Estado. Consulta del mareógrafo de Marín. Fuente: [75].

## 2.6 Sistemas *Big Data* integrados en gemelos digitales con interfaz SPA

### 2.6.1 Antecedentes

El concepto de *Big Data* surgió en los años 2000 y se ha extendido a todos los ámbitos de la sociedad en las últimas décadas, con aplicaciones en múltiples campos. El término *Big Data* hace referencia, no solo al enorme volumen de datos generados diariamente y que crece exponencialmente, sino también a la capacidad de procesarlos y analizarlos eficientemente. Actualmente, el *Big Data* está estrechamente ligado a la IA, ya que estos sistemas necesitan grandes volúmenes de datos para entrenar modelos y hacer predicciones precisas, algunos incluso con capacidad de mejorar de forma autónoma con el tiempo, tal y como explica el Dr. Viktor Mayer-Schönberger en [77].

Por otro lado, la evolución de los GDs (Sección 2.3), ha propiciado que, los sistemas *Big Data*, hayan ido tomando peso en el desarrollo de estos. El auge de sensores conectados y plataformas *Big Data* hizo posible el desarrollo de gemelos digitales integrados en tiempo real, donde los datos en vivo alimentan continuamente al modelo virtual para simular el comportamiento del sistema físico [78]. Para lograr esto, un gemelo digital moderno debe aprovechar las tecnologías avanzadas del *Big Data* para el almacenamiento y procesamiento masivo de datos, y su computación en la nube. De esta forma, se le

permite recibir, almacenar y procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real., como se explica en [79].

De igual manera, es fundamental que el GD exponga sus resultados de forma comprensible a los usuarios; por ello suele incluir una interfaz digital interactiva que permita visualizar y consultar el estado del gemelo en tiempo real [78]. En este contexto, nace la necesidad de desarrollo de GDs con arquitectura web. Dicha interfaz puede implementarse como una aplicación web para brindar una experiencia de usuario dinámica e interactiva. Esto es, precisamente, lo que se persigue en [53], trabajo encuadrado dentro del desarrollo del sistema POSEIDON del Centro Universitario de la Defensa.

### 2.6.2 Dimensiones y ciclo Big Data

Según Según IBM (*International Business Machines Corporation*), el análisis de Big Data se refiere al proceso de examinar grandes y variados conjuntos de datos para descubrir patrones ocultos, correlaciones y otras informaciones relevantes (como podrían ser datos meteorológicos y ambientales, cuya combinación fuese necesaria analizar para determinar el riesgo en operaciones militares). Este análisis permite transformar datos masivos en conocimientos accesibles, ayudando a la toma de decisiones y al desarrollo de estrategias [80]. Es por ello, que el IBM define cinco dimensiones principales conocidas como “las 5V”:

- **Volumen:** Se refiere a la enorme cantidad de datos generados continuamente desde diversas fuentes, como pueden ser modelos de predicción matemática, dispositivos IoT, dispositivos de medición como sensores, etc.
- **Velocidad:** Indica la rapidez con la que se generan y procesan los datos, lo que permite al usuario, que haga uso de esta tecnología, reaccionar en tiempo real al resultado del análisis de dicha cantidad de datos.
- **Variiedad:** Hace referencia a los diferentes tipos de datos disponibles, que pueden ser estructurados, semiestructurados o no estructurados, provenientes de textos, imágenes, videos, mediciones, etc. o generados sintéticamente por IA.
- **Veracidad:** Concierna a la calidad y fiabilidad de los datos, asegurando que las decisiones basadas en ellos sean precisas y confiables.
- **Valor:** Se centra en la capacidad de transformar datos en información útil que aporte beneficios tangibles.

Por otro lado, resulta imposible entender el *Big Data* sin abordar lo que se conoce como el ciclo de vida del *Big Data* (puede verse en la Figura 2-27), el cual hace referencia al conjunto de etapas que se suceden habitualmente en el tratamiento de grandes volúmenes de datos. Aunque las fases específicas pueden variar en función del tipo de proyecto y del enfoque metodológico adoptado, existen una serie de pasos comúnmente aceptados [77]:

- **Captura o adquisición de datos:** comprende la recopilación de datos desde diversas fuentes, que pueden presentar formatos heterogéneos. Por ejemplo, los datos MetOcean pueden provenir tanto de archivos históricos, como de sensores embarcados en unidades navales, estaciones meteorológicas terrestres, o incluso modelos predictivos generados por simulaciones numéricas. La variedad de orígenes y formatos impone la necesidad de una arquitectura flexible de entrada de datos.
- **Almacenamiento de datos:** una vez adquiridos, los datos deben ser almacenados en infraestructuras capaces de manejar volúmenes masivos y garantizar su disponibilidad, integridad y accesibilidad. En este punto entran en juego múltiples soluciones, desde bases de

datos estructuradas o SQL (*Structured Query Language*), hasta plataformas de almacenamiento distribuido en la nube, que permiten escalar horizontalmente según las necesidades del sistema.

- **Procesamiento o tratamiento de datos:** antes de que los datos puedan ser analizados, a menudo es imprescindible someterlos a un proceso de tratamiento o preprocesado. Esto puede incluir tareas como la depuración de errores, la normalización de formatos, la fusión de fuentes diversas o la conversión a estructuras más manejables. Esta fase es clave para asegurar la calidad y la coherencia de la información a utilizar posteriormente.
- **Análisis de datos:** mediante el uso de herramientas de análisis descriptivo, estadístico o predictivo, se identifican patrones, correlaciones, tendencias y comportamientos ocultos en los datos. Es decir, se transforma la información en conocimiento útil para la toma de decisiones.
- **Visualización de datos:** finalmente, los resultados del análisis deben presentarse de forma comprensible para el usuario final. Para ello se emplean distintos mecanismos de representación visual, como gráficos, diagramas, mapas interactivos o paneles de control (*dashboards*), que permiten interpretar fácilmente los datos procesados y facilitan su uso en contextos operativos, estratégicos o científicos.



Figura 2-27 Ciclo Big Data. Fuente: [81].

### 2.6.3 Bases de datos y sus tipos

Una base de datos es una recopilación organizada de información que se almacena en un sistema informático. Estas bases de datos permiten almacenar información sobre personas, productos, pedidos u otros elementos como datos de carácter MetOcean. Para gestionar y operar estas bases de datos, se utilizan Sistemas de Gestión de Bases de Datos (DBMS, por sus siglas en inglés), que son herramientas de software diseñadas para interactuar con el usuario, las aplicaciones y la propia base de datos, permitiendo definir, manipular y controlar los datos [82].

En base a esta definición, el IBM define dos tipos de bases de datos [83]:

- **Bases de datos SQL:** son bases de datos denominadas como relacionales, que organiza la información en tablas formadas por filas y columnas (como se puede observar en la Figura 2-28). Utiliza el lenguaje SQL (*Structured Query Language*) para gestionar y consultar los datos, y es ideal para trabajar con datos estructurados que presentan relaciones claras entre sus elementos.

Estas bases de datos requieren un esquema predefinido, lo que significa que la estructura de los datos debe ser establecida antes de almacenar la información. También se caracterizan por cumplir con las propiedades ACID (atomicidad, consistencia, aislamiento y durabilidad), lo que garantiza transacciones fiables y coherentes. Suelen escalar verticalmente (ampliando la capacidad del servidor).

- **Bases de datos NoSQL o no estructuradas:** se trata de un tipo de base de datos no relacional, es decir, que no almacena los datos en tablas tradicionales. Su estructura es dinámica y flexible, lo que le permite adaptarse a datos no estructurados o semiestructurados como documentos, texto libre o registros variables. NoSQL permite modificar el esquema sobre la marcha, añadiendo atributos y tipos de datos nuevos sin afectar al conjunto. Además, estas bases de datos escalan horizontalmente (añadiendo nuevos nodos o servidores), lo que las hace ideales para grandes volúmenes de información en sistemas distribuidos. Se basan en el teorema CAP (consistencia, disponibilidad y particiones).

id [PK]	integer	lat real	lon real	date_created timestamp without time zone	date_predicted timestamp without time zone	mod real	dir real	wind_gust real	temp real	prec real	rh real	sst real
21001	21001	42.78004	-9.103727	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	6.902148	186.21736	10.972792	12.131592	0.501	0.999557	12.039
21002	21002	42.779327	-9.087424	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	6.107468	187.03017	10.772792	11.957397	0.629	0.999957	11.860
21003	21003	42.77861	-9.071121	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	5.3717613	180.5067	8.972792	12.255615	0.60400	0.998857	12.195
21004	21004	42.777893	-9.054818	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	6.700529	174.66937	10.472792	12.76001	0.448	0.97075707	12.63
21005	21005	42.777172	-9.038516	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	8.688503	176.4202	11.672792	13.029419	0.331	0.952257	12.709
21006	21006	42.776447	-9.022214	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	8.6448145	181.57434	12.072792	13.016815	0.262	0.949157	12.599
21007	21007	42.775723	-9.005913	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	8.116849	187.27254	11.972792	13.007416	0.194	0.943657	12.478
21008	21008	42.774994	-8.989612	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	7.2494984	191.1952	11.272792	13.083801	0.127	0.933157	12.342
21009	21009	42.774265	-8.973311	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	6.1966004	192.84416	11.272792	13.127594	0.07	0.923657	12.182
21010	21010	42.773533	-8.95701	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	5.3834286	194.93579	10.572792	13.0578	0.032	0.91545695	11.998
21011	21011	42.7728	-8.940711	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	4.096074	199.05852	10.172792	12.802002	0.014	0.925557	12.505
21012	21012	42.77206	-8.924411	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	4.4283648	197.57965	10.472792	12.595398	0.005	0.918057	12.322
21013	21013	42.771324	-8.908113	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	4.77982	185.01103	10.272792	12.378815	0.005	0.91165704	12.093
21014	21014	42.77058	-8.891813	2025-02-13 00:00:00	2025-02-13 02:00:00	5.0901732	167.60631	9.972792	12.196991	0.008	0.91535705	11.962

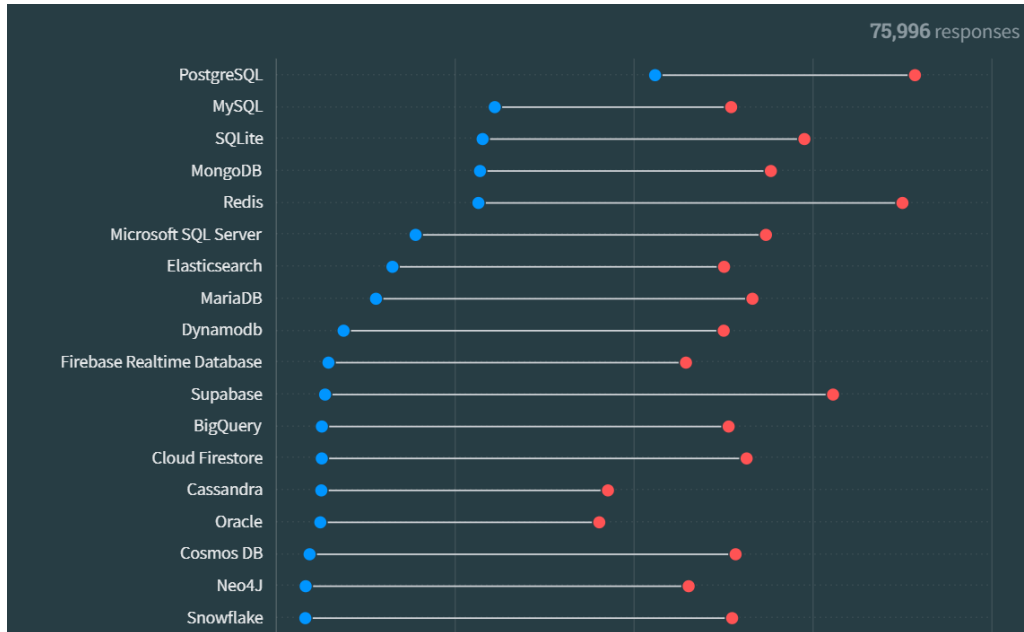
Figura 2-28 Interfaz de una base de datos estructurada (SQL), PostgreSQL. Fuente: elaboración propia.

### 2.6.4 Base de datos PostgreSQL

La base de datos PostgreSQL tiene su origen en el proyecto POSTGRES iniciado en 1986 en la Universidad de California en Berkeley bajo la dirección de Michael Stonebraker. En su página web oficial [84], se desarrolla la evolución histórica que ha tenido el proyecto:

A lo largo de los años 80 e inicios de los 90, el proyecto académico produjo varias versiones. La primera versión se liberó en 1989, seguida de la segunda en 1990 (con un nuevo sistema de reglas) y la tercera versión en 1991. En 1994 se publicó la versión 4.2 de POSTGRES y, tras finalizar el desarrollo en Berkeley, el código fuente se liberó permitiendo continuar el proyecto de forma abierta. En 1995 dos estudiantes de Berkeley añadieron un intérprete para el lenguaje SQL al sistema (hasta entonces usaba un lenguaje de consultas propio llamado QUEL), lanzando la versión Postgres95, y al año siguiente el proyecto fue renombrado oficialmente como PostgreSQL para reflejar su compatibilidad completa con SQL.

Desde la primera versión comunitaria PostgreSQL 6.0 (enero de 1997), una comunidad internacional de desarrolladores ha impulsado su evolución continua, convirtiéndolo en uno de los sistemas gestores de base de datos relacionales más avanzados y utilizados en la actualidad (tal y como se puede ver en la Figura 2-29). Como expone la encuesta *Stack Overflow* realizada a más de 90000 programadores profesionales de todo el mundo, consultable en [85].



**Figura 2-29** Encuesta *Stack Overflow* sobre el uso de bases de datos siendo PostgreSQL la más apreciada a nivel internacional por programadores profesionales. Fuente: [85].

En cuanto a sus principios de funcionamiento, PostgreSQL sigue el paradigma de un sistema gestor de bases de datos relacional de arquitectura cliente-servidor: los datos se organizan en tablas (relaciones) con esquemas definidos, permitiendo establecer relaciones entre ellas mediante claves. Las operaciones de consulta y administración se realizan mediante el lenguaje SQL, cumpliendo con gran parte del estándar SQL vigente e incorporando características típicas como vistas materializadas, índices, desencadenadores (*triggers*) y procedimientos almacenados dentro del propio motor, [86].

Entre sus características técnicas principales, PostgreSQL incorpora múltiples capacidades avanzadas que lo distinguen de otras soluciones de bases de datos, en [87] y [88] se destacan:

- Extensibilidad a nivel de tipos y funciones, el soporte nativo de datos JSON, y sólidos mecanismos de seguridad para protección de la información.
- Capacidad adaptar el motor a requerimientos específicos, incorporando nuevas estructuras de datos o lógicas de negocio dentro del servidor de bases de datos según las necesidades de cada aplicación
- Integración de múltiples tipos de datos JSON y JSONB (JSON binario) que permiten almacenar y consultar documentos JSON semiestructurados directamente en las tablas.
- Seguridad. PostgreSQL ofrece autenticación robusta y configurable (desde contraseñas con hash seguro hasta métodos externos como Kerberos o certificados SSL) junto con un modelo de control de accesos basado en roles para gestionar permisos de usuarios.

## 3 MATERIALES Y MÉTODOS

Una vez finalizado el análisis sobre la evaluación de riesgos METOC y la utilización del GDO como herramienta de gran utilidad para este fin, se expone en el siguiente apartado el desarrollo del trabajo y la consecución de la solución al problema presentado: la creación de un modelo de evaluación de riesgos integrado en un GDO con el soporte de un sistema Big Data.

En este capítulo se irán desarrollando las técnicas y procedimientos que han sido necesarios para el correcto funcionamiento del modelo de evaluación de riesgos operacionales que se quiere desarrollar. Se comenzará, por tanto, por exponer las herramientas que han sido utilizadas para abordar el proyecto. Entre ellas, los lenguajes de programación Python o JavaScript, los cuales servirán para llevar a cabo todas las acciones necesarias en el desarrollo del trabajo. Así como, la plataforma de bases de datos estructuradas PostgreSQL con extensión PostGIS, empleada para el almacenamiento de datos de diferentes modelos de predicción meteorológica en el servidor POSEIDON.

Posteriormente, se realizará una descripción general de la arquitectura, y se expondrán, finalmente, las diferentes implementaciones realizadas, así como una descripción de los problemas encontrados y la solución adoptada, con el objetivo de ejecutar correctamente un modelo fiable de evaluación del riesgo operacional METOC.

### 3.1 Software y herramientas empleadas

Durante este apartado, se detallan las herramientas de software empleadas en el desarrollo del proyecto. Para explicar las características que aporta cada herramienta dentro del sistema se incluyen algunas partes del código aún no expuestas al lector (lo cual se hará en la Sección 3.3). El objetivo es que el lector entienda que todas las herramientas desarrolladas a continuación, gracias a sus características, han resultado idóneas para la consecución de los objetivos del trabajo.

#### 3.1.1 Lenguaje Python

Para el desarrollo de parte de este proyecto (en concreto, del *backend*), se ha utilizado el lenguaje de programación Python. Python, es un lenguaje de alto nivel, interpretado y de propósito general, creado a finales de los años 80 por el programador holandés Guido van Rossum en el Instituto de Investigación Nacional de Matemáticas y Ciencias de la Computación. Desde su primera versión<sup>19</sup>, Python ha

---

<sup>19</sup> Para más información sobre la evolución de las versiones de Python, se recomienda consultar: <https://www.luisllamas.es/historia-evolucion-python> (Accedido por última vez: 10/03/25)

evolucionado constantemente hasta convertirse en uno de los lenguajes de programación más extendidos en todo el globo [89].

Entre sus características principales, consultables en [90], cabe destacar la incorporación de estructuras de datos integradas como listas, diccionarios, conjuntos y tuplas, lo que permite llevar a cabo operaciones complejas con pocas líneas de código. Es por esto, que Python se considera un lenguaje de alto nivel. Además, al ser un lenguaje interpretado, el código fuente se ejecuta línea por línea mediante un intérprete, sin necesidad de compilación previa. Su carácter de propósito general se refleja en la gran variedad de aplicaciones en las que se utiliza, como el análisis de datos o el desarrollo de aplicaciones web.

Estas características de Python lo convierten en idóneo para abordar el diseño del código fuente del sistema, pues permite escribir código claro y conciso, lo cual es esencial en proyectos académicos como este, en el que es necesaria la comprensión del código por parte de terceros.

Entre las principales ventajas de Python destaca la amplitud de su biblioteca estándar. Como veremos posteriormente, el código fuente desarrollado, ejecuta consultas sobre datos MetOcean y elementos georreferenciados. Este proceso, es resuelto mediante el lenguaje de Python haciendo uso de algunas de sus librerías como `psycopg2`, para conectar con PostgreSQL; `shapely`, para crear y transformar geometrías; o `numpy`, para realizar promedios y operaciones numéricas.

Por otro lado, destaca la portabilidad de Python. Es decir, la compatibilidad de este lenguaje con diversos sistemas operativos como Windows (empleado en este proyecto). Además, Python, dispone también de una comunidad muy activa de desarrolladores que constantemente amplían sus capacidades y fomentan su evolución. En el código desarrollado, se manifiestan algunas de las características de Python más valoradas:

- Tipado dinámico: para implementar funciones con estructuras como listas o diccionarios sin necesidad de definir estos tipos de estructuras explícitamente.
- Organización de módulos separados cumplimiento con el principio de diseño modular que debe seguir un proyecto como este.
- Facilidad para el manejo de datos complejos como flechas o la conversión de variables de un tipo a otro distinto.

Finalmente, cabe destacar que Python puede ser utilizado en distintos entornos de desarrollo integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) como Visual Studio Code, o Sublime Text. Sin embargo, en este trabajo, se ha optado por utilizar PyCharm, que será descrito con más detalle en la Sección 483.1.4.



**Figura 3-1** Logo de Python. Fuente: [91].

### 3.1.2 *Microframework Flask*

Antes de estudiar el siguiente modelo de lenguaje empleado para el desarrollo del proyecto, es necesario introducir la herramienta Flask, que, dentro del entorno de Python, nos ha permitido implementar una interfaz de comunicación con protocolo HTTP en nuestro *backend*.

Flask es un *microframework* web para Python. Es decir, un conjunto de herramientas, librerías y prácticas para desarrollar aplicaciones. La herramienta, fue creada por Armin Ronacher y lanzada en 2010 y fue ganando gran popularidad por su diseño sencillo, ligero pero potente [92].

Flask, nos permite crear API REST de forma rápida y con una estructura clara. Esto quiere decir, crear una interfaz de programación de aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) que permita a otras aplicaciones enviar datos y recibir respuestas estructuradas, como en el caso de nuestro sistema, que utiliza respuestas estructuradas en formato JSON tras haber recibido una petición POST del *frontend*).

Entre sus características, cabe remarcar que Flask es una herramienta ligera en cuanto a su integración en el código. Además, se centra en la simplicidad, es decir, proporciona lo esencial para construir una aplicación web o API. Es por esto que se ha convertido en uno de los quince *frameworks* más utilizados actualmente, según la encuesta *Stack Overflow* realizada a más de 90000 programadores de todo el mundo [85].

### 3.1.3 *Lenguaje Javascript*

JavaScript es, también, un lenguaje de programación interpretado que se utiliza para crear contenido dinámico en páginas web, permitiendo una interactividad y una experiencia de usuario más completa y de mayor complejidad. Junto con HTML y CSS, forman un grupo de herramientas fundamental para el desarrollo web moderno [93]. Es por ello, que esta “triada” se ha implementado para el desarrollo del *frontend* y, por ende, la interfaz web con la que el usuario puede interactuar con el modelo de evaluación de riesgos creado.

JavaScript fue desarrollado en 1995 por Brendan Eich en la empresa *Netscape Communications*. Originalmente llamado Mocha y luego LiveScript, su propósito inicial era permitir la manipulación dinámica de contenido en los navegadores web, mejorando la interactividad de las páginas web estáticas<sup>20</sup>. A lo largo de su evolución, JavaScript ha mantenido dicha esencia y funcionalidad inicial, por ello es la herramienta idónea para implementar el *frontend* interactivo de nuestro sistema, permitiendo la construcción de una interfaz gráfica, la interacción dinámica con mapas y diferentes componentes y la comunicación con el *backend* (implementado en Python) mediante HTTP.

Son muchas las características [94] que hacen de JavaScript el modelo de lenguaje necesario en nuestro proyecto. Entre las principales, podemos encontrar:

- Tipado dinámico y débil: pues las variables en JavaScript no requieren una declaración explícita y pueden cambiar de tipo en tiempo de ejecución (tal y como sucedía con Python).
- Capacidad para manipular la estructura, estilo y contenido de documentos HTML o XML, facilitando la creación de interfaces de usuario dinámicas como la de nuestro modelo.
- Empleo de funcionalidades que permitan la ejecución de peticiones HTTP. En nuestro proyecto, es el caso de la API FETCH que permite en el código enviar una petición POST con los parámetros seleccionados en la interfaz.

---

<sup>20</sup> Para más información sobre la evolución de las versiones de JavaScript, se recomienda consultar: <https://www.luisllamas.es/historia-y-evolucion-de-javascript/> (Accedido por última vez: 10/03/25)

- Asincronía y manejo de eventos: es decir, la capacidad de ejecutar tareas sin bloquear el flujo principal del programa. Para ello, JavaScript es capaz de manejar operaciones asincrónicas de manera eficiente.
- Ecosistema amplio: Cuenta con una vasta colección de bibliotecas y *frameworks*, como `React.js` (implementada en nuestro código y que se analizará a continuación), que agilizan el desarrollo de aplicaciones complejas.
- Manipulación y visualización de elementos geoespaciales. JavaScript permite esta funcionalidad gracias a la combinación de bibliotecas como `Leaflet.js` o `h3-js`, que permiten convertir índices H3 en polígonos renderizables sobre un mapa *OpenStreetMap*.
- Programación reactiva mediante la implementación de `React.js`. Es decir, la actualización automática y eficiente de la interfaz cuando el estado de la aplicación cambia, como veremos en la siguiente sección.

Gracias a todas estas características, JavaScript permite la creación de una SPA (*Single Page Application*) de grandes funcionalidades, donde la interacción ocurre en una única página, sin recargar la web.



Figura 3-2. Logo de JavaScript. Fuente: [95].

### 3.1.4 Librerías `React.js` y `Leaflet.js`

Entre las herramientas utilizadas en el entorno de JavaScript, es necesario analizar el uso de `React` y `Leaflet`.

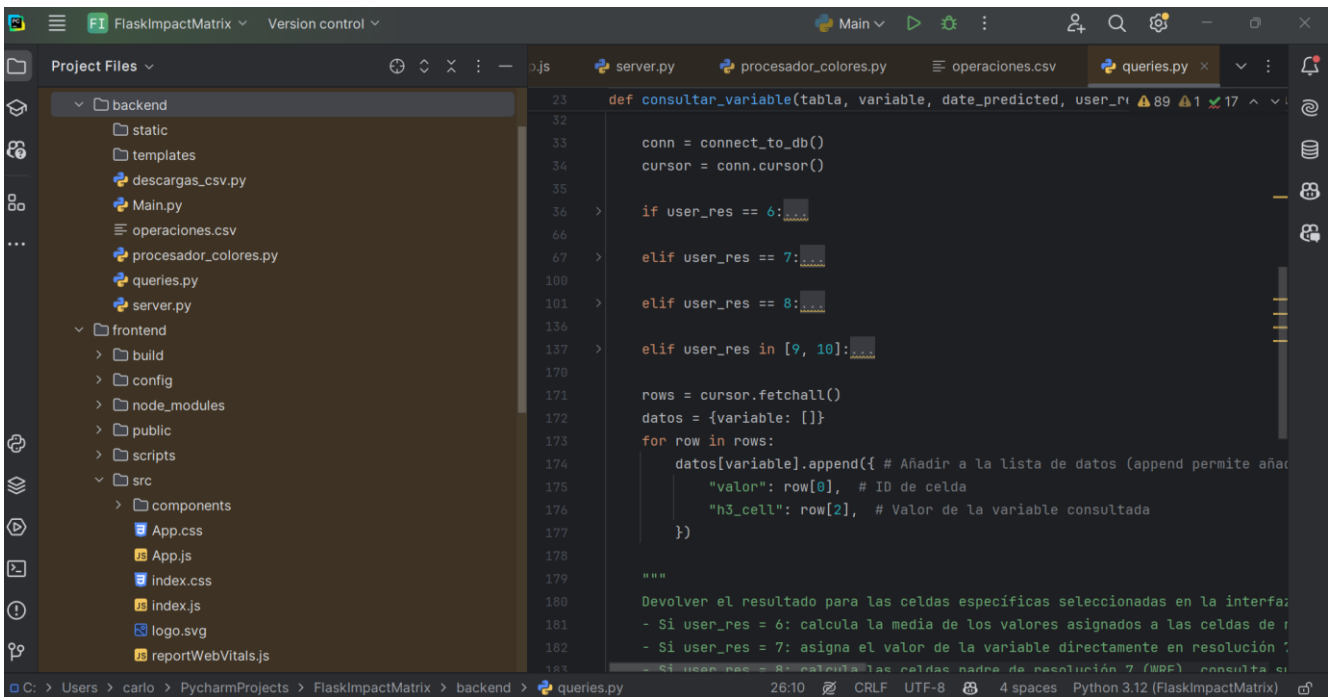
`React.js` es una biblioteca de JavaScript desarrollada por Facebook en 2011. Sin embargo, comenzó a utilizarse en otras plataformas como Instagram en 2012. Finalmente, en 2013, Facebook decidió liberar la herramienta al público convirtiéndola en un servicio de código abierto [96]. Esta herramienta permite la construcción de interfaces de usuario dinámicas y modulares, como la de nuestro modelo. Emplear `React.js` en nuestro sistema ha permitido desarrollar una programación del *frontend* reactiva. Esto significa que el sistema “reacciona” automáticamente a los cambios, actualizando la interfaz de forma automática y eficiente cuando cambia el estado de algunos componentes dentro de la aplicación. Puesto que el sistema debía generar numerosas celdas y renderizarlas cambiando el estado de su color de manera automática, se ha escogido esta herramienta, que ha permitido el cumplimiento de este objetivo de manera muy eficiente.

Por otro lado, `Leaflet.js` es una biblioteca creada en 2011 por el ucraniano Volodymyr Agafonkin [97]. En nuestro modelo se emplea en numerosas funciones para cargar y renderizar el mapa *OpenStreetMap*, dibujar el área de estudio y generar las celdas H3 contenidas en ella, etc.

`React` representa el marco principal de la interfaz, dentro de él se utiliza `Leaflet.js` para desarrollar los cometidos mencionados anteriormente. La combinación de ambos es idónea en el proyecto: `React` permite desarrollar una interfaz modular y fácil de manejar y `Leaflet` ofrece herramientas potentes y de calidad sin depender de otras bibliotecas.

### 3.1.5 IDE PyCharm 2024

Antes de analizar la herramienta en sí, es importante comprender qué es un IDE. Se trata de un sistema software que combina todas las herramientas de desarrollo para hacer la realización de un proyecto o trabajo, sin tener que salir del mismo entorno [98]. Permite la integración de múltiples sistemas y herramientas de programación, centralizando todos los elementos de un proyecto en un entorno único, tal y como se puede observar en la siguiente Figura 3-3:



**Figura 3-3** Interfaz del IDE PyCharm. A la izquierda, todos los elementos integrados en el software del modelo. A la derecha, uno de los *scripts* del código fuente. Fuente: elaboración propia.

PyCharm es un IDE diseñado específicamente para el lenguaje de programación Python (aunque admite otros muchos lenguajes de alto nivel). Fue desarrollado por la empresa checa JetBrains, y su primera versión beta se lanzó en 2011. Desde entonces, ha evolucionado constantemente, incorporando nuevas funcionalidades y mejoras en cada actualización<sup>21</sup>. Además, PyCharm se presenta como un IDE multiplataforma, con capacidad para integrarse de forma coherente en los sistemas operativos macOS, Linux y, como en este caso, Windows [98].

Durante el desarrollo de este proyecto, el entorno de desarrollo PyCharm ha sido una herramienta fundamental, mejorando la productividad, permitiendo un correcto control de errores, facilitando la navegación a través del código e incluso, autocompletando de forma inteligente líneas del código. Entre las muchas de las características de PyCharm, algunas de las experimentadas, durante el desarrollo del software, se encuentran:

- Su capacidad para estructurar el proyecto y organizar el código, integrando, incluso los archivos del entorno de configuración o archivos del proyecto en diferentes formatos. Lo cual, es realmente importante, pues el código fuente del modelo desarrollado es necesariamente modular.

<sup>21</sup> Para consultar la evolución de las versiones de PyCharm, acudir al siguiente enlace: <https://www.jetbrains.com/pycharm/download/other.html> (Accedido por última vez: 28/02/25)

- Su gestión como entorno virtual para poder instalar múltiples dependencias necesarias en el proyecto (*Flask.js*, *psycop2*, *h3-js*, etc.) sin afectar al sistema operativo.
- La inspección de código con el modo *debug*, añadiendo puntos de interrupción en el código para inspeccionar el flujo y acceder a las variables internas que se van generando la ejecución del código.
- Su empleabilidad para el desarrollo web, soportando *frameworks* de desarrollo web como Flask (Sección 473.1.2). Además, acepta otras tecnologías del entorno JavaScript como HTML, CSS, etc. utilizadas en el proyecto.



Figura 3-4 Logo de PyCharm por JetBrains. Fuente: [99].

### 3.1.6 PostgreSQL con extensión PostGIS

Habiendo introducido con anterioridad el sistema de gestión de bases de datos PostgreSQL en la Sección 2.6.4, en este apartado nos centraremos en su funcionalidad y cuáles son las características que han convertido a esta base de datos en la idónea para el desarrollo de este proyecto.

Como ya sabrá el lector, PostgreSQL destaca por ser ligero, gratuito y de código abierto. Gracias a su arquitectura robusta, su fiabilidad y la integridad que ofrece en el manejo de los datos se ha convertido en una opción muy valorada por los usuarios. Además, ha sido posible su integración en el sistema desarrollado al ser compatible con lenguajes de programación como Python. El lenguaje SQL empleado para realizar consultas en la base de datos, se ha podido integrar en el código fuente con facilidad, permitiendo al modelo consultar la base de datos de manera eficaz y con datos MetOcean actualizados.

