

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un entorno de simulación para la planificación y optimización de rutas marítimas

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Julio Pérez Estupiñán

DIRECTORES: José Antonio González Prieto

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un entorno de simulación para la planificación y optimización de rutas marítimas

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado se desarrolla en el Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar (CUD-ENM) con el objetivo de diseñar e implementar un entorno de simulación avanzado para el planeamiento y la optimización de derrotas marítimas. Bajo el nombre de «Varuna», se ha creado una aplicación multiplataforma utilizando el lenguaje Python y el *framework* Kivy, orientada a mejorar la eficiencia operativa y la formación técnica de los futuros oficiales de la Armada.

El núcleo del programa permite la integración de datos oceanográficos reales procedentes del servicio Copernicus Marine, procesando archivos para visualizar y emplear campos vectoriales de corrientes y viento en tiempo real. La arquitectura del software se divide en tres modos operativos fundamentales: *Navigation*, destinado a la visualización y conciencia situacional; *Editor*, centrado en el diseño de los escenarios, con la configuración de las corrientes; y *Game*, enfocado a la instrucción mediante la evaluación de trayectorias optimizadas matemáticamente y a la planificación de derrotas.

A través de un motor de optimización, el simulador permite calcular trayectorias que minimizan el impacto de los agentes ambientales, facilitando la extracción de datos técnicos como rumbos verdaderos y coordenadas GPS. El desarrollo consolida una herramienta integral capaz de asistir en el planeamiento eficaz de rutas marítimas, unificando la precisión algorítmica con las necesidades operativas del entorno naval.

PALABRAS CLAVE

Optimización de rutas, Simulaciones marítimas, Navegación, Escenario, Condiciones ambientales.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi familia. A mis padres, Julio y Mayu, por su apoyo, no solo durante estos 5 años, sino durante toda mi vida. Ellos han sido una ayuda primordial en la realización de este trabajo, mostrando interés en todas y cada una de sus fases y participando activamente en él. A mis hermanos, Fernando y Jorge, por acompañarme durante toda mi vida, por su confianza depositada en mí y por su apoyo incondicional. Muchas gracias familia.

He de mencionar a mi grupo de amigos. Gracias a ellos soy capaz de desconectar plenamente de mi vida profesional, y así, trabajar mejor y con fuerzas renovadas cada semana. Además de interesarse por mi trabajo, opinando con criterio y preocupación. Gracia señores, espero no separarme nunca de vosotros.

Por último, al director del proyecto, por su ayuda durante todo el periodo de realización de este trabajo. Sin él esto no hubiera sido posible. Gracias José Antonio.

CONTENIDO

Contenido 1

Índice de Figuras 5

Índice de Tablas....7

1 Introducción y objetivos 9

1.1 Contexto y motivación. 9

1.2 Objetivos del TFG....9

1.3 Organización de la memoria 10

2 Estado del arte 13

2.1 Introducción general. 13

2.1.1 Contexto global y relevancia estratégica del transporte marítimo....13

2.1.2 El paradigma de la planificación: De la experiencia náutica al algoritmo multiobjetivo.15

2.1.3 Alcance y objetivos del estado del arte....16

2.2 La Realidad de la navegación y la planificación de rutas 16

2.2.1 El legado de la navegación tradicional: Del juicio empírico a la planificación estática ..16

2.2.2 La era de la digitalización: aparición de la ECDIS y la integración de datos 17

2.2.3 Criterios de decisión del comandante/capitán: El equilibrio entre seguridad, eficiencia y normativa....18

2.3 Estado actual de la modelización matemática y herramientas tecnológicas 19

2.3.1 Evolución de los modelos de optimización: De grafos deterministas a sistemas híbridos 19

2.3.2 Fiabilidad de los modelos oceanográficos y meteorológicos: La base del cálculo 19

2.3.3 Herramientas comerciales y el problema de la caja negra....20

2.3.4 La interacción buque-medio: Modelos hidrodinámicos y el "Ship Response" 21

2.4 Factores Externos 22

2.4.1 Validación normativa automatizada: El impacto de las zonas SECA/NECA y el estándar S-100 22

2.4.2 El factor geopolítico y la seguridad física: Piratería, zonas de conflicto y ciberseguridad 23

2.4.3 Carga cognitiva y la interfaz Hombre-Máquina (HMI)....24

2.5 Optimización de rutas marítimas en navegación a vela 24

2.5.1 Cinemática en la navegación a vela: abatimiento y fuerzas laterales 24

2.5.2 El uso de las polares de rendimiento y la optimización de la VMG (Velocity Made Good) 26

2.5.3 Meteorología táctica y la gestión del oleaje en la derrota 26

2.5.4 Interacción hidrodinámica: Corrientes, mareas y la deriva en la planificación....27

2.6 Tecnologías de vanguardia en la planificación y monitorización de la derrota 28
2.6.1 Realidad aumentada (AR) y visualización de trayectorias predictivas 28
2.6.2 Planificación cooperativa y el intercambio de rutas mediante VDES 29
2.6.3 Optimización basada en conectividad satelital de baja latencia 29
2.6.4 Interfaces HMI de nueva generación: Control por voz y gestión gestual de la derrota 30
2.7 La Transición hacia los buques autónomos (MASS) y el nuevo rol del comandante/capitán 31
2.7.1 Los Niveles de autonomía de la OMI y el cambio de paradigma 31
2.7.2 Centros de control en tierra (ROC): La monitorización remota de la derrota 32
2.7.3 Ciberseguridad en la derrota: Amenazas de spoofing, jamming e integridad de datos 33
2.7.4 Responsabilidad legal y ética 33
2.7.5 Conclusiones: El futuro de la navegación y la planificación de rutas 34
2.8 Integración de herramientas de optimización de rutas marítimas en la formación de los futuros oficiales de la Armada Española 35
2.8.1 Herramientas actuales utilizadas en la Escuela Naval Militar 35
2.8.2 Futuro en la formación de los oficiales 36
3 Desarrollo del TFG 39
3.1 Introducción 39
3.1.1 Principios básicos y objetivos del programa 39
3.1.2 Modo de trabajo 39
3.2 Módulo de integración de datos de costas e islas 40
3.2.1 Introducción 40
3.2.2 Metodología y validación de pruebas comparativas 41
3.2.3 Natural Earth (NE) 41
3.2.4 Open Street Map (OSM) 42
3.2.5 Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline (GSHHS) 44
3.2.6 Conclusión 47
3.3 Arquitectura de la interacción y adaptación dinámica de datos GSHHS 47
3.3.1 Introducción 47
3.3.2 Modos de operación de la aplicación 48
3.3.3 Problema de la carga dinámica de datos costeros 48
3.3.4 Adaptación dinámica del sistema GSHHS 49
3.4 Persistencia de escenarios: creación de una base de datos en SQLite 51
3.4.1 Introducción 51
3.4.2 Escenarios 51
3.4.3 Obstáculos 52
3.4.4 Corrientes 53

3.5 Flujos de almacenamiento y recuperación de la información de escenarios. 54
3.5.1 Introducción 54
3.5.2 Validación del escenario 54
3.5.3 Guardado del escenario en la base de datos 55
3.5.4 Guardado de Obstáculos 56
3.5.5 Guardado del campo de corrientes 57
3.5.6 Persistencia del campo de corrientes 58
3.6 Carga de escenarios 59
3.6.1 Introducción 59
3.6.2 Validación de la selección 60
3.6.3 Restaurar la vista y los puntos FROM y TO 60
3.6.4 Carga de los obstáculos 61
3.6.5 Carga de las corrientes 62
3.7 Aplicación en modo Editor y configuración de escenarios 63
3.7.1 Introducción 63
3.7.2 Panel de configuración del escenario 63
3.7.3 Generación de obstáculos 64
3.7.4 Configuración y generación de corrientes 65
3.7.5 Guardado del escenario 69
3.8 Modo Game 69
3.8.1 Introducción 69
3.8.2 Selección y carga del escenario 70
3.8.3 Interacción durante el diseño 70
3.8.4 Panel Route 71
3.8.5 Panel de resultados 71
3.8.6 Evaluador de rutas marítimas. 72
3.9 Modo Navigation 73
3.9.1 Introducción 73
3.9.2 Descarga y visualización de corrientes reales 74
3.9.3 Descarga y visualización del viento real 74
3.9.4 Panel de escalas 75
3.9.5 Indicador GPS 76
3.9.6 Dynamic Route 76
3.10 Arquitectura del código 77
4 Resultados / Validación / Prueba 81
4.1 Introducción 81

4.2 Análisis crítico de la cartografía 81
4.3 Limitaciones de la resolución y propuesta de una solución hibrida 81
4.4 Análisis del algoritmo de optimización 83
4.5 Análisis de los escenarios y gestión de la optimización 84
4.6 Cumplimiento funcional y capacidad de la simulación operativa 86
5 Conclusiones y líneas futuras 89
5.1 Introducción 89
5.2 Integración de la cartografía oficial y el desarrollo de la costa 89
5.3 Veriles y calado dinámico 89
5.4 Integración del RIPA 90
5.5 Monitorización del tráfico marítimo mediante AIS 90
5.6 Unificación del motor de cálculo y autonomía del software. 91
5.7 Complejidad de los impactos ambientales: El factor viento 91
5.8 Desarrollo completo de la ruta dinámica con seguimiento GPS. 91
6 Bibliografía 93
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales 97
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales 99
Anexo III: Diccionario de siglas, acrónimos y abreviaturas 101
Anexo IV: Librerías y módulos de programación 103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Ejemplo de un Atlas meteorológico del Atlántico Sur para enero de 1995 (tomada de [11]).....17
Figura 2-2 Servicios costeros de Copernicus (tomada de [18]). 20
Figura 2-3. Página web de NAPA (tomada de [21]). 21
Figura 2-4 Gemelo digital F-110 (tomada de [22]). 22
Figura 2-5. Ataques de piratería en el índico entre 2005-2010 (tomado de [23]). 23
Figura 2-6 Buque escuela Juan Sebastián Elcano en aguas del Pacífico (elaboración propia). 25
Figura 2-7 Suma vectorial VMG y VMC (tomada de [25]).....26
Figura 2-8 Suma de vectores Rumbo de superficie y rumbo efectivo (tomada de [27]) 27
Figura 2-9.Modelo de un MASS (tomada de [42]). 35
Figura 2-10. Alumnos de la ENM en el simulador de navegación (tomada de [43]). 36
Figura 2-11 Poster del nuevo simulador VR de navegación (tomada de [44]). 37
Figura 3-1. Interfaz de Antigravity (elaboración propia). 40
Figura 3-2 Ensayo NE Rías Bajas (elaboración propia).....42
Figura 3-3 Ensayo OSM Rías Bajas (elaboración propia). 43
Figura 3-4 Detalle ensayo OSM Puerto de Marín, ENM e Isla de Tambo (elaboración propia). 43
Figura 3-5 Ensayo OSM de Ría de Vigo a Ría de Camariñas (elaboración propia). 44
Figura 3-6. Ensayo GSHHS Rías Bajas (elaboración propia). 45
Figura 3-7 Ensayo GSHHS península Ibérica e Islas Baleares (elaboración propia). 45
Figura 3-8 Ensayo GSHHS Europa (elaboración propia). 46
Figura 3-9. Destalle GSHHS Ría de Pontevedra (elaboración propia). 47
Figura 3-10. Cálculo del área visible (generada a partir de IA). 49
Figura 3-11. Proceso de *clipping* (generada a partir de IA). 50
Figura 3-12. Funcionalidad de herramientas de detección de costas e islas integrada en la aplicación. 51
Figura 3-13. Flujo de validación del escenario (generada a partir de IA). 55
Figura 3-14. Guardado del escenario en la base de datos (generada a partir de IA). 56
Figura 3-15. Guardado de obstáculos (generada a partir de IA). 57
Figura 3-16. Guardado del campo de corrientes (generada a partir de IA). 58
Figura 3-17. Persistencia del campo de corrientes (generada a partir de IA). 59
Figura 3-18. Validación de la selección (generada a partir de IA).....60
Figura 3-19. Restaurar la vista (generada a partir de IA). 61
Figura 3-20. Carga de los obstáculos (generada a partir de IA). 62
Figura 3-21. Carga de las corrientes (generada a partir de IA). 63

Figura 3-22. Panel de configuración del escenario modo Editor (elaboración propia).....64
Figura 3-23.Panel de configuración de obstáculos (elaboración propia). 64
Figura 3-24. Ejemplo de generación de obstáculos (elaboración propia). 65
Figura 3-25. Escenario con corriente real para el día 16/02/2026 con el panel de configuración de corrientes a la derecha (elaboración propia). 66
Figura 3-26. Ejemplo configuración del *grid* y de la corriente *uniform* (elaboración propia).....66
Figura 3-27. Panel de Edición de los escenarios (elaboración propia). 69
Figura 3-28. Panel de configuración modo Game (elaboración propia). 70
Figura 3-29. Ejemplo de ruta Marín/Ons (elaboración propia).....71
Figura 3-30. *Route Panel* (elaboración propia). 71
Figura 3-31. *Results Panel* (elaboración propia).....72
Figura 3-32. Panel de configuración modo Navigation (elaboración propia).....74
Figura 3-33. Corrientes reales (elaboración propia).....74
Figura 3-34. Viento real (elaboración propia).....75
Figura 3-35. Panel de escalas (elaboración propia).....75
Figura 3-36. Panel GPS (elaboración propia). 76
Figura 3-37. Funcionalidad Dynamic Route (elaboración propia).....77
Figura 3-38. Código QR de la aplicación (elaboración propia). 79
Figura 4-1. Resolución de la fuente GSHHS en la ría de Arosa (elaboración propia).....82
Figura 4-2. Puente de cruce a la isla de Arosa[59].....82
Figura 4-3. Solución escenario Marín/Sanxenxo (elaboración propia).....83
Figura 4-4. Solución escenario ACoruña/Santander (elaboración propia).....83
Figura 4-5. Solución escenario Marín/Ons (elaboración propia). 84
Figura 4-6. Escenario Vigo/Muros (elaboración propia). 85
Figura 4-7. Escenario Base Naval de Rota/Puerto de Malaga (elaboración propia). 86
Figura 5-1. DST Finisterre[60].....90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resumen de las misiones de la Armada Española en 2025 (tomada de [2]). 14
Tabla 2-2 Índices de evaluación sistema ECDIS (tomada de [9]). 15
Tabla 3-1. Diferentes resoluciones GSHHS. 46
Tabla 3-2. Conclusión de las fuentes estudiadas. 47
Tabla 3-3. Resumen modos de operación. 48
Tabla 3-4. Configuración tamaño-resoluciones 50
Tabla 3-5. Tabla Escenarios. 52
Tabla 3-6. Tabla SCENARIO_OBSTACLES. 53
Tabla 3-7. Tabla SCENARIO_CURRENTS. 53
Tabla 3-8. Parámetros de la corriente uniform. 67
Tabla 3-9. Parámetros de la corriente *vortex*. 67
Tabla 3-10. Parámetros de la corriente *tidal*. 67
Tabla 3-11. Parámetros de la corriente *river outflow*. 68
Tabla 3-12. Parámetros de la corriente *linear shear*. 68
Tabla 3-13. Parámetros de la corriente *logarithmic*. 68
Tabla 3-14. Tabla decaimiento exponencial. 73
Tabla 3-15. Archivos Varuna. 79

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación.

Actualmente, la transformación digital y la disponibilidad masiva de datos están redefiniendo de manera global distintos sectores estratégicos.

En el ámbito marítimo, esta evolución ha incidido en la capacidad de procesar información proveniente del Sistema de Identificación Automática (AIS), en los modelos oceanográficos de alta precisión para mejorar la seguridad y eficiencia de la navegación y por último en las numerosas implementaciones de señalización y salvamento marítimo que hacen de la mar un entorno cada vez más seguro.

La Armada Española, consciente de que el éxito de sus misiones depende de un planeamiento rápido y eficaz, ha marcado la Transformación Digital como un principio fundamental para mantener su superioridad tecnológica y agilidad operativa. En este escenario, por tanto, la obtención de rutas óptimas no es solo una cuestión de ahorro de costes o reducción de emisiones, sino un factor determinante para el cumplimiento de misiones críticas de defensa e intereses nacionales.

Tradicionalmente, la planificación de una derrota dependía del juicio empírico del marino y del análisis manual de publicaciones estáticas. Sin embargo, hoy en día se tiende hacia la integración de sistemas de decisión automatizados y algoritmos de optimización multiobjetivo que equilibran la seguridad, el tiempo y el consumo. A pesar de estos avances, existe una necesidad latente de herramientas que no solo realicen cálculos matemáticos, sino que sirvan como plataformas de formación y simulación donde el oficial pueda validar su criterio frente a escenarios dinámicos y complejos.

Motivado por estas necesidades, el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se centra en el diseño y desarrollo de un entorno de simulación capaz de integrar datos cartográficos, condiciones ambientales y algoritmos de optimización. Este sistema busca proporcionar una herramienta robusta para la planificación de rutas marítimas, permitiendo ensayar virtualmente la respuesta del buque y la eficacia de la derrota antes de su ejecución real.

1.2 Objetivos del TFG

El objetivo principal de este trabajo es diseñar y desarrollar un entorno de simulación para la planificación y optimización de rutas marítimas, integrando fuentes de datos geoespaciales y meteorológicos para facilitar la toma de decisiones de nivel estratégico.

Para alcanzar este propósito, el trabajo se desglosa en los siguientes subobjetivos:

- Revisión del estado del arte: Analizar la evolución de la navegación, desde los métodos tradicionales hasta el uso de algoritmos avanzados de inteligencia artificial y estándares de datos dinámicos como el S-100.
- Definición del entorno geográfico: Implementar y validar diferentes fuentes de datos costeros (Natural Earth, Open Street Map, GSHHS) para garantizar una representación fiel de la costa.
- Modelización de factores ambientales: Desarrollar mecanismos para la carga y visualización de campos de corrientes y vientos, tanto simulados mediante modelos matemáticos como reales, que influyan en la cinemática del buque.
- Arquitectura del sistema: Diseñar una estructura de software modular que incluya la persistencia de datos mediante SQLite para la gestión de escenarios, obstáculos y rutas.
- Implementación de modos de operación: Crear interfaces diferenciadas (Editor, Game, Navigation) que permitan desde la configuración técnica del entorno hasta la simulación interactiva de la derrota.
- Validación y pruebas: Evaluar el comportamiento del sistema ante distintos escenarios operativos, verificando la precisión de los cálculos y la usabilidad de la interfaz.

Un objetivo subyacente de este trabajo reside en afrontar el reto que supone la realización de un desarrollo de esta complejidad por parte de un alumno con escasa experiencia en la programación de aplicaciones, mediante la aplicación de técnicas de *vibe coding*. Este enfoque se basa en la interacción directa y continua entre el programador y un agente de inteligencia artificial especializado en tareas de desarrollo de software. Se trata de una tendencia actual en la ingeniería del software, que redefine el papel tradicional del programador: en lugar de concentrarse exclusivamente en la escritura del código, adopta un rol de gestor del desarrollo, orientando y supervisando los procesos generativos de la IA. De la misma forma que resulta esencial analizar cómo los desarrolladores experimentados aprovechan estos sistemas, también lo es comprender cómo los nuevos programadores se aproximan a este paradigma emergente. Este estudio, por tanto, cobra relevancia no solo como ejercicio técnico, sino como exploración práctica de la interacción humano-IA, un aspecto clave en la evolución de los sistemas inteligentes en múltiples ámbitos de aplicación.

1.3 Organización de la memoria

Tras contextualizar el trabajo y definir sus metas, el documento se estructura en cinco capítulos principales y una serie de anexos para facilitar su comprensión:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. En este apartado se establece el marco general del trabajo, detallando la motivación que impulsa el diseño de un simulador de rutas y los objetivos generales y específicos que se pretenden alcanzar. En el mismo se justifica la relevancia del proyecto para el adiestramiento naval y la optimización operativa.
- Capítulo 2: Estado del arte. Realiza un recorrido por la tecnología de navegación, la modelización matemática y el impacto de la digitalización en la Armada. Además, establece el marco teórico y tecnológico que fundamenta el proyecto, analizando en profundidad la relevancia estratégica del transporte marítimo en el comercio global y su impacto crítico en la operatividad de la Armada Española.
- Capítulo 3: Desarrollo del TFG. Constituye el núcleo técnico de la memoria. En él se describe el proceso de diseño. Se detalla la arquitectura del sistema basada en tres modos operativos (*Navigation, Editor y Game*), la implementación de la lectura de los datos asociados a la costa, el desarrollo de corrientes analíticas y la visualización de rutas marítimas matemáticamente optimas teniendo en cuenta las condiciones ambientales. Por último, se dedica un apartado especial a la metodología de trabajo innovadora empleada, describiendo cómo el uso de la Inteligencia Artificial y el prototipado rápido han permitido

transformar el rol del desarrollador en un arquitecto de soluciones capaz de agilizar el diseño y la depuración del software.

- Capítulo 4: Resultados y validación. Analiza el rendimiento del software mediante casos de estudio prácticos, como el escenario entre Rota y Málaga. Se evalúan las limitaciones del algoritmo, la precisión cartográfica y los retos encontrados durante la integración de datos reales.
- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras. Sintetiza los logros del proyecto y propone mejoras para versiones posteriores, incluyendo la integración del reglamento RIPA, el seguimiento de tráfico mediante AIS y la mejora de la resolución del litoral.

Finalmente, se incluye la bibliografía consultada y los anexos con información complementaria sobre implicaciones éticas, sociales, técnicas y ambientales.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción general.

2.1.1 Contexto global y relevancia estratégica del transporte marítimo

Uno de los pilares fundamentales de la economía global es el comercio internacional, donde el transporte marítimo actúa como el principal motor de intercambio entre naciones. La magnitud de esta industria es tal que, en la actualidad, más del 80 por ciento del volumen de las mercancías y el 70 por ciento del valor de las transacciones totales se desplazan a través de las rutas marítimas [1]. La actual guerra en Irán ha tenido un gran impacto económico a nivel mundial con el cierre del Estrecho de Ormuz; en este escenario, la eficiencia y la seguridad de las rutas de navegación no son solo variables operacionales, sino factores determinantes de la competitividad global, de la estabilidad de las cadenas de suministro y, cada vez más, de la sostenibilidad medioambiental.

Por otra parte, en el ámbito de la Armada Española, para realizar cualquier tipo de operación es esencial disponer de un planeamiento rápido y eficaz, capaz de integrar diferentes aspectos relacionados con las rutas a realizar, tales como distancias a recorrer, meteorología o tiempo estimado en la ruta, así como de aplicar una serie de normativas de navegación, específicamente del ámbito militar.

A modo de ejemplo, podemos observar las misiones realizadas por la Armada en el año 2025 en la Tabla 2-1[2]. Al igual que en las operaciones marítimas civiles, en todas ellas es crucial la obtención de una ruta óptima, principalmente cuando esta es determinante para el cumplimiento de una misión crítica para la defensa de nuestro país y de sus intereses.

Misión	Coalición	Descripción
Dédalo-25	Nacional/OTAN	Despliegue de proyección de fuerza naval en el Mediterráneo y el Atlántico (de Estambul a Helsinki) para reforzar la disuasión en el flanco aliado.
Atalanta	Unión Europea	Lucha contra la piratería en el Océano Índico y protección de los buques del Programa Mundial de Alimentos.
Dynamic Mariner / Flotex-25	Nacional/OTAN	El mayor ejercicio naval del año, diseñado para certificar la capacidad de Mando y Control en escenarios de media/alta intensidad y defensa colectiva en el Golfo de Cádiz.
Sea Guardian	OTAN	Operación permanente de seguridad marítima en el Mediterráneo destinada a la detección de amenazas híbridas, lucha antiterrorista y protección de infraestructuras críticas.

Sinergia 25	Nacional	Activación de unidades navales y aéreas bajo el Mando Operativo Marítimo para reforzar la soberanía en aguas del Estrecho, el Mediterráneo y el archipiélago canario.
Presencias marítimas coordinadas	Unión Europea	Despliegue recurrente de buques en el Golfo de Guinea para mejorar la seguridad cooperativa y combatir la piratería en el África Occidental.
Campaña Antártica 24-25	Nacional	Apoyo logístico a las bases científicas y realización de investigaciones oceanográficas en condiciones extremas durante la campaña austral.
Agrupaciones Navales OTAN (SNMG)	OTAN	Integración de buques españoles en las fuerzas de respuesta inmediata de la Alianza, manteniendo una presencia constante en el Atlántico Norte y el Mediterráneo.

Tabla 2-1 Resumen de las misiones de la Armada Española en 2025 (tomada de [2]).

En las últimas dos décadas, el sector ha experimentado una transformación digital sin precedentes. La disponibilidad masiva de datos provenientes del Sistema de Identificación Automática (AIS) y los avances en la teledetección oceánica ha permitido que organismos, como por ejemplo el Servicio Marítimo de Copernicus, proporcionen modelos de previsión oceánica con una precisión antes inalcanzable [3]. Estos datos son la base de los algoritmos de optimización que buscan reducir el impacto medioambiental, una prioridad impulsada por la Organización Marítima Internacional (OMI) a través de normativas como el Índice de Eficiencia Energética para Buques Existentes (EEXI) y el Indicador de Intensidad de Carbono (CII) [4].

Tradicionalmente, la planificación de una travesía dependía en gran medida de la pericia y el juicio del comandante/capitán y del oficial de navegación. Uno y otro utilizaban publicaciones náuticas, Cartas Piloto (*Pilot Charts*) y la observación empírica de las condiciones. Sin embargo, el estado del arte actual se define por la integración de sistemas de decisión automatizados en los protocolos de navegación segura establecidos en convenios internacionales como el SOLAS [5].

Esta dualidad entre la experiencia operativa del marino y la precisión matemática del algoritmo es el núcleo del presente estudio y define el estado actual de la disciplina. La combinación de modernos sistemas de predicción meteorológica, las múltiples herramientas para la planificación de rutas y las

experiencias de marinos que ya han experimentado esas mismas rutas, define la manera de trabajar del navegante.

2.1.2 El paradigma de la planificación: De la experiencia náutica al algoritmo multiobjetivo

La planificación de rutas marítimas, desde la perspectiva del profesional a bordo, ha evolucionado pasando de ser un proceso artesanal basado en la experiencia, a un análisis de datos complejo y multidimensional.

En cualquiera de los casos el pilar fundamental del planeamiento es el cumplimiento del Capítulo V del Convenio SOLAS, el cual establece que todos los buques deben realizar una planificación del viaje previa a la salida, cerciorándose de que la ruta propuesta sea segura para la navegación y evite peligros detectados [6].

Tradicionalmente, el marino ha operado bajo un enfoque de seguridad jerárquico. Así el proceso comienza con el trazado de rutas ortodrómicas o loxodrómicas, que se ajustan manualmente mediante la consulta de los Derroteros (*Sailing Directions*) y las Cartas Piloto, que ofrecen promedios estadísticos de corrientes y vientos [7].