Es necesario explicar que el modelo de evaluación de riesgos desarrollado está diseñado para conectar con el servidor remoto POSEIDON, donde se integra la base de datos estructurada “Poseidon”. Sin embargo, para el correcto desarrollo del prototipo del sistema creado, se ha instalado en servidor local PostgreSQL. De esta forma, se ha procedido a un volcado de la base de datos del servidor a una nueva base de datos en local con el mismo nombre. Esto ha permitido a lo largo de todo el trabajo una conexión a la base de datos desde el entorno de desarrollo mucho más eficiente. Además, poder realizar consultas en la aplicación de PostgreSQL para, de manera sencilla, identificar errores y realizar diferentes pruebas.

La aplicación utilizada en cuestión es *pgAdmin4*, una aplicación para Windows que incluye todo lo necesario para comenzar de forma rápida y sencilla. Ofrece una interfaz de gran claridad (Figura 3-5) donde poder gestionar la base de datos, consultar todos los elementos de la arquitectura estructurada de la base de datos SQL, realizar consultas, etc.

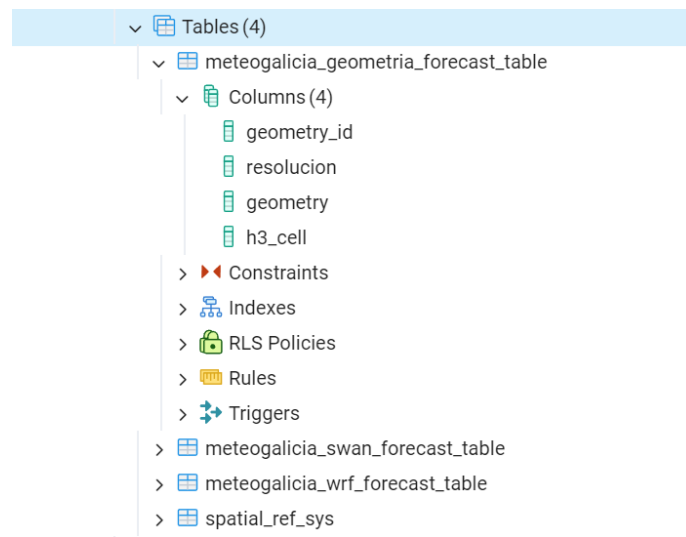


Figura 3-5 Menú lateral de la interfaz de *pgAdmin4*. Fuente:propia.

En este apartado, no se entrará más en detalle en lo relativo a la base de datos “Poseidon”, pues se analiza con mayor profundidad en la Sección 3.2.1. Sin embargo, si es necesario hablar de la extensión a PostgreSQL utilizada en el proyecto.



Figura 3-6 Logo de PostgreSQL. Fuente: [86]

Se trata de la extensión PostGIS. El desarrollo comenzó en el año 2000 por la empresa canadiense Refrations Research, La primera versión pública, PostGIS 0.1, fue lanzada en mayo de 2001, incorporando objetos espaciales, índices y el almacenamiento datos geoespaciales [100]. Esta herramienta, añade a la base de datos PostgreSQL, un soporte, necesario en nuestro sistema para poder manejar la indexación espacial H3, que requiere de un trato más complejo:

En primer lugar, PostGIS permite realizar consultas espaciales como `ST_Contains` o `ST_Centroid` para trabajar con precisión las geometrías de las celdas H3.

En segundo lugar, PostGIS permite adaptarse al carácter jerárquico de H3, esa cualidad por la cual una celda de resolución menor contiene 7 celdas de una resolución mayor integradas en su interior. Esto es posible porque la herramienta es compatible con geometrías hexagonales H3 transformadas a polígonos WKT. Gracias a esto, es posible consultar con precisión, por ejemplo, las celdas H3 contenidas dentro de un polígono (es decir, de una celda de mayor tamaño).

### 3.2 Arquitectura del sistema

El modelo desarrollado tiene como objetivo la evaluación de riesgos operacionales en operaciones navales en función de los datos MetOcean que, en un momento dado, afecten a la operación. Estos datos son obtenidos de diversas fuentes y procesados por un sistema Big Data. La interacción con el GDO requiere de la generación de una interfaz web interactiva que permite la selección de una zona geográfica sobre la que visualizar, mediante un código de colores, los límites operacionales METOC definidos. Para ello, se ha diseñado una arquitectura modular compuesta por dos subsistemas principales:

- El módulo Big Data, desarrollado en el servidor POSEIDON, que integra los códigos de extracción y descarga de datos de diversas fuentes y la base de datos con el mismo nombre que el servidor, donde se vuelcan todos los datos obtenidos. Este módulo ha sido desarrollado progresiva y previamente en otros trabajos como [51] y [53]. El autor de este trabajo únicamente ha hecho uso de una versión en local de este, para hacer funcionar el siguiente módulo antes de conectarlo definitivamente con el servidor POSEIDON.
- El modelo de consulta de impacto operacional METOC (sistema e interfaz del GDO), está dividido en dos submódulos:
  - Módulo *backend*, que desarrolla un servicio Flask, incluye los códigos de consulta al sistema Big Data, los códigos de análisis de datos y evaluación del impacto.
  - Módulo *frontend*, basado en React.js, que incluye los códigos de generación de la interfaz web SPA (*Single Page App*) interactiva que permite realizar consultas al GDO y permite a los usuarios seleccionar la operación a evaluar en un momento y zona geográfica determinada, y consultar su impacto METOC en el entorno geográfico con segmentación espacial de celdas H3.

Esta arquitectura (Figura 3-7) permite la recolección, procesamiento y visualización de datos MetOcean en un entorno distribuido y escalable asegurando una representación visual precisa y eficiente.

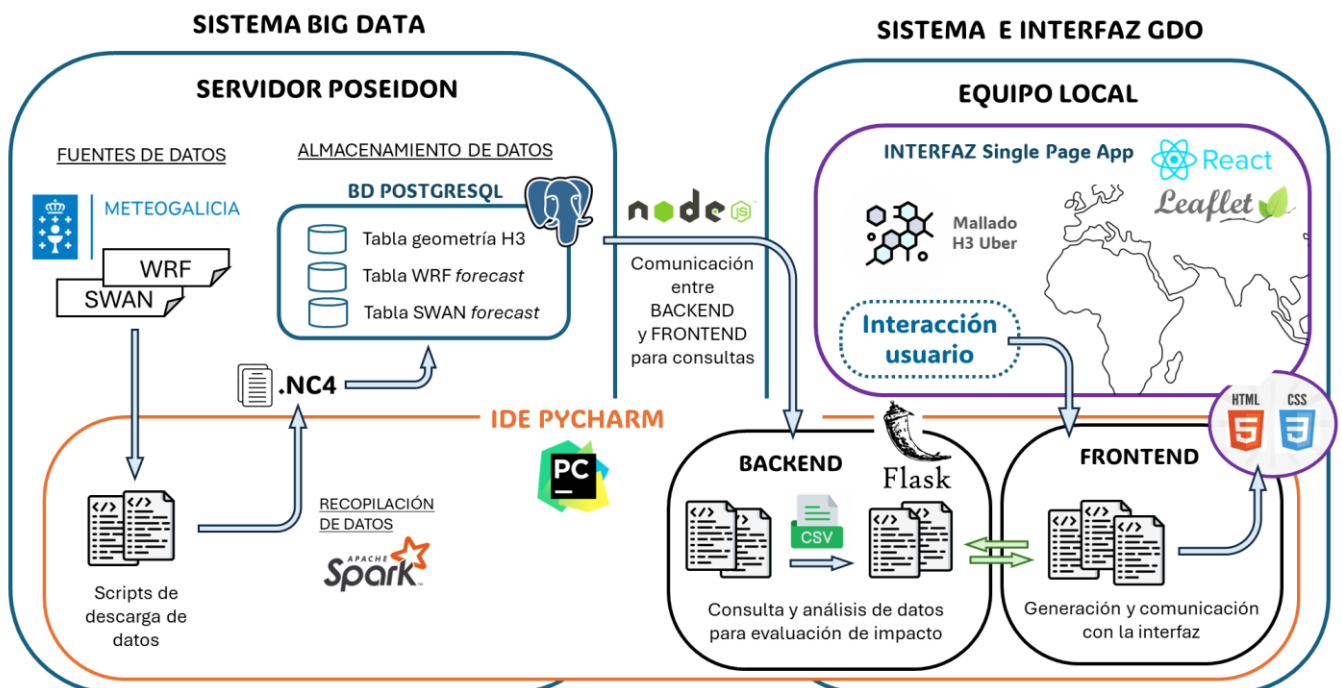


Figura 3-7 Arquitectura modular del modelo de evaluación de riesgos operacionales. Fuente: propia.

### 3.2.1 Sistema Big Data

Como se comentaba anteriormente, el sistema Big Data se encuentra desplegado en un servidor remoto denominado POSEIDON y es responsable de la ingesta, almacenamiento y procesamiento de los datos MetOcean. Se compone de los siguientes elementos:

- **Scripts automatizados para la descarga de datos MetOcean:** En este sentido, *MeteoGalicia* es la fuente principal tomada para hallar los datos generados por los modelos de predicción numérica que integra su sistema. Estos scripts son ejecutados periódicamente, asegurando la actualización constante de los datos. Los datos MetOcean se descargan en doce o veinticuatro horas según el tipo, y se almacenan en archivos .NC o .NC4 permitiendo un eficaz manejo de grandes volúmenes de datos.
- **Procesamiento en tiempo real con Apache Spark:** Empleado para gestionar el flujo continuo de datos. Para ello, se implementa Apache Spark Streaming, permitiendo la ingesta y procesamiento en tiempo real de los datos MetOcean. La descarga de los archivos se realiza en una serie de carpetas en las que Spark Streaming está a la escucha. Cuando los nuevos archivos son detectados, la herramienta inserta los datos MetOcean contenidos en ellos en la base de datos para su almacenamiento.
- **Base de Datos “Poseidon” de PostgreSQL para el almacenamiento de los datos:** Los datos procesados se almacenan en una base de datos PostgreSQL, llamada “Poseidon”. Cabe destacar que para el desarrollo del código fuente, se ha volcado esta base de datos en el servidor local para favorecer el entorno de desarrollo del modelo. Su estructura está diseñada para permitir consultas eficientes y adaptativas en función de la dimensión temporal que se desea consultar y la resolución espacial requerida gracias a la extensión añadida PostGIS que permite el manejo de datos geospaciales como la inclusión de datos de información georreferenciada (latitud y longitud).

Puesto que se trata de una base de datos estructurada, en ella se han definido tablas específicas para cada modelo de predicción meteorológica y oceanográfica, incluyendo MOHID, WRF, WW3 y SWAN (tal y como se puede observar en la Figura 3-8). Como veremos posteriormente, el modelo creado, en la versión actual, solo requiere consultar los modelos de predicción WRF y SWAN para su correcto funcionamiento.

Adicionalmente, se ha implementado una tabla de referencia con identificadores de celdas H3, permitiendo la indexación espacial y la vinculación de los datos con la representación geográfica de la información.

```
Poseidon=# \d
```

List of relations			
Schema	Name	Type	Owner
public	geography_columns	view	postgres
public	geometry_columns	view	postgres
public	meteogalicia_geometria_forecast_table	table	postgres
public	meteogalicia_geometria_forecast_table_geometry_id_seq	sequence	postgres
public	meteogalicia_mohid_forecast_table	table	postgres
public	meteogalicia_mohid_forecast_table_id_seq	sequence	postgres
public	meteogalicia_swan_forecast_table	table	postgres
public	meteogalicia_swan_forecast_table_id_seq	sequence	postgres
public	meteogalicia_wrf_forecast_table	table	postgres
public	meteogalicia_wrf_forecast_table_id_seq	sequence	postgres
public	meteogalicia_ww3_forecast_table	table	postgres
public	meteogalicia_ww3_forecast_table_id_seq	sequence	postgres
public	spatial_ref_sys	table	postgres

(13 rows)

Figura 3-8 Lista de relaciones de la base de datos estructurada POSEIDON. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan las tablas clave que organizan la información según el tipo de modelo de predicción:

**“meteogalicia\_swan\_forecast\_table”:**

Contiene los principales datos de modelado de oleaje SWAN. En la Figura 3-9 se pueden observar sus principales columnas: *id* (identificador único), *lat* y *lon* (coordenadas geográficas), *date\_created* (fecha de creación del modelo forecast), *date\_predicted* (fecha de predicción), variables meteorológicas como dirección del oleaje *dir*, altura significativa del oleaje *hs*, profundidad bajo nivel medio del mar *depth*, periodo pico del oleaje *rtp*, y periodo medio del oleaje *tm01*, además de variables de ubicación, *km* y *geometry\_id* (clave foránea de la tabla *meteogalicia\_geometria\_forecast\_table*).

```
Poseidon=# select * from meteogalicia_swan_forecast_table Limit 10;
id | lat | lon | date_created | date_predicted | dir | hs | depth | rtp | tm01 | km | geometry_id
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
(0 rows)
```

Figura 3-9 Arquitectura de la tabla *meteogalicia\_swan\_forecast\_table*. Fuente: elaboración propia.

**“meteogalicia\_wrf\_forecast\_table”:**

Contiene los principales datos del modelo atmosférico WRF. Como se puede observar en la siguiente Figura 3-10, las principales columnas de la tabla en la que se almacenan los datos del modelo SWAN son: *id*, *lat*, *lon*, *date\_created*, *date\_predicted*, variables meteorológicas como *mod* (el módulo de viento a 10m), *dir* (dirección de viento a 10m), *wind\_gust* (rachas de viento a 10m), *temp* (temperatura a 2m), *prec* (precipitaciones acumuladas en 1h), *rh* (humedad relativa a 2m), *sst* (temperatura de la superficie del mar), *visibility* (visibilidad), “*mslp*” (presión media a nivel del mar), *cfl* (nubosidad en niveles bajos), *cfm* (nubosidad en niveles medios), *cfh* (nubosidad en niveles altos), *cft* (nubosidad total en niveles bajos), y *pbl\_height* (altura de la capa límite planetaria), además de las variables de ubicación *km* y *geometry\_id*.

```
Poseidon=# select * from meteogalicia_wrf_forecast_table Limit 10;
id | lat | lon | date_created | date_predicted | mod | dir | wind_gust | temp | prec | rh | sst | visibility | mslp | cfl | cfm | cfh | cft | pbl_height | km | geometry_id
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
(0 rows)
```

Figura 3-10 Arquitectura de la tabla *meteogalicia\_wrf\_forecast\_table*. Fuente: elaboración propia.

**“meteogalicia\_ww3\_forecast\_table”:**

Contiene los principales datos del modelo de oleaje WW3, con columnas similares a las del modelo SWAN (Figura 3-11): *id*, *lat*, *lon*, *date\_created*, *date\_predicted*, las variables meteorológicas *dirm*, *hs*, *rtp* y *tm01*, y las variables de ubicación *km* y *geometry\_id*.

```
Poseidon=# select * from meteogalicia_ww3_forecast_table Limit 10;
 id | lat | lon | date_created | date_predicted | dirm | hs | rtp | tm01 | km | geometry_id
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
(0 rows)
```

Figura 3-11 Arquitectura de la tabla *meteogalicia\_ww3\_forecast\_table*. Fuente: elaboración propia.

**“meteogalicia\_mohid\_forecast\_table”:**

Almacena información de simulaciones oceánicas desarrollando en sus columnas los elementos *id*, *lat*, *lon*, *date\_created*, *date\_predicted*, variables meteorológicas como el nivel de profundidad *depth*, la salinidad *salt*, los módulos de la corriente en 3 ejes *u*, *v* y *w*, la marea *water\_level*, y las variables de ubicación *km* y *geometry\_id*.

```
Poseidon=# select * from meteogalicia_mohid_forecast_table Limit 10;
 id | lat | lon | date_created | date_predicted | depth | salt | u | v | w | water_level | km | geometry_id
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
(0 rows)
```

Figura 3-12 Arquitectura de la tabla *meteogalicia\_mohid\_forecast\_table*. Fuente: elaboración propia.

**“meteogalicia\_geometria\_forecast\_table”:**

La base de datos integra una tabla adicional *meteogalicia\_geometria\_forecast\_table*, que vincula datos meteorológicos con sus ubicaciones geoespaciales a través del identificador *geometry\_id*. Esto permite una representación eficiente mediante celdas H3.

```
geometry_id | resolucion |
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----
| h3_cell | geometry
```

Figura 3-13 Arquitectura de la tabla *meteogalicia\_geometria\_forecast\_table*. Fuente: elaboración propia.

Las consultas a la base de datos se hacen mediante “*queries*” integrados en los códigos que extraen información de estas tablas basándose en la fecha de predicción y las celdas H3 de interés, como veremos más adelante.

3.2.2 Submódulo “*backend*”

El *backend* está implementado en Python utilizando Flask como *framework* principal. Su función es la de recibir peticiones POST de información desde el *frontend* sobre la operación, fecha, hora y celdas seleccionadas por el usuario en la interfaz del modelo. El flujo de código diseñado para el desarrollo del sistema permite consultar los datos meteorológicos almacenados en la base de datos del servidor POSEIDON mediante consultas SQL parametrizadas (*queries*). Tras la consulta a la base de datos, el *backend* se encarga de procesarlos y asignar un código de color a cada celda representada en la interfaz según los criterios operacionales predefinidos, y que veremos más adelante.

Las principales funciones que maneja el *backend* se encuentran repartidas en diversos scripts integrados en el IDE Pycharm, Son las siguientes:

### - **Función principal del servidor Flask (`Main.py`)**

Es el archivo principal del *backend* y define un servicio Flask que recibe peticiones del *frontend*, coordina el procesamiento de datos y devuelve la información solicitada por el usuario en la interfaz. Los datos devueltos están conformados por la asociación de un color a cada celda H3 seleccionada en la interfaz. Esto determina el impacto METOC sobre la operación naval en cuestión en las diferentes regiones del espacio. Para ello:

- `Main.py` recibe una petición *POST* con los datos de la operación, fecha y celdas seleccionadas en la interfaz.
- Obtiene los parámetros de la operación seleccionada llamando a la función `descargas_csv.py`.
- Ejecuta consultas a la base por cada variable meteorológica a analizar usando `queries.py`.
- Evalúa los resultados y asigna un color por celda consultada según los umbrales definidos en `procesador_colores.py`. Lo hace estableciendo una jerarquía de colores en función del riesgo, siendo rojo igual a condiciones desfavorables, amarillo igual a condiciones marginales y verde igual a condiciones favorables.
- Devuelve el resultado al *frontend* para su representación en la interfaz.

Se puede concluir que `Main.py` controla el flujo de la información del *backend* llamando necesariamente a las demás funciones, gestionando y tratando la información para construir el resultado solicitado por el usuario.

### - **Función de lectura y extracción de datos del archivo “operaciones.csv” (`descargas_csv.py`)**

Este módulo es responsable de leer el archivo con formato `.csv` que contiene los parámetros operacionales y criterios de impacto para diferentes tipos de misiones navales, el cual será definido al estudiar su implementación más adelante.

La función `obtener_parametros_operacion` extrae los valores de referencia de la operación seleccionada y los devuelve en forma de diccionario. En `descargas_csv.py` se realiza la conversión de algunos datos del `.csv` a valores numéricos y se implementan funciones para el control de errores para asegurar la consistencia de los datos.

### - **Función de consultas a la base de datos del servidor POSEIDON (`queries.py`)**

Este módulo establece la conexión con la base de datos Poseidon, integrada en servidor remoto con el mismo nombre, y ejecuta consultas aprovechando las capacidades de la extensión PostGIS de PostgreSQL para tratar datos georreferenciados y poder hacer uso del carácter jerárquico del mallado H3 Uber. De esta manera es posible consultar datos MetOcean extraídos de diferentes modelos de predicción numérica (WRF y SWAN) y que, por sus características, están referenciados a una resolución de celda determinada (resolución 8 para SWAN y 7 para WRF). Aprovechando la extensión PostGIS es posible consultar estos datos a pesar de la resolución seleccionada por el usuario.

Al consultar la función `consultar_variable` y entrar con las variables definidas `tabla`, `variable`, `date_predicted`, `user_res` y `h3cells`, son devueltos los valores meteorológicos de las celdas seleccionadas. En “`queries.py`” se han implementado consultas adaptativas según la resolución (de 6 a 10) y la tabla de las variables a consultar para optimizar la precisión de los datos.

- **Función de procesamiento de colores según impacto METOC (procesador\_colores.py)**

Este módulo asigna el color correspondiente a cada celda según los valores meteorológicos obtenidos en la base de datos. Al llamar a `obtener_color` y entrar con las variables `operación`, `variable` y `valor`, son comparados los valores obtenidos con los umbrales definidos en el archivo “operaciones.csv” y asigna un color acorde también definido en ese mismo archivo .csv. Los colores asignados reflejan una jerarquía de colores, y tratada posteriormente en `Main.py`, donde el rojo representa las condiciones más adversas y el verde las óptimas.

### 3.2.3 Submódulo “frontend”

El *frontend* está desarrollado en JavaScript utilizando `React.js`, lo que permite crear una página web dinámica con una sola página, es decir, una SPA (*Single Page Application*). En ella, se renderizan los diversos componentes que conforman la interfaz. Esto permite presentar al usuario una interfaz en la que poder interactuar con el modelo seleccionando un área geográfica de estudio, mediante `Leaflet.js`, y sus respectivas celdas del mallado H3 de Uber (implementado a través de librerías). Además, el *frontend* permite al usuario la selección de la resolución de las celdas, la operación, la fecha de predicción y la hora de predicción. Para ello, se desarrollan múltiples componentes dinámicos y funcionales que utilizan `useState` de `React.js` para manejar estados locales, es decir para que el estado de los diferentes componentes que conforman la interfaz pueda ser almacenado y gestionado permitiendo variaciones dinámicas (como la activación o desactivación de un botón, el reinicio del dibujo en el mapa...).

La interfaz creada (Figura 3-14) se compone de dos áreas visibles principales:

- Un mapa interactivo (*Map*) desarrollado en `Leaflet.js`, donde se dibujan áreas de análisis que incluyen múltiples celdas H3 incluidas en dicha región.
- Un menú lateral (*Sidebar*) para la selección de los parámetros de consulta.



Figura 3-14 Interfaz del modelo de evaluación METOC de riesgos operacionales desarrollada en el *frontend*.  
Fuente: elaboración propia.

Para llevar a cabo la ejecución de la aplicación web se han desarrollado los siguientes componentes:

- **Componente principal de la SPA (App.js)**

Es el archivo principal del *frontend* e integra los componentes *Map* y *Sidebar*. De esta forma, se sigue un diseño modular que permite la integración eficiente de datos, su procesamiento y visualización web. En *App.js* se definen los estados: *canDrawRectangle* para controlar cuándo se puede dibujar en el mapa, *resolution* como el nivel de resolución H3 escogido, *hexagons* como lista de las celdas H3 generadas, *rectangle* como los límites del área seleccionada, *visibleHexagons* para mostrar progresivamente las celdas H3 generadas y *cellColors* para la asignación final de colores a cada celda según el impacto METOC.

- **Componente del mapa basado en Leaflet.js (Map.js)**

Este módulo permite dibujar el rectángulo sobre el mapa, abriéndolo de esquina a esquina, gracias a *Leaflet.js*. Además, con la definición del estado *h3-js*, convierte la selección en celdas H3 de diferentes resoluciones que son enviadas al *backend*. Tras efectuarse la respuesta con los datos consultados, recibe y representa el resultado de la evaluación con un código de colores dependiendo del riesgo operacional. Finalmente, las celdas se visualizan como polígonos coloreados cuyo color está basado en la actualización del estado *cellColors*, proporcionado desde el *backend*.

- **Componente del menú lateral interactivo (Sidebar.js)**

Este componente integra una barra lateral a modo menú que permite la selección de los diferentes parámetros de análisis que definen la consulta. En este módulo se formula la petición al *backend*, incluyendo las celdas seleccionadas en *Map.js*.

Por otro lado, la interfaz integra 3 botones principales: “Activar dibujo” para permitir al usuario la selección de una zona geográfica, “Reset” para reiniciar todos los estados y “Consultar impacto” para enviar la petición al *backend* pasando los parámetros seleccionados en el menú y las celdas H3 generadas. Al recibir la respuesta el color de cada celda se actualiza de forma automática.

- **Componentes complementarios de diseño de la interfaz y lanzamiento de la SPA.**

El *frontend* incluye diferentes archivos de definición de estilos y presentación. Entre otros, se encuentran *App.css* que define estilos generales como el título principal, el color de fondo, etc. o *Sidebar.css* que da formato al menú lateral manteniéndolo fijo, estableciendo el estilo de letra, etc.

Por otro lado, el *frontend* incluye scripts que lanzan el servidor local para abrir el navegador automáticamente, permitiendo la visualización de la interfaz y la recarga de la aplicación web en tiempo real cuando se modifica el código.

### 3.3 Metodología e implementación del sistema

En este apartado, se desarrolla el flujo del código empleado, desde el inicio del sistema hasta la visualización final de los resultados. Para mayor comprensión del lector, se introducen partes del código fuente desarrollado. Se puede consultar el código completo en el Anexo I. Para obtener una idea visual del flujo y comprender mejor las funciones y componentes mencionados en el análisis de la arquitectura efectuado previamente, se introduce el siguiente esquema gráfico (Figura 3-15).

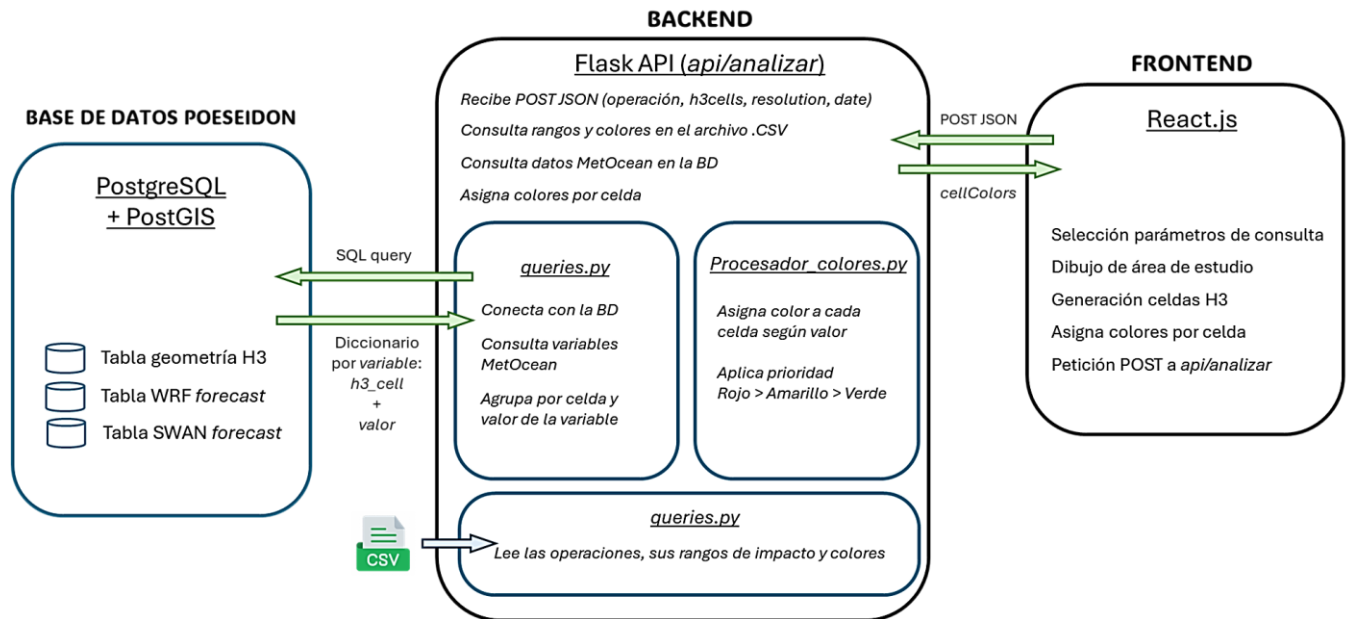


Figura 3-15 Diagrama de flujo del sistema de consulta y análisis de datos. Fuente: propia.

### 3.3.1 Inicio y configuración del frontend y backend

El frontend y el backend siguen una estructura cliente – servidor.

Por un lado, el frontend, se encuentra desarrollado en React.js, implementado a través de bibliotecas de JavaScript para construir interfaces web interactivas. Las bibliotecas empleadas son las siguientes (Tabla 3-1):

```
import React from 'react';
import ReactDOM from 'react-dom';
import {MapContainer, TileLayer, Polygon, FeatureGroup } from 'react-leaflet';
import {EditControl } from 'react-leaflet-draw';
import Select from 'react-select';
import DatePicker from 'react-datepicker';
import "react-datepicker/dist/react-datepicker.css";
```

Tabla 3-1 Bibliotecas empleadas en el módulo frontend.

Estas bibliotecas son la base de la aplicación React implementada, permitiéndonos, por orden de aparición en las líneas de código anteriores: renderizar la aplicación dentro del HTML, mostrar mapas interactivos con Leaflet.js, renderizar el mapa y las celdas H3 seleccionadas, añadir herramientas de dibujo que nos permitan seleccionar un área, incluir componentes “Select” para seleccionar algunas opciones en el menú lateral y seleccionar fechas en el menú lateral.

El punto de entrada para el cliente es App.js. Esta función carga Map.js para renderizar el mapa Leaflet con capacidad de dibujo, y Sidebar.js para poder seleccionar diferentes opciones para llevar a cabo la evaluación de riesgo.

La aplicación, actualmente, se ejecuta desde el entorno de desarrollo mediante `npm start` en el puerto 3000, lanzando en el navegador un HTML (*HyperText Markup Language*, o Lenguaje de Marcado de Hipertexto). HTML es el lenguaje que estructura el contenido de una aplicación web para su visualización en el navegador. Define los elementos visuales, su jerarquía y organización en la página. En el caso de la aplicación desarrollada con React.js, la interfaz se genera de forma dinámica mediante JavaScript y se “inyecta” dentro de un archivo HTML base.

Por otro lado, el *backend* que está programado en Python usando Flask, permite implementar una API REST (interfaz que permite la comunicación entre sistemas utilizando peticiones POST de HTTP) de forma rápida y estructurada. El archivo principal `Main.py` realiza la configuración inicial a través de las siguientes librerías (Tabla 3-2):

```
from flask import Flask, request, jsonify
from flask_cors import CORSct-datepicker.css";
```

**Tabla 3-2 Librerías empleadas en el archivo principal del *backend*. Fuente: elaboración propia.**

Para iniciar la aplicación del *backend*, se configura CORS (*Cross-Origin Resource Sharing*), que permite que cualquier cliente, como el *frontend*, acceda a la API sin restricciones. CORS se implementó para solucionar problemas de compatibilidad en el sistema.

El *endpoint* o punto de entrada a las funciones del *backend*, es la URL del servidor Flask a la que se hace la solicitud de envío y recepción de información. React, llama a Flask como se muestra en la siguiente Tabla 3-3:

```
fetch("http://localhost:5000/api/analizar", {
  method: "POST"
```

**Tabla 3-3 Petición HTTP tipo POST realizada desde el *frontend* (React) hacia el *backend* (Flask). Fuente: elaboración propia.**

Y en Flask, se ha creado un *endpoint* (`/api/analizar`) que ejecuta dicha función cuando es llamado desde el *frontend*. El *endpoint* se define en el código como se muestra en la siguiente Tabla 3-4:

```
@app.route('/api/analizar', methods=['POST'])
def analizar():
```

**Tabla 3-4 *Endpoint* en Flask, que responde a peticiones POST realizadas al *backend*. Fuente: elaboración propia.**

### 3.3.2 Interacción con la interfaz y envío de parámetros desde el *frontend* al *backend*

Como se comentaba en el apartado anterior, desde el componente *Sidebar*, el usuario puede seleccionar los siguientes parámetros:

- Fecha (guardada en la variable `startDate`), en el desplegable “Fecha de inicio” del menú lateral (Figura 3-16).

### Selecciona fecha (UTC)

Fecha de inicio:

Selección

Hora de inicio:

Selección

Selección

Selección



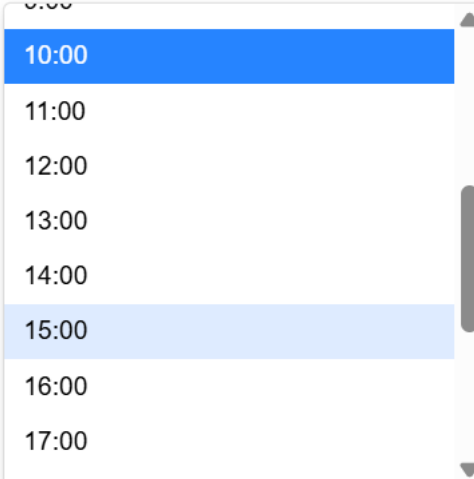
March 2025						
Su	Mo	Tu	We	Th	Fr	Sa
23	24	25	26	27	28	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5

Figura 3-16 Menú desplegable para la selección de fecha de predicción. Fuente: elaboración propia.

- Hora (guardada en la variable `selectedOptionH`), en el desplegable “Hora de inicio” del menú lateral (Figura 3-17).

### Seleccione hora UTC

Hora de inicio:



- 10:00
- 11:00
- 12:00
- 13:00
- 14:00
- 15:00
- 16:00
- 17:00

Figura 3-17 Menú desplegable para la selección de hora de predicción. Fuente: elaboración propia.

- Tipo de operación (guardado en la variable `selectedOptionO`). Se pueden seleccionar hasta 27 operaciones en su desplegable del menú lateral (Figura 3-18).

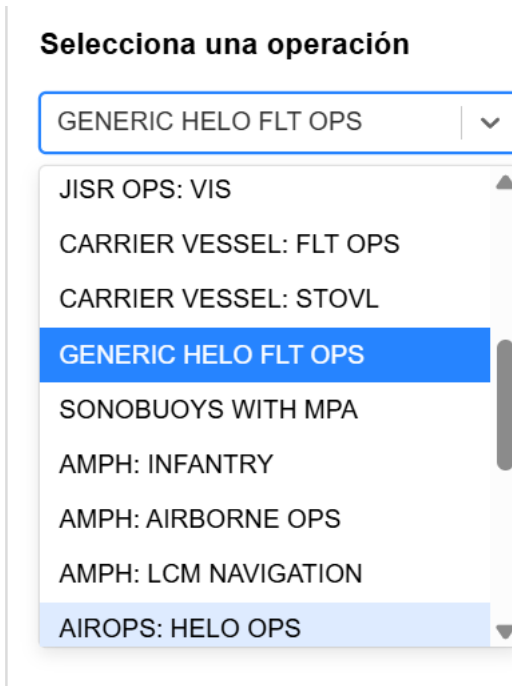


Figura 3-18 Menú desplegable para la selección de operación. Fuente: elaboración propia.

- Resolución de celdas H3 (guardado en la variable `selectedResolution`), en su desplegable del menú lateral (Figura 3-19).

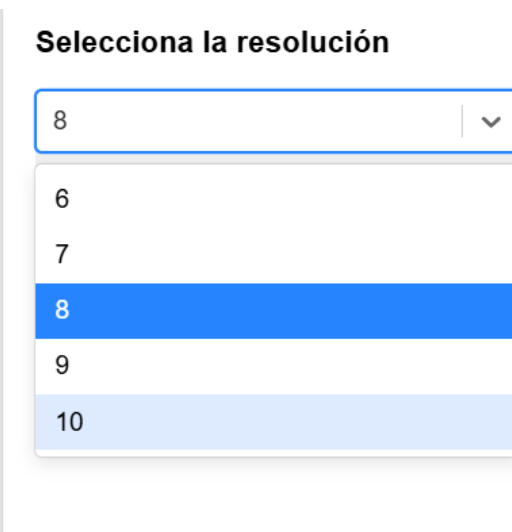


Figura 3-19 Menú desplegable para la selección de resolución de las celdas H3. Fuente: elaboración propia.

Tras seleccionar estos campos, el sistema permite dibujar un rectángulo sobre el mapa. Una vez dibujado, se generan todas las celdas H3 que cubren completamente el polígono dibujado. Para esta generación de las celdas se emplea la función `generateH3Cells` de `h3-js` (que convierte el polígono a GeoJSON, formato utilizado por `Leaflet.js`). Como se puede ver en la Tabla 3-5, la función requiere de `polygon`, un array de coordenadas (`lat, lon`) que forma un área cerrada, y `resolution`, el nivel de resolución seleccionado.

```
const generateH3Cells = (bounds, resolution) => {
  const [[southwestLat, southWestLng], [northEastLat, northEastLng]] = [
    [bounds.getSouthWest().lat, bounds.getSouthWest().lng],
    [bounds.getNorthEast().lat, bounds.getNorthEast().lng],
```

```
];  
  
const polygon = [  
  [southWestLat, southWestLng],  
  [northEastLat, southWestLng],  
  [northEastLat, northEastLng],  
  [southWestLat, northEastLng],  
];  
  
return polygonToCells(polygon, resolution);  
};
```

Tabla 3-5 Función para generación de celdas H3 dentro de un rectángulo dibujado en el mapa. Fuente: elaboración propia.

La función devuelve un listado de celdas con identificadores H3 (como, por ejemplo: "873920c01ffffff", "873920c02ffffff", "873920c03ffffff"...) que se guardan en `hexagons` y `visibleHexagons`. Por un lado, `hexagons` será el listado que enviemos al *backend* junto con el resto de la petición POST. Por otro lado, `visibleHexagons` (en el return de `Map.js`) recorrerá las celdas generadas, comprobará que no hay respuesta del *backend*, asignará un color gris a las celdas por defecto y las pintará empleando `Polygon` de `react-leaflet` (ver la Figura 3-20). En la última Sección 3.3.7, se explicará detalladamente cómo es el renderizado de las celdas hexagonales. En este punto, el flujo del *frontend* se mantendrá a la espera de recibir una respuesta del *backend* que modifique el color de las celdas para actualizar dicho color de forma automática.

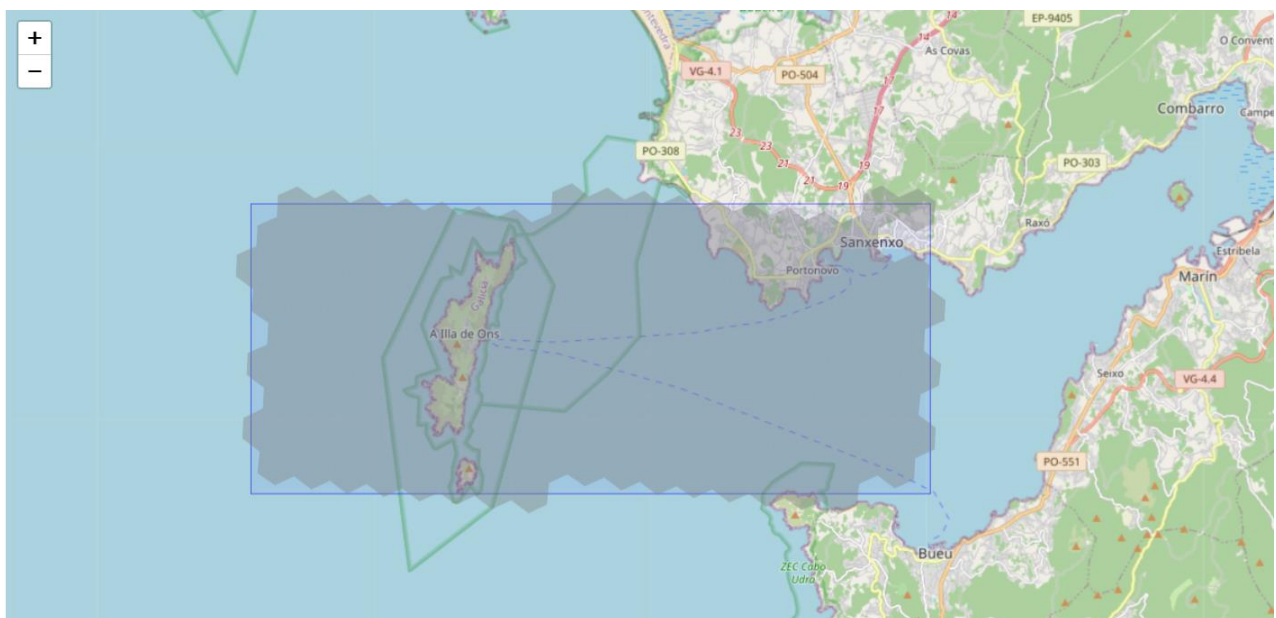


Figura 3-20 Interfaz. Dibujo de las celdas que cubren todo el polígono seleccionado. Su color es gris por defecto hasta recibir la respuesta del *backend*. Fuente: elaboración propia.

De esta forma, el *frontend*, recogiendo los datos de `startDate`, `selectedOptionH`, `selectedOptionO`, `selectedResolution` y `hexagons`, y efectuando las modificaciones necesarias (como la unión de la fecha y hora para formar `date_predicted`, y su conversión a la zona

horaria con la que trabaja la base de datos “Poseidon”), emite una petición POST al *backend* con el siguiente cuerpo JSON<sup>22</sup>. A modo de ejemplo se presenta la siguiente Tabla 3-6:

```
{
  "operacion": "GENERIC HELO FLT OPS",
  "date_predicted": "2025-03-15 11:00:00",
  "resolucion": 8,
  "h3cells": ["873920c01ffffff", "873920c02ffffff", "873920c03ffffff" ...]
}
```

**Tabla 3-6 Ejemplo de petición POST del *frontend* en formato JSON. Fuente: elaboración propia.**

### 3.3.3 Definición de límites de impacto operacional y umbrales de parámetros METOC.

Antes de continuar con el flujo del código, es necesario, en esta sección, definir los diferentes umbrales de impacto asociados a las condiciones ambientales y a diferentes parámetros meteorológicos y oceanográficos. Estos umbrales de impacto vienen determinados para cada operación en base a unos valores “límite”. Esta información se integra en el sistema y en el código fuente por medio de un archivo “operaciones.csv”. Este archivo con extensión .csv procede de un archivo .xlsx fácilmente modificable (característica necesaria, como se explicará más adelante), y está integrado con el resto de los archivos necesarios para la ejecución del sistema en el servidor.

En la generación de productos de evaluación de riesgos (como matrices de impacto) se codifican los diferentes umbrales de impacto con colores, de manera semejante a la de un semáforo. Cada color, representa un umbral de parámetros que definen el riesgo asociado al desarrollo de una operación en determinadas condiciones ambientales (ver Tabla 3-7). De esta forma, los responsables de la toma de decisiones son capaces de relacionar las condiciones ambientales con los umbrales de misión, sistema y plataforma, con el fin de garantizar la máxima seguridad de la operación.

Los límites y umbrales definidos a continuación han sido extraídos de la publicación “*ACO DIRECTIVE 080-034 Meteorological and oceanographic services for allied command operations*” del 20 de marzo de 2024 [14]. Estos han sido empleados por su carácter genérico y estándar, y su aplicabilidad en operaciones conjuntas entre los aliados de la OTAN.

La publicación es aplicable a todas las unidades de las ACO (*Allied Command Operations*). Sin embargo, hay que tener en cuenta que el personal de apoyo METOC de JFC (*Joint Force Commanders METOC*) deberán coordinar los criterios de impacto con todos los grupos METOC en el teatro de operaciones para obtener un conjunto acordado de umbrales de impacto. Actualmente, el desarrollo del proyecto permite la modificación de del archivo .xlsx, exportable al archivo .csv en el que se encuentran almacenados los límites operacionales y rangos de impacto meteorológico. Su modificación, permitiría adaptar el modelo a la operación en cuestión.

En el modelo de evaluación de riesgos desarrollado, los umbrales de parámetros asociados a condiciones ambientales seguirán estos criterios y colores correspondientes:

Color	Condición ambiental	Criterio de Impacto
<b>VERDE</b>	Favorable	Impacto nulo o insignificante, sin restricciones basadas en condiciones METOC

<sup>22</sup> JSON (*JavaScript Object Notation*) es un formato de texto para representar datos estructuradas como listas u objetos. En este proyecto, es usado, entre otras cosas, para enviar datos entre *frontend* (React) y *backend* (Flask)

<b>AMARILLO</b>	Marginal	Las condiciones METOC degradan o limitan las operaciones
<b>ROJO</b>	Desfavorable	Impacto severo con degradación significativa de las operaciones; las condiciones METOC restringen las operaciones

**Tabla 3-7 Criterios de evaluación de riesgo METOC codificados a color. Fuente: [14]**

En el sistema desarrollado, se han integrado hasta 27 operaciones en diferentes ámbitos, fundamentales y vinculantes para su evaluación. Por cada operación, se detallan a continuación, en la Tabla 3-8, los rangos de impacto y valores límites de aquellos parámetros asociados a condiciones ambientales que puedan afectarlas. Dichos rangos, han sido comparados con algunos de los límites marcados en diferentes operaciones de la Armada y con los repartidos en las diferentes unidades de la flota, base para múltiples navegaciones. En la tabla, quedan en rojo, las variables “*CEIL*” (techo de nubes) y “*CURR*” (corriente en nudos), cuyo estudio es necesario para llevar a cabo una evaluación del riesgo completa. Sin embargo, el modelo desarrollado, actualmente, no integra ningún modelo de predicción numérica que desarrolle estas variables.

Tipo de Operación	Parámetro <sup>23</sup>	Favorable	Marginal	Desfavorable
<b>Operaciones de vuelo con aeronaves</b>				
<b>FLT OPS CARRIER</b> Operaciones de vuelo en portaaviones	SS	< 2,5m	2,5 – 4m	> 4m
	W	< 25kts (12,86m/s)	25 – 35kts	> 35kts (18m/s)
	V	> 3500m	1000 – 3500m	< 1000m
	<b>CEIL</b>	<b>&gt; 1500ft</b>	<b>200 – 1500ft</b>	<b>&lt; 200ft</b>
<b>CVS STOVL</b> Operaciones en portaaviones con aeronaves de despegue corto y aterrizaje vertical	SS	< 2,5m	2,5 – 6m	> 6m
	W	< 25kts (12,86m/s)	25 – 35kts	> 35kts (18m/s)
	V	> 5000m	1000 – 5000m	< 1000m

<sup>23</sup> Leyenda: SS (estado de la mar), W (viento), V (visibilidad), HT (alta temperatura), LT (baja temperatura), CEIL (techo de nubes), C (nubosidad compuesta), P (precipitaciones), GUST (rachas de viento), H (humedad), CURR (corriente), T (periodo oleaje).

	HT	< 30°C	30 – 35°C	> 35°C
	CEIL	> 1500ft	200 – 1500ft	< 200ft
<b>HELO FLT OPS</b> Operaciones con helicópteros en escoltas	SS	< 2,5m	2,5 – 4m	> 4m
	W	< 20kts (12,86m/s)	20 – 30kts	> 30kts (15,43m/s)
	V	> 4000m	2000 – 4000m	< 2000m
	CEIL	> 3000ft	500 – 3000ft	< 500ft
<b>MPA/ASW (SONOBUOYS)</b> Empleo de sonoboyas por aeronave de patrulla marítima en guerra antisubmarina	W	< 25kts (12,86m/s)	25 – 35kts	> 35kts (18m/s)
	SS	< 2,5m	2,5 – 4m	> 4m
<b>Operaciones aéreas</b>				
<b>HELO OPS</b> Operaciones en la mar de carácter general con helicóptero	W	< 25kts (12,86m/s)	25 – 40kts	> 40kts (20,58m/s)
	V	> 1600m	800 – 1600m	< 800m
	CEIL	> 500ft	300 – 500ft	< 300ft
<b>LOW RECCE OPS</b> Operaciones de reconocimiento a baja altura	CEIL	> 4000ft	2000- 4000ft	< 2000ft
	V	> 1000m	500 – 1000m	< 500m
<b>HIGH RECCE OPS</b> Operaciones de reconocimiento a gran altura	CEIL	> 4000ft	2000- 4000ft	< 2000ft
	V	> 6000m	3500 – 6000m	< 3500m
	C	< 4/8 (50%)	= 4/8 (50%)	> 4/8 (50%)
<b>APCLO / APCMO</b>	CEIL	> 2000ft	1000 – 2000ft	< 1000ft

Operación de contribución de poder aéreo a las operaciones terrestres / marítimas	V	> 8000m	3000 – 8000m	< 3000m
<b>Operaciones anfibias</b>				
<b>INFANTRY</b> Incurción en playa de infantería a pie	P	< 2,5mm en 1h	2,5 – 12,5mm en 1h	>12,5mm en 1h
	HT	< 30°C	30 – 35°C	> 35°C
	LT	> -6°C	-6 – -26°C	< -26°C
<b>AIRBORNE OPS</b> Operaciones de aerotransporte	V	> 3000m	2000 – 3000m	< 2000m
	<b>CEIL</b>	> 2000ft	1500 – 2000ft	< 1500ft
	GUST	< 10kts (5,14m/s)	10 – 13kts	> 13kts (6,69m/s)
<b>LCM NAVIGATION</b> Navegación de embarcaciones de desembarco anfibio	SS	< 1,25m	1,25 – 2,5m	> 2,5m
	W	< 25kts (12,86m/s)	25 – 35kts	> 35kts (18m/s)
	V	> 1852m	1852 – 926m	< 926m
<b>Operaciones JOINT ISR – Operaciones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento conjuntas</b>				
<b>EO/IR</b> Operaciones JISR con empleo de sensores electroópticos e infrarrojos	P	< 2,5mm en 1h	2,5 – 12,5mm en 1h	>12,5mm en 1h
	V	> 4000m	600 – 4000m	< 600m
	H	< 80%	80 – 90%	> 90%
<b>VIS</b> Operaciones JISR con empleo de sensores de espectro visible	C	< 4/8 (50%)	= 4/8 (50%)	> 4/8 (50%)
	V	> 6000m	3500 – 6000m	< 3500m
<b>Operaciones marítimas</b>				

<b>ASUW</b> <i>Anti-Surface Warfare</i> o Guerra antisuperficie	SS	< 1,25m	1,25 – 2,5m	> 2,5m
	P	< 2,5mm en 1h	2,5 – 12,5mm en 1h	>12,5mm en 1h
<b>ASW</b> <i>Anti-Submarine Warfare</i> o Guerra antisubmarina	SS	< 1,25m	1,25 – 4m	> 4m
<b>AAW</b> <i>Anti Air Warfare</i> o Guerra Antiaérea	SS	< 2,5m	2,5 – 6m	> 6m
	P	< 2,5mm en 1h	2,5 – 12,5mm en 1h	>12,5mm en 1h
<b>FPB</b> Operaciones con embarcaciones de patrullaje rápidas	SS	< 2,5m	2,5 – 4m	> 4m
	W	< 25kts (12,86m/s)	25 – 40kts	> 40kts (20,58m/s)
<b>SMALL BOATS</b> Operaciones con embarcaciones menores, semirrígidas, botes...	SS	< 0,5m	0,5 – 2,5m	> 2,5m
	W	< 10kts (5,14m/s)	10 – 20kts	> 20kts (10,28m/s)
<b>FIAC (ASYW)</b> Operaciones con embarcaciones costeras de ataque rápido propias de guerra asimétrica	W	< 10kts (5,14m/s)	10 – 21kts	> 21kts (10,80m/s)
	SS	< 0,5m	0,5 – 1,25m	> 1,25m
<b>MIO/BOARDING</b> Operaciones de interdicción marítima y abordaje	SS	< 1,25m	1,25 – 2,5m	> 2,5m
	W	< 15kts (7,72m/s)	15 – 25kts	> 25kts (12,86m/s)
	V	> 4000m	2000 – 4000m	< 2000m
<b>RAS/FAS</b> Operaciones de reabastecimiento en la mar	SS	< 2,5m	2,5 – 4m	> 4m
	W	< 20kts (10,29m/s)	20 – 30kts	>30kts (15,43m/s)

Operaciones hidrográficas				
<b>HOIST/LOW (BOATS)</b> Izado/Arriado botes hidrográficos	SS	< 1m	1 – 1,5m	> 1,5m
	W	< 5,14m/s	5,14 – 7,72m/s	> 7,72m/s
	T	< 10s	> 10s	-
<b>BATHYMETRY (BOATS)</b> Trabajos batimétricos con botes hidrográficos	SS	< 1m	1 – 1,5m	> 1,5m
	W	< 5,14m/s	5,14 – 7,72m/s	> 7,72m/s
	T	> 10s	< 10s	-
<b>BATHYMETRY (BBHH)</b> Trabajos batimétricos con BBHH (Malaspina)	SS	< 1,5m	1,5 – 2m	> 2m
	T	< 12,86m/s	12,86 – 18m/s	> 18m/s
	W	> 10s	< 10s	-
Operaciones MCM				
<b>HUNTING OPS</b> Operaciones de caza de minas	SS	< 1,25m	1,25 – 2,5m	>2,5m
	<b>CURR</b>	< 0,75 kts	0,75 – 2 kts	2 kts
	W	< 7,72 m/s	7,72 – 14,9 m/s	> 14,9m/s
<b>MIW EOD DIVERS</b> Operaciones de desactivación de explosivos con buceadores	SS	< 0,5m	0,5-1,25m	>1,25m
	<b>CURR</b>	< 1 kts	1 – 1,5 kts	>1,5 kts
	W	< 7,72 m/s	7,72 – 10,8 m/s	> 10,8m/s

ROV OPS				
Operaciones de guerra de minas con vehículos operados por control remoto	SS	< 0,5m	0,5 – 1,25m	> 1,25m

Tabla 3-8 Límites operacionales METOC para evaluación de riesgo. Fuente: [14]

Entre otras consideraciones se han llevado a cabo modificaciones a los anteriores datos para adecuar la utilización de la tabla en el sistema Big Data ya desarrollado. Por ejemplo, se han modificado las unidades habituales (por su utilización en el ámbito militar) de algunos parámetros para adaptarlas a las utilizadas por los modelos de predicción numérica (SWAN y WRF) empleados por MeteoGalicia para la generación de datos de predicción que se encuentran integrados en la base de datos de POSEIDON.

- Visibilidad (V): de millas náuticas (mn) a metros (m)
- Viento (W) y rachas de viento (W(G)): de nudos (kts) a metros por segundo (m/s)
- Nubosidad (C): de “octas” (X/8) a porcentaje de nubosidad (%)
- Precipitaciones (P): de los términos “light”, “moderate” o “heavy” a unidades numéricas expresadas en milímetros por hora (mm/h).

### 3.3.4 Extracción de parámetros operacionales del archivo “operaciones.csv”

Como se expone la sección anterior, todos los parámetros relativos a la evaluación de riesgo para cada una de las operaciones integradas en el sistema se definen en el archivo “operaciones.csv”, consultable en la Sección A3.3.5. En él, las columnas se distribuyen de la siguiente forma (ver ejemplo en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

- operación naval en concreto (ej. ASUW, RAS/FAS, MIO BOARDING...)
- variable meteorológica (ej. *prec*, *mod*, *gust*, etc.)
- nombre de la tabla en de la base de datos en la que se encuentra la variable
- rango de valores límite por nivel riesgo (umbral inferior *val1*, umbral superior *val2*)
- color asociado al nivel de impacto en función del rango de valores (Rojo, Amarillo, Verde).

```
operacion;tabla;variable;val1_1;val2_1;color
ASUW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
ASUW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;2,5;Amarillo
ASUW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;100;Rojo
ASUW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;0;2,5;Verde
ASUW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;2,5;17,5;Amarillo
ASUW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;17,5;100;Rojo
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;4;Amarillo
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
AAW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;2,5;Verde
AAW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;6;Amarillo
AAW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;6;100;Rojo
```

Tabla 3-9 Definición de columnas y primeras filas del archivo “operaciones.csv”. Fuente: elaboración propia.

La información del archivo se integra en el código fuente mediante el script `descargas_csv.py` que integra la función `obtener_parametros_operacion`. Como se puede ver en la Tabla 3-10, la función abre el archivo, filtra las filas donde aparece la operación solicitada (enviada en la petición POST), y extrae: las variables, el nombre de la tabla (de la base de datos) correspondiente a la variable, los rangos definidos para dicha operación y nivel de impacto, y el nivel de impacto en forma de color:

```
def obtener_parametros_operacion(operacion):
```

```

parametros = []
with open(csv_path, newline='', encoding="utf-8") as csvfile:
    reader = csv.reader(csvfile, delimiter=';')
    for row in reader:
        if row[0] == operacion:
            parametros.append({
                "tabla": row[1],
                "variable": row[2],
                "val1": float(row[3].replace(",", "", ".")),
                "val2": float(row[4].replace(",", "", ".")),
                "color": row[5]
            })
    
```

**Tabla 3-10** Función empleada para leer el archivo “operaciones.csv” y convertir sus columnas en una lista de parámetros. Fuente: elaboración propia.

El resultado es el diccionario `parametros` que, gracias al código anterior, guarda para la operación seleccionada, tres filas con el listado de parámetros leídos. Una fila para cada color (nivel de impacto).

### 3.3.5 Recepción de petición POST y posterior de datos MetOcean en la base de datos.

Retomando el flujo del código, cuando el *frontend* realiza la petición POST al *endpoint* `/api/analizar` (como se ha explicado en la Sección 3.3.1), el archivo `Main.py` recibe los datos mediante la función `request.get_json`, que convierte el contenido JSON enviado por el cliente en un diccionario de Python. Una vez recibido el JSON, el flujo del *backend* sigue una serie de pasos hasta enviar el resultado de la evaluación de riesgos por cada celda seleccionada al *frontend*.

En primer lugar, mediante el script `descargas_csv.py`, entrando con la variable `operación`, se obtienen los límites operacionales y las variables meteorológicas asociadas a la operación, tal y como se ha explicado en la Sección anterior.

En segundo lugar, se llevan a cabo las consultas a la base de datos para obtener el valor de cada variable por cada celda solicitada. Esto se hace a través del *script* `queries.py` tiene varias funcionalidades que permiten el desarrollo de las consultas a la base de datos. Los datos de la base de datos Poseidon, se van actualizando de manera automática para ofrecer resultados de predicción a tiempo real. A efectos técnicos, el *script* `queries.py` está dividido en varios submódulos independientes para llevar a cabo las diferentes funcionalidades del *script*. Por orden de flujo, son los siguientes:

- **Conexión a la base de datos PostgreSQL:**

Se integran en el código las credenciales de acceso a la base de datos Poseidon de PostgreSQL, como se puede ver en Tabla 3-11, para permitir el acceso por parte del usuario, en este caso, a la base de datos establecida en local. (Se omite la contraseña).

```

import psycopg2
def connect_to_db():
    return psycopg2.connect( dbname="Poseidon", user="postgres",
password="_____", host="localhost", port="5432")
    
```

**Tabla 3-11** Función de conexión a la base de datos Poseidon. Fuente: elaboración propia.

### - Procesamiento de geometrías y celdas H3:

Se usan las librerías `h3` y `shapely` de Python para convertir las celdas generadas en el *frontend*, contenidas en el listado `h3cells`, en un polígono con formato WKT para poder realizar consultas como explicaremos posteriormente. Véase en el código de la Tabla 3-12, la necesidad de intercambiar latitud y longitud para hacer compatibles los formatos en los que se encuentran los puntos geográficos de los vértices de las celdas y los de `Polygon` en formato WKT (*Well-Known Text*):

```
import h3
from shapely.geometry import Polygon
from shapely.ops import unary_union
from shapely.wkt import dumps

def h3_to_wkt(h3cells):
    polygons = [Polygon([(lon, lat) for lat, lon in
h3.cell_to_boundary(cell)]) for cell in h3cells]
    unified_polygon = unary_union(polygons)
    return dumps(unified_polygon)
```

**Tabla 3-12 Librerías y función para convier una lista de celdas H3 en un polígono WKT. Fuente: elaboración propia.**

Es importante comprender, que, para efectuar las consultas a la base de datos, en ocasiones, entraremos con un listado de celdas contenido en `h3cells` (celdas generadas en la interfaz que tienen la resolución seleccionada), en otras ocasiones entraremos con el polígono WKT creado a partir de estas celdas, y en otras ocasiones, con las celdas “padre” de las celdas seleccionadas obtenidas a partir de la función de la Tabla 3-13 (por ejemplo, para obtener celdas “padre” de resolución 7 a partir de sus celdas “hijas” de resolución 8 contenidas en `h3cells`):

```
parent_cells = {h3.cell_to_parent(cell, 7) for cell in h3cells}
```

**Tabla 3-13 Función que obtiene la celda "padre" de resolución 7 de las celdas de `h3cells`. Fuente: elaboración propia.**

### - Consultas SQL a la base de datos Poseidon:

Se realizan empleando los parámetros recibidos desde `Main.py` (`date_predicted`, `variable`, `tabla`, y `h3cells` o `polygon_wkt`). Primero, se inspecciona la resolución seleccionada (de 6 a 10) y la fuente de datos (SWAN o WRF). Como se ha explicado anteriormente, cada fuente de datos tiene una tabla asignada en la base de datos y en función de la variable meteorológica consultada (dependiendo de la operación seleccionada) se consulta la tabla que contenga dicha variable (*meteogalicia\_wrf\_forecast\_table* o *meteogalicia\_swan\_forecast\_table*). Dependiendo de la combinación de la tabla a consultar y la resolución seleccionada se formula una consulta u otra, pues las variables de SWAN están definidas para celdas H3 de resolución 8, y las variables de WRF están definidas para celdas de resolución 7. Para ver en detalle todas las consultas SQL acudir a la Sección A3.3.4. En total, el código integra hasta ocho consultas diferentes empleando la siguiente lógica:

- Si `user_res` (resolución seleccionada por el usuario) es igual a seis (6), se consulta por polígono WKT tanto la tabla de WRF (con celdas en resolución 7), como la tabla de SWAN (con celdas en resolución 8).

- Si `user_res` es igual a siete (7), y se consulta la tabla de WRF, se realiza una consulta directa con las celdas de `h3cells` (de resolución igual a `user_res`). Pero, si se consulta la tabla de SWAN, se realiza una consulta de las celdas contenidas en el polígono `polygon_wkt`.
- Si `user_res` es igual a ocho (8), y se consulta la tabla de SWAN, se realiza una consulta directa con las celdas de `h3cells`. Pero, si se consulta la tabla de WRF, se realiza una consulta a partir de las celdas “padre”, de resolución igual a `user_res`, obtenidas a partir de las celdas de `h3cells`.
- Si `user_res` es igual a nueve o diez (9 o 10), se consulta a partir de las celdas “padre”, de resolución igual a `user_res`, obtenidas a partir de las celdas de `h3cells`, tanto la tabla de WRF, como la tabla de SWAN.