Este modelo estático está siendo desplazado por la Optimización Multiobjetivo, donde algoritmos avanzados procesan simultáneamente variables de tiempo, de coste operativo y de seguridad. La eficiencia de este sistema depende de la integración de estándares de datos como el S-100, que permite que el equipo de navegación (ECDIS) interprete dinámicamente datos de interés en tiempo real [8].

Sin embargo, la capacidad de procesar datos masivos carecería de utilidad práctica sin unas métricas claras de validación. Para que el sistema ECDIS pueda proponer una alternativa viable, debe contrastar la ruta preliminar con una serie de índices de evaluación de seguridad y eficiencia. Estos parámetros actúan como filtros críticos: antes de optimizar el consumo, el algoritmo debe garantizar que la derrota cumple con los márgenes de seguridad dinámica del buque (mostrados en la Tabla 2-2[9]). Solo una vez superados estos umbrales de seguridad (*Safety Constraints*), el sistema aplica las variables de eficiencia económica.

Índice/Parámetro de evaluación	**Descripción técnica**
UKC (*Under Keel Clearance)*	Margen de seguridad vertical. Calcula la diferencia entre el calado dinámico del buque y la profundidad de la carta (ajustada por marea).
XTE (*Cross Track Error*)	Corredor de seguridad lateral a ambos lados del rumbo trazado.
Safety Contour (*Veril de Seguridad)*	Línea de profundidad mínima de seguridad basada en el calado del buque.
RoT (*Rate of Turn*) / Radio de Giro	RoT (*Rate of Turn*) / Radio de Giro
Límites Ambientales (*Weather Limits*)	Umbrales máximos de altura de ola o velocidad de viento (integración S-412).

Tabla 2-2 Índices de evaluación sistema ECDIS (tomada de [9]).

En la actualidad, el reto no es solo encontrar la ruta más corta, sino equilibrar la "ventana de llegada" con el consumo mínimo. Este cambio de paradigma hacia el *Just-In-Time (JIT) Arrivals* es una de las estrategias principales recomendadas para alcanzar los objetivos de descarbonización, permitiendo a los

buques ajustar su velocidad en ruta para evitar esperas innecesarias en puerto, reduciendo así las emisiones hasta en un 14% en ciertos trayectos [10].

Esta transición delega en el algoritmo el cálculo pesado, pero mantiene en el marino la responsabilidad final de validar la viabilidad ética y operativa de la ruta propuesta.

De esta forma, aunque el algoritmo realice los cálculos más complejos y busque una solución óptima en el menor tiempo posible, la responsabilidad real sigue siendo del comandante/capitán, este tiene que ser capaz de discernir y escoger la ruta más optima entre las opciones que nos presente nuestro sistema, siempre teniendo en cuenta factores que han podido ser ignorados u olvidados.

2.1.3 Alcance y objetivos del estado del arte

El presente estado del arte se ha estructurado como un análisis comparativo que recorre la línea temporal de la navegación marítima desde el punto de vista de una de sus facetas más críticas: la toma de decisiones sobre la ruta. El alcance de este estudio busca tanto catalogar las herramientas actuales, como explicar la metamorfosis que ha sufrido la figura del marino ante la irrupción tecnológica. Por ello, se analiza cómo el juicio empírico, basado tradicionalmente en la interpretación de publicaciones estáticas y la observación de cielo mar, ha sido transformado por sistemas digitales de visualización y, posteriormente, por algoritmos de optimización.

El objetivo central es exponer la evolución de los sistemas de navegación. En primer lugar, se documentan las metodologías convencionales que aún hoy sustentan la base legal de la navegación, donde el marino es el integrador único de la información. Seguidamente, se profundiza en el paradigma contemporáneo, caracterizado por la dependencia de los sistemas de información y visualización de cartas electrónicas (ECDIS) y los servicios comerciales de *weather routing*, analizando críticamente la brecha de transparencia que estos presentan. Finalmente, el estudio proyecta una visión hacia el futuro, evaluando cómo los nuevos estándares de datos dinámicos y la inteligencia artificial redefinirán de nuevo el papel del oficial de puente.

A través de este estudio, se busca identificar las carencias formativas y operacionales que surgen cuando la tecnología avanza más rápido que la normativa o que la propia capacidad de supervisión humana. En última instancia, este análisis didáctico servirá para justificar el desarrollo de nuevas herramientas de simulación que no solo busquen la eficiencia matemática, sino que recuperen el valor del criterio del marino, proporcionando soluciones que sean seguras, optimas y coherentes con los desafíos geopolíticos y medioambientales del siglo XXI.

En conclusión, el análisis se estructura partiendo de una revisión histórica que muestra la evolución de los sistemas de planificación de rutas marítimas, para centrarse posteriormente en las barreras y dificultades que impone la tecnología actual. El estudio desemboca en una evaluación de las líneas futuras, anticipando los desafíos técnicos y humanos que definirán la próxima etapa del transporte marítimo.

Finalmente se aborda el estudio de las herramientas que se integran hoy en día en la educación de los alumnos de la escuela naval.

2.2 La Realidad de la navegación y la planificación de rutas

2.2.1 El legado de la navegación tradicional: Del juicio empírico a la planificación estática

Para comprender la magnitud de la transformación tecnológica actual, es imperativo analizar primero el método convencional de planificación de rutas, un proceso que constituye el núcleo de la formación náutica y la base legal de la navegación segura. Tradicionalmente, la planificación de una travesía oceánica se ha basado en la síntesis de información estática y el juicio empírico del marino. Este método se apoya en el uso de publicaciones náuticas que recopilan décadas de observaciones climáticas

y oceanográficas, permitiendo al oficial trazar una ruta "probable" antes de enfrentarse a la realidad del mar.

El pilar fundamental de esta etapa son las Cartas Piloto (*Pilot Charts*) o APC (*Atlas of Pilot Charts*), como el mostrado en la Figura 2-1[11]. Estas publicaciones ofrecen una representación estadística de las condiciones meteorológicas y oceanográficas medias para cada mes del año. Mediante el uso de "rosas de los vientos" y vectores de corriente, el marino puede identificar los patrones predominantes de viento, la altura significativa de las olas y la probabilidad de encontrar niebla o hielos flotantes en una región determinada [12]. Este análisis permite decidir, por ejemplo, si una ruta ortodrómica (la distancia más corta sobre la esfera) es realmente eficiente o si el encuentro con corrientes contrarias, como la Corriente del Golfo, anularía cualquier ahorro de distancia.

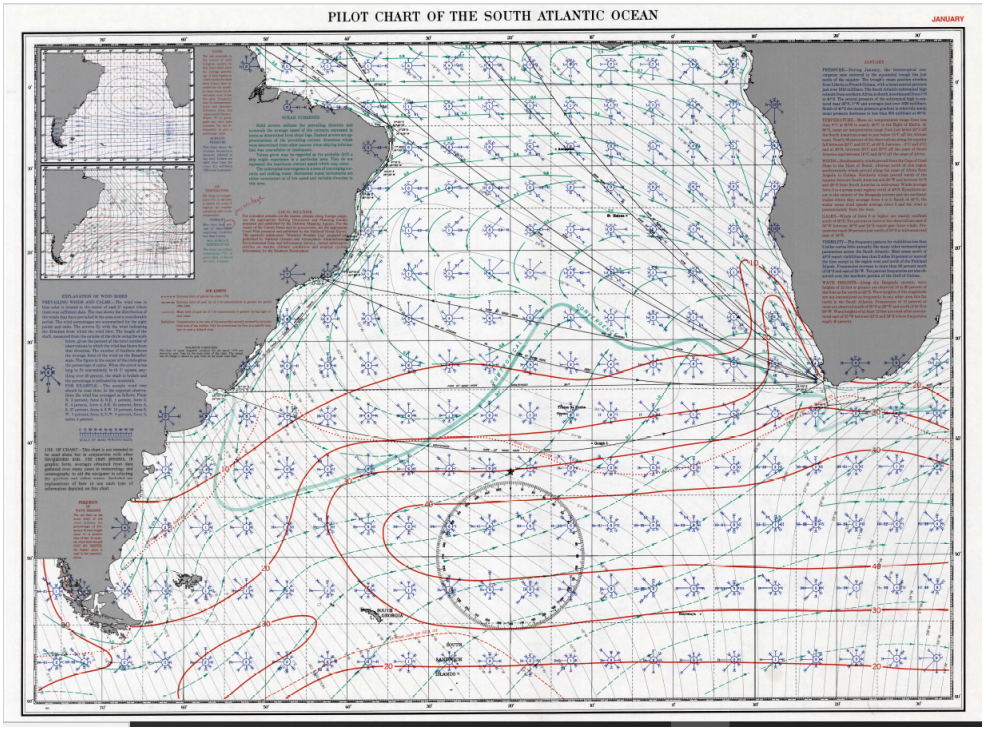


Figura 2-1 Ejemplo de un Atlas meteorológico del Atlántico Sur para enero de 1995 (tomada de [11]).

A este análisis se suma la consulta de los Derroteros, que proporcionan información descriptiva detallada sobre peligros costeros, regulaciones locales y condiciones meteorológicas regionales que no pueden representarse gráficamente en una carta [13]. En este modelo, el "optimizador" es el oficial de puente, quien debe integrar manualmente todas estas variables bajo un criterio de seguridad jerárquico: primero la integridad del buque y la carga, y después la eficiencia económica.

Este enfoque se define como planificación estática porque la estrategia de viaje se fija antes de la salida basándose en promedios históricos. Aunque el marino reacciona a la meteorología que encuentra mediante el uso del radar y la observación visual, carece de la capacidad de procesar en tiempo real modelos dinámicos que recalculen la ruta óptima en un espacio de tiempo reducido. Sin embargo, este legado no ha desaparecido; el convenio SOLAS sigue exigiendo que esta planificación manual sea la base de cualquier viaje, estableciendo que la tecnología debe ser una ayuda a la decisión y nunca un sustituto de la responsabilidad del comandante/capitán [14].

2.2.2 La era de la digitalización: aparición de la ECDIS y la integración de datos

La llegada del Sistema de Información y Visualización de Cartas Electrónicas, ECDIS supuso el cambio de paradigma más drástico en la navegación desde la invención del radar. Este sistema no solo digitalizó la carta náutica, sino que se convirtió en una plataforma de integración donde convergen datos del GNSS, Radar/ARPA, AIS y, de forma creciente, información meteorológica dinámica. Desde una

perspectiva didáctica, el ECDIS ha transformado al oficial de puente: así, de ser un "calculador" de posiciones y rumbos sobre la carta náutica, ha pasado a ser un gestor de información crítica en una interfaz digital.

El cumplimiento del estándar S-57 para el contenido de los datos y el S-52 para su visualización ha permitido que la planificación de rutas pase de ser un proceso estático a uno mucho más fluido. La función de *Route Planning* del ECDIS permite al marino trazar rutas y realizar comprobaciones de seguridad automáticas (como la detección de bajos o áreas restringidas para la navegacion) en segundos, una tarea que tradicionalmente tomaba horas de revisión manual de cartas de papel [15]. No obstante, esta facilidad ha introducido el riesgo de la "excesiva confianza en el sistema", donde el marino puede perder la percepción del entorno al centrarse únicamente en la pantalla.

Un elemento disruptivo en esta fase es la integración de los datos del Sistema de Identificación Automática (AIS). La capacidad de visualizar en tiempo real la posición, rumbo y velocidad de otros buques a nivel global ha permitido que la planificación de rutas ya no considere solo el entorno físico (la costa y el fondo), sino también el entorno del tráfico marítimo. Según la UNCTAD (2023, p. 65)[16], el uso de datos masivos de AIS es lo que hoy permite a los centros de control en tierra y a los sistemas de a bordo optimizar las llegadas a puerto mediante el concepto de *Just-in-Time*, ajustando la velocidad de navegación para evitar la congestión y reducir las emisiones.

A pesar de estos avances, el ECDIS actual sigue siendo, en muchos aspectos, un sistema de visualización más que de optimización inteligente. La mayoría de los sistemas instalados hoy en día muestran capas de información (clima, tráfico, avisos náuticos), pero sigue siendo responsabilidad del oficial integrar mentalmente todas esas capas para decidir si la ruta sigue siendo la óptima. Esta limitación es la que justifica el paso hacia la siguiente etapa del estado del arte: el uso de algoritmos avanzados de apoyo a la decisión que procesen esa información de manera automática.

2.2.3 Criterios de decisión del comandante/capitán: El equilibrio entre seguridad, eficiencia y normativa

En la realidad operativa actual, la planificación de una ruta no es un proceso puramente matemático, sino un ejercicio de equilibrio multiobjetivo donde el comandante/capitán tiene la última decisión. Aunque los sistemas tecnológicos proponen rutas basadas en el ahorro de combustible o tiempo, el marino debe aplicar un criterio de decisión que priorice la seguridad y el confort de la vida a bordo del buque y de la carga por encima de cualquier métrica de rendimiento. Este juicio profesional se fundamenta en tres pilares críticos: la seguridad operativa, la eficiencia económica y el estricto cumplimiento normativo.

El primer pilar, la seguridad operativa, obliga al marino a considerar factores que los modelos a menudo simplifican. Esto incluye la evaluación de las condiciones meteorológicas extremas que son de vital importancia y pueden poner en riesgo el cumplimiento de la misión. El comandante/capitán debe decidir si la ruta propuesta por un optimizador comercial es segura, teniendo en cuenta la estabilidad del buque, la sensibilidad de la carga (especialmente en buques portacontenedores o metaneros) y el confort de la tripulación.

El segundo pilar es la eficiencia y sostenibilidad. Con la introducción de normativas de descarbonización, el marino ya no solo busca minimizar el tiempo de travesía, sino optimizar el consumo de combustible para cumplir con los indicadores de emisiones.