A continuación, en la Tabla 3-14, se presenta un ejemplo de una consulta SQL, solicitando directamente las celdas de `h3cells`. En este caso, `user_res` es igual a 8 y se consulta la tabla `meteogalicia_swan_forecast_table` para un `date_predicted` determinado. Además, en este caso, se pueden visualizar los límites aplicados al valor de la variable (entre 0 y 15) para filtrar aquellas celdas en tierra que, por defecto del modelo de predicción SWAN, nos dan valores de variable oceánicas como “`hs`” (altura de la ola) o “`tm01`” (periodo de la ola) exageradamente grandes y que ofrecen resultados incoherentes. Los límites aplicados son el valor mínimo y máximo que ofrece la descarga de datos desde MeteoGalicia para sendas variables:

```

query = f"""
SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
"{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
FROM "{tabla}"
JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
ON "{tabla}".geometry_id =
"meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell = ANY(%s)
AND "{tabla}".date_predicted = %s
AND "{tabla}"."{variable}" >= 0 AND "{tabla}"."{variable}" <= 15
GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
"""
cursor.execute(query, (list(h3cells), date_predicted))

```

**Tabla 3-14 Consulta SQL para una resolución seleccionada de celda 8. Fuente: elaboración propia.**

Como siguiente ejemplo, se presenta en la Tabla 3-15, una consulta que solicita aquellas celdas contenidas en el polígono de formato WKT generado a partir de las celdas de `h3cells`. Este ejemplo, permite visualizar aquellas funciones que trabajan con geometrías en PostGIS, “ST\_” (*Spacial Type*). En esta *query*, para evitar errores de asignación de celdas no contenidas en el polígono en cuestión, se especifica la búsqueda de las celdas cuyos centroides (`ST_Centroid`) se encuentren contenidos completamente (`ST_Contains`) en el polígono convertido de texto WKT a una geometría entendida por PostGIS con el Sistema de Referencia Espacial 4326 de WGS 84 (`ST_GeomFromText(%s, 4326)`).

```

polygon_wkt = h3_to_wkt(h3cells)

```

```

if "meteogalicia_wrf_forecast_table" in tabla:
    query = f"""
        SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
            "{tabla}".geometry_id,
            "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
        FROM "{tabla}"
        JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
        ON "{tabla}".geometry_id =
            "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
        WHERE ST_Contains(ST_GeomFromText(%s, 4326),
            ST_Centroid("meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry)
        )
        AND "{tabla}".date_predicted = %s
        GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
            "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
    """
    cursor.execute(query, (polygon_wkt, date_predicted))

```

**Tabla 3-15 Consulta SQL para una resolución seleccionada de celda 6. Fuente: elaboración propia.**

Por último, se presenta, en la Tabla 3-16, una consulta SQL que solicita aquellas celdas “padres” que contienen a las celdas de h3cells de menor resolución.

```

elif user_res in [9, 10]:
    if "meteogalicia_wrf_forecast_table" in tabla:
        parent_cells = {h3.cell_to_parent(cell, 7) for cell in
h3cells}

        query = f"""
            SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
                "{tabla}".geometry_id,
                "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
            FROM "{tabla}"
            JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
            ON "{tabla}".geometry_id =
                "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
            WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell =
                ANY(%s)
            AND "{tabla}".date_predicted = %s
            GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
                "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
        """
        cursor.execute(query, (list(parent_cells), date_predicted))

```

**Tabla 3-16 Consulta SQL para una resolución seleccionada de celda 9. Fuente: elaboración propia.**

#### - **Postprocesado de los resultados para determinar valor final:**

Con el objetivo de hallar un valor final por cada de h3cells generada en la interfaz, se lleva a cabo un proceso de adaptación de los resultados a las celdas originales con la resolución seleccionada por el usuario. Para ello, se sigue propone una lógica que permita, según se requiera, la agrupación de valores, el cálculo del valor promedio o la reasignación según la resolución solicitada. La lógica implementada es la siguiente:

- Si `user_res` igual a seis (6), se calcula el promedio de los valores asignados a cada celda de resolución 8 (si es una variable SWAN) o 7 (si es una variable WRF) y se reasigna dicho promedio a las celdas “padre” de resolución seis (6) que las contienen.
- Si `user_res` es igual a siete (7), y la variable consultada pertenece a la tabla de WRF, se reasigna el valor obtenido por cada celda, asegurando que el resultado final contenga las celdas generadas en la interfaz. Pero si, la variable consultada es de la tabla SWAN, se calcula el promedio de los valores, como en el caso anterior, y se asigna a las celdas “padre” de resolución 7 contenidas en `h3cells`.
- Si `user_res` es igual a ocho (8), y se consulta la tabla de SWAN, se reasigna el valor obtenido por cada celda, asegurando que el resultado final contenga las celdas generadas en la interfaz. Pero si, la tabla contenida es WRF, se toman las celdas de resolución siete (7) consultadas y se expande su valor asociado a las celdas “hijas” de resolución ocho (8) contenidas en `h3cells`.
- Si `user_res` es igual a nueve o diez (9 o 10), se toman las celdas de resolución siete (7) u ocho (8) consultadas en las dos tablas y se expande su valor asociado a las celdas “hijas” de resolución ocho (9) o diez (10) contenidas en `h3cells`.

Para ver las diferentes formas de postproceso tras la consulta SQL, ver la Sección A3.3.4. A continuación, en la Tabla 3-17, podemos ver un ejemplo con `user_res` igual a ocho (8). En él, se puede observar, como la función intermedia `valores_por_celda`, asegura que las celdas finales del diccionario `datos` con los resultados finales sean las misma que las consultadas en la interfaz (`h3cells`). También se puede ver el uso de `get_resolution` para obtener la resolución de las celdas consultadas en la base de datos con el objetivo de aplicar la lógica explicada anteriormente.

```

if user_res == 8:
    valores_por_celda = {cell: [] for cell in h3cells}
    for row in datos[variable]:
        h3_original = row["h3_cell"]
        valor = row["valor"]
        if h3.get_resolution(h3_original) == 8:
            if h3_original in valores_por_celda:
                valores_por_celda[h3_original].append(valor)
            else:
                child_cells = h3.cell_to_children(h3_original, 8)
                for child in child_cells:
                    if child in valores_por_celda:
                        valores_por_celda[child].append(valor)

    datos[variable] = []
    for cell, valores in valores_por_celda.items():
        if valores:
            datos[variable].append({
                "valor": round(np.mean(valores), 4),
                "h3_cell": cell
            })
        else:

```

```

datos[variable].append({
    "valor": None,
    "h3_cell": cell
})

```

**Tabla 3-17 Función para hallar las celdas de `h3cells` de resolución 8 tras consultar por el valor de sus celdas “padre”. Fuente: elaboración propia.**

Como se puede observar, el resultado de la función es un diccionario que, por cada variable meteorológica relevante en la operación seleccionada, lista todas las celdas H3 generadas en la interfaz y un valor definitivo para cada una de ellas. Este diccionario adquiere el nombre de “*datos*”.

### 3.3.6 Evaluación de riesgo y procesamiento de colores

Tras generar el diccionario “*datos*” por cada variable relativa a la operación seleccionada, el flujo continúa en `Main.py`. En este momento, cada valor meteorológico obtenido por cada celda H3 se compara con los umbrales definidos en el archivo “`operaciones.csv`”. Esto se realiza en el *script* `procesador_colores.py` mediante la función `obtener_color(operacion, variable, valor)`, que podemos observar en la Tabla 3-18. Esta función requiere de las variables leídas en el archivo `.csv`, `operacion` y `variable`, y a las que se suma `valor` obtenida de las consultas a la base de datos. Revisa para cada variable del diccionario `datos`, el valor obtenido, y lo compara con `val1` y `val2` leídos en el archivo `.csv`.

```

def obtener_color(operacion, variable, valor):
    parametros = descargas_csv.obtener_parametros_operacion(operacion)
    if not parametros:
        return "Sin color"

    for parametro in parametros:
        if parametro["variable"] == variable:
            if valor is not None and parametro["val1"] <= valor <
parametro["val2"]:
                return parametro["color"]

```

**Tabla 3-18 Función que determina el color según el valor consultado y un rango de valores de comparación. Fuente: elaboración propia.**

Recordemos que, por cada operación, el archivo contenía 3 líneas (Tabla 3-19). Una para “Verde”, otra para “Amarillo” y otra para “Rojo” de la siguiente manera:

```

ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;4;Amarillo
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo

```

**Tabla 3-19 Ejemplo de líneas del archivo “`operaciones.csv`”. Fuente: elaboración propia.**

Como se puede ver en la función de la Tabla 3-18, se toma el color de la fila en cuestión si el valor se encuentra entre los dos límites (`val1` y `val2`). Sin embargo, si el valor es igual a uno de los límites, tomará el color de aquella fila con el impacto (`color`) más restrictivo.

Por ejemplo, tomando las tres filas anteriores, si “*hs*” (altura de la ola) tuviese un valor de 4m, al recorrer los parámetros de la segunda línea, el color “Amarillo” quedaría descartado porque 4m no es mayor o igual que 1,25m ni menor a 4m. Sin embargo, al recorrer los parámetros de la tercera fila, 4m sería igual o menor a 4m (`val1`), por lo que el color devuelto en la función sería “Rojo”. De esta forma,

perseguiamos uno de los principios de la gestión de riesgos, el de ponerse en la peor situación siendo precavidos en la evaluación.

Una vez obtenido el color, se genera en `Main.py` el siguiente diccionario (Tabla 3-20), que almacena, por cada celda consultada, la variable, el valor de la variable, y el color asignado tras la evaluación del riesgo:

```
resultados_por_celda[h3_cell].append({  
    "variable": variable,  
    "valor": valor,  
    "color": color  
})
```

**Tabla 3-20** Diccionario de asignaciones de color, valor y variable a cada celda H3. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, para cada celda pueden quedar asignados múltiples colores (uno por cada variable evaluada que puede suponer un impacto en la operación). Por ello, se establece en `Main.py` una función de priorización de colores para tomar el color más restrictivo (el de mayor impacto) y que, finalmente, cada celda se envíe al *frontend* con un solo color asignado. Para ello, primero se define el criterio de prioridad tal y como se muestra en la siguiente Tabla 3-21:

```
prioridad_colores = {"Rojo": 3, "Amarillo": 2, "Verde": 1}
```

**Tabla 3-21** Asignación de prioridad para cada color. Fuente: elaboración propia

Después, se ejecuta la función `color_final_por_celda` (Tabla 3-22), que recorre todos los ítems del diccionario `resultados_por_celda` tomando un solo color a través de la función `color_final` (toma aquel color que tenga asignado el mayor *lambda* en el criterio de prioridad) y almacenándolo en `color_final_por_celda`:

```
color_final_por_celda = {}  
final_por_celda = {}  
for h3_cell, detalles in resultados_por_celda.items():  
    color_final = max(detalles, key=lambda d: prioridad_colores.get(d["color"], 0))  
    color_final_por_celda[h3_cell] = color_final["color"]  
    final_por_celda[h3_cell] = {  
        "variable": color_final["variable"],  
        "color": color_final["color"]  
    }
```

**Tabla 3-22** Función para la selección del color de mayor impacto por cada celda H3. Fuente: propia.

El resultado es el diccionario `final_por_celda` que asigna a cada celda seleccionada, la variable más restrictiva y el nivel de impacto (color) con el siguiente formato (Tabla 3-23):

```
{ "873920c08ffffff": { "variable": "mod", "color": "Rojo" },  
  "873920c09ffffff": { "variable": "mod", "color": "Rojo" },  
  "873920c10ffffff": { "variable": "mod", "color": "Amarillo" },  
  ... }
```

**Tabla 3-23** Estructura de resultados finales de variable y color por celda H3. Fuente: elaboración propia.

### 3.3.7 Envío de resultados al módulo frontend y visualización final en la interfaz.

El diccionario final de resultados se devuelve desde `Main.py` al *frontend* con: `return jsonify(final_por_celda)`

Esto, permite a `Sidebar.js` (que, recordemos, es desde donde se envía la petición) recibir todas las celdas con su color asignado tras la evaluación del impacto de las condiciones ambientales relevantes para la operación seleccionada. En este punto, se actualiza el estado de las celdas mediante la función `setCellColors({...data})`, dentro del bloque de la petición, donde `data` representa el objeto JSON resultante con las celdas H3 y sus colores finales asociados (Tabla 3-24):

```
.then(data => {
  console.log("Respuesta del backend:", data);
  setCellColors({...data});
})
```

**Tabla 3-24** Recepción y asignación de colores de *frontend* (React). Fuente: elaboración propia.

Esto, supone una actualización del estado `cellColors`, como adelantábamos en la Sección 3.2.2, relativa a la arquitectura del *backend*, provoca una nueva renderización automática de todos los componentes que dependen de `cellColors`. El flujo para pintar las celdas de nuevo con los colores asignados es el siguiente:

- **Iteración sobre las celdas:** se recorren todos los elementos del objeto `cellColors`, para tomar aquellos identificadores H3 de las celdas contenidas en el rectángulo dibujado.
- **Conversión de celdas H3 a coordenadas:** se usa la función `h3ToGeoBoundary` de la librería `h3-js` para convertir cada celda en una lista de coordenadas geográficas (latitud y longitud) que delimitan su forma hexagonal.
- **Dibujo de hexágonos en el mapa Leaflet:** cada conjunto de coordenadas se transforma en un polígono con mediante “`<Polygon />`” de la biblioteca `react-leaflet`, utilizando el color correspondiente. El color se encuentra definido dinámicamente con siguiente asignación (Tabla 3-25):

```
color = colorMap[cellColors[h3Index].color] || "gray";
```

**Tabla 3-25** Asignación del color según el nivel de riesgo o de “gris” por defecto. Fuente: elaboración propia.

Tras la respuesta, los colores asignados a las celdas vienen dado por la función `colorMap` que asigna a cada palabra “Verde”, “Amarillo” y “Rojo” un código de color hexadecimal:

```
const colorMap = {
  "Rojo": "#FF0000", "Amarillo": "#FFFF00", "Verde": "#008000"
};
```

**Tabla 3-26** Función de creación de colores hexadecimales para codificación del impacto. Fuente: elaboración propia.

- **Renderizado progresivo:** para evitar la percepción de “congelamiento” de la interfaz mientras se cargan las celdas, estas se van mostrando de forma progresiva utilizando un pequeño retardo (`setTimeout`) en `visibleHexagons` que controla las celdas están visibles en cada momento.

De esta forma, el renderizado final de las celdas en el mapa Leaflet se lleva a cabo a través del siguiente código contenido en el return de Map.js (Tabla 3-27):

```
{visibleHexagons.map((h3Index, idx) => {
  let color = "gray";

  if (cellColors && cellColors[h3Index] && cellColors[h3Index].color) {
    color = colorMap[cellColors[h3Index].color] || "gray";
  }
  console.log(`Celda: ~${h3Index}, Color asignado: ${color}`);
  return (
    <Polygon
      key={` ${h3Index}-${idx}-${color}`}
      positions=(cellToBoundary(h3Index).map(([lat, lng]) => [lat, lng]))
      fillColor={color}
      fillOpacity={0.4}
      stroke={false}
      weight={0}
    />
  );
})}
```

**Tabla 3-27** Renderizado en el mapa de celdas H3 con sus colores definitivos. Fuente: elaboración propia.

## 4 VALIDACIÓN DE RESULTADOS

En el siguiente apartado, se muestran los resultados obtenidos, se ofrece una interpretación de estos y se lleva a cabo una serie de simulaciones del modelo en un entorno operativo para comprobar su correcto funcionamiento y evaluar su posible desempeño en campaña como elemento de asistencia METOC para asesorar al mando en la toma de decisiones.

Por otro lado, el sistema de evaluación de riesgos desarrollado será comparado con la herramienta oficial de SIAAMETOC, demostrando su aplicabilidad en escenarios reales y su valor como herramienta de apoyo METOC.

### 4.1 Visualización de resultados y simulaciones

Como se ha ido explicando a medida que se analizaba el flujo del código en la Sección, el resultado tras lanzar la aplicación React es la generación de una interfaz web, a modo SPA que se abre en el navegador. El código, se irá ejecutando a medida que el usuario interactúe con la interfaz. En primer lugar, se selecciona una fecha, una hora UTC, la operación que se desea evaluar y la resolución con la que se quiere hacer la evaluación. Evidentemente, la resolución escogida dependerá del área de análisis, siendo necesaria una mayor resolución para áreas de menor tamaño. Si el área es lo suficientemente extensa, el usuario debe coger una resolución menor para consultar el impacto sobre dicha zona.

Posteriormente, el usuario selecciona el área de evaluación trazando un rectángulo en el mapa. En este momento, comienzan a generarse de forma asíncrona celdas hexagonales dentro del rectángulo con el tamaño (resolución) escogido (ver Figura 4-1). Mientras las celdas van representándose en el mapa, el usuario puede pulsar en cualquier momento “Consultar impacto”.



Figura 4-1 Momento de representación de celdas en la interfaz de forma asíncrona previo a haberse generado todas las contenidas en el polígono. Fuente: elaboración propia.

Como ya sabrá el lector, esto provoca la ejecución del código del *backend*, que tiene como resultado la actualización del color de las celdas según el análisis efectuado. El resultado es el coloreado de las celdas del área seleccionada en el mapa, de tal forma que la región quede codificada por colores donde cada color representa un nivel de riesgo METOC calculado en base a la información meteorológica y los límites definidos para la operación. Tal y como se puede observar en la Figura 4-2, donde los resultados, son los esperados.



Figura 4-2 Actualización final del color de las celdas según la evaluación de riesgo efectuada por el sistema. Fuente: elaboración propia.

Esta visualización geoespacial permite una interpretación rápida e intuitiva del riesgo operacional en una zona determinada, lo que convierte al sistema en una herramienta idónea para el apoyo a la toma de decisiones del mando.

A continuación, para el desarrollo de esta Sección, se han llevado a cabo numerosas simulaciones con el objetivo de poner a prueba la eficacia del modelo desarrollado, validar su comportamiento en distintos escenarios simulados y analizar las posibles limitaciones operativas del sistema. Las simulaciones no se han planteado únicamente como una herramienta de verificación del funcionamiento del modelo, sino también como un medio para estudiar situaciones que podrían darse en un entorno naval real. De esta forma, se pretende que el lector alcance a comprender la operatividad del sistema desarrollado.

#### *4.1.1 Simulaciones e interpretación de resultados en un entorno operativo*

Las siguientes simulaciones, pretenden reflejar un entorno operativo que permita observar el rendimiento del sistema para evaluar el riesgo en ciertas operaciones y acciones tácticas, así como su posible influencia en la toma de decisiones del mando. A continuación, se recogen dos de dichas simulaciones efectuadas. De interés, tanto por la naturaleza de los resultados obtenidos como por la capacidad de estos para reflejar y explicar aspectos del funcionamiento del código.

- **Simulación 1. Escenario de ASUW (guerra antisubmarina).**

- Fecha seleccionada: 18 de febrero de 2025
- Hora UTC seleccionada: 0500Z
- Escenario: se ha informado a la fuerza de la presencia de un posible submarino en el canal principal entre las islas Ons y las islas Cíes. La misión es detectar, clasificar, localizar y, si es necesario, realizar un seguimiento al submarino. Los planes de acción propuestos para la exploración del área son el despliegue de un patrón en línea de sonoboyas por parte de un MPA (*Maritime Patrol Aircraft*) cubriendo el eje Norte – Sur entre las Ons y Sálvora, y el despliegue de un SH-60B que se aproximará con perfil bajo de altura y realizará varios vuelos estacionarios para usar el sonar calable.
- Operaciones seleccionadas por el usuario: “SONOBUOYS WITH MPA” y “GENERIC HELO FLT OPS”
- Área seleccionada por el usuario: se dibuja un rectángulo que cubre la entrada Norte de la Ría de Vigo, la entrada Sur de la ría de Pontevedra, el Sur de las islas Ons y el Norte de las islas Cíes.
- Resultados obtenidos: Figura 4-3 y Figura 4-4.



Figura 4-3 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones aéreas de un helicóptero a las 0500UTC del día 18 de febrero de 2025. Fuente: elaboración propia.

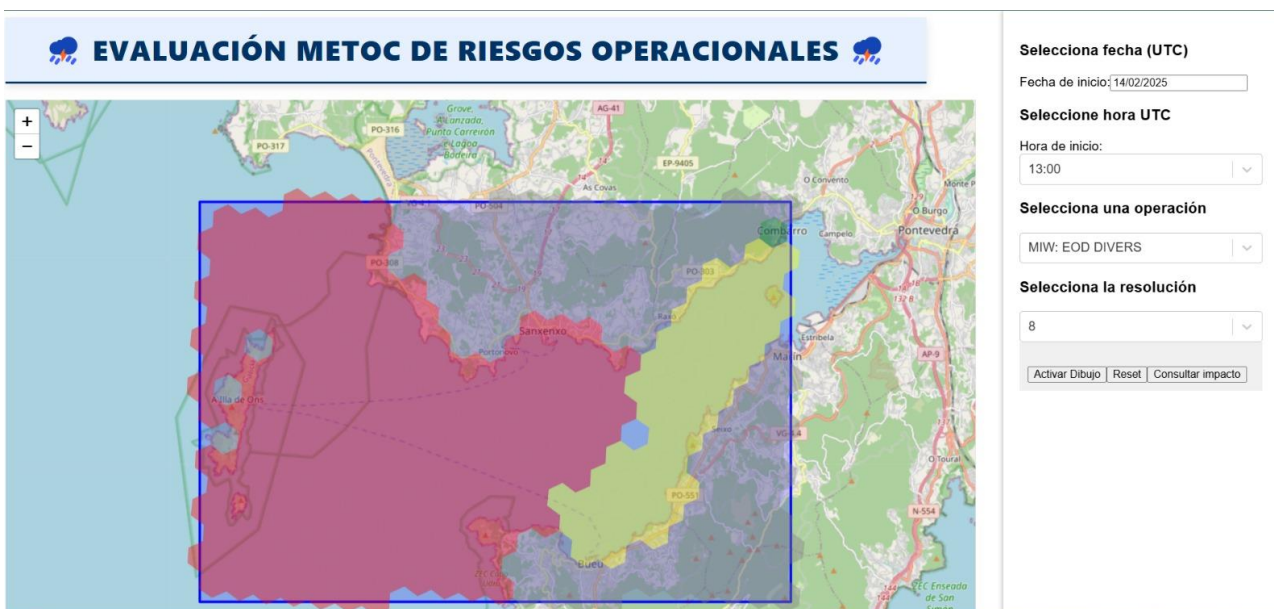


Figura 4-4 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de despliegue de sonoboyas por un MPA a las 0500UTC del día 18 de febrero de 2025. Fuente: elaboración propia.

- **Discusión:** basándonos en los resultados de las simulaciones. Podemos observar que las condiciones son marginales para las operaciones del helicóptero debido a las condiciones METOC, y favorables para el empleo de sonoboyas mediante un MPA. El mando al cual corresponda tomar una decisión, viendo estos resultados tan sintetizados, podría valorar que la decisión táctica más coherente sería, por ejemplo, priorizar el uso del MPA como plataforma principal de detección y localización del submarino mediante sonoboyas, aprovechando las condiciones favorables de la operación. El helicóptero, debido a las condiciones marginales obtenidas, podría mantenerse en alerta en alerta, para operar en caso de necesidad.

- **Simulación 2. Escenario de MCM.**

- Fecha seleccionada: 14 de febrero de 2025
- Hora UTC seleccionada: 1300Z
- Escenario: durante una inspección batimétrica en la Ría de Pontevedra, se han detectado varios objetos metálicos parcialmente enterrados en el lecho marino compatibles con artefactos explosivos sumergidos. La misión es localizar, identificar y, si es posible, desactivar o neutralizar los artefactos explosivos submarinos detectados en la ría de Pontevedra, garantizando la seguridad de las infraestructuras críticas, del personal y de la navegación. Para ello, se cuenta con una unidad de buceadores EOD de la Armada.
- Operaciones seleccionadas por el usuario: MIW: EOD DIVERS
- Área seleccionada por el usuario: se dibuja un rectángulo que cubre la mayor parte de la extensión de la ría de Pontevedra.
- Resultados obtenidos: Figura 4-5.



**Figura 4-5 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de buceadores EOD a las 1300UTC del día 14 de febrero de 2025. Fuente: elaboración propia.**

- **Discusión:** tal y como se puede observar, la evaluación METOC para esta operación ofrece un impacto severo desde Punta Festiñanzo hacia el oeste, y marginal hacia el este. Por lo que la imagen, serviría al mando pertinente para tomar una decisión rápida con el objetivo de mitigar los riesgos de la misión. Por ejemplo, esta: se decide limitar las inmersiones de buceadores EOD exclusivamente al sector interior de la ría, donde las condiciones, aunque marginales, permiten una intervención con las correctas medidas de mitigación de riesgo implementadas.

Por otro lado, a efectos técnicos, se puede observar en este caso, cómo la zona de evaluación de impacto obtenida se ajusta a la línea de costa. Esto se debe a que la variable meteorológica más restrictiva para el desarrollo de esta operación es de la tabla *meteogalicaia\_swan\_forecast\_table*, es decir, la altura de la ola *hs* o el periodo medio *tm01*. Esto es así porque al consultar la base de datos, el valor asignado a cada una de las celdas en tierra es incoherente, es decir, muy alto. Al implementar límites en las consultas, de 0 a 15, en el valor leído, estas celdas devuelven una respuesta *None*. Con este resultado, el código acabará por desarrollar un resultado “Sin Color” para estas celdas.

#### 4.1.2 Comparación de resultados en función de la resolución

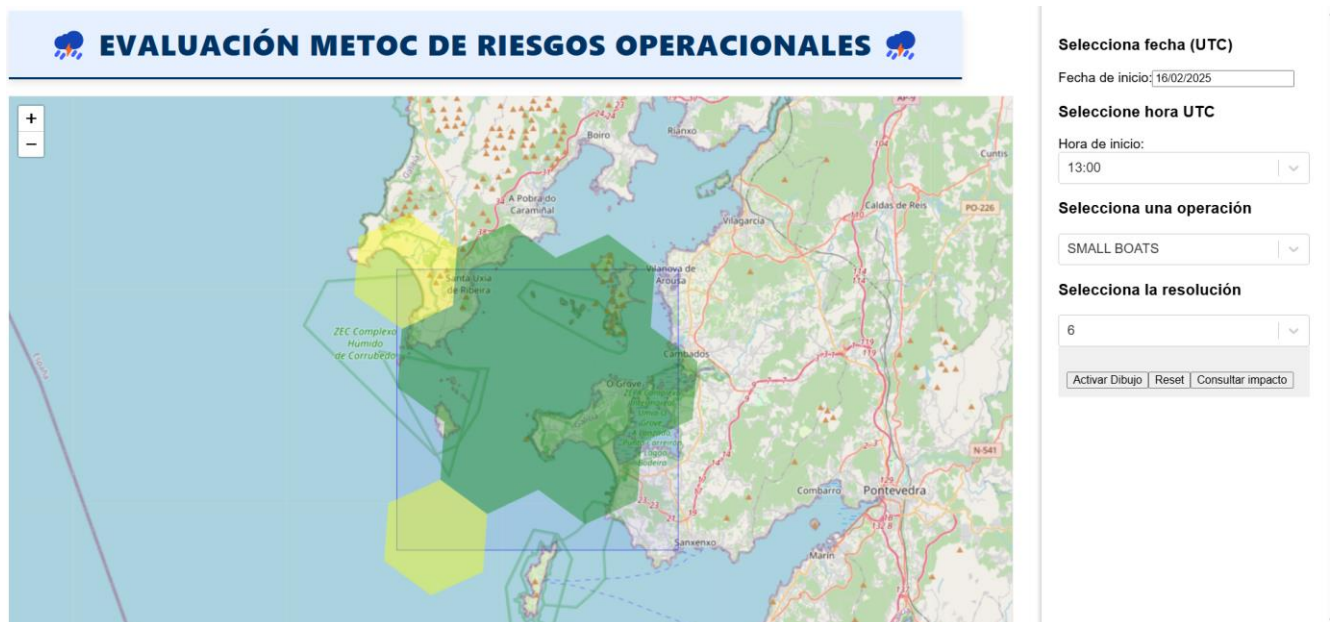
Para validar el correcto funcionamiento del modelo de evaluación METOC implementado, se realizará una serie de pruebas comparativas del sistema variando la resolución H3 seleccionada. Estas pruebas permitirán analizar el impacto que tiene la resolución del mallado hexagonal sobre la representación espacial del riesgo y sobre la precisión de los resultados ofrecidos al usuario.

Como es sabido, el usuario podrá seleccionar desde la interfaz la resolución H3 que desea utilizar (por ejemplo: 6, 7, 8, 9 o 10). Esta elección afecta directamente a:

- El número de celdas generadas para un área determinada: a mayor resolución, mayor número de celdas generadas.
- El nivel de detalle con el que se representa el riesgo operacional, a menor resolución menor nivel de detalle de la evaluación de riesgo para una misma zona.
- El tiempo de respuesta del sistema: se aprecia un aumento del retraso en la generación final de los colores cuanto mayor es el área seleccionada o mayor la resolución escogida. Es decir, podríamos decir que existe un mayor tiempo de espera cuanto mayor es el número de celdas.

A continuación, se procederá a la evaluación de riesgos de una misma área empleando nuestro sistema variando las resoluciones para observar los resultados obtenidos:

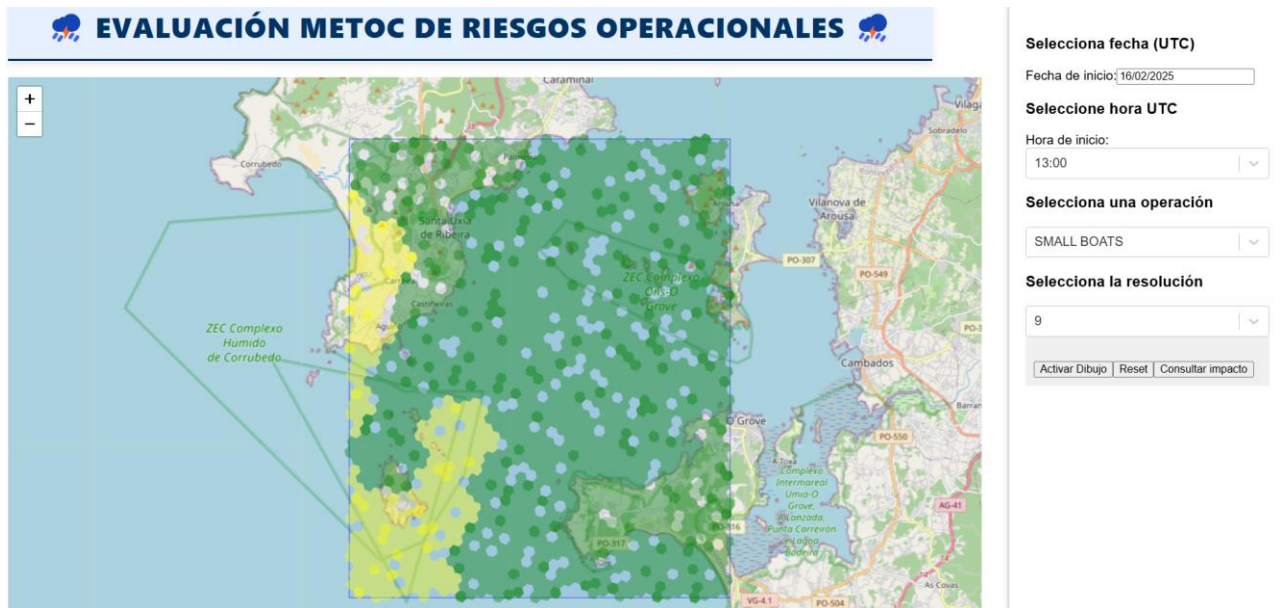
- **Resolución baja (celda H3 de resolución 6):**



**Figura 4-6 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de pequeñas embarcaciones con una resolución de celda seis. Fuente: elaboración propia.**

Como podemos observar en esta Figura 4-6, pocas celdas cubren la extensa área seleccionada. Por este motivo, los valores meteorológicos se promedian sobre regiones grandes y se obtiene una visión más genérica del impacto METOC, con menor precisión. Esto puede provocar que el usuario pase por alto algunos fenómenos ambientales locales que incrementen el nivel de impacto en una región del espacio menor al área que cubre una celda de la resolución seleccionada. Sin embargo, la renderización del color de las celdas ha llevado apenas 9 segundos, bastante más rápido que en el siguiente caso.

- **Resolución alta (celda H3 de resolución 9):**



**Figura 4-7 Resultados finales de la evaluación del impacto METOC sobre las operaciones de pequeñas embarcaciones con una resolución de celda nueve. Fuente: elaboración propia.**

Como se puede observar en esta Figura 4-7, para el área seleccionada se generaron muchas celdas pequeñas de resolución 9. Existe un mayor detalle en la detección de condiciones meteorológicas locales que puedan variar el color de la celda en un punto determinado. Sin embargo, nos encontramos con la ausencia de muchas celdas. Este comportamiento indica que hay algún problema en el agrupamiento, expansión o renderizado de las celdas H3.

Por otro lado, la carga computacional para generar el color final de las celdas del área seleccionada fue bastante superior al caso anterior, 3 minutos 38 segundos. Ofreciendo una sensación de “congelamiento” de la interfaz y restando calidad al modelo cuando se pretende evaluar un área de gran tamaño con una buena resolución.

Por último, podemos apreciar un efecto, desde luego, esperado. Nuestro sistema funciona consultando celdas de resolución 7 para la tabla de WRF almacenada en la base de datos y de resolución 8 para la tabla de WRF. Al expandir el valor de las variables consultadas asociado a estas celdas en celdas de menor resolución, estas quedan con el mismo valor que su celda “padre”. Es por ello, que en la Figura 4-7 podemos observar como las celdas que limitan la región de impacto marginal, y favorable parecen agruparse en celdas hexagonales, en este caso de resolución 7. Es por ello, que, aunque se consulte por una mayor resolución, el sistema nunca detectará fenómenos locales atmosféricos si estos se encuentran en una región geográfica menor al área que abarca una celda de 7 u 8.

Sin embargo, está claro que seleccionar una mayor resolución ofrece una visual más atractiva, con mayor sensación de detalle. Además, si la variable más restrictiva en cuanto al impacto pertenece a la tabla de SWAN, las celdas de tierra quedarán en gris. Escoger una resolución mayor permite que el coloreado de las celdas se ajuste a la línea de costa.

Esta comparación entre resoluciones es clave para validar la fiabilidad del sistema. Desde luego, la resolución actúa como un elemento de equilibrio entre detalle de la evaluación y rendimiento del sistema.

## 4.2 Comparativa de resultados con la plataforma SIAAMETOC

### 4.2.1 Contextualización de la comparación y adaptación de modos de evaluación

Para completar la validación del modelo se ha considerado necesario, efectuar una comparativa entre este sistema y el ofrecido por plataformas oficiales como SIAAMETOC, para verificar su fiabilidad y utilidad en escenarios operativos reales.

El sistema SIAAMETOC, fue introducido en la Sección 2.2.4, y como se explicó, el sistema nació con el objetivo de adaptar e interpretar los datos meteorológicos para facilitar la elaboración de productos de carácter operacional. Su capacidad para la identificación, análisis y explotación de datos METOC en los buques de la Armada, está ofreciendo resultados muy positivos. Todo ello gracias a la colaboración en su desarrollo entre el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria) y el IHM [22].

SIAAMETOC, se estructura en varios módulos especializados para diferentes operaciones. En el sistema desarrollado en este proyecto se han incluido “Operaciones hidrográficas” y “Operaciones MCM (MIW)”. Ambas, integradas en el sistema SIAAMETOC. Es de fundamental importancia, tomar los mismos rangos de parámetros para efectuar las comparaciones entre los dos sistemas. Sin embargo, como veremos en la Tabla 4-1, la evaluación de impacto por parte de SIAAMETOC se realiza, para algunas operaciones, efectuando un cruce entre los valores de diferentes variables en lugar de estudiar el rango en el que se encuentra dicho valor. De dicho cruce, se obtiene el nivel de impacto (favorable, marginal o desfavorable). Esto es porque en este caso, se cuenta con los límites específicos para algunas plataformas en concreto, como son el buque Malaspina o el dron ROV (*Remotely Operated Vehicle*) que opera el IHM. Las operaciones y su evaluación de impacto en sistema SIAAMETOC quedarían de la siguiente forma:

Operaciones hidrográficas										
		SS	<0,5m		0,5 – 1m		1 – 1,5m		>1,5m	
		T	<10s	>10s	<10s	>10s	<10s	>10s	<10s	>10s
HOIST/LOW (BOATS) Izado/Arriado botes hidrográficos	W	< 5,14m/s								
		5,14 – 7,72m/s								
		> 7,72m/s								
		SS	<0,5m		0,5 – 1m		1 – 1,5m		<1,5	
		T	<10s	>10s	<10s	>10s	<10s	>10s	<10s	>10s
BATHYMETRY (BOATS) Trabajos batimétricos con botes hidrográficos	W	< 5,14m/s								
		5,14 – 7,72m/s								
		> 7,72m/s								
		SS	<1m		1 – 1,5m		1,5 – 2m		>2m	

<b>BATHYMETRY (BBHH)</b> Trabajos batimétricos con BBHH (Malaspina)	<b>T</b>		<10s	>10s	<10s	>10s	<10s	>10s	<10s	>10s	
	<b>W</b>	< 12,86m/s									
12,86 – 18m/s											
> 18m/s											
<b>Operaciones MCM</b>											
<b>HUNTING OPS</b> Operaciones de caza de minas	<b>SS</b>		< 1,25m			1,25 – 2,5m			>2,5m		
	<b>CURR</b>		<0,75	0,75-2	>2	<0,75	0,75-2	>2	<0,75	0,75-2	>2
	<b>W</b>	< 7,72m/s									
		7,72-14,9m/s									
> 14,9m/s											
<b>MIW EOD DIVERS</b> Operaciones de desactivación de explosivos con buceadores	<b>SS</b>		< 0,5m			0,5 – 1,25m			> 1,25m		
	<b>CURR</b>		<1	1-1,5	>1,5	<1	1-1,5	>1,5	<1	1-1,5	>1,5
	<b>W</b>	< 7,72m/s									
		7,72-10,8m/s									
> 10,8m/s											
<b>ROV OPS</b> Operaciones de guerra de minas con vehículos operados por control remoto	<b>SS</b>		< 0,5m			0,5 – 1,25m			> 1,25m		

**Tabla 4-1 Límites operativos METOC con variables cruzadas integrados en SIAAMETOC. Fuente: elaboración propia.**

Con el objetivo de poder integrar, la evaluación de dichas operaciones en nuestro modelo fue necesario revertir el cruce de dichas variables para analizarlas de forma “lineal” por separado, como se muestra en la Tabla 3-8. Para ello, se han llevado una serie de adaptaciones que dan como resultado la definición de rangos de impacto que encontramos en dicha tabla. El resultado de estas modificaciones expone que el análisis del riesgo en las operaciones que integra SIAAMETOC no sufre variaciones considerables, brindando la oportunidad de ofrecer resultados similares entre ambos sistemas.

#### 4.2.2 Funcionamiento de SIAAMETOC y comparación de sistemas

En este apartado, es necesario hacer referencia al Anexo III, en el que se explica cuestiones que permitirán comprender mejor la comparación entre ambos sistemas: cómo se ha llevado a cabo instalación de la aplicación SIAAMETOC -OM, cómo se configura su aplicación y una descripción de la interfaz.

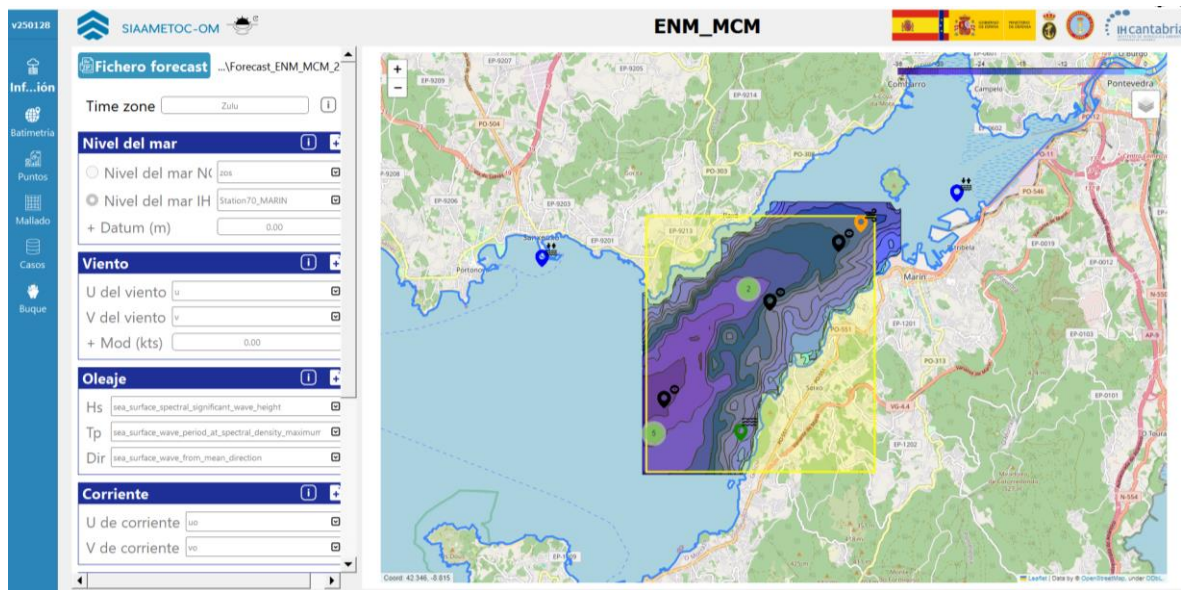


Figura 4-8 Interfaz de SIAAMETOC -OM para la evaluación del impacto METOC sobre diferentes operaciones navales. Fuente: elaboración propia.

Como ya es sabido, la aplicación SIAMETOC -OM es una herramienta desarrollada para evaluar el riesgo operacional de diferentes operaciones navales en función de las condiciones METOC. Su arquitectura está orientada a facilitar la integración de datos MetOcean de diferentes modelos de predicción numérica como SWAN o WRF. Su aplicación, al igual que nuestro modelo, permite la representación visual de una interfaz geoespacial interactiva que muestra los resultados del impacto sobre una operación con la codificación del color (verde, amarillo y rojo) de las celdas de un mallado determinado.

Durante las pruebas de ambos sistemas, se puede concluir que entre las principales similitudes entre ambos se encuentran:

- **Integración de diferentes modelos numéricos:** ambos modelos están diseñados para trabajar con datos obtenidos a partir de modelos numéricos como WRF para variables relativas a la atmósfera y SWAN para condiciones de oleaje.
- **Mallado geoespacial:** en ambos casos se emplea una discretización espacial del área de estudio, dividiendo la zona en celdas que permiten evaluar el impacto METOC. En ambos casos, es posible la selección de la resolución de mallado por parte del usuario.
- **Visualización geográfica con mapa Leaflet:** ambos utilizan la librería *Leaflet.js* con mapas *OpenStreetMap* para la representación de resultados, permitiendo una interfaz gráfica cómoda para el usuario e interactiva.
- **Producto final de evaluación de impacto operacional:** el objetivo de ambos modelos es la estimación del impacto METOC sobre una determinada operación. Para ello, ambos sistemas generan una codificación por colores según el nivel de impacto en las diferentes zonas del área de operación.

Por otro lado, el sistema de SIAAMETOC se encuentra en un nivel de desarrollo y madurez muy superior al sistema desarrollado en este trabajo. SIAAMETOC presenta un modelo mucho más consolidado en cuanto a representación gráfica, interacción del usuario, funcionalidades, optimización y rendimiento. Es por ello, que se presentan numerosas diferencias, entre las principales:

- **Capacidad de análisis y rendimiento:** lo que se refleja en los tiempos de respuesta de generación de los productos finales, siendo SIAAMETOC más fluida y con capacidad de ejecutar casos en paralelo. Esto es especialmente notable en escenarios con selección de un mallado con alta resolución.
- **Integración de unidades y plataformas navales:** a diferencia del modelo de este proyecto, SIAAMETOC incorpora módulos específicos para vincular tipos de buques, sus límites operacionales y características, permitiendo un análisis más individualizado sobre la unidad.
- **Módulos adicionales de análisis:** SIAAMETOC cuenta con funcionalidades más avanzadas como estudio de la batimetría, un módulo de evaluación de operaciones anfibas más completo, etc.
- **Interacción avanzada con datos MetOcean:** el sistema de SIAAMETOC permite visualizar los valores de las variables que afectan a según qué operación naval, y además, cuenta con la opción de generar productos gráficos en lo que visualizar los valores de dichas variables sobre el mapa, con codificación gradual a color y leyendas explicativas.

Sin embargo, a pesar de estas grandes diferencias, ambos sistemas comparten la lógica de evaluación fundamental y la funcionalidad de generar áreas de impacto codificadas a color. Por lo que es posible la comparación de estos productos de evaluación como veremos a continuación.

#### 4.2.3 Comparación de resultados en operaciones MCM

Para llevar a cabo la comparación del producto de evaluación en todas las operaciones relativas a la MIW (*Mine Warfare* o Guerra de Minas) se ha seleccionado un área cuadrada interior de la ría de Pontevedra que comprende desde el límite Oeste de los muelles de la Escuela naval hasta Punta Festiñanzo, tal y como se puede ver en la Figura 4-9. El escenario planteado en todas las operaciones corresponde a la predicción *forecast* para el día 15 de marzo de 2025 a las 11:00 UTC.

Cabe destacar, que los resultados esperados para esta comparación eran, para nuestro sistema, menos restrictivos en cuanto al impacto. Esto se debe a la ausencia de integración de una variable oceanográfica, la corriente. La corriente, es determinante en este tipo de operaciones, y de las evaluadas, solo las operaciones con ROV no la tienen presente para llevar a cabo la evaluación METOC. Las operaciones comparadas son las siguientes (por el nombre de cómo se integran en nuestro sistema desarrollado):

- **HUNTING OPS: operaciones de caza de minas con buque cazaminas.**

En SIAAMETOC, estas operaciones corresponden a la selección “Hunting Operations” en el desplegable que habilita la selección de operación. El resultado obtenido, Figura 4-9, permite visualizar un nivel de impacto severo para estas operaciones:

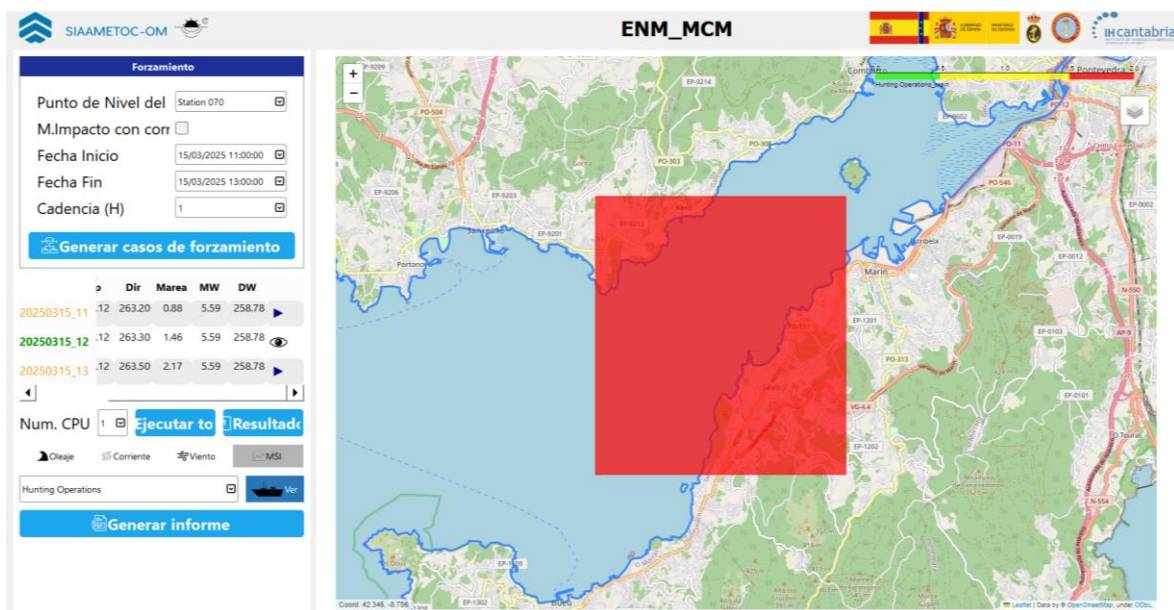


Figura 4-9 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de caza de minas a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

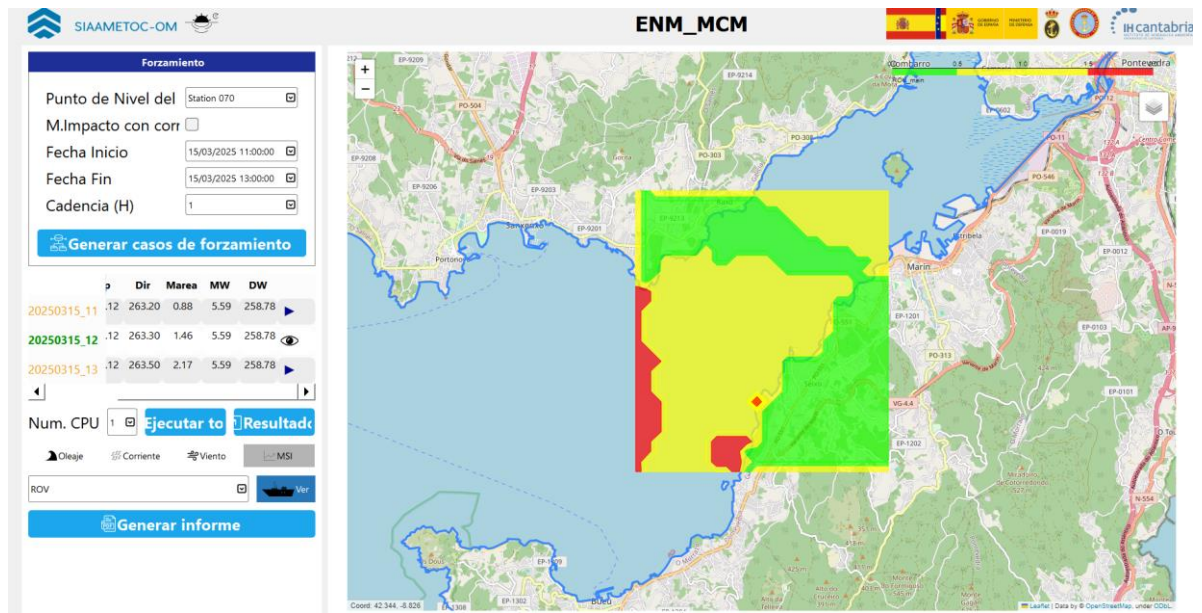
Para evaluar el impacto en el modelo desarrollado se seleccionan las fechas y horas correspondientes, la operación “HUNTING OPS” y una resolución 9 de celda H3. Al consultar el impacto, el resultado obtenido, Figura 4-10, es marginal para el área seleccionada. Como podíamos esperar, la ausencia de una correcta integración de la corriente en el modelo (muy acentuada por las subidas y bajadas de marea en la ría) nos simula un escenario no tan desfavorable para dicha operación.



Figura 4-10 Resultados finales propios de la evaluación del impacto sobre operaciones de caza de minas a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

- **ROV OPS: operaciones de guerra de minas con vehículos operados por control remoto.**  
 En SIAAMETOC, estas operaciones corresponden a la selección “ROV” en el desplegable que habilita la selección de operación. El resultado obtenido, Figura 4-11, permite visualizar un nivel

de impacto marginal en su mayor parte. Sin embargo, podemos observar ciertas regiones donde el impacto es favorable y otras, en menor proporción, donde el impacto es severo:



**Figura 4-11 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones con ROV a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.**

Para evaluar el impacto en el modelo desarrollado se seleccionan las fechas y horas correspondientes, la operación “ROV OPS” y, de igual manera, una resolución 9 de celda H3. Al consultar el impacto, el resultado obtenido, Figura 4-12, se obtiene una visualización similar a la de SIAAMETOC, marginal en su mayor parte, con ciertas áreas de impacto favorable al Noroeste de la zona evaluada.



**Figura 4-12 Resultados finales propios de la evaluación del impacto sobre operaciones con ROV a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.**

Las zonas con un impacto, considerado severo, en los resultados de SIAAMETOC, que en nuestro sistema no se aprecian, se deben a que su sistema devuelve resultados con mayor detalle y, como se comentaba anteriormente, integra el estudio de la corriente. A pesar de ello, la similitud de los resultados es notable.

- **MIW EOD DIVERS: operaciones de desactivación de explosivos con buceadores.**

En SIAAMETOC, estas operaciones corresponden a la selección “Buceo” en el desplegable que habilita la selección de operación. El resultado obtenido, Figura 4-13, permite visualizar un nivel de impacto marginal severo en toda la zona evaluada:

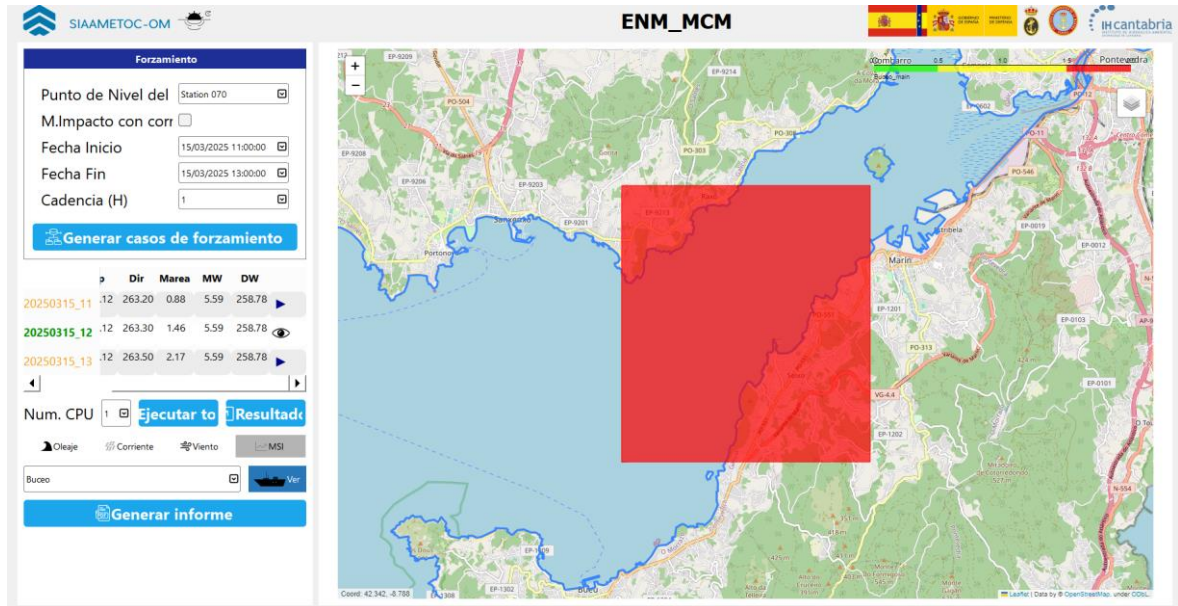


Figura 4-13 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones con buceadores EOD a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el impacto en el modelo desarrollado se seleccionan operación “MIW DIVERS” y, la resolución 9 de celda H3. El resultado obtenido, Figura 4-14, dista del resultado obtenido por SIAAMETOC, siendo mayormente marginal. Estos resultados eran esperados, en gran parte, por el impacto que tienen la corriente sobre este tipo de operaciones.



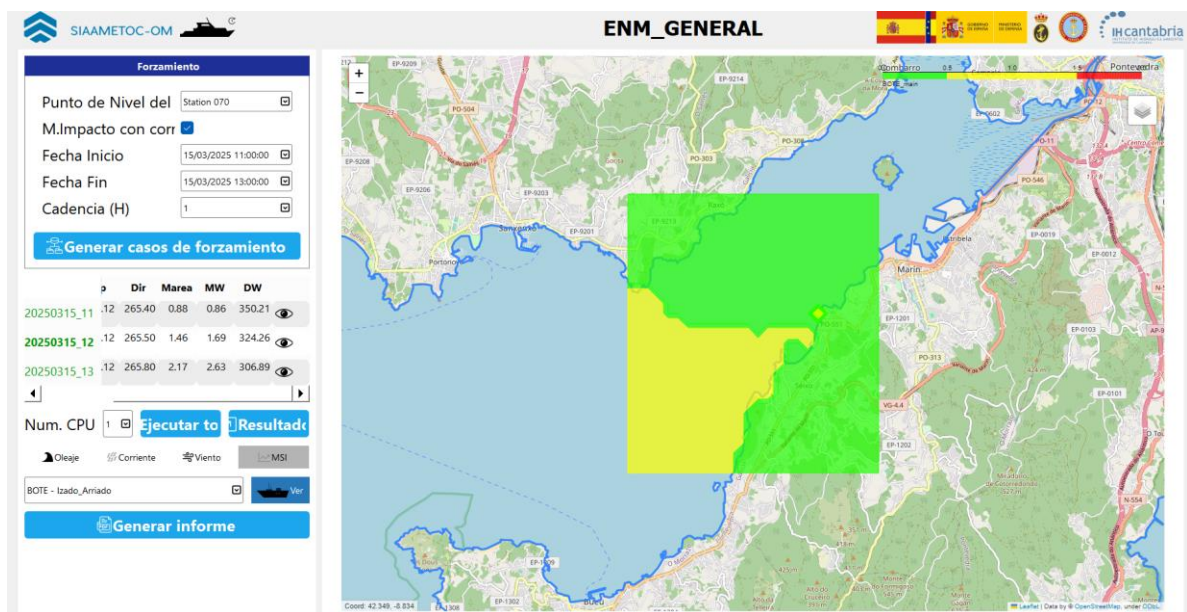
Figura 4-14 Resultados finales propios de la evaluación de impacto de sobre operaciones con buceadores EOD a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.4 Comparación de resultados en operaciones hidrográficas

Para llevar a cabo la comparación del producto de evaluación de las operaciones relativas a las operaciones hidrográficas se han seleccionado la misma área cuadrada interior de la ría de Pontevedra que en los casos anteriores. Las operaciones comparadas son las siguientes (por el nombre de cómo se integran en nuestro sistema desarrollado):

- **HOIST/LOW BOATS: izado e arriado de botes.**

En SIAAMETOC, estas operaciones corresponden a la selección “BOTE – Izado\_Arriado” en el desplegable que habilita la selección de operación. El resultado obtenido, Figura 4-15, permite visualizar un nivel de impacto principalmente favorable en la zona evaluada, con una región de impacto marginal hacia el exterior de la ría:



**Figura 4-15. Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de izado y arriado de botes a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.**

Al igual que en las operaciones anteriores, para evaluar el impacto en el modelo desarrollado se seleccionan las fechas y horas correspondientes, la operación “HOIST/LOW BOATS” y, de igual manera, una resolución 9 de celda H3. El resultado obtenido, Figura 4-16, es muy similar al obtenido en SIAAMETOC, obteniendo una visual donde el impacto es mayormente favorable con cierta región al Oeste asociada a un impacto marginal. Si bien es cierto que, en el resultado anterior se observaba esta región más desplazada hacia al Sur, se puede decir que el resultado de la comparación es muy positivo.



Figura 4-16 Resultados finales propios de la evaluación de impacto sobre operaciones de izado e arriado de botes a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

- **BATHIMETRY (BOATS): trabajos de batimetría con botes hidrográficos.**

En SIAAMETOC, estas operaciones corresponden a la selección “BOTE – Trabajos batimétricos” en el desplegable que habilita la selección de operación. El resultado obtenido, Figura 4-17, permite visualizar unos niveles de impacto iguales a los obtenidos en el caso anterior, esto se debe a la implementación de los mismos criterios de evaluación de riesgos aplicados ambas operaciones. Es decir, tienen los mismos límites operacionales.

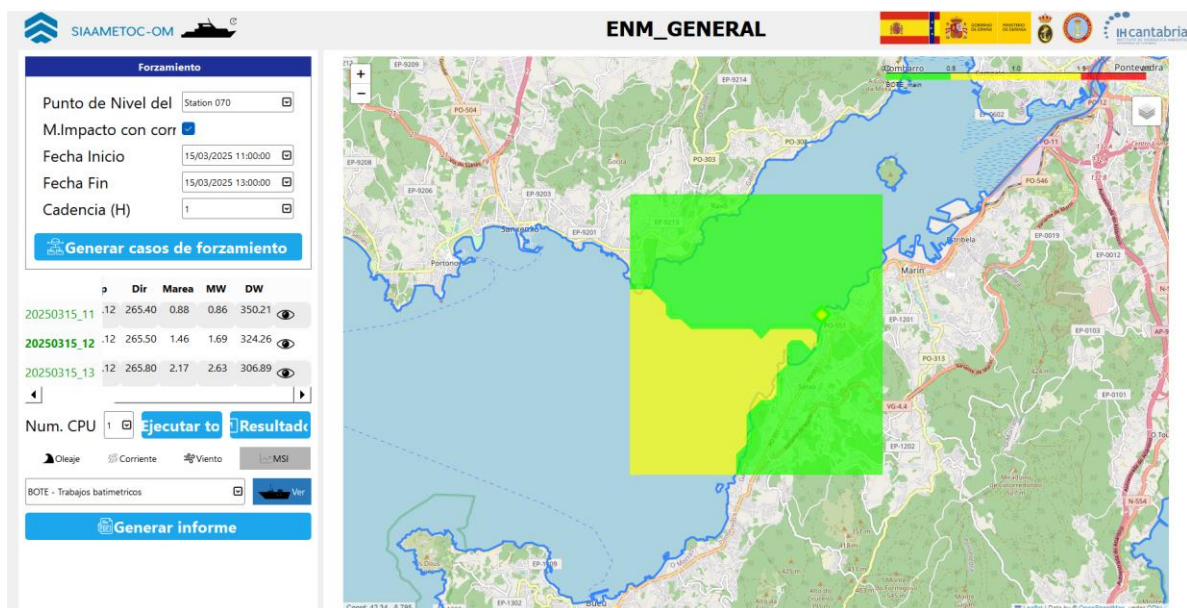


Figura 4-17 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de batimetría con botes hidrográficos a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el impacto en el modelo desarrollado se selecciona la operación “BATHYMETRY (BOATS)” y una resolución 9 de celda H3. Al consultar el impacto el resultado obtenido, Figura

4-18, se obtiene, como era de esperar el mismo impacto que en la operación anterior. La comparativa de resultados, por tanto, ofrece los mismos resultados tan positivos para la validación de nuestro modelo.



Figura 4-18 Resultados finales propios de la evaluación de impacto sobre trabajos batimétricos con botes a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

- **BATHYMETRY (BBHH): trabajos de batimetría con buques hidrográficos.**

En SIAAMETOC, estas operaciones corresponden a la selección “MALASPINA – Trabajos batimétricos” en el desplegable que habilita la selección de operación. En concreto se evalúa el impacto para la plataforma del buque “Malaspina” de la Armada. El resultado obtenido, Figura 4-19, permite visualizar un nivel de impacto favorable:

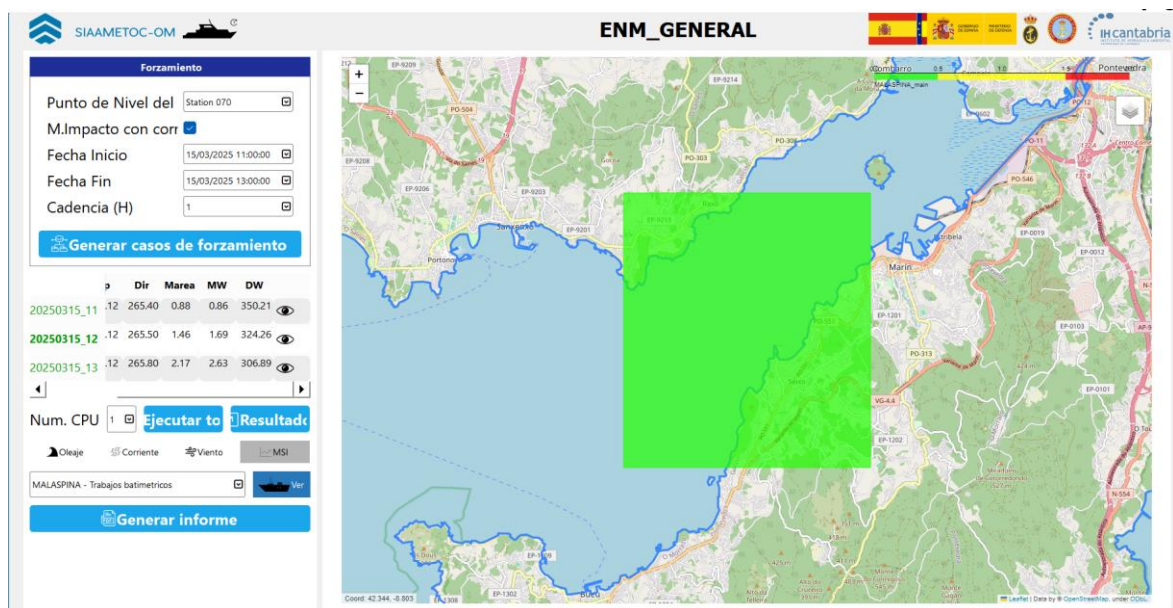


Figura 4-19 Resultados finales de la evaluación de impacto de SIAAMETOC sobre operaciones de batimetría con buque hidrográfico a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el impacto en el nuestro modelo se selecciona la operación “BATHYMETRY (BBHH)”. Como se puede observar en la Figura 4-20, el impacto ofrecido por el sistema es

favorable para toda la región, igual que en SIAAMETOC. Por lo que el éxito de la comparación en este escenario es evidente.



**Figura 4-20** Resultados finales propios de la evaluación de impacto de sobre operaciones de batimetría con buque hidrográfico a las 1100UTC del día 15 de marzo de 2025. Fuente: elaboración propia.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

Efectuada la validación del sistema en el apartado anterior, podemos asegurar que el modelo de evaluación de riesgos METOC operacionales ha resultado un éxito en cuanto a diseño, implementación y obtención de resultados.