Por último, el cumplimiento normativo automatizado ha pasado de ser una tarea consultiva a una función obligatoria en el puente de mando. Los sistemas modernos deben validar automáticamente que la ruta no viole el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPAM), respete los dispositivos de separación de tráfico (DST) y cumpla con las restricciones de emisiones en zonas SECA/NECA (*Sulphur emission Control áreas* y *Nitrogen Emission Control Areas*). A pesar de esta automatización, el comandante/capitán sigue siendo el único responsable legal ante cualquier incidente, lo que genera

una tensión constante entre la confianza en la sugerencia del algoritmo (a menudo del tipo "caja negra" propio sentido náutico apoyado por su experiencia.

2.3 Estado actual de la modelización matemática y herramientas tecnológicas

2.3.1 Evolución de los modelos de optimización: De grafos deterministas a sistemas híbridos

La representación matemática del problema de optimización de rutas ha experimentado una profunda transformación en las últimas tres décadas. Históricamente, en los años 90 y principios del 2000, la planificación digital se basaba en modelos deterministas que utilizaban grafos y heurísticas simples. Estos modelos calculaban la ruta sobre una red de puntos predefinidos, asumiendo variables estáticas y sin considerar la variabilidad dinámica del entorno oceánico. Sin embargo, la literatura científica más reciente ha desplazado este enfoque hacia modelos híbridos capaces de incorporar la incertidumbre, el aprendizaje automático y la compleja interacción entre el buque y el estado de la mar.

En la actualidad, la valoración técnica muestra una clara tendencia hacia sistemas de decisión en tiempo real que dependen del flujo constante de datos en *streaming*. El paradigma ha pasado de una planificación "fija" a una estructura flexible y autoajustable que permite al oficial de guardia en puente reaccionar ante cambios imprevistos con una precisión matemática superior. En este contexto, las técnicas de aprendizaje por refuerzo profundo (*Deep Reinforcement Learning*)[17] se postulan como una solución disruptiva, demostrando ventajas significativas en entornos dinámicos no lineales donde los algoritmos tradicionales fallan al no poder predecir comportamientos aleatorios en la mar.

Mirando hacia el futuro, observamos que los algoritmos no solo serán más rápidos, sino más integradores. Se anticipa que los sistemas del futuro fusionarán enfoques multiagente con navegación autónoma y una fusión sensorial avanzada que incluirá datos radar, *light detection and ranging* (LIDAR) y satélite. Además, la introducción de sistemas predictivos basados en Inteligencia Artificial Generativa permitirá al oficial de guardia en puente interactuar con simulaciones holísticas que integren el buque, el tráfico, la economía y la regulación en un único modelo de alta fidelidad.

2.3.2 Fiabilidad de los modelos oceanográficos y meteorológicos: La base del cálculo

La precisión de cualquier algoritmo de optimización de rutas depende en gran medida de la calidad y resolución de los datos ambientales de entrada. Para el comandante/capitán, comprender el origen y las limitaciones de estos datos es fundamental para determinar el margen de confianza que debe otorgar a una ruta sugerida. En la actualidad, la comunidad marítima internacional se apoya en modelos oceánicos globales de alta fidelidad, como los proporcionados por el Servicio Marítimo de Copernicus (CMEMS) Figura 2-2[18], el sistema HYCOM o el modelo de oleaje WAVEWATCH III, los cuales permiten modelizar las condiciones reales de navegación con una precisión sin precedentes.

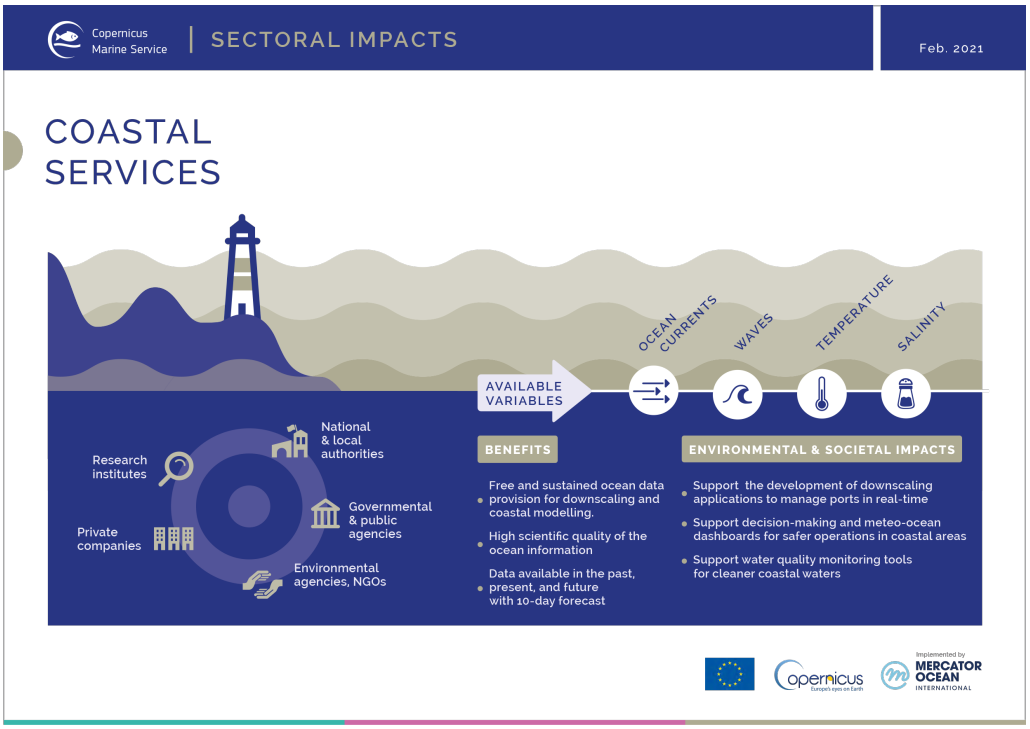


Figura 2-2 Servicios costeros de Copernicus (tomada de [18]).

A pesar de estos avances, la fiabilidad de los modelos no es absoluta y presenta variaciones significativas según la región geográfica y la densidad de instrumentación *in situ*. Mientras que en rutas transatlánticas o zonas costeras europeas la asimilación de datos de boyas y satélites es constante, en regiones polares o áreas remotas del Índico, el error predictivo puede aumentar considerablemente. El comandante/capitán debe ser consciente de que una previsión meteorológica a cinco días vista tiene un componente estocástico que los sistemas de "caja negra" a menudo presentan como datos ciertos, lo que puede llevar a una infravaloración del riesgo meteorológico si no se aplica el juicio profesional[19].

La evolución tecnológica apunta hacia la integración de la IA para la corrección de sesgos en tiempo real. Los modelos del futuro no solo ofrecerán una "foto" estadística del tiempo, sino que serán capaces de autocorregirse mediante la comparación inmediata entre la previsión y los datos reales que el buque experimenta durante la navegación. Esta mejora en la fidelidad de los datos es lo que permitirá, en última instancia, el despliegue seguro de naves autónomas y la optimización de rutas basada en el estado real del casco y la carga, permitiendo al comandante/capitán tomar decisiones basadas en una certidumbre matemática mucho mayor [20].

2.3.3 Herramientas comerciales y el problema de la caja negra

En el panorama marítimo actual, la optimización de rutas está liderada por soluciones de alta complejidad que han transformado la gestión del viaje. Herramientas como StormGeo BVS, referencia en predicción meteorológica integrada, Wärtsilä FOS, centrada en la eficiencia energética y logística, y NAPA, Figura 2-3[21], líder en modelización hidrodinámica aplicada, dominan el mercado global. Estos sistemas han evolucionado hacia una automatización que permite reconfigurar rutas de forma autónoma ante cambios en la meteorología o variaciones normativas en tiempo real. No obstante, a pesar de su potencia operativa, estas herramientas presentan una limitación crítica desde el punto de vista del comandante/capitán y del investigador: hablamos en este sentido de su naturaleza de "caja negra".

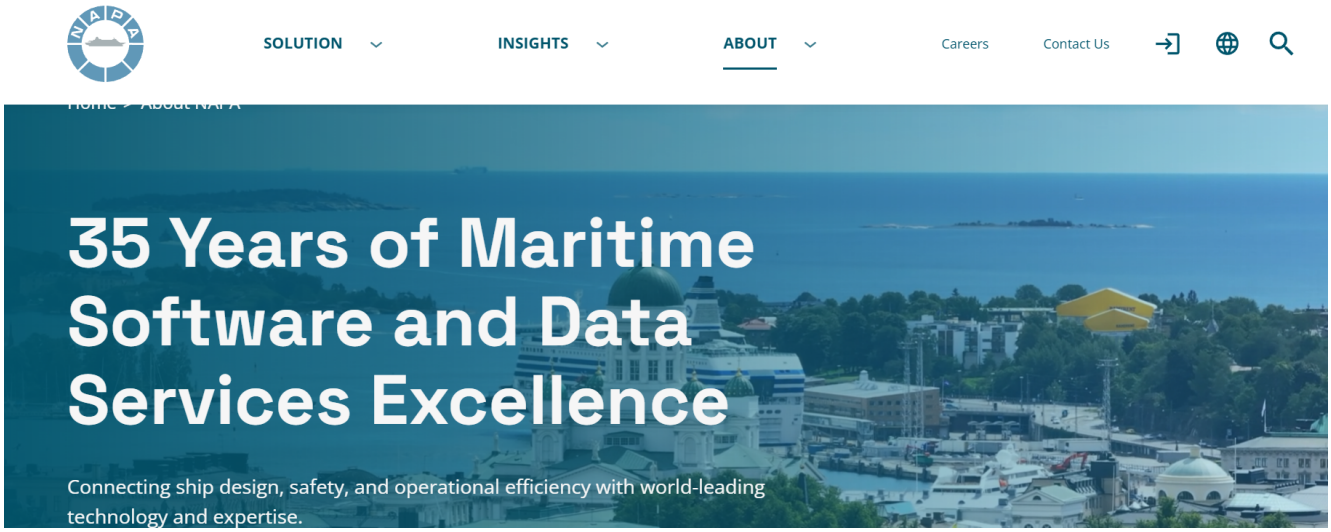


Figura 2-3. Página web de NAPA (tomada de [21]).

El problema de la opacidad algorítmica radica en que la mayoría de los procesos internos de estos sistemas no son auditables ni permiten una investigación académica directa.

Para el comandante/capitán del barco, este hecho implica que a menudo va a recibir una sugerencia de ruta sin conocer la ponderación exacta entre variables de seguridad, consumo y cumplimiento legal. Esta carencia de transparencia genera una "brecha de confianza", especialmente cuando el sistema prioriza la optimización energética en condiciones que el juicio náutico del marino considera límite para la seguridad de la carga o el confort de la dotación.

La valoración actual del estado del arte indica que, aunque estos sistemas han reducido incidentes y mejorado la eficiencia, existe una necesidad urgente de evolucionar hacia la IA explicable (XAI) y la apertura de datos mediante APIs (*Application Programming Interface*). El futuro de estas herramientas comerciales no solo reside en la precisión de sus cálculos, sino en su capacidad para integrarse con sistemas de navegación asistida y navegación autónoma, proporcionando al comandante/capitán una justificación clara para cada recomendación. Esta evolución es esencial para que la tecnología deje de ser un ente opaco y se convierta en un verdadero colaborador en la toma de decisiones estratégicas a bordo.

2.3.4 La interacción buque-medio: Modelos hidrodinámicos y el "Ship Response"

Un paso crítico en la evolución del estado del arte es la transición de la optimización geométrica (basada en la distancia) a la optimización física (basada en el comportamiento). Para que el comandante/capitán valide una ruta propuesta por un algoritmo, el sistema no solo debe procesar datos meteorológicos genéricos, sino predecir el comportamiento dinámico del buque en cuestión bajo esas condiciones, un concepto conocido como *Ship Response*. Actualmente, nos centramos en la integración de modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y series temporales que permiten ajustar las rutas considerando la interacción real entre el casco y el oleaje.

Esta integración permite calcular fenómenos que tradicionalmente dependían únicamente del "sentido náutico" y la experiencia del oficial. Los algoritmos avanzados pueden cuantificar el riesgo de pantocazo (*slamming*), el balanceo sincrónico y la pérdida involuntaria de velocidad por resistencia de olas (*added resistance in waves*). La valoración técnica actual señala que sistemas líderes como NAPA utilizan estos modelos para simular por ejemplo cómo la suciedad del casco (*fouling*) incrementa la resistencia al avance, permitiendo al sistema sugerir rutas que minimicen el esfuerzo mecánico del motor y, por ende, el consumo de combustible.

La tendencia en el futuro apunta hacia el uso de CFD en tiempo real y la creación de Gemelos Digitales (*Digital Twins*), como los de las futuras F-110, Figura 2-4[22]. Estos cambios permitirán que el sistema de optimización se alimente de sensores de deformación y movimiento instalados en el propio buque. De este modo, el oficial de guardia en puente podrá interactuar con una simulación holística en el puente de mando, ensayando virtualmente cómo responderá el buque ante un cambio de rumbo o velocidad antes de ejecutar la maniobra real, garantizando así que la eficiencia matemática nunca comprometa la integridad estructural o la estabilidad del buque.

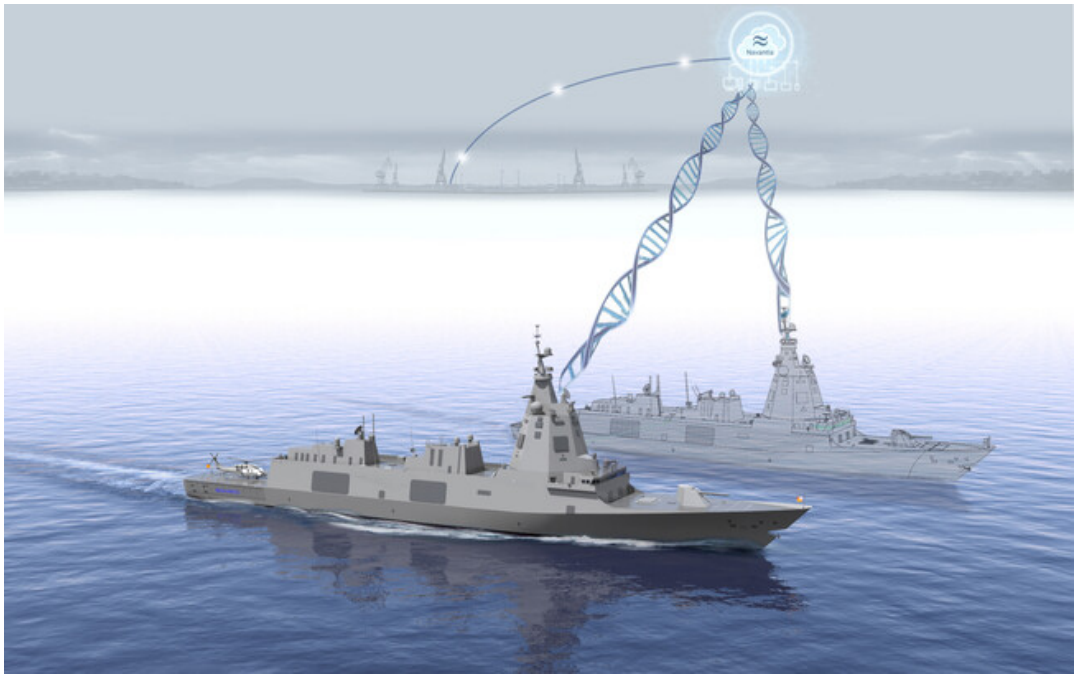


Figura 2-4 Gemelo digital F-110 (tomada de [22]).

2.4 Factores Externos

2.4.1 Validación normativa automatizada: El impacto de las zonas SECA/NECA y el estándar S-100

La planificación de rutas moderna ha dejado de ser un problema exclusivamente meteorológico para convertirse en un desafío de cumplimiento legal dinámico. Las restricciones ambientales impuestas por el Anexo VI del Convenio MARPOL han creado zonas de control de emisiones (ECA) que actúan como fronteras invisibles con un impacto directo en la operativa del buque. El comandante/capitán debe gestionar la transición entre diferentes tipos de combustible o la activación de sistemas de limpieza de gases de escape antes de la entrada en estas áreas, lo que introduce una variable determinante en el algoritmo de optimización: el coste diferencial de la energía y la logística de tanques.

El desarrollo del estándar S-100 de la OHI facilita que estas restricciones normativas se integren directamente en el sistema de navegación. A diferencia de las cartas electrónicas tradicionales (S-57), este nuevo modelo permite que las regulaciones locales, las zonas protegidas y los límites de emisiones sean datos interoperables para el software de optimización. Esto reduce el riesgo de infracciones involuntarias, permitiendo que el sistema calcule mediante simulaciones si es económicamente preferible rodear una zona ECA consumiendo más combustible de bajo coste o atravesarla utilizando destilados más caros.

La evolución de estas herramientas tiene como objetivo conseguir que la legislación marítima digital sea una capa de información activa en el puente de mando. La integración de estos factores permite que el oficial de guardia en puente disponga de una validación automática de la ruta frente a los TSS y las áreas de especial sensibilidad medioambiental (PSSA). Aunque esta automatización no sustituye la

responsabilidad legal del mando, proporciona un nivel de seguridad jurídica indispensable en un entorno regulatorio cada vez más estricto donde el error humano en el cumplimiento puede acarrear sanciones económicas masivas para la naviera.

2.4.2 El factor geopolítico y la seguridad física: Piratería, zonas de conflicto y ciberseguridad

La optimización de rutas en la marina mercante contemporánea ha trascendido el análisis puramente técnico para integrarse en un contexto de seguridad global. Hoy en día no solo se tiene en consideración la ruta más corta o la más económica, sino aquella que minimiza la exposición a riesgos asimétricos. La inestabilidad en pasos angostos de carácter estratégicos para el comercio marítimo (*chokepoints*) como el Estrecho de Bab el-Mandeb (Mar Rojo) o el Estrecho de Ormuz (Océano Indico), o zonas con riesgo de piratería, debe incluirse en su matriz de decisión primaria, en la Figura 2-5 podemos observar un ejemplo de los ataques sucedidos entre los años 2005-2010, auge de estas actividades[23].

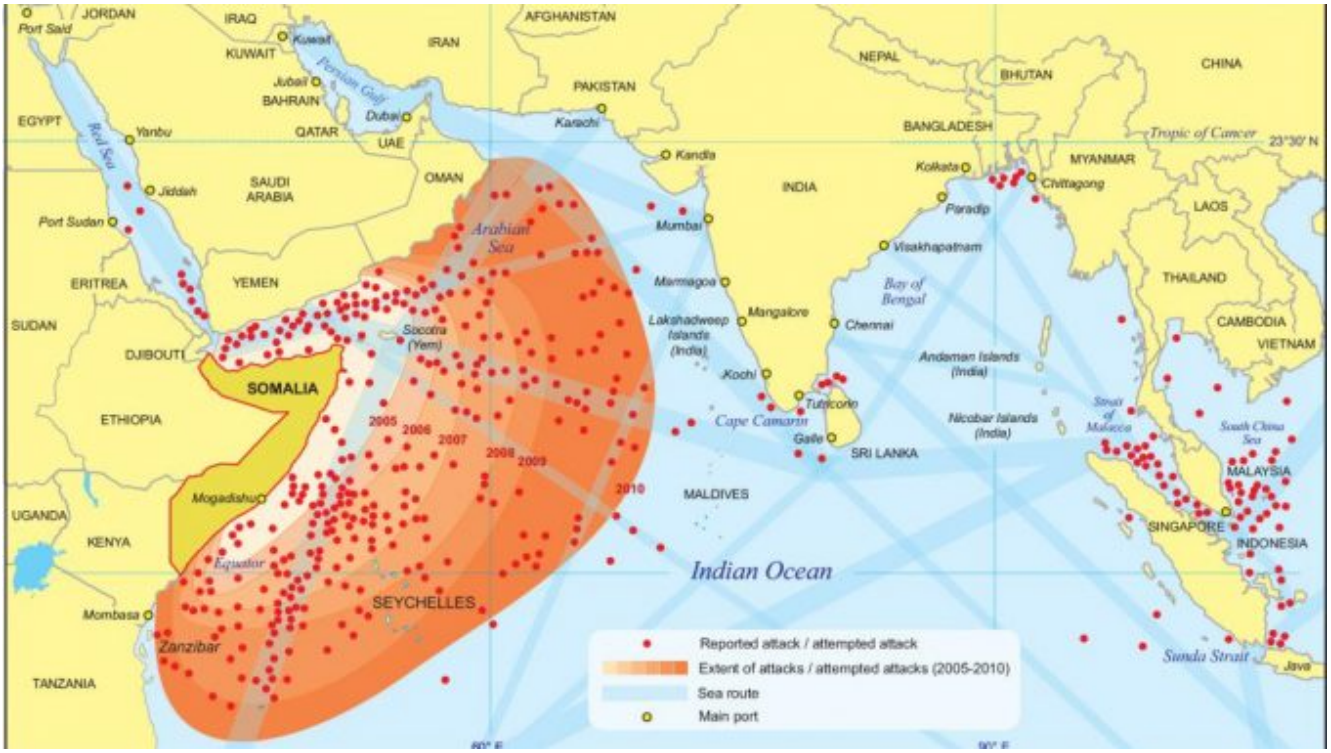


Figura 2-5. Ataques de piratería en el índico entre 2005-2010 (tomado de [23]).

Este análisis de riesgo físico se alimenta hoy de datos no estructurados provenientes de centros de inteligencia marítima y agencias de seguridad privada. A diferencia de un parte meteorológico, la información sobre amenazas es fluida y requiere una validación constante por parte del mando. Un desvío preventivo, como la circunnavegación del Cabo de Buena Esperanza para evitar zonas de riesgo, supone un reto de planificación masivo donde el sistema de apoyo a la decisión debe recalcular no solo el combustible, sino la logística de suministros y el bienestar y seguridad de la dotación ante travesías mucho más prolongadas.

Paralelamente, ha surgido una amenaza invisible pero crítica: la vulnerabilidad de los sistemas de posicionamiento y navegación. El *spoofing* o la interferencia intencionada de las señales Global Navigation Satellite System (GNSS) en zonas de tensión geopolítica puede inducir al buque a errores de navegación catastróficos, alterando su posición real en la carta electrónica. Como consecuencia debemos supervisar que el optimizador de rutas cuente con mecanismos de redundancia y detección de anomalías cibernéticas, asegurando que la ruta sugerida se base en datos íntegros y no manipulados por terceros.

La integración de estas amenazas está dando lugar a sistemas de "Alerta Temprana de Riesgo Geopolítico". Estas herramientas cruzan la posición AIS del buque con zonas de exclusión declaradas y

reportes de incidentes en tiempo real. Esta capacidad permite que el sistema proponga maniobras evasivas o cambios de rumbo estratégicos antes de que el buque entre en el radio de acción de una amenaza física, proporcionando una capa de protección proactiva que complementa las medidas de seguridad tradicionales a bordo.

Finalmente, la toma de decisiones en este ámbito refuerza la necesidad de la supervisión humana. Aunque un algoritmo puede sugerir una ruta segura basándose en estadísticas de incidentes, solo el comandante/capitán posee la autoridad legal y el criterio moral para evaluar si el riesgo es aceptable dadas las características específicas del buque y su carga. Esta interacción entre la inteligencia de datos y el juicio profesional es lo que define la resiliencia operativa de la navegación moderna ante la incertidumbre global.

2.4.3 Carga cognitiva y la interfaz Hombre-Máquina (HMI)

La eficacia de una ruta optimizada no reside exclusivamente en la potencia de cálculo del algoritmo, sino en la capacidad del equipo de navegación del barco para procesar y ejecutar dicha información sin comprometer la seguridad. En los puentes de mando actuales, la proliferación de sensores y sistemas de monitorización ha generado un entorno de alta densidad informativa que puede derivar en una saturación sensorial. El riesgo de la "parálisis por análisis" es una preocupación creciente en el sector, ya que el exceso de alarmas y datos secundarios en el ECDIS puede enmascarar indicadores críticos, elevando la carga cognitiva del oficial de guardia en momentos de navegación compleja o tráfico denso[24].

Bajo esta premisa, la evolución de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI) busca transformar al sistema de una fuente pasiva de datos a un colaborador activo.

Debemos tender hacia principios de diseño que priorizan la conciencia situacional, filtrando el ruido visual para que solo la información relevante según el contexto llegue al mando. Esta jerarquización de datos es fundamental para combatir la fatiga mental y asegurar que la toma de decisiones se base en una comprensión clara del entorno, y no en una interpretación apresurada de gráficos complejos.

Uno de los pilares para garantizar esta simbiosis es la implementación de la IA Explicable (XAI). A diferencia de los sistemas tradicionales que solo ofrecen un resultado final, la XAI proporciona el razonamiento técnico que sustenta una sugerencia de cambio de rumbo o velocidad. Si el sistema comunica que la alteración se debe a una previsión de resonancia paramétrica en lugar de un simple ahorro de combustible, el comandante/capitán puede validar la maniobra con una confianza técnica superior, integrando su experiencia náutica con la precisión del modelo matemático.

En este sentido la estandarización visual a través del estándar S-100 juega un papel determinante en la seguridad pasiva. Al unificar la forma en que se presentan los peligros, las capas meteorológicas y las restricciones legales en cualquier marca de equipo, se reduce el tiempo de adaptación y el error humano derivado de la confusión entre diferentes plataformas tecnológicas. En última instancia, una interfaz ergonómica y transparente es el canal que permite que la responsabilidad legal del comandante/capitán se ejerza sobre una base de datos íntegra y comprensible, asegurando que la tecnología potencie, y no reemplace, el juicio profesional en la mar.

2.5 Optimización de rutas marítimas en navegación a vela

2.5.1 Cinemática en la navegación a vela: abatimiento y fuerzas laterales

En un velero, la cinemática se basa en un equilibrio dinámico de fuerzas que no son paralelas al rumbo deseado. A diferencia de un buque a motor, el empuje generado por las velas tiene una componente transversal muy potente que tiende a desplazar el barco lateralmente. Este desplazamiento, denominado abatimiento, es el ángulo entre el rumbo de crujía y el rumbo real sobre el agua. El equipo de navegación debe integrar este factor en su planificación, sabiendo que el abatimiento aumenta drásticamente al navegar en rumbos de ceñida (viento de proa) y disminuye en rumbos portantes.

El cálculo del rumbo real exige la comprensión de la interacción entre la sustentación aerodinámica de las velas y la sustentación hidrodinámica de la orza o quilla.

Cuando el viento incide en las velas, el velero escora, lo que a su vez altera la forma del casco sumergido y, por ende, su resistencia y capacidad de mantener el rumbo. Un exceso de grados de escora no solo es incómodo, sino que cinemáticamente es ineficiente, ya que la orza pierde superficie efectiva de sustentación y el abatimiento se dispara, obligando a realizar correcciones constantes en el timón que actúan como un freno hidrodinámico.