A nivel técnico, se puede concluir que el sistema resuelve con éxito diversas complicaciones encontradas a lo largo del desarrollo del proyecto, resolviendo algunos conflictos:

- Ajuste de la resolución seleccionada por el usuario `user_res` a la resolución de las celdas almacenadas en la base de datos. Lo cual se resuelve mediante adaptaciones de las consultas SQL en función de la resolución seleccionada, entre otras técnicas.
- Resolución del conflicto de implementar varios modelos de predicción numérica en el sistema cada uno con una resolución de celda asignada. Para conseguir una evaluación de impacto completa, que evaluase el mayor número de variable meteorológicas posibles era necesario integrar ambos modelos, SWAN y WRF, a pesar de las complicaciones derivadas de que ambas tablas en la base de datos no integrasen celdas H3 con la misma resolución. De nuevo, esto fue resuelto mediante la lógica de consultas SQL.
- Ajuste necesario de la zona horaria para convertir el grupo fecha/hora UTC introducido por el usuario a la hora de la zona horaria que emplea la base de datos Poseidon en PostgreSQL para asignar un `date_predicted` a los datos MetOcean almacenados. La zona horaria en la que se encuentran es *Europe/Paris* y dicho grupo fecha/hora se construye elemento a elemento con la siguiente función (Figura 5-1):

```
const dateUTC= new Date(startDate);
const selectedHour = parseInt(selectedOptionH.value);
dateUTC.setUTCHours(selectedHour, 0, 0, 0);
const parisTime = new Intl.DateTimeFormat("en-US", {
  timeZone: "Europe/Paris",
  year: "numeric",
  month: "2-digit",
  day: "2-digit",
  hour: "2-digit",
  minute: "2-digit",
  second: "2-digit",
  hour12: false
```

```
}).formatToParts(dateUTC);  
const year = parisTime.find((p) => p.type === "year").value;  
const month = parisTime.find((p) => p.type === "month").value;  
const day = parisTime.find((p) => p.type === "day").value;  
const hour = parisTime.find((p) => p.type === "hour").value;  
const minute = parisTime.find((p) => p.type === "minute").value;  
const second = parisTime.find((p) => p.type === "second").value;  
const date_predicted = `${year}-${month}-${day} ${hour}:${minute}:${second}`;
```

**Figura 5-1** Función de `Sidebar.js` que permite convertir la hora UTC seleccionada en el desplegable a la hora de *Europe/Paris*. Fuente: elaboración propia.

- Solución adoptada para filtrar celdas con valores de datos MetOcean incoherentes, como es el caso de las celdas en tierra, que ofrecen valores desproporcionados de las variables meteorológicas de SWAN. Lo cual se resuelve aplicando límites razonables a ciertas consultas SQL, lo que permite la obtención de resultados de tan buena calidad como los de la Figura 4-5. Además, estos valores no perjudican al valor de la variable en las celdas colindantes cuando se ejecutan las operaciones de promedio de valores o expansión de valores.
- Solución adoptada para adaptar el método de evaluación de riesgo de SIAAMETOC al sistema desarrollado. Permitiendo, que los resultados sean bastante similares aun siguiendo el método de evaluación de riesgo “lineal” para cada variable.

Todos estos conflictos han sido resueltos a lo largo del diseño y desarrollo del proyecto, y han permitido alcanzar las siguientes conclusiones sobre el modelo desarrollado:

En primer lugar, ha demostrado ser una herramienta capaz de apoyar al mando en la toma de decisiones, mediante una visualización geoespacial del impacto ambiental rápida, simplificada y eficaz. Las simulaciones efectuadas para mayor comprensión del carácter operativo del sistema dan cuenta de ello. Además, la arquitectura cliente – servidor, hace que el sistema sea fácilmente desplegable y adaptable a entornos operativos reales, incluyendo plataformas METOC de defensa.

En segundo lugar, tras estudiar los casos de simulación de una misma área con diferentes resoluciones, se puede concluir que la resolución seleccionada afecta directamente a la fiabilidad operativa del sistema, determinando que:

- En zonas amplias o en alta mar, una resolución baja puede ser suficiente, más eficiente y de respuesta más rápida.
- En zonas costeras, canales estrechos o aproximaciones portuarias, se requiere alta resolución para detectar condiciones de riesgo más localizadas (siempre que no sea más alta de 7 u 8).
- Los resultados se ven condicionados por la resolución de las celdas asociadas a los diferentes modelos de predicción numérica de la base de datos.

Sin embargo, una resolución alta, a pesar de no ofrecer variaciones de resultados que ofrezcan mayor detalle que una resolución de 7 u 8, ofrece una visualización más atractiva en algunos entornos, dando sensación de mayor resolución. Además, en caso de que el impacto determinado por el valor de una variable oceanográfica de SWAN, una mayor resolución permite que el color de las celdas se ajuste mejor a la línea de costa. Lo que ofrece una visual mucho más atractiva y optimizada. Es por ello, que permitir al usuario adaptar la resolución según el tipo de operación y el tamaño del área de análisis es un acierto como funcionalidad del modelo.

Por otro lado, estas simulaciones efectuadas en la Sección 4.1.2, han dado cuenta de algunas imprecisiones en la interfaz. En dicha simulación observábamos un resultado que dejaba numerosos

huecos entre celdas, especialmente a baja resolución. A pesar de ello, el modelo sigue cumpliendo con éxito al seleccionar una resolución de celda alta.

Por último, las comparaciones realizadas entre el sistema desarrollado y la herramienta oficial SIAAMETOC han arrojado resultados muy positivos, evidenciando una buena correlación en la evaluación del riesgo METOC para distintos escenarios operativos. De los resultados de la comparación se arrojan las siguientes conclusiones:

Es evidente que SIAAMETOC muestra una mayor resolución en sus resultados, mientras que nuestro modelo se encuentra limitado por la resolución 7 y 8, que presentan las celdas integradas en la base de datos a los que se asocian los valores MetOcean. Sin embargo, es muy posible que, si el área seleccionada fuese más grande, los resultados serían muy similares en este sentido, al ser el mallado empleado por SIAAMETOC para dichos casos mucho más cercano a una resolución de celda 7 u 8.

Por otro lado, las grandes diferencias entre los resultados de ambos sistemas se deben, principalmente, a la corriente. Pues como ya se ha dicho, el modelo desarrollado no integra el análisis de esta variable, lo que afecta significativamente al resultado ofreciendo un impacto menos restrictivo.

A pesar de ello y del hecho de que SIAAMETOC cuenta con una infraestructura muy consolidada y funcionalidades mucho más avanzadas, el modelo propuesto en este trabajo ha demostrado tener un gran potencial para convertirse en una alternativa válida, flexible y fácilmente adaptable a diferentes fuentes de datos y tipos de operación. Esta validación respalda la utilidad del sistema como herramienta de apoyo a la toma de decisiones del mando en entornos operativos reales.

## 5.2 Cumplimentación de objetivos

En este apartado, tomando las conclusiones expuestas anteriormente, se pretende valorar si el proyecto ha cumplido con los objetivos marcados:

- Se ha conseguido integrar datos de predicción meteorológica y oceanográfica procedentes de diferentes modelos numéricos de predicción accesibles a través de MeteoGalicia en una base de datos PostgreSQL con extensión PostGIS.
- Se ha desarrollado un modelo capaz de recibir solicitudes del usuario, consultar datos del servidor POSEIDON y procesarlos en base a los límites operacionales definidos por la OTAN.
- Se han definido y estructurado los umbrales de impacto METOC para distintas operaciones navales, codificándolos mediante colores (verde, amarillo y rojo) en función del riesgo (favorable, marginal, severo).
- Se ha conseguido crear una interfaz web tipo SPA (*Single Page Application*) que permita al usuario seleccionar una zona geográfica a evaluar para una operación en concreto y en una fecha y hora determinadas.
- Se ha logrado implementar un sistema de discretización geoespacial basado en el mallado H3 de Uber, aprovechando su estructura jerárquica para adaptar dinámicamente la resolución de las celdas en función del tamaño del área seleccionada por el usuario, optimizando así la precisión y eficiencia del análisis del riesgo METOC.
- Se ha validado el modelo mediante simulaciones, comparando los resultados obtenidos con los ofrecidos por plataformas oficiales como SIAAMETOC, para verificar su fiabilidad y utilidad en escenarios operativos reales.

Por tanto, se dan por cumplidos todos los objetivos marcados en este proyecto.

## 5.3 Limitaciones al modelo desarrollado

Sin embargo, el modelo de evaluación desarrollado requiere de una mayor optimización y de la implementación de mejoras para convertirse en una herramienta indiscutible en el proceso de evaluación

de riesgos METOC en las unidades de la Armada. Actualmente, el modelo cuenta con una serie de limitaciones a subsanar en un futuro:

- **Definición incompleta de las operaciones desarrolladas:** el sistema no diferencia en trato las operaciones navales de las aéreas, siendo estas más complejas de analizar por requerir parámetros de altura y la evaluación de condiciones atmosféricas no numéricas como los tipos de nubes. Además, el sistema no contempla características propias de las plataformas de la Armada. Los umbrales de riesgo implementados podrían variar dependiendo del barco o aeronave en cuestión. Sin embargo, los rangos tomados en nuestro sistema tienen un carácter más genérico e integrador.
- **Visualización limitada del tiempo:** el sistema actual evalúa el riesgo para un único instante temporal seleccionado manualmente. Sin embargo, el comportamiento del entorno METOC puede variar considerablemente en pocas horas. La falta de un análisis continuo temporal o de una barra de tiempo limita la capacidad predictiva del sistema para operaciones que se extienden en el tiempo, obligando al usuario a consultar el impacto manualmente “hora a hora” para llevar a cabo una evaluación del riesgo en detalle para poder realizar una correcta recomendación al mando.
- **Límite de variedad de parámetros meteorológicos y deficiencias de estos:** algunas variables relevantes para ciertas operaciones navales no están aún integradas o se presentan de forma restringida. Por ejemplo:
  - La humedad relativa, que sólo está considerada en el rango 60%-90%, lo que impide detectar extremos secos o saturados.
  - No se incluye información sobre radiación solar, niebla, visibilidad, tormentas eléctricas o turbulencias.
  - No se contempla el nivel de iluminación (Lux), clave en operaciones nocturnas con NVGs (*Night Vision Goggles*).
- **Pérdida de celdas y equilibrio entre resolución y rendimiento:** como se ha explicado anteriormente, la selección de una resolución H3 demasiado baja puede generar pérdida de información crítica, mientras que una resolución muy alta puede saturar y ralentizar el procesamiento. Actualmente, esta selección depende exclusivamente del usuario y no se sugiere un nivel óptimo en función del tipo de operación o del área geográfica.
- **Ausencia de gestión de usuarios y seguridad:** el sistema funciona como una aplicación local sin autenticación. Tratándose de una plataforma posiblemente implementada en defensa se requeriría un control de acceso con distintos perfiles de usuario y un registro de actividad. Elementos de los cuales carece el modelo, actualmente.

## 5.4 Líneas futuras

Las limitaciones comentadas anteriormente dejan la puerta abierta a numerosas implementaciones futuras que mejoren el sistema actual. Por ello, con el objetivo de transformar este prototipo en una herramienta operacional avanzada, se proponen las siguientes líneas de desarrollo:

- **Barra de tiempo (*time bar*) en la interfaz:** implementación de una barra temporal interactiva que permita al usuario navegar hora a hora visualizando la evolución del riesgo operacional.
- **Sincronización horaria y conversión de husos:** el sistema debe gestionar correctamente la hora UTC y ajustarse automáticamente al huso horario de la zona de operaciones, independientemente del uso horario trabajado por la base de datos. De esta forma, se podrían evitar confusiones en la interpretación de predicciones.

- **Integración de datos de diferentes plataformas:** sería conveniente integrar en el sistema especificaciones operativas y umbrales de impacto con mayor personalización para diferentes unidades. Esto permitiría la adaptación del sistema a múltiples plataformas ofreciendo resultados más fiables, precisos e individualizados.
- **Evaluador de resolución óptima:** se propone desarrollar un módulo integrado en código fuente que, según el tipo de operación, el tamaño del área seleccionada y la disponibilidad de datos sugiera automáticamente la resolución H3 óptima o incluso, que la seleccione por defecto. Esto mejoraría la experiencia del usuario encontrando en la interfaz un mejor equilibrio entre la visualización del impacto en el mapa y el tiempo de respuesta de la interfaz.
- **Nuevas variables ambientales y factores de impacto:** se propone ampliar el modelo para contemplar: variables relativas a la radiación solar, para valorar su impacto en sistemas ópticos o comunicaciones; iluminación ambiental (Lux) para evaluar viabilidad de uso de NVGs; parámetros atmosféricos como tormentas eléctricas para evaluar con precisión el impacto sobre operaciones aéreas; etc.
- **Ampliación del modelo hacia su integración en la evaluación de operaciones anfibas:** el sistema actual no integra datos batimétricos. Sin embargo, se propone y recomienda la integración de datos de previsión de rompientes en playa y datos de batimetría para operaciones LCM (*Landing Craft Mechanized*).

Se puede considerar que el sistema se encuentra en un punto idóneo para evolucionar hacia una herramienta operativa con funcionalidades avanzadas. Todas estas líneas futuras expuestas no sólo aumentarían el valor operativo del sistema, sino que lo acercan a su aplicación en un entorno real de toma de decisiones tácticas y operativas, convirtiéndolo en una herramienta integral de apoyo a la planificación operativa naval.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

En esta sección figuran se encuentran todas las referencias empleadas para el desarrollo de esta memoria:

- [1] L. G. de Pedraza, «La meteorología y la guerra», Rev. Tiempo Clima, vol. 5, n.º 11, Art. n.º 11, 2006. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/527>
- [2] Ángel Alcázar Izquierdo, «Meteorología y Defensa.», 2018, Aemetblog. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aemetblog.es/2018/05/26/meteorologia-y-defensa/>
- [3] B. Egorov, «Russia's most brilliant victories over Napoleon», Russia Beyond. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.rbth.com/history/333751-russias-most-brilliant-victories-napoleon>
- [4] CC R. Montero C., «La meteorología y la guerra», 1950, Revista de Marina 1950 n°555. Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://revistamarina.cl/visorpdf/vis/viewer.php?file=https://revistamarina.cl/revistas/1950/1950\\_r02\\_10.pdf](https://revistamarina.cl/visorpdf/vis/viewer.php?file=https://revistamarina.cl/revistas/1950/1950_r02_10.pdf)
- [5] Sergi González Herrero, «El día D: La predicción meteorológica más importante de la historia», 2016, Aemetblog. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://aemetblog.es/2016/06/06/el-dia-d-la-prediccion-meteorologica-mas-importante-de-la-historia/>
- [6] Á. A. Izquierdo, «Meteorología Táctica: la información meteorológica para la toma de decisiones.», Acta Las Jorn. Científicas Asoc. Meteorológica Esp., Art. n.º 30, 2008. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pub.ame-web.org/index.php/JRD/article/view/2181>
- [7] «Naval Meteorology and Oceanography Command | Public Facing». Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.metoc.navy.mil/>
- [8] «UK defence», Met Office. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.metoffice.gov.uk/services/government/defence-and-security/uk-defence/index>
- [9] «Deutscher Wetterdienst: Sociedad Meteorológica Europea». Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.emetsoc.org/members/member/dwd/>
- [10] «Departamento de Meteorología Militar», Argentina.gob.ar. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/fuerzaaerea/direccion-general-de-seguridad-operacional-aeroespacial-militar/departamento-de>

- [11] Boletín Oficial del Estado del Viernes de 5 julio de 2024, Resolución 13758. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2024/07/05/pdfs/BOE-A-2024-13758.pdf>
- [12] Beatriz Sanz et al. «La batalla del tiempo - Ministerio de Defensa de España», 2022. Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.defensa.gob.es/comun/slider/2022/09/220930-profesionales-meteorologia-red.html>
- [13] Antonio A. Palacio López-Villaseñor et al., «El apoyo meteorológico a las operaciones del siglo XXI», Documentos de Seguridad y Defensa, nº64, Escuela Superior de las Fuerzas Armadas, 2014. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://publicaciones.defensa.gob.es/el-apoyo-meteorologico-a-las-operaciones-del-siglo-xxi-n-64-4747.html>
- [14] Allied Command Operations Directive 080-034, «NATO Meteorological and Oceanographic Services for Allied Command Operations». 20 de marzo de 2024.
- [15] F. Belda, «Problemas clásicos y nuevos retos», 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.proteccioncivil.es/catalogo/guiastecnicas/jornadas-tecnicas-informacion-poblacion/presentaciones/p3.pdf>
- [16] CC don Fernando Le Dantec Gallardo, «Apuntes de historia y de meteorología aplicada a la táctica», Revista de Marina de Chile, 1977. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistamarina.cl/revistas/1977/3/ledantec.pdf>
- [17] Escuela Náutica de Cataluña, «UT9 Meteorología», 2014. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://enc.es/encvirtual/PER/Documentos/Capitulos%20en%20pdf/9.%20UT9%20Meteorologia.pdf>
- [18] Noa García, «La importancia de la previsión meteorológica en la navegación», 2024, Sailway. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sailway.es/la-importancia-de-la-prevision-meteorologica-en-la-navegacion/>
- [19] Daniel Rodríguez Lorenzo et al., «Influencia meteorológica y oceanográfica a la navegación», Universidad de La Laguna, 2018. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/13420/INFLUENCIA%20METEOROLOGICA%20Y%20OCEANOGRAFICA%20A%20LA%20NAVEGACION%20.pdf?sequence=1>
- [20] N. Pastor, «Escala Beaufort y Douglas: clasificación del viento y del oleaje – Boat Málaga. Academia Náutica Oficial». Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boatmalaga.com/escala-beaufort-y-escala-douglas-clasificacion-del-viento-y-del-oleaje/>
- [21] Rodrigo Pelayo González, «Riesgos a la misión: Mucho más que daño físico», Revista de Marina, 2021. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://revistamarina.cl/es/articulo/riesgos-la-mision-mucho-mas-que-dano-fisico?utm\\_source=chatgpt.com](https://revistamarina.cl/es/articulo/riesgos-la-mision-mucho-mas-que-dano-fisico?utm_source=chatgpt.com)
- [22] Dirección General de Armamento y material, «Boletín de Observación Tecnológica en Defensa nº81», 2024. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/b/o/bot\\_81.pdf](https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/b/o/bot_81.pdf)
- [23] Carlos José González et al., «Metocean support for Spanish Navy operations: The SIAAMETOC-OM operational system», en ResearchGate, oct. 2024. Accedido: 24 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/384925119\\_Metocean\\_support\\_for\\_Spanish\\_Navy\\_operations\\_The\\_SIAAMETOC-\\_OM\\_operational\\_system](https://www.researchgate.net/publication/384925119_Metocean_support_for_Spanish_Navy_operations_The_SIAAMETOC-_OM_operational_system)

- [24] Carlos José González et al., «SIAAMETOC-OM: desarrollo de un sistema operacional de apoyo metoceanográfico durante operaciones navales», 2024. Accedido: 24 de febrero de 2025.
- [25] M. Singh, E. Fuenmayor, et al., «Digital Twin: Origin to Future. Appl. Syst. Innov.», 2021. Accedido: 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2571-5577/4/2/36>
- [26] M. Grieves et al., Origins of the Digital Twin Concept, 2016. [En línea]. Accedido: 10 de febrero de 2025. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/307509727\\_Origins\\_of\\_the\\_Digital\\_Twin\\_Concept](https://www.researchgate.net/publication/307509727_Origins_of_the_Digital_Twin_Concept)
- [27] Varas Chiquito, M., García Plua, J. C., Bustamante Chong, M., & Bustaman y te Chong, C., «Gemelos digitales y su evolución en la industria», 2020. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://recimundo.com/index.php/es/article/view/953>
- [28] J. L. Moigne, «Earth System Digital Twins (ESDT) Workshop», 2022. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220015961/downloads/2022-10-26\\_ESDT-Workshop\\_JLM-Intro.pdf](https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20220015961/downloads/2022-10-26_ESDT-Workshop_JLM-Intro.pdf)
- [29] M. Grieves y J. Vickers, «Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems», en Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems, 2017, Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- [30] Pablo García Valera et al., «Gemelo Digital Oceanográfico: discretización del entorno mediante un modelo multinivel de mallas H3», 2023.
- [31] «Estadísticas», Hexagon. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://hexagon.com/es/resources/insights/digital-twin/statistics>
- [32] Fortune Business Insights, «Digital Twin Market Size, Share & Growth Forecast, Report, 2032», 2025. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fortunebusinessinsights.com/digital-twin-market-106246>
- [33] Capgemini Research Institute, «Mirroring reality: Digital Twins in Aerospace and defense», 2023, Accedido: 11 de febrero de 2025. [En línea]: Disponible en: <https://www.capgemini.com/es-es/wp-content/uploads/sites/16/2024/08/Final-Web-Version-Report-Digital-Twins-in-AD.pdf>
- [34] L. Li, S. Aslam, A. J. Wileman, y S. Perinpanayagam, «Digital Twin in Aerospace Industry: A Gentle Introduction», dic. 2021, Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9656111>
- [35] Dirección General de Armamento y Material, «Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa ETID - 2020», 2020. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]: <https://publicaciones.defensa.gob.es/estrategia-de-tecnologia-e-innovacion-para-la-defensa-etid-2020-libros-pdf.html>
- [36] Prada, C., Galán-Casado, S., Pitarch, J.L., Sarabia, D., Galán, A., Gutiérrez G., «Digital Twins in the Process Industry», 2022. Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16901>
- [37] «Gemelo Digital - Astillero 5.0», Navantia. Accedido: 9 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/navantia-5-0/astillero-5-0/gemelo-digital/>
- [38] Capgemini Research Institute, «A&D Digital Twin Survey», 2023. Accedido: 14 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://prod.ucwe.capgemini.com/wp-content/uploads/2023/05/Final-Infographic-Digital-Twins-in-AD.pdf>

- [39] R. D. InfoDefensa, «La Armada dotará con gemelos digitales a los submarinos S80, las fragatas F100 y los cazaminas», Infodefensa, 2025. Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/4232222/armada-dotara-gemelos-digitales-submarinos-s80-fragatas-f100-cazaminas>
- [40] Navantia, «Guía de orientación sobre el Gemelo Digital». Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/wp-content/uploads/2024/06/guia-de-orientacion-sobre-gemelo-digital.pdf>
- [41] A. M. Madni, C. C. Madni, y S. D. Lucero, «Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering», *Systems*, vol. 7, n.º 1, p. 7, ene. 2019. Accedido: 20 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-8954/7/1/7>
- [42] «About Mercator Ocean International», Mercator Ocean. Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mercator-ocean.eu/en/about-mercator-ocean-international/>
- [43] «Digital Twin of the Ocean», Mercator Ocean. Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mercator-ocean.eu/en/digital-twin-ocean/>
- [44] European Commission. Directorate General for Research and Innovation., *The digital twin ocean: an interactive replica of the ocean for better decision making*. LU: Publications Office, 2022. Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/343496>
- [45] «Home | CMEMS». Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://marine.copernicus.eu/>
- [46] «What is EMODnet? | European Marine Observation and Data Network (EMODnet)». Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://emodnet.ec.europa.eu/en/about\\_emodnet](https://emodnet.ec.europa.eu/en/about_emodnet)
- [47] «Home», EuroGOOS. Accedido: 18 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://eurogoos.eu/>
- [48] «DestinE», Destination Earth. Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://destine.ecmwf.int/>
- [49] «Océano gemelo digital». Accedido: 10 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://digitaltwinocan.mercator-ocean.eu/>
- [50] «G7 Future of the Seas and Ocean Initiative», G7 Future of Seas and Ocean Initiative. Accedido: 19 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.g7fsoi.org/>
- [51] Álvarez Gutierrez, Pablo Patricio, «Implementación de un sistema Big Data para almacenamiento de datos MetOcean para la mejora de predicciones meteorológicas - Trabajo de Fin de Grado». Accedido: 23 de febrero de 2025.
- [52] M. Fernández-Gavilanes et al., «Gemelo Digital Oceanográfico: Visualización Dinámica del Océano mediante mallas H3», Accedido: 23 de febrero de 2025.
- [53] García Valera, Pablo «Gemelo Digital Oceanográfico: Discretización del entorno marino mediante un modelo multinivel de mallas H3 - Trabajo de Fin de Grado». Accedido: 23 de febrero de 2025.
- [54] Olgierd Cecil Zienkiewicz, *The Finite Element Method*. 1967.
- [55] Alejandro Díaz Morcillo, «Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el Método de los Elementos Finitos», 2000. Accedido: 26 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/b4a143fe-0a4b-4150-8e5c-a254caf9e612/content>

- [56] Ramírez Morán, Sergio, «Gemelo Digital de Entorno Marítimo: Propuesta de arquitectura de integración de datos y operación - Trabajo de Fin de Grado». Accedido: 21 de febrero de 2025.
- [57] L. M. García-Cuevas y A. Gil, «Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad del mallado», Departamento de Máquinas y Motores Térmicos Universitat Politècnica de València. Accedido: 14 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/146219/García-Cuevas%3bGil%3bNavarro%20-%20Mecánica%20de%20fluidos%20computacional%3a%20tipos%20de%20mallas%20y%20calidad%20del%20mall....pdf?sequence=1>
- [58] Giuseppe Mirlisenna, «Método de los elementos finitos: ¿qué es?», ESSS. Accedido: 13 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.esss.com/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- [59] «Guía de la API del MeteoSIX», MeteoGalicia, 2021. Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/meteo/proyectos/meteosix/API\\_MeteoSIX\\_v4\\_es.pdf](https://www.meteogalicia.gal/datosred/infoweb/meteo/proyectos/meteosix/API_MeteoSIX_v4_es.pdf)
- [60] Instituto Geográfico Nacional, «Proyecciones cartográficas | Cartografía (ESO)». Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://educativo.ign.es/atlas-didactico/cartografia-eso/proyecciones\\_cartograficas.html](https://educativo.ign.es/atlas-didactico/cartografia-eso/proyecciones_cartograficas.html)
- [61] «H3: Uber's Hexagonal Hierarchical Spatial Index», Uber Blog, Uber Technologies. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.uber.com/en-ID/blog/h3/>
- [62] «Introduction | H3», Uber Technologies. Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h3geo.org/docs/>
- [63] «Joining | H3», Uber Technologies. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h3geo.org/docs/highlights/joining/>
- [64] «Indexing | H3», Uber Technologies. Accedido: 4 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h3geo.org/docs/highlights/indexing/>
- [65] «Flow Modelling | H3», Uber Technologies. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h3geo.org/docs/highlights/flowmodel/>
- [66] «Aggregation | H3», Uber Technologies. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://h3geo.org/docs/highlights/aggregation/>
- [67] C. P. D. Birch, S. P. Oom, y J. A. Beecham, «Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology», *Ecol. Model.*, vol. 206, n.º 3, pp. 347-359, ago. 2007. Accedido: 15 de febrero de 2025. [En línea]: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380007001949>
- [68] «MeteoGalicia: ciencia e educación, sempre xuntas | Eduga». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.edu.xunta.gal/eduga/1324/que/meteogalicia-ciencia-educacion-sempre-xuntas>
- [69] «Predicción tiempo en Galicia», MeteoGalicia. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.meteogalicia.gal/web/home>
- [70] «Servidor Thredds | ¿Qué es THREDDs?», MeteoGalicia. Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.meteogalicia.gal/modelos/thredds/threddsIndex.action?request\\_locale=es](https://www.meteogalicia.gal/modelos/thredds/threddsIndex.action?request_locale=es)

- [71] «EMODnet web service documentation | European Marine Observation and Data Network (EMODnet)». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://emodnet.ec.europa.eu/en/emodnet-web-service-documentation#data-download-services>
- [72] «EMODnet Map Viewer». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://emodnet.ec.europa.eu/geoviewer/>
- [73] «Inicio | Puertos del Estado», Puertos del Estado. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.puertos.es/>
- [74] «FAQs | Puertos del Estado», Puertos del Estado. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.puertos.es/servicios/oceanografia/faqs#faq2>.
- [75] «PORTUS (Puertos del Estado)», Puertos del Estado. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://portus.puertos.es/#/>
- [76] «Manual de usuario | Servicio online de descarga de datos oceano-meteorológicos de Puertos del Estado», Puertos del Estado, 2021. Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://bancodatos.puertos.es/BD/peticiones/Manual\\_Usuario\\_Descargaportus.pdf](https://bancodatos.puertos.es/BD/peticiones/Manual_Usuario_Descargaportus.pdf)
- [77] Viktor Mayer-Schönberger et al., «Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think».
- [78] Prabhjot Singh, «Digital Rwin in Architecture and Infrastructure». Accedido: 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://pngrb.gov.in/pdf/press-note/20250306\\_SPA.pdf](https://pngrb.gov.in/pdf/press-note/20250306_SPA.pdf)
- [79] «Evolution of Digital Twins», Scholarly Community Encyclopedia. Accedido: 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://encyclopedia.pub/entry/9513>
- [80] «¿Qué es el análisis de big data? | IBM». Accedido: 5 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/big-data-analytics>
- [81] Javier Esmerado, «Las 5 etapas del ciclo de vida de los datos». Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://javieresmerado.com/blog/ciclo-de-vida-de-datos/>
- [82] Marta López, «Base de datos ¿Qué es y para qué sirve?», IMMUNE Institute. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://immune.institute/blog/bdd-que-es-y-por-que-es-importante/>
- [83] «SQL vs. NoSQL Databases: What's the Difference? | IBM». Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibm.com/think/topics/sql-vs-nosql>
- [84] «A Brief History of PostgreSQL», PostgreSQL Documentation. Accedido: 18 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.postgresql.org/docs/17/history.html>
- [85] «Stack Overflow Developer Survey 2023», Stack Overflow. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://survey.stackoverflow.co/2023/?utm\\_source=social-share&utm\\_medium=social&utm\\_campaign=dev-survey-2023](https://survey.stackoverflow.co/2023/?utm_source=social-share&utm_medium=social&utm_campaign=dev-survey-2023)
- [86] «PostgreSQL: Acerca de», PostgreSQL. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.postgresql.org/about/>
- [87] «Postgres JSON data types - Neon Docs», Neon. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://neon.tech/docs/data-types/json>
- [88] S. Nguyen, «How to Secure Your PostgreSQL Database | Dreamfactory». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://blog.dreamfactory.com/5-top-tips-for-postgresql-api-security>
- [89] Challenger-Pérez, Iveta, et al., «El lenguaje de programación Python». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181531232001.pdf>

- [90] «Preguntas frecuentes generales sobre Python — documentación de Python - 3.10.16», Python. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.python.org/es/3.10/faq/general.html>
- [91] MadBasH, «The Comprehensive Guide to Python Programming | BULB». Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.bulbapp.io/p/04a8fcbe-a33f-41a4-82d5-48838918e0ef/the-comprehensive-guide-to-python-programming>
- [92] ZidOP, «Conociendo Flask: El Framework para Python», Zidrave in the Net. Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://zidrave.net/index.php/2024/10/04/conociendo-flask-el-framework-para-python/>
- [93] E. R. Moraguez, «HTML, CSS y JavaScript: La Trinidad del Desarrollo Web». Accedido: 21 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://lovtechnology.com/html-css-y-javascript-la-trinidad-del-desarrollo-web/>
- [94] «JavaScript | MDN», Mozilla Developer. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/JavaScript>
- [95] L. Llamas, «Historia y evolucion de JavaScript». Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/historia-y-evolucion-de-javascript/>
- [96] «React: framework multi-propósito», Aplyca Tecnología SAS. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.aplyca.com/blog/react-biblioteca-javascript-multiproposito>
- [97] J. L. G. Grandes, «10 cosas que quizá no sabías de Leaflet», MappingGIS. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mappinggis.com/2017/10/10-10-cosas-quiza-no-sabias-leaflet/>
- [98] A. Manotoa, «Tutorial de PyCharm: características, instalación y usos», Platzi. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://platzi.com/blog/pycharm/>
- [99] «Install PyCharm | PyCharm», PyCharm Help. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.jetbrains.com/help/pycharm/installation-guide.html>
- [100] «Introducción — Introduction to PostGIS», PostGIS. Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://postgis.net/workshops/es/postgis-intro/introduction.html>

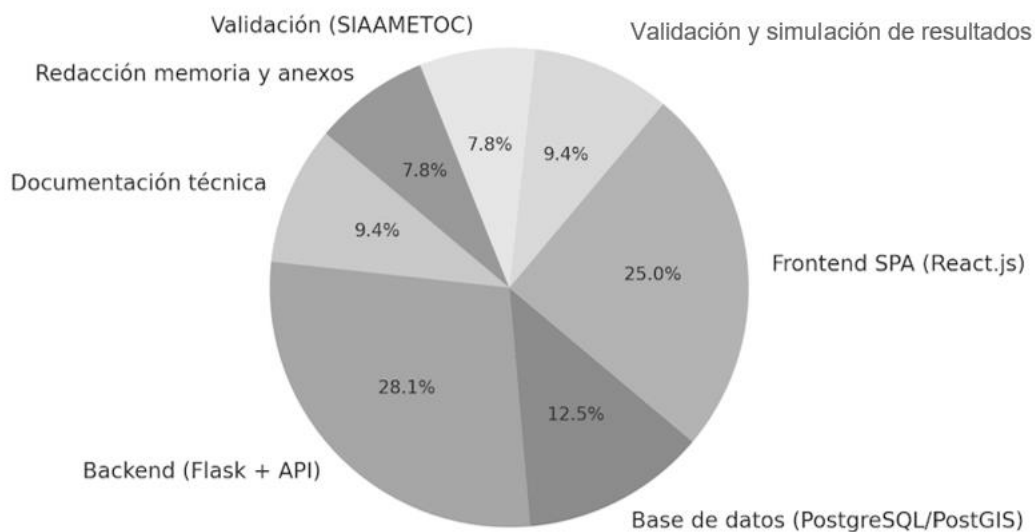
## ANEXO I: IMPLICACIONES ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

### A1.1 Implicaciones económicas

El sistema desarrollado en este trabajo representa una herramienta de alto valor añadido para el entorno operativo naval, al automatizar la evaluación del riesgo ambiental sobre las operaciones militares. No obstante, para llevar a cabo este proyecto, es necesario tener en cuenta los factores económicos que implica.