La cinemática se complica aún más por la diferencia entre el viento real (el que sopla sobre el mar) y el viento aparente (el que siente el barco en movimiento). Dado que las velas reaccionan al viento aparente, cualquier aumento en la velocidad del velero hace que el viento aparente "caiga" hacia la proa. Este fenómeno obliga al oficial de guardia en puente a ajustar constantemente las velas o el rumbo para mantener el ángulo de ataque óptimo, creando una trayectoria que, vista desde un satélite, rara vez es una línea recta, sino una curva dinámica que busca el equilibrio entre la velocidad del barco y la dirección del viento.

Por último, en la planificación de una derrota de altura, la cinemática debe considerar el efecto de las corrientes marinas. En un velero que navega a velocidades bajas (5-8 nudos), una corriente contraria o lateral de apenas 1 o 2 nudos puede suponer una deriva de 20 o 30 grados respecto al rumbo previsto. La victoria técnica en la planificación reside en utilizar el abatimiento y la corriente a favor, convirtiendo fuerzas que inicialmente parecen opuestas en componentes vectoriales que "empujen" al velero hacia su destino de forma eficiente.

Durante el crucero de los guardiamarinas a bordo del buque escuela ¨Juan Sebastián Elcano¨ Figura 2-6, la comprensión de estos factores es esencial. La gran mayoría de la travesía se realiza meramente a vela y una buena planificación de la derrota es crucial para las travesías que este realiza, ya sea el cruce del océano atlántico o una vuelta al mundo.



Figura 2-6 Buque escuela Juan Sebastián Elcano en aguas del Pacífico (elaboración propia).

2.5.2 El uso de las polares de rendimiento y la optimización de la VMG (Velocity Made Good)

El factor determinante en la planificación de la derrota de un velero no es la velocidad absoluta por el agua, sino la VMG o "Velocidad Efectiva en el Rumbo", tal y como se muestra en la Figura 2-7. La VMG es la proyección de la velocidad del velero sobre la dirección exacta del viento o hacia el destino. Para optimizarla, el comandante/capitán utiliza las Polares de Rendimiento, que son diagramas que indican cuál es la velocidad máxima que el velero puede alcanzar para cada ángulo y velocidad de viento[25].

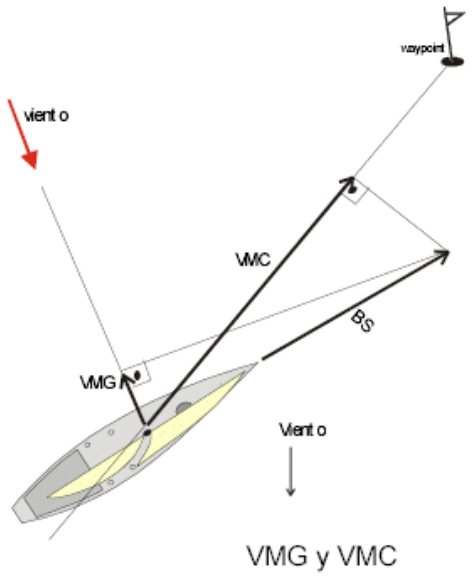


Figura 2-7 Suma vectorial VMG y VMC (tomada de [25])

La planificación basada en polares demuestra que, para llegar a un punto situado directamente contra el viento, es más rápido navegar a 45 grados del viento a gran velocidad que intentar "forzar" un ángulo más cerrado donde el barco se frena. El software de optimización moderno utiliza estos datos para proponer los puntos de virada (*tacks*) ideales. Este análisis permite al comandante/capitán decidir si es preferible realizar bordadas largas o cortas en función de la previsión de cambios en la dirección del viento (*roles*), una táctica que puede ahorrar horas de navegación.

2.5.3 Meteorología táctica y la gestión del oleaje en la derrota

En la navegación a vela, la meteorología trasciende la mera consulta de un parte de seguridad para convertirse en el motor cinemático del viaje. La planificación de la derrota debe realizarse bajo un prisma de meteorología táctica, donde se busca no simplemente evitar el mal tiempo, sino posicionar el velero en el sector más favorable de los sistemas de presión. En el hemisferio norte, por ejemplo, situarse en el cuadrante sur de una baja presión en movimiento garantiza vientos portantes de componente oeste, permitiendo velocidades medias muy superiores a las que se obtendrían navegando por el centro del sistema, donde las calmas o los vientos variables pueden detener el avance por completo.

El oleaje representa el factor de resistencia más complejo de modelar y el que más influye en la fatiga estructural del velero. La derrota óptima no siempre coincide con la dirección del viento más fuerte, ya que un mar de proa con olas cortas y escarpadas —típicas de zonas de poca profundidad o corrientes contrarias— puede generar un efecto de "frenado" hidrodinámico que anule el empuje de las velas.

También se debe evaluar la longitud y el periodo de la ola; si el velero "pica" en cada seno de la ola (pantocazo), la pérdida de velocidad es masiva. En estos escenarios, la táctica habitual consiste en abrir el ángulo de navegación respecto al viento (*footing*) para ganar potencia y atravesar la masa de agua con mayor inercia, aunque esto suponga desviarse de la línea recta hacia el destino.

La gestión de los "roles" o cambios de dirección del viento es otro pilar de la planificación táctica. Un equipo de navegación experimentado no traza una ruta fija, sino que establece una estrategia de bordadas basada en la previsión de giros del viento a corto y medio plazo [26]. Al navegar en ceñida, si el viento rola hacia la proa, el velero pierde ángulo y eficiencia; si rola hacia la popa, se dice que el viento "abre" y el barco gana velocidad. La capacidad de anticipar estos cambios mediante la observación de nubes (como los cúmulos que indican térmicas) o el análisis de modelos de mesoescala permite a la tripulación realizar las viradas en el momento preciso para recorrer la menor distancia real sobre el agua.

Finalmente, el factor humano y la seguridad de la jarcia limitan la maniobra a la hora de cumplir con la optimización matemática. En navegación de altura, el comandante/capitán debe considerar que un rumbo que teóricamente es el más rápido según las polares de rendimiento puede resultar insostenible para la tripulación debido a la escora excesiva o al movimiento violento del barco. La derrota debe, por tanto, incorporar márgenes de maniobra que permitan reducir trapo o cambiar de rumbo rápidamente ante un chubasco (*squall*) o un empeoramiento súbito del estado del mar. Esta simbiosis entre la precisión del algoritmo meteorológico y el juicio náutico del comandante/capitán es lo que garantiza que una derrota sea, además de eficiente, marinera y segura.

2.5.4 Interacción hidrodinámica: Corrientes, mareas y la deriva en la planificación

La planificación de una derrota para un velero puro no puede completarse sin un análisis exhaustivo de la dinámica de las masas de agua. A diferencia de un buque mercante de gran tonelaje, cuya inercia y potencia de motor minimizan el impacto de las corrientes superficiales, un velero opera en un rango de velocidades donde una corriente contraria de apenas dos nudos puede reducir su avance efectivo en un 30% o 40%. Por tanto, debemos integrar en su software de optimización los modelos de corrientes globales (como la Corriente del Golfo o la de Kuroshio) y las corrientes de marea locales, las cuales pueden transformar una zona de navegación segura en un área de mar arbolada y peligrosa si el viento sopla en dirección contraria a la corriente (*wind against tide*).

Técnicamente, el concepto clave en este apartado es la diferencia entre el Rumbo de Superficie (Rs) y el Rumbo Efectivo o sobre el Fondo (Re), en la Figura 2-8[27] podemos observar claramente la suma de vectores para calcular el rumbo de superficie.

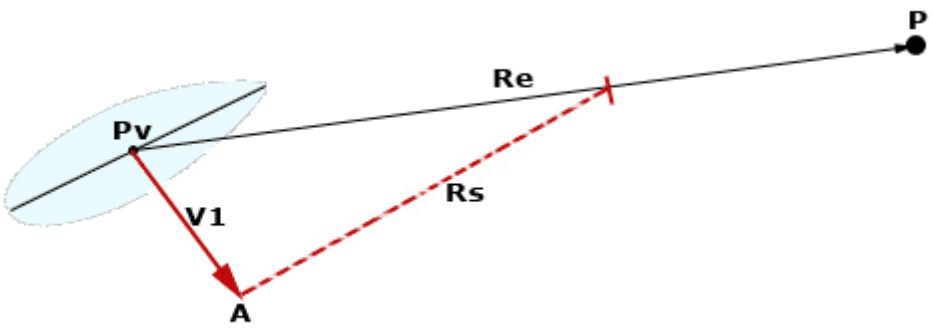


Figura 2-8 Suma de vectores Rumbo de superficie y rumbo efectivo (tomada de [27])

La planificación moderna utiliza archivos GRIB de corrientes que se superponen a los de viento para calcular la "ruta de tiempo mínimo". En zonas como el Canal de la Mancha o el Estrecho de Gibraltar, a menudo se opta por una derrota que parece ilógica geométricamente —alejándose del destino— para posicionar el velero en una "veta" de corriente a favor que le proporcione un empuje gratuito de varios nudos. Esta táctica, conocida como navegación por corriente, exige una precisión extrema; un error de cálculo de pocas millas puede dejar al velero atrapado en un remolino o en una contra-corriente costera que obligue al uso prolongado del motor, desvirtuando la eficiencia de la navegación a vela.

Otro factor crítico es el impacto de la corriente en el viento aparente. El velero "siente" el viento en función de su movimiento real sobre el agua; por lo tanto, una corriente que empuja al barco hacia el viento aumentará la intensidad del viento aparente y cerrará su ángulo, mientras que una corriente a favor del viento lo disminuirá. Este fenómeno obliga al timonel a realizar ajustes constantes en el trimado de las velas incluso cuando el viento real permanece constante. La integración de estos datos en los sistemas de apoyo a la decisión permite que el algoritmo proponga cambios de bordada basados no solo en el viento, sino en la ganancia neta de VMG que proporciona el flujo de la marea en cada momento del ciclo.

Finalmente, la gestión de la deriva por corriente es una cuestión de seguridad física. En aproximaciones a costa o pasos estrechos, se debe calcular el "margen de seguridad de sotavento", asegurándose de que la combinación de abatimiento por viento y deriva por corriente no empuje al velero hacia peligros submarinos o zonas de tráfico denso. El estado del arte actual en aplicaciones de *routing* permite simular estas trayectorias con alta fidelidad, proporcionando una visualización clara de su "cono de incertidumbre" y permitiéndole tomar decisiones preventivas que garanticen que, a pesar de las fuerzas del mar, el velero mantenga siempre una posición de ventaja táctica.

2.6 Tecnologías de vanguardia en la planificación y monitorización de la derrota

2.6.1 Realidad aumentada (AR) y visualización de trayectorias predictivas

La integración de la Realidad Aumentada (AR) en el puente de mando representa el siguiente salto evolutivo tras la consolidación del ECDIS y los sistemas cartográficos vectoriales. Esta tecnología permite superponer la planificación de la ruta y la información crítica de navegación directamente sobre la visión real del oficial de guardia en puente, ya sea a través de pantallas transparentes situadas en los ventanales del puente (*Heads-Up Displays*) o mediante dispositivos de visión sintética. El valor operativo fundamental de la AR reside en que permite visualizar la derrota segura y las áreas de peligro, como bajos o zonas de exclusión, proyectadas físicamente sobre el mar. Esta fusión elimina la necesidad de alternar constantemente la vista entre el exterior y las pantallas multifunción, mitigando el riesgo de pérdida de conciencia situacional en maniobras críticas o en condiciones de visibilidad reducida[28].

Más allá de la representación estática de líneas de rumbo, los sistemas de planificación futuros incorporan vectores predictivos dinámicos basados en modelos de respuesta del buque en tiempo real. Estos sistemas procesan la inercia, el calado y las fuerzas ambientales, como el viento y la corriente, para proyectar sobre el horizonte una envolvente de maniobra precisa.

Si el sistema de planificación detecta una desviación respecto a la derrota prevista, la interfaz de AR resalta visualmente el corredor de seguridad, permitiendo que el oficial de guardia en puente perciba de forma intuitiva si el buque se está aproximando a un límite de calado o a una zona de tráfico denso. Esta capacidad de anticipar la trayectoria futura del buque transforma la planificación de la derrota de un ejercicio de consulta de datos a una guía visual continua que reduce significativamente la carga cognitiva durante la navegación costera.

La efectividad de la AR en la planificación de rutas se ve potenciada por su capacidad de destacar blancos AIS y señales marítimas con información contextualizada directamente en el campo de visión. Al observar un buque en el horizonte, el oficial puede ver, superpuesta a la imagen real, la información de su punto de aproximación más cercano (CPA) y su plan de ruta previsto, siempre que este sea

compartido mediante sistemas de intercambio de datos. Esta transparencia informativa permite validar las decisiones del optimizador de rutas de forma instantánea, ya que se puede contrastar físicamente dónde se producirá el cruce y si la maniobra sugerida por el algoritmo es coherente con el entorno físico circundante.

Finalmente, la implementación de la visión sintética y la AR actúa como una medida de seguridad pasiva ante fallos de visibilidad o de los sistemas tradicionales. En escenarios de niebla cerrada o navegación nocturna, el sistema proyecta una representación digital del canal de navegación y de la ruta planificada sobre la oscuridad, basándose en la base de datos batimétrica y el posicionamiento de alta precisión. Esta tecnología garantiza que la planificación de la derrota sea siempre accesible y comprensible, proporcionando a el oficial de guardia en puente una herramienta de "transparencia ambiental" que asegura que la intención estratégica del viaje se mantenga alineada con la realidad geográfica, independientemente de las condiciones meteorológicas externas.