La solución propuesta para la automatización de la evaluación del riesgo ambiental en operaciones basada en tecnologías libres como React, Flask o PostgreSQL/PostGIS minimiza el coste de adquisición y mantenimiento de licencias, contribuyendo a la sostenibilidad económica del sistema en fases futuras de implantación y escalado.

Por otro lado, el sistema ha sido validado en un entorno local y diseñado para su integración futura con servidores navales como POSEIDON, reduciendo así la necesidad de infraestructuras adicionales. En este sentido, el coste económico del modelo propuesto es principalmente imputable al desarrollo técnico llevado a cabo por el alumno, que ha supuesto más de 400 horas distribuidas entre documentación técnica, programación del *backend* (API REST y consultas geoespaciales), desarrollo de la interfaz SPA (*Single Page Application*), carga de datos e PostgreSQL/PostGIS y validación del modelo frente a sistemas reales como SIAAMETOC. En este marco, la distribución de horas dedicadas al desarrollo de este proyecto se presenta de la siguiente manera (Figura A1- 1):



**Figura A1- 1 Distribución de las horas dedicadas al proyecto por el alumno. Fuente: elaboración propia.**

A título orientativo, y tomando como referencia una tarifa técnica estándar de 25 €/hora, el coste del desarrollo alcanzaría los 10.000 euros, tal y como se puede ver en la Tabla A1- 1.

Siendo el sistema implementable, en una versión definitiva, en las unidades de la Armada, a esta cifra, habría que añadir los costes indirectos asociados al despliegue y mantenimiento de un entorno operativo (servidor, soporte y actualizaciones). Sin embargo, su arquitectura modular y basada en estándares permite una fácil replicabilidad en unidades navales sin necesidad de realizar desarrollos específicos adicionales, lo cual repercute positivamente en la eficiencia económica del sistema. Los costes del sistema por tarea desarrollada quedarían de la siguiente forma:

Fase del desarrollo	Horas dedicadas	Coste estimado (€)
Documentación técnica	37,6	940
Backend (Flask + API)	112,4	2810
Base de datos (PostgreSQL/PostGIS)	50	1250
Frontend SPA. (React.js)	100	2500
Validación y simulación	37,6	940
Validación (SIAAMETOC)	31,2	780
Redacción memoria y anexos	31,2	780
<b>TOTAL</b>	<b>400</b>	<b>10000</b>

**Tabla A1- 1 Desglose de costes por tarea del proyecto. Fuente. Propia.**

Finalmente, es ciertamente notable que el modelo podría generar “ahorros operativos” en la Armada al facilitar una evaluación más precisa del entorno METOC, evitando despliegues innecesarios en condiciones desfavorables y mejorando la seguridad de las operaciones. Esto permite, además, reducir los costes derivados de posibles incidencias o daños materiales por exposición a condiciones meteorológicas extremas no previstas.

Se concluye, que las implicaciones económicas del proyecto en materia de gastos se limitan al desarrollo de este, en función de las horas de trabajo dedicadas. La inversión inicial, podría considerarse considerable. Sin embargo, los costes posteriores se centran en tareas de mantenimiento sin excesivo gasto. Cabe señalar que, a medida que la aplicación comience a utilizarse, podrían detectarse errores o incidencias en el sistema que requieran corrección. Estas intervenciones puntuales implicarían un coste adicional que, por su naturaleza impredecible, no se ha incluido en el presupuesto estimado en esta memoria.

En cualquier caso, desde el punto de vista económico, este proyecto ofrece beneficios claros. La implementación de un sistema de evaluación de riesgos operacionales permite llevar a cabo un buen proceso de gestión de riesgo que minimice daños en sistemas, daños estructurales a unidades o daños humanos.

## A1.2 Implicaciones ambientales

El sistema propuesto no tiene un impacto directo sobre el medio ambiente, dado que se trata de una herramienta de evaluación y visualización de las condiciones ambientales sin interactuar físicamente con el entorno. Sin embargo, su utilidad en el marco ambiental se refleja podemos reflejar en todas aquellas operaciones navales a las que asiste, iniciando un proceso de mitigación de riesgos que previene situaciones y accidentes que puedan suponer un impacto ambiental dañino para el entorno. De esta forma, el sistema desarrollado aporta en el marco medioambiental:

- **Apoyo a la sostenibilidad operativa:** Como se ha explicado anteriormente, la selección de una resolución H3 demasiado baja puede generar pérdida de información crítica, mientras que una resolución muy alta puede saturar y ralentizar el procesamiento. Actualmente, esta selección depende exclusivamente del usuario y no se sugiere un nivel óptimo en función del tipo de operación o del área geográfica.
- **Reducción del riesgo de vertidos y accidentes marítimos:** Al evaluar el entorno METOC antes de ejecutar una operación naval, se minimiza la posibilidad de incidentes que puedan generar daños ambientales, como colisiones, encallamientos o vertidos de combustible.



Figura A1- 2 FAS en la mar bajo riesgo METOC marginal. Fuente: elaboración propia.

- **Planificación de operaciones con menor huella ambiental:** El sistema permite seleccionar ventanas temporales y zonas con condiciones más favorables, lo que puede traducirse en trayectorias de menor consumo de combustible y reducción de emisiones contaminantes.
- **Protección de ecosistemas marinos sensibles:** Al integrar datos geoespaciales y representar el riesgo con celdas H3, el sistema puede contribuir a evitar operaciones innecesarias en zonas marinas protegidas o hábitats críticos durante momentos críticos a nivel meteorológico y oceanográfico.
- **Favorecimiento del uso de predicción científica:** Fomentar el uso de herramientas tecnológicas basadas en datos oceanográficos y meteorológicos favorece una cultura de toma de decisiones más informada y respetuosa con el medio ambiente.

- **Apoyo a la sostenibilidad del medio marino en operaciones de largo plazo:** La integración de fuentes como MeteoGalia, promueve el uso de redes de observación científica sostenibles y el intercambio de datos abiertos, alineado con las políticas europeas de protección marina.

De esta forma, se puede concluir que este proyecto no solo favorece la automatización de la evaluación del riesgo en las operaciones navales con respecto a las condiciones meteorológicas y oceanográficas, sino que puede reducir el uso innecesario de recursos, así como disminuir una parte considerable de los riesgos derivados de las operaciones en el personal de la Armada, ya que su adopción como herramienta de apoyo al mando refuerza la cultura de prevención de riesgos en este entorno.

## ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Este trabajo de fin de grado ha permitido al autor reflexionar sobre las implicaciones éticas y sociales del uso de tecnología en operaciones militares, especialmente en el ámbito de la implementación de sistemas que automatizan procesos de ayuda a la toma de decisiones tácticas.

En este contexto, la automatización de estos procesos se presenta como una hoja de dos caras. Por un lado, como herramienta de automatización que mejore el rendimiento y suprima ineficiencias del proceso de gestión de riesgo, y por otro lado como una herramienta que sustituye la capacidad de análisis y de evaluación crítica del oficial de marina que emplee el sistema.

La existencia de este paradigma parece casi absurda por las evidentes ventajas que se obtienen de la implementación de un modelo como este. Sin embargo, evidencia el hecho de que cada vez más, los oficiales de la Armada cuentan con herramientas que automatizan evaluaciones que antes realizaban. Estas evaluaciones requerían de conocimientos, destreza y experiencia. Sin embargo, se plantea la pregunta de si suprimir estas evaluaciones “a mano” significan suprimir también ese conocimiento, esas habilidades para la evaluación crítica. Al fin y al cabo, el desuso de ciertas habilidades y formas de pensar llevan directamente a su olvido.

Sin embargo, ofreciendo otro enfoque podríamos decir que el uso de herramientas como esta lleva asociada una responsabilidad en cuanto a la confianza que deposita el oficial en la fiabilidad de los modelos de evaluación de riesgo automatizados. Pues, una incorrecta evaluación del riesgo METOC podría comprometer la seguridad no solo de la operación, si no del personal. Incluso conducir a decisiones inadecuadas en escenarios de alta exigencia operativa. Por tanto, es fundamental mantener una supervisión humana sobre las herramientas desarrolladas, garantizando que estas actúan como sistemas de apoyo y no de sustitución al mando. Esta supervisión requiere de esos conocimientos y destrezas mencionadas anteriormente.

Además, la fiabilidad del sistema no debe tomarse nunca como incorruptible, pues el uso de datos MetOcean de fuentes públicas, plantea cuestiones relacionadas con la veracidad, trazabilidad y responsabilidad de los datos integrados en el sistema. Pues esos datos, pueden ser manipulados y alterados como consecuencia de un acto externo para empobrecer nuestras capacidades de evaluación de riesgos operativos.

Desde un punto de vista social, este trabajo contribuye al avance de la innovación tecnológica dentro de las Fuerzas Armadas Españolas, promoviendo el uso de software libre y soluciones tecnológicas que mejoran la autonomía y reducen la dependencia de terceros países.

Finalmente, se destaca el compromiso del autor con el principio de transparencia tecnológica, reflejado en la documentación exhaustiva del código fuente (Anexo IV) y la modularidad del sistema, permitiendo su auditoría, mejora y evolución futura.

## ANEXO III: INSTALACIÓN, CONFIGURACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE INTERFAZ DE SIAAMETOC

Gracias a la colaboración del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM), ha sido posible instalar de forma local la aplicación SIAAMETOC-OM, un visor avanzado de condiciones ambientales marinas y meteorológicas orientado al apoyo en la toma de decisiones operacionales en el ámbito naval.

La instalación se llevó a cabo a través de un archivo ejecutable .exe facilitado directamente por el IHM, lo cual permitió disponer de una versión funcional de la herramienta en EL entorno Windows sin necesidad de conexión a servidores externos.

Junto con el instalador, se recibió un conjunto completo de archivos y recursos necesarios para el funcionamiento del sistema. Estos incluían tanto el código de la aplicación, como diversos scripts de procesamiento, archivos de configuración, ficheros de datos geoespaciales y material complementario para la generación y visualización de escenarios METOC.

En concreto, el IHM ha proporcionado una serie de carpetas comprimidas estructuradas por operación, que contenían los elementos esenciales para configurar y ejecutar cada escenario de evaluación. Entre otros, los elementos que contienen dichas carpetas son los siguientes:

- Archivos de predicción numérica (*forecast*) generados mediante modelos de alta resolución como WRF para condiciones atmosféricas o SWAN para simulación de oleaje en zonas costeras y portuarias.
- Datos de plataforma, relativos a las características y parámetros del buque o unidad implicada en la operación.
- Datos de batimetría.
- Datos de evaluación del riesgo operacional, con los límites definidos y sus umbrales de riesgo en función de la operación y plataforma.

Este conjunto de recursos permite emular de forma realista las condiciones ambientales esperadas en una zona y ventana temporal concreta. De esta forma, el IHM puede proveer a los usuarios de escenarios con datos preseleccionados en cuanto a las operaciones, puntos de control, variables del modelo de predicción numérica seleccionadas, etc.

Al ejecutar el programa se abre la siguiente ventana (Figura A3- 1):

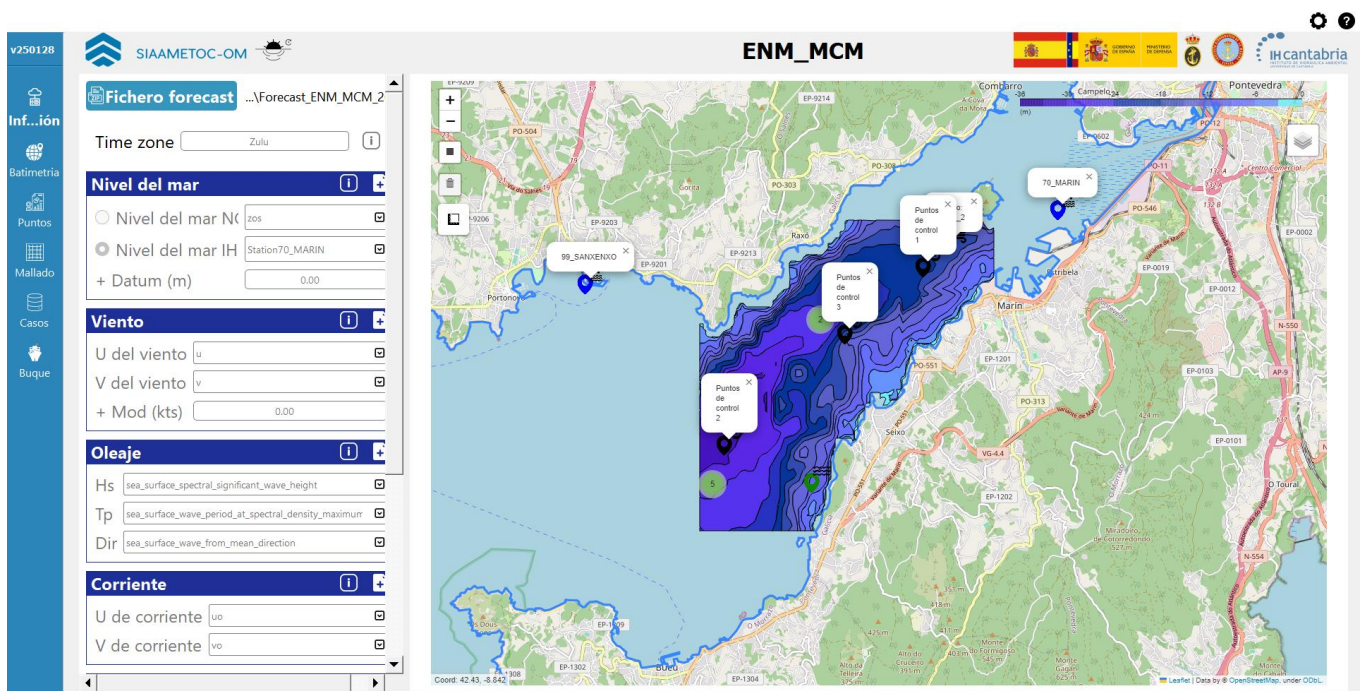


Figura A3- 1 Venta de inicio al ejecutar SIAAMETOC. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, desde aquí se accede a las funciones básicas de carga, creación y gestión de proyectos de SIAAMETOC. Entre las opciones encontradas se puede hacer lo siguiente:

- **Abrir un proyecto SIAAMETOC (Abrir):** Permite cargar un proyecto previamente generado que tenga ya un formato de carpeta estándar del sistema. Es decir, el escenario ya ha sido generado y se puede trabajar con él para llevar a cabo la evaluación.
- **Abrir un proyecto comprimido SIAAMETOC (Cargar):** Permite cargar un archivo comprimido (.zip) que contenga la estructura completa de un proyecto SIAAMETOC. El sistema está pensado para llevar a cabo al descompresión y lectura de los archivos. Esto, es muy útil para importar proyectos transferidos desde el IHM, facilitando la portabilidad de escenarios entre diferentes equipos y unidades.
- **Crear un proyecto SIAAMETOC a partir de datos (Crear):** Permite generar un nuevo proyecto desde cero utilizando los datos disponibles en local.
- **Por último, abrir el módulo *Ensembler* (*Ensembler*):** En nuestro caso se encuentra deshabilitado. Este modo de ejecución está orientado a combinar distintos modelos de predicción o ejecutar análisis de probabilidad a partir de múltiples escenarios.

Para cargar por primera vez un escenario, seleccionamos “Cargar”. Al pulsar, nos permite realizar una selección del archivo en cuestión. Pongamos el ejemplo de que cargamos en archivo “MCM\_ENM.zip” suministrado por el IHM. Se nos abre inmediatamente la siguiente ventana (Figura A3- 2):



**Figura A3- 2** Interfaz de la aplicación SIAAMETOC -OM para la evaluación METOC de operaciones MCM.  
Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, la interfaz presenta numerosos elementos que pasarán a explicarse a continuación para mejor comprensión del uso del este sistema durante la validación y comparación de ambos modelos:

- **Mapa central Leaflet:** es el núcleo visual del sistema y utiliza Leaflet *OpenStreetMap*. En él, se puede observar un área delimitada de estudio para el análisis del escenario operativo en cuestión. También, se pueden ver los “Puntos de control” tomados. Esta interfaz permite al usuario visualizar, una vez generados los “Casos de forzamiento”, la situación METOC *forecast* para la

zona seleccionada, pudiendo generar visualizaciones de la región codificada a color según el impacto.

- **Menú lateral izquierdo (sidebar azul):** En él, se pueden encontrar diferentes selecciones para configurar el entorno y preparar la evaluación de las operaciones seleccionadas:
  - **"Información":** en este submenú se puede cargar un fichero con todos los datos correspondientes a un *forecast* concreto. En nuestro caso, todas las opciones de este menú están deshabilitadas, sin embargo en él se pueden seleccionar los parámetros que definirán las condiciones meteorológicas y oceanográficas bajo las cuales se evaluará el impacto operacional y el modelo de predicción numérica para según qué unidades, entre otras cosas. Por otro lado, se puede seleccionar hora de inicio y final de la predicción meteorológica, y al final se encuentra la opción de “Generar Informe”, que genera un “Informe de Forzamiento” obteniendo la información de predicción de las variables seleccionadas para un modelo de predicción numérica concretos. En el caso actual, estos han sido suministrados por SIAAMETOC.
  - **“Batimetría”:** en este submenú se puede generar un informe de estudio batimétrico de una región para una plataforma en concreto, con una velocidad del barco en concreto, y en base a uno de los puntos de control que se pueden ver en el mapa. En el caso que nos ocupa, este módulo se encuentra desactivado por defecto.
  - **“Puntos de control”:** en este submenú se pueden visualizar y seleccionar puntos geográficos predefinidos sobre el mapa, a partir de los cuales se extraen los datos meteorológicos y oceanográficos proporcionados por los modelos de predicción numérica. Estos puntos permiten monitorizar y representar la evolución de variables METOC en dichas ubicaciones.
  - **“Mallado”:** en este submenú se permite acceder a la configuración del mallado espacial sobre el que se aplicarán los análisis de riesgo METOC. Se puede configurar el mallado principal y la malla anidada, y permite definir la resolución espacial para generar las celdas en las que dividen el área de estudio. En este caso, los datos de mallado ya vienen dados en el archivo importado del IHM.
  - **“Buque”:** en este submenú se encuentra el módulo en el que se pueden definir o seleccionar los diferentes tipos de buques anfibios para llevar a cabo una evaluación de impacto en operaciones anfibias, calculando, entre otras cosas, la altura de la ola en el dique del buque cuando esté se encuentra en condición de lastrado. En el caso que nos ocupa, este módulo es irrelevante.
  - **“Casos”:** este es el submenú en el que podremos generar los informes de evaluación de riesgos operacionales que permitirán realizar la comparación con nuestro sistema. módulo de generación y ejecución de casos de forzamiento dentro del sistema SIAAMETOC. En él, se puede encontrar un módulo de generación y ejecución de casos de forzamiento en el que se permite seleccionar la estación o punto marítimo desde el cual se extraen los datos de nivel del mar, la fecha de inicio, la fecha de fin y la cadencia horaria (es decir, el intervalo con el que se generarán los casos de forzamiento) y el botón “generar casos de forzamiento” que genera automáticamente una serie de casos para el modelo, dividiendo el intervalo temporal en bloques según la cadencia establecida. Una vez generados los casos el submenú queda de la siguiente forma:

**Forzamiento**

Punto de Nivel del

M.Impacto con corr

Fecha Inicio

Fecha Fin

Cadencia (H)

**Generar casos de forzamiento**

	Hs	Tp	Dir	Marea	MW	D
20250315_11	1.26	12.12	263.20	0.88	5.59	25
20250315_12	1.26	12.12	263.30	1.46	5.59	25
20250315_13	1.22	12.12	263.50	2.17	5.59	25

Num. CPU **Ejecutar to** **Resultad**

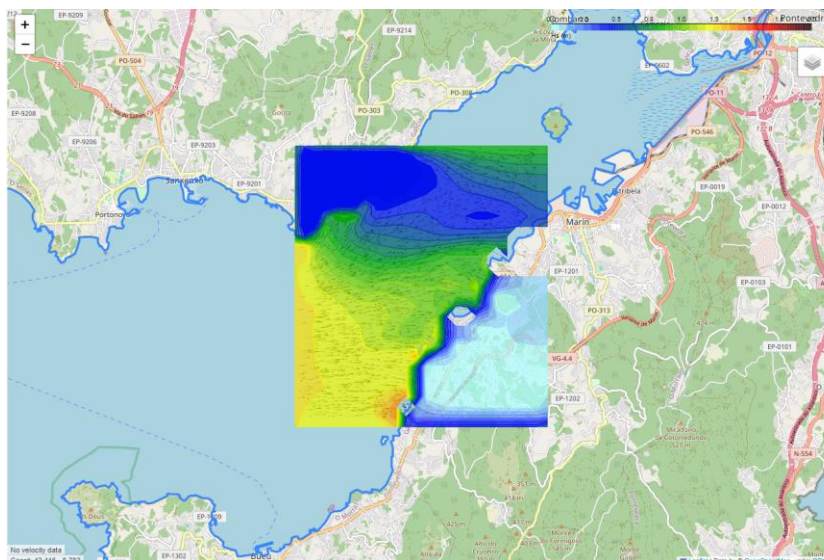
Oleaje     Corriente     Viento     MSI

**Ver**

**Generar informe**

**Figura A3- 3** Submenú “casos” de la aplicación SIAAMETOC -OM para generar casos de forzamiento para evaluar el impacto sobre operaciones MCM. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, tras generar los casos de forzamiento quedan cargadas las diferentes ventanas horarias seleccionadas y los valores de las variables ambientales para cada una de ellas. Por otro lado, se nos habilitan diferentes opciones de ejecución y visualización de los resultados. En primer lugar, se nos habilita la opción de escoger de visualizar las diferentes variables ambientales seleccionadas; (oleaje, corriente, viento, etc.) al seleccionar una de estas opciones se visualiza en el mapa de la interfaz una simulación de las condiciones de esa variable para el área seleccionada incluyendo una escala de magnitud a color (Figura A3- 4):



**Figura A3- 4** campo vectorial de viento sobre la Ría de Pontevedra en la aplicación SIAAMETOC -OM. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, a través del desplegable con el tipo de operación, es posible seleccionar la operación cuyo impacto METOC se desea evaluar con todos estos parámetros ambientales. Al pulsar el icono “Ver”, se mostrará definitivamente el mapa de impacto codificado con los

colores verde, amarillo y rojo para la operación seleccionada. De esta forma, se obtienen el mismo producto que el modelo de evaluación desarrollado en este trabajo. Además, se permite al usuario generar un informe que concentra la evaluación de todas las operaciones del módulo correspondiente (MCM, Hidrográficas, etc.)

Con esta configuración, la aplicación SIAAMETOC -OM permite cargar diferentes escenarios y según la unidad desplegada y la misión a desempeñar. Permite, hacer análisis de riesgos METOC a partir de variables meteorológicas y oceanográficas críticas para ciertas operaciones navales: viento, oleaje, corrientes, batimetría. De esta forma, permite estimar la viabilidad o peligrosidad de las operaciones en función de datos medidos o modelizados.

## ANEXO IV: CÓDIGOS Y ARCHIVOS DE TEXTO

### A1.3 Códigos y archivos integrados en el *backend*

En este bloque aparecen los distintos códigos empleados en el *backend* para la recepción de peticiones del *frontend*, la comunicación con el Sistema Big Data, el análisis y evaluación de los datos MetOcean y la generación de una respuesta a enviar al *frontend*.

#### A3.3.1 *Servidor Flask y gestión de componentes del backend (Main.py)*

```

import os
import psycopg2
from psycopg2 import sql
import h3
from shapely.geometry import Polygon
from flask import Flask, request, jsonify
from flask_cors import CORS
import queries
import descargas_csv
import procesador_colores

app = Flask(__name__)
CORS(app, resources={r"/*": {"origins": "*"}})

@app.route("/api/analizar", methods=["POST"])
def analizar():
    data = request.json
    operacion = data.get("operacion")
    date_predicted = data.get("date_predicted")
    h3cells = data.get("h3cells", [])
    user_res = data.get("resolucion")

    if not operacion or not date_predicted or not h3cells:
        return jsonify({"error": "Faltan datos en la solicitud"}), 400

    parametros = descargas_csv.obtener_parametros_operacion(operacion)
    resultados_por_celda = {}

    for parametro in parametros:
        tabla = parametro["tabla"]
        variable = parametro["variable"]
        datos = queries.consultar_variable(
            tabla,
            variable,
            date_predicted,
            user_res,
            h3cells)

    for variable, datos in datos.items():
        for dato in datos:
            h3_cell = dato["h3_cell"]
            valor = float(dato["valor"]) if dato["valor"] is not None else None
            color = procesador_colores.obtener_color(operacion, variable, valor)
            if h3_cell not in resultados_por_celda:
                resultados_por_celda[h3_cell] = []

            resultados_por_celda[h3_cell].append({
                "variable": variable,
                "valor": valor,
                "color": color})

prioridad_colores = {"red": 3, "yellow": 2, "green": 1}

```

```
color_final_por_celda = {}
final_por_celda = {}
for h3_cell, detalles in resultados_por_celda.items():
    color_final =
        max(detalles,
            key=lambda d: prioridad_colores.get(d["color"], 0))
    color_final_por_celda[h3_cell] = color_final["color"]
    final_por_celda[h3_cell] = {
        "variable": color_final["variable"],
        "color": color_final["color"]}

print("Datos enviados al frontend:", final_por_celda)
return jsonify(final_por_celda)

if __name__ == "__main__":
    app.run(debug=True, host="0.0.0.0", port=5000)
```

### A3.3.2 Descarga y extracción e datos del archivo “operaciones.csv” (descargas\_csv.py)

```
import os
import pandas as pd
import csv

csv_path = r"C:\(dirección local)\FlaskImpactMatrix\backend\operaciones.csv"

def obtener_parametros_operacion(operacion):
    parametros = []
    with open(csv_path, newline='', encoding="utf-8") as csvfile:
        reader = csv.reader(csvfile, delimiter=';')
        for row in reader:
            if row[0] == operacion:
                parametros.append({
                    "tabla": row[1],
                    "variable": row[2],
                    "val1": float(row[3].replace(",", ".")),
                    "val2": float(row[4].replace(",", ".")),
                    "color": row[5]
                })
    return parametros
```

### A3.3.3 Operaciones de asignación de color según los rangos de impacto definidos (procesador\_colores.py)

```
import os
import descargas_csv

def obtener_color(operacion, variable, valor):
    parametros = descargas_csv.obtener_parametros_operacion(operacion)
    if not parametros:
        print(f"Advertencia: No se encontraron parámetros para {operacion}")
        return "Sin color"

    for parametro in parametros:
        if parametro["variable"] == variable:
            if valor is not None and parametro["val1"] <= valor <
parametro["val2"]:
                print(f"Color asignado: {parametro['color']}")
                return parametro["color"]
```

```
return "Sin color"
```

### A3.3.4 Consultas a la base de datos Poseidon por variable y tabla según corresponda (queries.py)

```
import os
import psycopg2
from psycopg2 import sql
import h3
from shapely.geometry import Polygon
from shapely.geometry import MultiPolygon
from shapely.wkt import dumps
from shapely.ops import unary_union
import numpy as np

def connect_to_db():
    return psycopg2.connect(
        dbname="Poseidon",
        user="postgres",
        password="_____",
        host="localhost",
        port="5432")

def h3_to_wkt(h3cells):
    polygons = [Polygon([(lon, lat) for lat, lon in h3.cell_to_boundary(cell)])]
    for cell in h3cells:
        unified_polygon = unary_union(polygons)
        return dumps(unified_polygon)
    polygon_wkt = h3_to_wkt(h3cells)

def consultar_variable(tabla, variable, date_predicted, user_res, h3cells):
    conn = connect_to_db()
    cursor = conn.cursor()

    if user_res == 6:
        polygon_wkt = h3_to_wkt(h3cells)
        print("Polígono WKT generado:", polygon_wkt)

        if "meteogalicia_wrf_forecast_table" in tabla:
            query = f"""
                SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
                "{tabla}".geometry_id,
                "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
            FROM "{tabla}"
            JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
            ON "{tabla}".geometry_id =
            "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
            WHERE ST_Contains(ST_GeomFromText(%s, 4326),
            ST_Centroid("meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry))
            AND "{tabla}".date_predicted = %s
            GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
            "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
            """
            cursor.execute(query, (polygon_wkt, date_predicted))

        else:
            query = f"""
                SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS
                "{variable}", "{tabla}".geometry_id,
                "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
            FROM "{tabla}"""
```

```

        JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
        ON "{tabla}".geometry_id =
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
        WHERE ST_Contains(ST_GeomFromText(%s, 4326),
        ST_Centroid("meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry))
        AND "{tabla}".date_predicted = %s
        AND "{tabla}"."{variable}" >= 0 AND "{tabla}"."{variable}" <= 15
        GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
        """
        cursor.execute(query, (polygon_wkt, date_predicted))

elif user_res == 7:

    if "meteogalicia_wrf_forecast_table" in tabla:
        query = f"""
        SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
        "{tabla}".geometry_id,
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
        FROM "{tabla}"
        JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
        ON "{tabla}".geometry_id =
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
        WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell = ANY(%s)
        AND "{tabla}".date_predicted = %s
        GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
        """
        cursor.execute(query, (list(h3cells), date_predicted))

    else:
        polygon_wkt = h3_to_wkt(h3cells)
        query = f"""
        SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
        "{tabla}".geometry_id,
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
        FROM "{tabla}"
        JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
        ON "{tabla}".geometry_id =
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
        WHERE ST_Contains(ST_GeomFromText(%s, 4326),
        ST_Centroid("meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry))
        AND "{tabla}".date_predicted = %s
        AND "{tabla}"."{variable}" >= 0 AND "{tabla}"."{variable}" <= 15
        GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
        """
        cursor.execute(query, (polygon_wkt, date_predicted))

elif user_res == 8:
    if "meteogalicia_wrf_forecast_table" in tabla:
        parent_cells = {h3.cell_to_parent(cell, 7) for cell in h3cells}
        query = f"""
        SELECT AVG ("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
        "{tabla}".geometry_id,
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
        FROM "{tabla}"
        JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
        ON "{tabla}".geometry_id =
        "meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id

```

```

WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell = ANY(%s)
AND "{tabla}".date_predicted = %s
GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
"""
cursor.execute(query, (list(parent_cells), date_predicted))

else:
query = f"""
SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
"{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
FROM "{tabla}"
JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
ON "{tabla}".geometry_id =
"meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell = ANY(%s)
AND "{tabla}".date_predicted = %s
AND "{tabla}"."{variable}" >= 0 AND "{tabla}"."{variable}" <= 15
GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
"""
cursor.execute(query, (list(h3cells), date_predicted))

elif user_res in [9, 10]:
if "meteogalicia_wrf_forecast_table" in tabla:
parent_cells = {h3.cell_to_parent(cell, 7) for cell in h3cells}
query = f"""
SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
"{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
FROM "{tabla}"
JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
ON "{tabla}".geometry_id =
"meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell = ANY(%s)
AND "{tabla}".date_predicted = %s
GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
"""
cursor.execute(query, (list(parent_cells), date_predicted))

else:
parent_cells = {h3.cell_to_parent(cell, 8) for cell in h3cells}
query = f"""
SELECT AVG("{tabla}"."{variable}") AS "{variable}",
"{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell
FROM "{tabla}"
JOIN "meteogalicia_geometria_forecast_table"
ON "{tabla}".geometry_id =
"meteogalicia_geometria_forecast_table".geometry_id
WHERE "meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell = ANY(%s)
AND "{tabla}".date_predicted = %s
AND "{tabla}"."{variable}" >= 0 AND "{tabla}"."{variable}" <= 15
GROUP BY "{tabla}".geometry_id,
"meteogalicia_geometria_forecast_table".h3_cell;
"""
cursor.execute(query, (list(parent_cells), date_predicted))

rows = cursor.fetchall()
datos = {variable: []}
for row in rows:

```

```

datos[variable].append({
    "valor": row[0],
    "h3_cell": row[2],
})

if user_res == 6:
    valores_por_celda = {cell: [] for cell in h3cells}
    for row in datos[variable]:
        h3_child = row["h3_cell"]
        valor = row["valor"]
        parent_cell = h3.cell_to_parent(h3_child, 6)
        if parent_cell in valores_por_celda:
            valores_por_celda[parent_cell].append(valor)

    datos[variable] = []
    for cell, valores in valores_por_celda.items():
        if valores:
            datos[variable].append({
                "valor": round(np.mean(valores), 4),
                "h3_cell": cell
            })
        else:
            datos[variable].append({
                "valor": None,
                "h3_cell": cell
            })

if user_res == 7:
    valores_por_celda = {cell: [] for cell in h3cells}
    for row in datos[variable]:
        h3_child = row["h3_cell"]
        valor = row["valor"]
        parent_cell = h3.cell_to_parent(h3_child, 7) if
h3.get_resolution(h3_child) == 8 else h3_child
        if parent_cell in valores_por_celda:
            valores_por_celda[parent_cell].append(valor)

    datos[variable] = []
    for cell, valores in valores_por_celda.items():
        if valores:
            datos[variable].append({
                "valor": round(np.mean(valores), 4),
                "h3_cell": cell
            })
        else:
            datos[variable].append({
                "valor": None,
                "h3_cell": cell
            })

if user_res == 8:
    valores_por_celda = {cell: [] for cell in h3cells}
    for row in datos[variable]:
        h3_original = row["h3_cell"]
        valor = row["valor"]
        if h3.get_resolution(h3_original) == 8:
            if h3_original in valores_por_celda:
                valores_por_celda[h3_original].append(valor)
        else:
            child_cells = h3.cell_to_children(h3_original, 8)

```

```

        for child in child_cells:
            if child in valores_por_celda:
                valores_por_celda[child].append(valor)

datos[variable] = []
for cell, valores in valores_por_celda.items():
    if valores:
        datos[variable].append({
            "valor": round(np.mean(valores), 4),
            "h3_cell": cell
        })
    else:
        datos[variable].append({
            "valor": None,
            "h3_cell": cell
        })

if user_res in [9, 10]:
    valores_por_celda = {cell: [] for cell in h3cells}
    for row in datos[variable]:
        h3_original = row["h3_cell"]
        valor = row["valor"]
        resolution = h3.get_resolution(h3_original)
        if resolution < user_res:
            child_cells = h3.cell_to_children(h3_original, user_res)
        else:
            continue
    for child in child_cells:
        if child in valores_por_celda:
            valores_por_celda[child].append(valor)

datos[variable] = []
for cell, valores in valores_por_celda.items():
    if valores:
        datos[variable].append({
            "valor": round(np.mean(valores), 4),
            "h3_cell": cell
        })
    else:
        datos[variable].append({
            "valor": None,
            "h3_cell": cell
        })

cursor.close()
conn.close()
return datos

```

**A3.3.5** Archivo “operaciones.csv” con rangos de impacto y colores asignados por operación y variable.

```

operacion;tabla;variable;val1_1;val2_1;color
ASUW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
ASUW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;2,5;Amarillo
ASUW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;100;Rojo
ASUW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;0;2,5;Verde
ASUW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;2,5;17,5;Amarillo
ASUW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;17,5;1000;Rojo
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;4;Amarillo
ASW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
AAW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;2,5;Verde

```

```
AAW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;6;Amarillo
AAW;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;6;100;Rojo
AAW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;0,2,5;Verde
AAW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;2,5;17,5;Amarillo
AAW;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;17,5;1000;Rojo
FPB;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
FPB;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;20,58;Amarillo
FPB;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;20,58;100;Rojo
FPB;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,2,5;Verde
FPB;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;4;Amarillo
FPB;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
SMALL BOATS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;5,14;Verde
SMALL BOATS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;5,14;10,28;Amarillo
SMALL BOATS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;10,28;100;Rojo
SMALL BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;0,5;Verde
SMALL BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,5;2,5;Amarillo
SMALL BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;100;Rojo
FIAC (ASYW);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;5,14;Verde
FIAC (ASYW);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;5,14;10,8;Amarillo
FIAC (ASYW);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;10,8;100;Rojo
FIAC (ASYW);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;0,5;Verde
FIAC (ASYW);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,5;1,25;Amarillo
FIAC (ASYW);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;100;Rojo
MIO BOARDING;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;4000;200000;Verde
MIO BOARDING;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;2000;4000;Amarillo
MIO BOARDING;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;2000;Rojo
MIO BOARDING;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;7,72;Verde
MIO BOARDING;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;7,72;12,86;Amarillo
MIO BOARDING;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;100;Rojo
MIO BOARDING;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
MIO BOARDING;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;2,5;Amarillo
MIO BOARDING;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;100;Rojo
RAS FAS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;10,29;Verde
RAS FAS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;10,29;15,43;Amarillo
RAS FAS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;15,43;100;Rojo
RAS FAS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,2,5;Verde
RAS FAS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;4;Amarillo
RAS FAS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
ROV OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;0,5;Verde
ROV OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,5;1,25;Amarillo
ROV OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;100;Rojo
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;0,2,5;Verde
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;2,5;12,5;Amarillo
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;12,5;100;Rojo
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;rh;0;80;Verde
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;rh;80;90;Amarillo
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;rh;90;100;Rojo
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;4000;200000;Verde
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;600;4000;Amarillo
EO IR;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;600;Rojo
VIS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;6000;200000;Verde
VIS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;3500;6000;Amarillo
VIS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;3500;Rojo
VIS;meteogalicia_wrf_forecast_table;cft;0;50;Verde
VIS;meteogalicia_wrf_forecast_table;cft;50;50;Amarillo
VIS;meteogalicia_wrf_forecast_table;cft;50;100;Rojo
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,2,5;Verde
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;4;Amarillo
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
```

```
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;18;Amarillo
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;18;100;Rojo
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;3500;200000;Verde
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;1000;3500;Amarillo
FLT OPS CARRIER;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;1000;Rojo
CVS STOVL;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;2,5;Verde
CVS STOVL;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;6;Amarillo
CVS STOVL;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;6;100;Rojo
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;18;Amarillo
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;18;100;Rojo
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;5000;200000;Verde
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;1000;5000;Amarillo
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;1000;Rojo
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;-10;30;Verde
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;30;35;Amarillo
CVS STOVL;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;35;100;Rojo
HELO FLT OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;2,5;Verde
HELO FLT OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;4;Amarillo
HELO FLT OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
HELO FLT OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
HELO FLT OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;15,43;Amarillo
HELO FLT OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;15,43;100;Rojo
HELO FLT OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;4000;200000;Verde
HELO FLT OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;2000;4000;Amarillo
HELO FLT OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;2000;Rojo
MPA/ASW SONOBUOYS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
MPA/ASW SONOBUOYS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;18;Amarillo
MPA/ASW SONOBUOYS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;18;100;Rojo
MPA/ASW SONOBUOYS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;2,5;Verde
MPA/ASW SONOBUOYS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;4;Amarillo
MPA/ASW SONOBUOYS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;4;100;Rojo
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;0;2,5;Verde
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;2,5;12,5;Amarillo
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;prec;12,5;100;Rojo
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;0;30;Verde
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;30;35;Amarillo
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;35;100;Rojo
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;-6;0;Verde
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;-26;-6;Amarillo
INFANTRY;meteogalicia_wrf_forecast_table;temp;-100;-26;Rojo
AIRBORNE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;3000;200000;Verde
AIRBORNE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;2000;3000;Amarillo
AIRBORNE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;2000;Rojo
AIRBORNE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;wind_gust;0;5,14;Verde
AIRBORNE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;wind_gust;5,14;6,69;Amarillo
AIRBORNE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;wind_gust;6,69;100;Rojo
LCM NAVIGATION;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;1852;200000;Verde
LCM NAVIGATION;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;926;1852;Amarillo
LCM NAVIGATION;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;926;Rojo
LCM NAVIGATION;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
LCM NAVIGATION;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;2,5;Amarillo
LCM NAVIGATION;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;15;Rojo
LCM NAVIGATION;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
LCM NAVIGATION;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;18;Amarillo
LCM NAVIGATION;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;18;100;Rojo
HELO OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
HELO OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;20,58;Amarillo
HELO OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;20,58;100;Rojo
HELO OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;1600;200000;Verde
HELO OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;800;1600;Amarillo
HELO OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;800;Rojo
LOW RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;1000;200000;Verde
```

```
LOW RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;800;1600;Amarillo
LOW RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;800;Rojo
HIGH RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;6000;200000;Verde
HIGH RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;3500;6000;Amarillo
HIGH RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;3500;Rojo
HIGH RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;cft;0;50;Verde
HIGH RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;cft;50;50;Amarillo
HIGH RECCE OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;cft;50;100;Rojo
APCLO APCMO;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;8000;200000;Verde
APCLO APCMO;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;3000;8000;Amarillo
APCLO APCMO;meteogalicia_wrf_forecast_table;visibility;0;3000;Rojo
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1;Verde
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1;1,5;Amarillo
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,5;100;Rojo
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;tm01;0;10;Verde
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_swan_forecast_table;tm01;10;100;Amarillo
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;5,14;Verde
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;5,14;7,72;Amarillo
HOIST LOW BOATS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;7,72;100;Rojo
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1;Verde
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1;1,5;Amarillo
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,5;100;Rojo
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_swan_forecast_table;tm01;0;10;Verde
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_swan_forecast_table;tm01;10;1000;Amarillo
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;5,14;Verde
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;5,14;7,72;Amarillo
BATHYMETRY (BOATS);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;7,72;100;Rojo
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,5;Verde
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,5;2;Amarillo
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2;100;Rojo
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_swan_forecast_table;tm01;10;1000;Verde
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_swan_forecast_table;tm01;0;10;Amarillo
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;12,86;Verde
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;12,86;18;Amarillo
BATHYMETRY (BBHH);meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;18;100;Rojo
HUNTING OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;1,25;Verde
HUNTING OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;2,5;Amarillo
HUNTING OPS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;2,5;100;Rojo
HUNTING OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;7,72;Verde
HUNTING OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;7,72;14,9;Amarillo
HUNTING OPS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;14,9;100;Rojo
MIW EOD DIVERS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0;0,5;Verde
MIW EOD DIVERS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;0,5;1,25;Amarillo
MIW EOD DIVERS;meteogalicia_swan_forecast_table;hs;1,25;100;Rojo
MIW EOD DIVERS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;0;7,72;Verde
MIW EOD DIVERS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;7,72;10,8;Amarillo
MIW EOD DIVERS;meteogalicia_wrf_forecast_table;mod;10,8;100;Rojo
```

## A1.4 Códigos y archivos integrados en el *frontend*.

En este bloque aparecen los distintos códigos empleados en el *frontend* para la generación de la SPA desarrollada en React, permitiendo la interacción del usuario para seleccionar los parámetros de la evaluación operativa, generando celdas y enviando peticiones del *backend*. Recibe la respuesta y renderiza de forma automática las celdas generadas para la representación del impacto en código de colores.

### A3.4.1 Generación de la aplicación y renderización de los componentes de la interfaz (App.js)

```
import React, { useState } from 'react';
import './App.css';
import Map from './components/Map';
import Sidebar from './components/Sidebar';

function App() {
  const [canDrawRectangle, setCanDrawRectangle] = useState(false);
  const [resolution, setResolution] = useState(10);
  const [hexagons, setHexagons] = useState([]);
  const [rectangle, setRectangle] = useState(null);
  const [visibleHexagons, setVisibleHexagons] = useState([]);
  const [cellColors, setCellColors] = useState({});

  const handleReset = () => {
    setHexagons([]);
    setRectangle(null);
    setVisibleHexagons([]);
    setCanDrawRectangle(false);
    setCellColors({});
  };

  return (
    <div className="App">
      <h1 className="main-title"> Evaluación METOC de Riesgos Operacionales </h1>
      <div style={{ display: 'flex' }}>
        <Map
          canDrawRectangle={canDrawRectangle}
          setCanDrawRectangle={setCanDrawRectangle}
          resolution={resolution}
          hexagons={hexagons}
          setHexagons={setHexagons}
          rectangle={rectangle}
          setRectangle={setRectangle}
          visibleHexagons={visibleHexagons}
          setVisibleHexagons={setVisibleHexagons}
          cellColors={cellColors}
        />
        <Sidebar
          setCanDrawRectangle={setCanDrawRectangle}
          setResolution={setResolution}
          handleReset={handleReset}
          hexagons={hexagons}
          cellColors={cellColors}
          setCellColors={setCellColors}
        />
      </div>
    </div>
  );
}

export default App;
```

#### A3.4.2 *Renderización y componentes del menú lateral (Sidebar.js)*

```
import React, { useState } from 'react';
import DatePicker from 'react-datepicker';
import "react-datepicker/dist/react-datepicker.css";
import Select from 'react-select';

const Sidebar = ({ setCanDrawRectangle, setResolution, handleReset, hexagons,
fetchImpactData, setCellColors }) => {
  const [startDate, setStartDate] = useState(null);
  const [selectedOption0, setSelectedOption0] = useState(null);
```

```

const [selectedResolution, setSelectedResolution] = useState(null);
const [selectedOptionH, setSelectedOptionH] = useState(null);
const [formError, setFormError] = useState('');

const optionsOperacion = [
  { value: 'ASUW', label: 'ASUW' },
  { value: 'ASW', label: 'ASW' },
  { value: 'AAW', label: 'AAW' },
  { value: 'FPB', label: 'FPB' },
  { value: 'SMALL BOATS', label: 'SMALL BOATS' },
  { value: 'FIAC (ASYW)', label: 'FIAC (ASYW)' },
  { value: 'MIO BOARDING', label: 'MIO: BOARDING' },
  { value: 'RAS FAS', label: 'RAS/FAS' },
  { value: 'EO IR', label: 'JISR OPS: EO IR' },
  { value: 'VIS', label: 'JISR OPS: VIS' },
  { value: 'FLT OPS CARRIER', label: 'CARRIER VESSEL: FLT OPS' },
  { value: 'CVS STOVL', label: 'CARRIER VESSEL: STOVL' },
  { value: 'HELO FLT OPS', label: 'GENERIC HELO FLT OPS' },
  { value: 'MPA/ASW SONOBUOYS', label: 'SONOBUOYS WITH MPA' },
  { value: 'INFANTRY', label: 'AMPH: INFANTRY' },
  { value: 'AIRBORNE OPS', label: 'AMPH: AIRBORNE OPS' },
  { value: 'LCM NAVIGATION', label: 'AMPH: LCM NAVIGATION' },
  { value: 'HELO OPS', label: 'AIROPS: HELO OPS' },
  { value: 'LOW RECCE OPS', label: 'AIROPS: LOW RECCE OPS' },
  { value: 'HIGH RECCE OPS', label: 'AIROPS: HIGH RECCE' },
  { value: 'APCLO APCMO', label: 'AIROPS: APCLO/APCMO' },
  { value: 'HOIST LOW BOATS', label: 'HOIST/LOW BOATS' },
  { value: 'BATHYMETRY (BOATS)', label: 'BATHYMETRY (BOATS)' },
  { value: 'BATHYMETRY (BBHH)', label: 'BATHYMETRY (BBHH)' },
  { value: 'HUNTING OPS', label: 'MIW: HUNTING OPS' },
  { value: 'MIW EOD DIVERS', label: 'MIW: EOD DIVERS' },
  { value: 'ROV OPS', label: 'MIW: ROV OPS' }
];

const resolutionOptions = Array.from({ length: 5 }, (_, i) => ({
  value: i + 6,
  label: `${i + 6}`
}));

const horaOptions = Array.from({ length: 24 }, (_, i) => ({
  value: i + 1,
  label: `${i + 1}:00`
}));

const handleAccept = () => {
  if (!startDate || !selectedOptionO || !selectedOptionH ||
    !selectedResolution) {
    setFormError('Por favor, completa todos los campos.');
```

setCanDrawRectangle(false);

**return;**

```

  }
  setCanDrawRectangle(true);
  setResolution(selectedResolution.value);
  setFormError('');
};

const isFormValid = startDate && selectedOptionO && selectedOptionH &&
selectedResolution;

const handleSendToBackend = () => {
```

```
if (!startDate || !selectedOptionH) {
  setFormError('Por favor, selecciona una fecha y una hora.');
```

```
  return;
}
const dateUTC = new Date(startDate);
const selectedHour = parseInt(selectedOptionH.value);
dateUTC.setUTCHours(selectedHour, 0, 0, 0);
const parisTime = new Intl.DateTimeFormat("en-US", {
  timeZone: "Europe/Paris",
  year: "numeric",
  month: "2-digit",
  day: "2-digit",
  hour: "2-digit",
  minute: "2-digit",
  second: "2-digit",
  hour12: false
}).formatToParts(dateUTC);
const year = parisTime.find((p) => p.type === "year").value;
const month = parisTime.find((p) => p.type === "month").value;
const day = parisTime.find((p) => p.type === "day").value;
const hour = parisTime.find((p) => p.type === "hour").value;
const minute = parisTime.find((p) => p.type === "minute").value;
const second = parisTime.find((p) => p.type === "second").value;
const date_predicted = `${year}-${month}-${day}
  ${hour}:${minute}:${second}`;

const requestData = {
  operacion: selectedOptionO.value,
  date_predicted: date_predicted,
  resolucion: selectedResolution.value,
  h3cells: hexagons,
};

fetch("http://localhost:5000/api/analizar", {
  method: "POST",
  headers: {
    "Content-Type": "application/json"
  },
  body: JSON.stringify(requestData)
})
.then(response => {
  if (!response.ok) throw new Error(`HTTP Error: ${response.status}`);
  return response.json();
})
.then(data => {
  console.log("Respuesta del backend:", data);
  setCellColors({...data});
})
.catch(error => console.error("Error al enviar datos:", error));
};

return (
  <div style={{
    backgroundColor: 'white',
    padding: '20px',
    width: '300px',
    position: 'fixed',
    right: 0,
    top: 0,
    height: '100vh',
    boxShadow: '-2px 0 5px rgba(0, 0, 0, 0.2)',
    overflowY: 'auto',
    maxHeight: '100vh'
  }}

```

```

    }}>

    <h3>Selecciona fecha (UTC)</h3>
    <div>
      <label>Fecha de inicio:</label>
      <DatePicker
        selected={startDate}
        onChange={(date) => setStartDate(date)}
        selectsStart
        startDate={startDate}
        dateFormat="dd/MM/yyyy"
      />
    </div>

    <h3>Selecione hora UTC</h3>
    <div>
      <label>Hora de inicio:</label>
      <Select
        value={selectedOptionH}
        onChange={setSelectedOptionH}
        options={horaOptions}
      />
    </div>

    <h3>Selecciona una operación</h3>
    <Select
      value={selectedOptionO}
      onChange={setSelectedOptionO}
      options={optionsOperacion}
    />

    <h3>Selecciona la resolución</h3>
    <Select
      value={selectedResolution}
      onChange={setSelectedResolution}
      options={resolutionOptions}
    />

    {formError && <p style={{color: 'red'}}>{formError}</p>}

    <div style={{width: '280px', padding: '10px', background: '#f0f0f0'}}>
      <button onClick={handleAccept} style={{marginTop: '20px'}}
        disabled={!isFormValid}>Activar Dibujo</button>
      <button onClick={handleReset} style={{marginTop: '20px'}}
        disabled={!isFormValid}>Reset</button>
      <button onClick={handleSendToBackend} style={{marginTop: '20px'}}
        disabled={!hexagons || hexagons.length === 0}>Consultar
        impacto</button>
    </div>
  </div>
);
};

export default Sidebar;

```

### A3.4.3 Renderización y componentes del mapa Leaflet.js (Map.js)

```

import React, { useEffect, useState } from 'react';
import { MapContainer, TileLayer, FeatureGroup, Polygon } from 'react-
leaflet';

```

```
import "leaflet/dist/leaflet.css";
import h3 from "h3-js";
import { cellToBoundary, polygonToCells } from "h3-js";
import { EditControl } from 'react-leaflet-draw';
import 'leaflet-draw/dist/leaflet.draw.css';

const Map = ({ canDrawRectangle,
  setCanDrawRectangle,
  resolution,
  hexagons,
  setHexagons,
  rectangle,
  setRectangle,
  visibleHexagons,
  setVisibleHexagons,
  cellColors }) => {
  const center = [42.4, -8.95];

  useEffect(() => {
    if (hexagons.length > 0) {
      setVisibleHexagons([]);
      let index = 0;
      const interval = setInterval(() => {
        if (index < hexagons.length) {
          setVisibleHexagons((prev) => [...prev, hexagons[index]]);
          index++;
        } else {
          clearInterval(interval);
        }
      }, 5);
      return () => clearInterval(interval);
    }
  }, [hexagons]);

  const handleReset = () => {
    console.log("Reseteando...");
    setRectangle(null);
    setHexagons([]);
    setVisibleHexagons([]);
    setCanDrawRectangle(true);
    setCellColors({});
  };

  const generateH3Cells = (bounds, resolution) => {
    const [[southWestLat, southWestLng], [northEastLat, northEastLng]] = [
      [bounds.getSouthWest().lat, bounds.getSouthWest().lng],
      [bounds.getNorthEast().lat, bounds.getNorthEast().lng],
    ];
    const polygon = [
      [southWestLat, southWestLng],
      [northEastLat, southWestLng],
      [northEastLat, northEastLng],
      [southWestLat, northEastLng],
    ];
    return polygonToCells(polygon, resolution);
  };

  const colorMap = {
    "Rojo": "#FF0000",
    "Amarillo": "#FFFF00",
    "Verde": "#008000"
  };
};
```

```

const handleCreated = (e) => {
  if (!canDrawRectangle) return;
  const {layerType, layer} = e;
  if (layerType === "rectangle") {
    const bounds = layer.getBounds();
    setRectangle(bounds);
    setCanDrawRectangle(false);
    const h3Cells = generateH3Cells(bounds, resolution);
    setHexagons(h3Cells);
  }
};

return (
  <div style={{width: "100%", height: "100%"}}>
    <MapContainer
      center={center}
      zoom={10}
      style={{width: "110%", height: '90vh', marginRight: '10px'}}
      whenCreated={ (map) => map.invalidateSize() }
    >
      <TileLayer
        url="https://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png"/>
        {rectangle && (
          <Polygon positions={[
            [rectangle.getSouthWest().lat, rectangle.getSouthWest().lng],
            [rectangle.getNorthEast().lat, rectangle.getSouthWest().lng],
            [rectangle.getNorthEast().lat, rectangle.getNorthEast().lng],
            [rectangle.getSouthWest().lat, rectangle.getNorthEast().lng],
          ]}
            color="blue"
            fillOpacity={0.05}
            weight={0.5}/>
        )}
      </TileLayer>
      {visibleHexagons.map((h3Index, idx) => {
        let color = "gray";

        if (
          cellColors &&
          cellColors[h3Index] &&
          cellColors[h3Index].color) {
          color = colorMap[cellColors[h3Index].color] || "gray";
        }
        console.log(`Celda: ~${h3Index}, Color asignado: ${color}`);
        return (
          <Polygon
            key={` ${h3Index}-${idx}-${color}`}
            positions={
              cellToBoundary(h3Index).map(([lat, lng]) => [lat, lng])
            }
            fillColor={color}
            fillOpacity={0.4}
            stroke={false}
            weight={0}
          />
        );
      })}

      {canDrawRectangle && (
        <FeatureGroup>
          <EditControl position="topright" onCreated={handleCreated}

```

```
        draw={{
            rectangle: canDrawRectangle,
            polyline: false,
            circle: false,
            circlemarker: false,
            marker: false,
            polygon: false,
        }}
    </>
</FeatureGroup>
    )}
</MapContainer>
</div>
);
};

export default Map;
```

#### A3.4.4 Archivo de estilos de la aplicación React (App.css)

```
body {
  background-color: #ffffff;
  font-family: Arial, sans-serif;
}

#root {
  display: flex;
  min-height: 100vh;
  background-color: #ffffff;
}

.main-title {
  font-size: 35px;
  font-weight: 800;
  text-align: center;
  color: #003366;
  background-color: #e6f0ff;
  padding: 16px 24px;
  margin: 0 auto 20px auto;
  width: 100%;
  text-transform: uppercase;
  letter-spacing: 1px;
  box-shadow: 0px 4px 10px rgba(0, 0, 0, 0.1);
  border-bottom: 3px solid #003366;
  font-family: 'Segoe UI', Tahoma, Geneva, Verdana, sans-serif;
}
```

#### A3.4.5 Archivo de estilos del menú lateral (Sidebar.css)

```
.sidebar {
  position: fixed;
  top: 0;
  right: 0;
  width: 250px;
  height: 100%;
  background-color: #f0f8ff;
  color: #1e3a8a;
  padding-top: 20px;
  box-shadow: -2px 0 5px rgba(0, 0, 0, 0.1);
  z-index: 1000;
}

.sidebar ul {
```

```
list-style: none;
padding: 0;
}

select {
  width: 100%;
  padding: 8px;
  font-size: 16px;
  font-weight: bold;
  color: #004080;
  background-color: #ffffff;
  border: 2px solid #004080;
  border-radius: 5px;
  box-shadow: 1px 1px 5px rgba(0, 0, 0, 0.1);
  cursor: pointer;
}

.sidebar li {
  padding: 15px;
  border-bottom: 1px solid #d1d5db;
}

.sidebar a {
  color: #1e3a8a;
  text-decoration: none;
  display: block;
}

.sidebar a:hover {
  background-color: #c3d9f5;
  padding-left: 10px;
}
```

#### A3.4.6 Lanzador del servidor local para la generación de la SPA (start.js)

```
'use strict';

process.env.BABEL_ENV = 'development';
process.env.NODE_ENV = 'development';

process.on('unhandledRejection', err => {
  throw err;
});

require('../config/env');

const fs = require('fs');
const chalk = require('react-dev-utils/chalk');
const webpack = require('webpack');
const WebpackDevServer = require('webpack-dev-server');
const clearConsole = require('react-dev-utils/clearConsole');
const checkRequiredFiles = require('react-dev-utils/checkRequiredFiles');
const {
  choosePort,
  createCompiler,
  prepareProxy,
  prepareUrls,
} = require('react-dev-utils/WebpackDevServerUtils');
const openBrowser = require('react-dev-utils/openBrowser');
const semver = require('semver');
```

```
const paths = require('../config/paths');
const configFactory = require('../config/webpack.config');
const createDevServerConfig = require('../config/webpackDevServer.config');
const getClientEnvironment = require('../config/env');
const react = require(require.resolve('react', { paths: [paths.appPath] }));

const env = getClientEnvironment(paths.publicUrlOrPath.slice(0, -1));
const useYarn = fs.existsSync(paths.yarnLockFile);
const isInteractive = process.stdout.isTTY;

if (!checkRequiredFiles([paths.appHtml, paths.appIndexJs])) {
  process.exit(1);
}

const DEFAULT_PORT = parseInt(process.env.PORT, 10) || 3000;
const HOST = process.env.HOST || '0.0.0.0';

if (process.env.HOST) {
  console.log(
    chalk.cyan(
      `Attempting to bind to HOST environment variable: ${chalk.yellow(
        chalk.bold(process.env.HOST)
      )}`
    )
  );
  console.log(
    `If this was unintentional, check that you haven't mistakenly set it in your shell.`
  );
  console.log(
    `Learn more here: ${chalk.yellow('https://cra.link/advanced-config')}`
  );
  console.log();
}

const { checkBrowsers } = require('react-dev-utils/browsersHelper');
checkBrowsers(paths.appPath, isInteractive)
  .then(() => {
    return choosePort(HOST, DEFAULT_PORT);
  })
  .then(port => {
    if (port == null) {
      return;
    }

    const config = configFactory('development');
    const protocol = process.env.HTTPS === 'true' ? 'https' : 'http';
    const appName = require(paths.appPackageJson).name;

    const useTypeScript = fs.existsSync(paths.appTsConfig);
    const urls = prepareUrls(
      protocol,
      HOST,
      port,
      paths.publicUrlOrPath.slice(0, -1)
    );
    const compiler = createCompiler({
      appName,
      config,
      urls,
      useYarn,
      useTypeScript,
      webpack,
```

```
});
const proxySetting = require(paths.appPackageJson).proxy;
const proxyConfig = prepareProxy(
  proxySetting,
  paths.appPublic,
  paths.publicUrlOrPath
);
const serverConfig = {
  ...createDevServerConfig(proxyConfig, urls.lanUrlForConfig),
  host: HOST,
  port,
};
const devServer = new WebpackDevServer(serverConfig, compiler);
devServer.startCallback(() => {
  if (isInteractive) {
    clearConsole();
  }

  if (env.raw.FAST_REFRESH && semver.lt(react.version, '16.10.0')) {
    console.log(
      chalk.yellow(
        `Fast Refresh requires React 16.10 or higher. You are using React
${react.version}.`
      )
    );
  }

  console.log(chalk.cyan('Starting the development server...\n'));
  openBrowser(urls.localUrlForBrowser);
});

['SIGINT', 'SIGTERM'].forEach(function (sig) {
  process.on(sig, function () {
    devServer.close();
    process.exit();
  });
});

if (process.env.CI !== 'true') {
  process.stdin.on('end', function () {
    devServer.close();
    process.exit();
  });
}
).catch(err => {
  if (err && err.message) {
    console.log(err.message);
  }
  process.exit(1);
});
```

## ANEXO V: DECLARACIÓN DE USO DE IA

Este anexo declara la incorporación del uso de la Inteligencia Artificial (IA) como herramienta de apoyo en el desarrollo de este trabajo de fin de grado (TFG). El uso de la IA no solo permite mejorar la eficiencia, sino que también contribuye a la mejora en la calidad del código de programación y optimización de su rendimiento. Todo ello dentro de un entorno controlado y teniendo en cuenta las estrictas regulaciones de seguridad y confidencialidad propias de un proyecto de esta naturaleza.

A continuación, se justifica el uso de IA en distintas áreas clave necesarias para la ejecución del proyecto:

El uso de la IA en la generación, escritura y optimización del código tiene como objetivo mejorar la eficiencia y velocidad en el desarrollo de software. La IA permite asistir en la escritura de código a través de sugerencias automáticas basadas en patrones de programación anteriores, lo cual optimiza el tiempo de desarrollo gracias a las recomendaciones automatizadas. También, apoya en la adaptación de nuevos lenguajes y tecnologías más específicos. Además, facilita un autocompletado de código inteligente al predecir y autocompletar fragmentos de código mientras el programador escribe, lo que acelera la escritura y reduce los errores. Herramientas como GitHub Copilot, integradas en el IDE PyCharm, emplean IA para sugerir las siguientes líneas de código en función de lo que el programador está escribiendo, adaptándose al contexto del proyecto y a las bibliotecas utilizadas. Además, aumenta el rendimiento y reduce la complejidad del código, asegurando que el software sea más fácil de mantener y menos propenso a errores en el futuro.

La detección y corrección de errores es un área crítica en el desarrollo de software. La IA permite efectuar una revisión automática de código (*Code Review*), en lugar de realizar revisiones manuales. Además, la IA puede asistir en la evaluación de la calidad del código, asegurando que no existan errores comunes y que se mantenga la consistencia en el estilo de codificación. Este tipo de herramienta permite realizar revisiones en tiempo real, lo que ahorra tiempo y mejora la calidad del código. Además, ayuda a priorizar los problemas más críticos, reduciendo el tiempo necesario para la corrección de estos y fomentando un mayor enfoque en problemas de mayor complejidad. Igualmente, la IA está programada para identificar posibles vulnerabilidades y advertir sobre posibles riesgos de seguridad, lo cual es fundamental en un entorno militar donde la protección de datos y la integridad del sistema son prioritarias.

El uso de la Inteligencia Artificial en el desarrollo de este proyecto ha demostrado ser una herramienta valiosa para mejorar la eficiencia y precisión en la programación, corrección de errores, optimización de código y la selección de librerías. El uso de IA no reemplaza el juicio y la supervisión humana, sino que sirve como herramienta complementaria para facilitar y agilizar el proceso de desarrollo, garantizando que el producto final sea confiable, seguro y funcional en un entorno de creación exigente como el que supone un proyecto de esta dimensión.