2.6.2 Planificación cooperativa y el intercambio de rutas mediante VDES

La planificación de derrotas está evolucionando desde un modelo individualista hacia la denominada navegación cooperativa. Este cambio de paradigma es posible gracias a la implementación del sistema VDES (*VHF Data Exchange System*), considerado la evolución del AIS tradicional. Mientras que el AIS tiene una capacidad de transmisión de datos muy limitada, el VDES ofrece un ancho de banda significativamente mayor, lo que permite que los buques no solo compartan su posición, rumbo y velocidad actuales, sino su plan de ruta completo (por ejemplo, los *waypoints* previstos). Este intercambio de intenciones permite que el software de planificación del buque identifique conflictos de tráfico con horas de antelación, mucho antes de que los buques entren en el rango de detección del radar.

Para el comandante/capitán/capitán, esta tecnología transforma la gestión del tráfico de una tarea reactiva a una estratégica y coordinada. Al integrar los planes de ruta de los buques circundantes en su propio sistema de optimización, el algoritmo puede proponer ajustes mínimos de velocidad o rumbo que eviten situaciones de aproximación excesiva de forma proactiva.

Esta coordinación automática reduce el estrés operativo en el puente y minimiza la necesidad de maniobras evasivas bruscas de última hora, lo que a su vez se traduce en una navegación más fluida y en un ahorro sustancial de combustible al evitar aceleraciones y frenados innecesarios.

La planificación cooperativa se extiende también a la relación entre el buque y los Centros de Control de Tráfico Marítimo (VTS). Con el VDES, el VTS puede enviar al buque sugerencias de rutas optimizadas o "ventanas de llegada" basadas en la congestión real del puerto de destino. Este concepto, conocido como *Just-In-Time Arrival*, permite que el comandante/capitán/capitán ajuste la derrota para llegar exactamente cuando el práctico y el muelle están disponibles. El resultado es una eliminación casi total de los periodos de fondeo en espera, optimizando la eficiencia logística de toda la cadena de suministro y reduciendo las emisiones contaminantes en las zonas costeras[29].

Finalmente, el intercambio de rutas mediante VDES actúa como una capa adicional de seguridad ante fallos en los sistemas de detección activa. En zonas de alta densidad de tráfico o en condiciones meteorológicas extremas donde el radar puede presentar ecos falsos, contar con la "intención de movimiento" de los buques cercanos validada digitalmente proporciona una certeza jurídica y operativa sin precedentes. Esta transparencia de datos entre plataformas convierte la derrota en un contrato dinámico entre los actores del mar, garantizando que la planificación de cada buque contribuya a la seguridad colectiva y a la fluidez del transporte marítimo global.

2.6.3 Optimización basada en conectividad satelital de baja latencia

La llegada de constelaciones de satélites de órbita baja (LEO), como Starlink[30]o OneWeb[31], ha provocado un cambio de paradigma en la disponibilidad de datos a bordo, eliminando las barreras de ancho de banda y latencia que históricamente limitaban la planificación de la derrota en alta mar. Anteriormente, se dependía de descargas manuales de archivos GRIB pesados y actualizaciones

meteorológicas que podían tener horas de desfase, lo que obligaba a trabajar con márgenes de error considerables. Con las redes LEO, el buque está "permanentemente sincronizado" con potentes servidores en la nube que procesan modelos meteorológicos de mesoescala en tiempo real. Esta infraestructura permite que el software de navegación realice recalibraciones constantes de la ruta cada vez que se detecta una alteración mínima en las condiciones del mar, asegurando una optimización dinámica y perpetua que antes era técnicamente inviable.

Desde una perspectiva técnica, esta conectividad permite la implementación del concepto de Edge Computing combinado con el procesamiento en la nube. Mientras que el sistema local del buque gestiona la seguridad inmediata y los datos de los sensores internos, los servidores en tierra calculan miles de variantes de la derrota basándose en el tráfico global y el *big data* histórico, enviando al buque únicamente la solución óptima.

Esto significa que la planificación ya no es un evento puntual que se realiza al salir de puerto, sino un servicio de flujo continuo. El sistema puede, por ejemplo, ajustar rumbo y velocidad de forma coordinada al recibir una actualización de un frente que todavía se encuentra a cientos de millas de distancia, garantizando el camino de menor resistencia sin intervención manual.

Además de la eficiencia energética, esta conectividad de alta velocidad es el habilitador determinante para la asistencia técnica remota en la toma de decisiones. Ante una avería mecánica que afecte a la propulsión o una situación meteorológica extrema que invalide la planificación original, el comandante/capitán puede compartir el flujo de datos del puente y vídeos en alta definición con centros de apoyo en tierra de forma instantánea. Esta capacidad de consulta externa refuerza la seguridad de la derrota, permitiendo que expertos en hidrodinámica o meteorólogos de la compañía analicen la situación del buque en tiempo real. Este nivel de soporte convierte al comandante/capitán en el gestor de una "inteligencia colectiva", donde la decisión final en el puente está respaldada por una red de expertos conectados globalmente.

Finalmente, la integración de redes LEO facilita la actualización automática y cibersegura de las cartas electrónicas (ENC) y el software de navegación. En un entorno donde las amenazas de ciberseguridad marítima, como la perturbación de la señal GPS *(spoofing)*, son crecientes, contar con una conexión estable permite que los parches de seguridad y las nuevas correcciones de la derrota se apliquen de forma transparente y cifrada. Esto garantiza que el oficial trabaje siempre sobre la base cartográfica más reciente y con las últimas optimizaciones algorítmicas disponibles. Al eliminar el riesgo de error humano asociado a la gestión manual de datos y descargas, la conectividad satelital se consolida como el sistema nervioso central de la navegación moderna, permitiendo que el comandante/capitán se enfoque en la supervisión de alto nivel mientras la tecnología asegura la integridad y frescura de los datos de navegación.

2.6.4 Interfaces HMI de nueva generación: Control por voz y gestión gestual de la derrota

La evolución en la planificación de rutas no solo afecta a la precisión de los datos, sino también a la forma en la que se interactúa con ellos. Las interfaces hombre-máquina (HMI) están migrando desde los sistemas tradicionales de ratón y teclado hacia entornos de control natural. La implementación de sistemas de reconocimiento de voz avanzados, diseñados específicamente para el entorno acústico de un puente de mando (que debe filtrar el ruido de motores y comunicaciones de radio), permite que el oficial realice consultas complejas sobre la derrota sin desviar la vista del horizonte. Comandos como "visualizar ruta alternativa por ahorro de combustible" o "mostrar CPA de blancos en un radio de 5 millas" permiten una manipulación dinámica de la planificación que reduce la fatiga operativa y acelera la respuesta ante cambios imprevistos.

Complementando al control por voz, la gestión gestual mediante sensores de seguimiento ocular (*eye-tracking*) y cámaras de profundidad representa un avance significativo en la ergonomía del puente. Estas tecnologías permiten que se interactúe con las capas de información del ECDIS o del radar

mediante gestos intuitivos en el aire o simplemente fijando la mirada en un punto específico de la consola[32].

Desde la perspectiva de la planificación de la derrota, esto facilita la modificación rápida de *waypoints* o la consulta de datos batimétricos de una zona concreta de forma casi instantánea. La capacidad de "navegar" a través de los datos meteorológicos y las opciones de ruta mediante gestos naturales transforma el puente en un entorno de trabajo inmersivo, donde la tecnología actúa como una extensión de los sentidos del marino, en lugar de ser una barrera de entrada compleja.

La seguridad de estas interfaces se ve reforzada por sistemas de autenticación biométrica y monitorización del estado de alerta. Los puentes de mando del futuro integrarán sensores que analizan los patrones de parpadeo y la postura del oficial de guardia en puente para detectar signos de fatiga o distracción durante la supervisión de la ruta. Si el sistema detecta que el oficial no está procesando correctamente la información de la derrota en un momento crítico, puede ajustar la interfaz para resaltar los datos más urgentes mediante alarmas visuales o hápticas. Esta "interacción adaptativa" asegura que la planificación de la ruta sea supervisada siempre bajo condiciones óptimas de rendimiento humano, minimizando el riesgo de error por saturación de información[33].

Finalmente, la estandarización de estas interfaces bajo el concepto de *S-100 Universal Hydrographic Data Model* garantiza que, independientemente del fabricante del equipo, se encuentre una lógica de control coherente. Esta interoperabilidad es crucial en un mercado global donde los oficiales cambian de buque con frecuencia. Al disponer de interfaces intuitivas y estandarizadas para la planificación y gestión de la derrota, se reduce drásticamente el tiempo de familiarización con el equipo (*type-specific training*), permitiendo que el oficial se centre en lo que realmente importa: la toma de decisiones estratégicas basadas en una comprensión clara y rápida de la situación náutica facilitada por una tecnología invisible y eficiente.

2.7 La Transición hacia los buques autónomos (MASS) y el nuevo rol del comandante/capitán

2.7.1 Los Niveles de autonomía de la OMI y el cambio de paradigma

La industria marítima se encuentra en una fase de transición crítica hacia la implementación de los buques autónomos de superficie (*Maritime Autonomous Surface Ship*, MASS por sus siglas en inglés). La Organización Marítima Internacional (OMI) ha establecido una clasificación de 4 niveles para definir el grado de autonomía, lo que redefine completamente la relación entre el comandante/capitán y la planificación de la derrota. En el Nivel 1, el buque cuenta con procesos automatizados y apoyo a la decisión, pero la tripulación está a bordo para operar los sistemas; el software de planificación de rutas actúa como un asesor experto que el comandante/capitán supervisa. Sin embargo, al avanzar hacia el Nivel 2 (buque controlado remotamente con tripulación a bordo), el Nivel 3 (controlado remotamente sin tripulación), la figura del mando se desplaza físicamente del puente, finalmente el Nivel 4 define al buque totalmente autónomo, en el cual el sistema operativo es capaz de tomar decisiones y determinar acciones de forma independiente[34].

Desde un punto de vista técnico, la autonomía de Nivel 3 y 4 exige que la planificación de la derrota sea gestionada por sistemas de navegación autónomos basados en Inteligencia Artificial. Estos sistemas deben ser capaces de interpretar no solo las cartas electrónicas y la meteorología, sino también el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPA) de forma algorítmica. Para el comandante/capitán, que ahora opera desde un Centro de Control en Tierra (ROC), la planificación deja de ser una tarea táctica de trazado para convertirse en una tarea de supervisión de lógica computacional. El reto reside en asegurar que el algoritmo de navegación autónoma tome decisiones de ruta que no solo sean matemáticamente óptimas, sino que también sigan la "buena práctica marinera", un concepto tradicional difícil de codificar.

La implementación de estos niveles de autonomía introduce una complejidad técnica sin precedentes en los sistemas de navegación. Un buque autónomo no puede permitirse el fallo de un sensor de posición o de un radar durante la ejecución de su derrota. Por ello, la idea actual se centra en la fusión de datos multisensorial y la navegación inercial. El sistema de planificación de rutas debe ser capaz de navegar "a ciegas" mediante una combinación de cámaras de visión computacional, gracias a sensores LIDAR y datos históricos si se pierde la señal GNSS. El comandante/capitán remoto, en este escenario, actúa como un auditor de la integridad del sistema, interviniendo solo cuando la incertidumbre de los sensores supera los umbrales de seguridad establecidos en la planificación original[35].

Finalmente, esta transición hacia el MASS obliga a replantear la formación y las competencias del oficial de puente. El comandante/capitán del futuro deberá poseer conocimientos avanzados en gestión de datos, ciberseguridad y sistemas expertos. La derrota ya no se "navega" en el sentido tradicional, sino que se "gestiona" mediante una interfaz digital que conecta el buque con una infraestructura global de información. Este cambio de paradigma sugiere que, aunque la presencia física en el mar disminuya, la responsabilidad estratégica del comandante/capitán sobre la seguridad de la vida humana y la protección del medio marino sigue siendo el pilar central de la navegación, ahora mediada por una capa de autonomía inteligente y conectividad total.

2.7.2 Centros de control en tierra (ROC): La monitorización remota de la derrota

La transición hacia la autonomía marítima conlleva la creación de los centros de control en tierra (*Shore Control Centers* o ROC), infraestructuras que actúan como el nuevo cerebro operativo de la flota. En este entorno, el puente físico es sustituido por una estación de trabajo ergonómica donde el comandante/capitán ejerce su autoridad mediante una interfaz digital de alta fidelidad. La planificación de la derrota deja de ser una tarea táctica aislada para convertirse en una gestión de supervisión de múltiples unidades; un solo oficial puede monitorizar el progreso de varios buques simultáneamente, interviniendo únicamente cuando los algoritmos de navegación del buque autónomo (MASS) detectan una situación que excede sus parámetros de seguridad, como un fallo en la interpretación de un blanco AIS o una discrepancia crítica en los datos batimétricos[36].

Desde una perspectiva de arquitectura de sistemas, el ROC opera bajo el concepto de "Espejo Digital". El buque transmite un flujo constante de telemetría que incluye datos de sensores LIDAR, cámaras termográficas y radares de estado sólido, los cuales son procesados en tierra para reconstruir un entorno 3D inmersivo.

El papel del comandante/capitán en este entorno es el de un auditor de lógica. No traza la ruta manualmente, sino que valida las sugerencias de optimización generadas por la IA del buque. Si el sistema propone una desviación de la derrota para evitar un área de baja presión, el oficial debe confirmar que dicha maniobra es coherente con la normativa local y la seguridad estructural, supervisando que la "inteligencia" de la máquina no comprometa la integridad de la carga.

La latencia de comunicación y la redundancia de datos representan los mayores desafíos técnicos para la planificación remota. Para que la supervisión de la derrota sea segura, el intercambio de información entre el buque y el ROC debe realizarse en milisegundos. Un retraso en la señal satelital podría provocar que el comandante/capitán tome una decisión basada en una posición que el buque ya ha superado. Por ello, se integra en algoritmos de "navegación predictiva" en la consola del ROC, que muestran no solo dónde está el buque, sino dónde estará en los próximos 30 segundos basándose en su inercia, permitiendo una reacción proactiva ante posibles colisiones[37].

Finalmente, la operativa en tierra exige el desarrollo de una nueva "ergonomía cognitiva". Al carecer de los estímulos físicos del mar (vibraciones, inclinación, sonido del motor), el comandante/capitán debe aprender a interpretar la derrota a través de indicadores puramente digitales[38]. La planificación incluye ahora protocolos de "Fallo Seguro" (*Fail-Safe*); si se pierde la conexión con el centro de control, el buque debe ser capaz de ejecutar una ruta de emergencia preprogramada hacia una zona de fondeo segura. Esta responsabilidad técnica convierte la labor del

oficial en una función de gestión de riesgos tecnológicos, donde la seguridad de la navegación depende de la capacidad del humano para supervisar sistemas complejos en un entorno de conectividad global.

2.7.3 Ciberseguridad en la derrota: Amenazas de spoofing, jamming e integridad de datos

La digitalización integral de la navegación y la dependencia de la conectividad permanente transforman al buque en un nodo crítico dentro de la red global de transporte, y así mismo en un objetivo vulnerable a ciberataques. En la planificación de rutas actual, la mayor amenaza no es solo el acceso no autorizado a los sistemas del buque, sino la manipulación de los datos de posicionamiento y navegación. Deberemos enfrentarnos ahora a fenómenos como el GNSS *Spoofing* (suplantación de la señal de satélite) y el *Jamming* (bloqueo de la señal). Mientras que el bloqueo es evidente porque el sistema pierde la posición, la suplantación es extremadamente peligrosa: el atacante introduce una señal falsa que hace creer al sistema de navegación que el buque se encuentra en una posición ligeramente distinta, lo que podría desviar la derrota hacia peligros submarinos o aguas territoriales conflictivas sin que salten las alarmas tradicionales.

Desde un punto de vista técnico, la protección de la derrota exige la implementación de sistemas de navegación resilientes. Una de las soluciones puede ser lo que se ha denominado la "fusión de sensores disparatados" para validar la integridad de la ruta. Esto significa que el software de planificación no solo confía en el GPS/Galileo, sino que cruza esos datos constantemente con la navegación inercial (IMU), la posición calculada por el radar y, en sistemas avanzados, mediante visión computacional que reconoce perfiles de costa o estrellas. Para el comandante/capitán, esta redundancia de datos es vital; si el sistema detecta una discrepancia entre la posición satelital y el resto de los sensores, debe alertar inmediatamente sobre una posible "corrupción de la derrota", permitiendo retomar el control manual antes de que el desvío sea crítico[39].

La integridad de los datos de la planificación también se está reforzando mediante tecnologías de "*Blockchain*". Al recibir una actualización de la ruta desde la oficina central o desde un Centro de Control en Tierra, el sistema de a bordo verifica la autenticidad de la orden mediante una firma digital única e inalterable. Esto garantiza que ningún actor externo pueda interceptar y modificar los *waypoints* de la derrota durante la transmisión. Este nivel de seguridad garantiza que el comandante/capitán trabaje siempre sobre una planificación legítima, protegiendo al buque contra el "secuestro digital" de su trayectoria, una preocupación creciente en zonas de inestabilidad geopolítica donde el sabotaje de rutas comerciales es una herramienta de presión real.

Finalmente, la ciberseguridad en el puente de mando exige una nueva cultura operativa basada en la desconfianza digital. La formación del comandante/capitán del siglo XXI incluye protocolos de respuesta ante el fallo total de los sistemas electrónicos de ayuda a la decisión. En un escenario de ciberataque masivo que inhabilite el ECDIS o las comunicaciones satelitales, la planificación de la derrota debe poder revertirse a métodos analógicos o sistemas autónomos aislados (*stand-alone*) que funcionen sin conexión exterior. Esta capacidad de mantener la seguridad de la navegación en un entorno digital hostil es lo que define la resiliencia del mando moderno, asegurando que la tecnología sea una herramienta de apoyo y nunca un punto único de fallo que comprometa la vida humana o el medio ambiente.

2.7.4 Responsabilidad legal y ética

La transición hacia los buques autónomos (MASS) redefine la estructura tradicional de responsabilidad en el sector marítimo, desplazando el foco del error humano directo hacia fallos en el diseño, la programación y la supervisión del sistema. En la navegación convencional, el comandante/capitán ostenta la responsabilidad absoluta bajo el principio jurídico de ser la máxima autoridad a bordo; sin embargo, cuando un algoritmo de inteligencia artificial asume la planificación y ejecución de rutas, la autoría de un posible siniestro se fragmenta. Si el sistema de navegación autónoma comete un error crítico en el trazado de la ruta, la responsabilidad legal tiende a derivar hacia el fabricante

del software o el astillero bajo el concepto de responsabilidad por producto defectuoso, dado que el comandante/capitán pierde la capacidad de intervención directa sobre procesos ejecutados de forma automatizada[40].

Éticamente, la implementación de IA en la planificación de rutas marítimas plantea el dilema de la "caja negra", donde la opacidad de los procesos de aprendizaje profundo dificulta la comprensión de porqué un buque tomó una decisión de maniobra específica en lugar de otra. Esto genera una brecha de rendición de cuentas, ya que las normativas vigentes, como el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPA), están cimentadas sobre el "buen juicio marinero", una cualidad humana que implica discernimiento ante lo imprevisto. Al delegar decisiones críticas a un código —como la elección entre un impacto ambiental menor o el riesgo de integridad estructural del buque— se produce una transferencia de la carga moral desde el puente de mando hacia las oficinas de los desarrolladores, quienes deben prever estos dilemas en la fase de diseño.

El nuevo rol del comandante/capitán en este entorno evoluciona de ser un ejecutor de maniobras a un gestor de riesgos que supervisa sistemas complejos desde un centro de control. Legalmente, aunque el buque opere con autonomía de alto nivel, la figura del operador remoto sigue siendo el garante de la seguridad, debiendo validar la viabilidad de la ruta propuesta por la IA. La culpabilidad en caso de accidente se determina entonces mediante el concepto de "vigilancia efectiva": si el comandante/capitán no intervino ante señales evidentes de mal funcionamiento del algoritmo, la responsabilidad recae sobre él por negligencia. No obstante, si el sistema presenta un fallo sistémico indetectable para el humano, la carga legal se desplaza hacia el proveedor tecnológico, lo que está obligando a una reestructuración profunda de las pólizas de seguro marítimo.

Finalmente, la integración de los MASS exige una armonización internacional que defina si la IA puede ser considerada un sujeto con personalidad electrónica o si siempre debe existir un humano responsable detrás de cada decisión náutica. La tendencia actual en la planificación de rutas autónomas sugiere que la responsabilidad debe ser compartida mediante un enfoque de gobernanza multiactor, donde el armador asume la responsabilidad objetiva frente a terceros, pero mantiene el derecho de repetición contra las empresas de software si se demuestra un error en la lógica de navegación. En última instancia, la planificación de rutas deja de ser una tarea puramente técnica para convertirse en un proceso jurídico-tecnológico donde la trazabilidad de los datos es la única evidencia capaz de señalar al responsable tras un incidente[41].

2.7.5 Conclusiones: El futuro de la navegación y la planificación de rutas

La transición hacia los buques autónomos (MASS) representa mucho más que una evolución tecnológica; supone una redefinición integral de la seguridad y la eficiencia en el transporte marítimo global, podemos observar un ejemplo de MASS en la Figura 2-9[42]. A lo largo de este trabajo, se ha evidenciado que la planificación de rutas ha dejado de ser una tarea estática y dependiente de la intuición humana para transformarse en un proceso dinámico basado en datos masivos. La capacidad de la inteligencia artificial para optimizar trayectorias en tiempo real, considerando variables meteorológicas y logísticas de forma simultánea, permite reducir significativamente el margen de error humano, que históricamente ha sido la causa principal de los siniestros en el mar.

Sin embargo, esta autonomía no implica la desaparición del factor humano, sino su desplazamiento hacia funciones de supervisión estratégica. El nuevo rol del comandante/capitán, ahora transformado en operador remoto o gestor de sistemas, exige un conjunto de competencias digitales y analíticas que van más allá de la náutica tradicional. Este cambio de paradigma garantiza que, aunque la ejecución de la ruta esté en manos de algoritmos, el juicio ético y la toma de decisiones en situaciones críticas sigan bajo el control de profesionales capacitados, asegurando que la tecnología actúe siempre como un facilitador de la seguridad y no como un riesgo imprevisto.

Desde la perspectiva legal y ética se concluye que la legislación internacional debe evolucionar con la misma rapidez que la tecnología para evitar vacíos en la atribución de responsabilidades. La

fragmentación de la culpa entre desarrolladores, armadores y operadores ante un fallo de la IA requiere un marco jurídico armonizado que proporcione seguridad a todos los actores del sector. La creación de protocolos claros de "vigilancia significativa" y la transparencia en los algoritmos de navegación son pilares fundamentales para que la sociedad y las aseguradoras confíen en un sistema donde la máquina asume el control del rumbo, garantizando que siempre exista una trazabilidad clara ante cualquier incidente.

En última instancia, el éxito de los buques autónomos y sus sistemas de planificación de rutas dependerá de la capacidad de la industria para equilibrar la eficiencia operativa con la resiliencia ética y técnica. Los MASS no deben verse como una amenaza a la tradición marinera, sino como la herramienta definitiva para alcanzar una navegación más sostenible, eficiente y segura. La integración de la inteligencia artificial en el puente de mando es un paso irreversible que, bien gestionado, posicionará al sector marítimo a la vanguardia de la cuarta revolución industrial, transformando el océano en un entorno conectado, sostenible y eficiente.



Figura 2-9.Modelo de un MASS (tomada de [42]).

2.8 Integración de herramientas de optimización de rutas marítimas en la formación de los futuros oficiales de la Armada Española

2.8.1 Herramientas actuales utilizadas en la Escuela Naval Militar

He de finalizar tratando un objetivo crucial del trabajo en conjunto, la creación de esta plataforma tiene también el propósito de contribuir en la formación de los futuros oficiales de la Armada a modo de una herramienta evaluadora y didáctica, que permita una transición hacía la compresión tanto del desarrollo de una ruta marítima, teniendo en cuenta todos los factores que afectan, como del correcto uso de herramientas similares que nos encontraremos en el futuro.

Hoy en día, durante todos los cursos de formación en la ENM (Escuela Naval Militar), se les presta mucha atención a los conocimientos de navegación. En primer lugar, durante el primer curso, aprendemos las bases de la cartografía náutica, familiarizándonos con problemas sencillos y planificando rutas costeras. Continuando como aspirantes de segundo, donde ponemos a prueba lo aprendido, siendo los principales responsables de las cartas náuticas en nuestras prácticas en la mar, a bordo de las lanchas

de instrucción, aquí la planificación pasa de ser un simple ejercicio a un problema real. A la vez durante nuestras practicas a bordo de unidades de la Armada nos familiarizamos con herramientas como las WECDIS de los barcos, siendo también responsables de una recalada de navegación, donde se planeará la entrada a un puerto, o un tránsito, trabajando juntamente con la dotación del barco donde nos encontremos. Ya como guardiamarinas de primero, nos centramos en nuestro viaje a bordo del JSE (Juan Sebastián Elcano), momento crucial en nuestra formación en relación con la planificación de rutas marítimas, puesto que aquí, aparte de aprender las bases de la navegación a vela, nos focalizamos en la navegación transoceánica, trabajando ahora con rutas ortodrómicas, realizando los cálculos requeridos para obtener la ruta más corta en relación con la curvatura de la tierra. Como guardiamarinas de segundo continuamos con las lanchas de instrucción, siendo los principales responsables de la seguridad en la navegación de nuestra dotación, básicamente aprendemos a trabajar como un oficial de la Armada. Por último, ya siendo alféreces de fragata finalizamos con las practicas a bordo de una unidad, donde nos integraremos en la dotación y tendremos que poner en práctica lo aprendido durante estos 5 años anteriores.

2.8.2 Futuro en la formación de los oficiales

La evolución de los diferentes sistemas de navegación y planificación de rutas marítimas ha de ser conocida por los alumnos de la ENM, para así implementar su uso en las unidades de la Armada y trabajar de una manera aún más eficaz.

Hoy en día esta transición a las nuevas tecnologías se está llevando a cabo en diferentes ámbitos, por ejemplo, mediante el uso del simulador de navegación, Figura 2-10[43], esta plataforma no se limita a recrear escenarios visuales, sino que constituye un entorno de evaluación integral donde el alumno es sometido a situaciones de alta presión operativa. El sistema permite medir con precisión no solo la profundidad de los conocimientos de navegación y el cumplimiento del RIPA (Reglamento Internacional de Abordajes en la Mar), sino también competencias críticas como la rapidez mental en la toma de decisiones ante fallos de sistemas y la pericia marinera necesaria para maniobrar el buque en condiciones meteorológicas adversas o tráfico denso. Complementariamente, se ha comenzado a implementar tecnología de Realidad Virtual (VR) para el adiestramiento individual Figura 2-11[44], permitiendo al alumno interiorizar estos procedimientos de forma autónoma sin requerir la activación de la dotación completa del simulador de puente.



Figura 2-10. Alumnos de la ENM en el simulador de navegación (tomada de [43]).

Ahora, centrándonos en la planificación de rutas marítimas, los medios en la formación de los alumnos son, hoy en día, los tradicionales (uso de la carta náutica), ya que por una parte se pretenden enseñar las bases en navegación. Sin embargo, es interesante la posibilidad de implementar el uso de sistemas más modernos, como puede ser el producto de este trabajo, un sistema didáctico y evaluador de rutas marítimas, que sea sencillo de utilizar, que considere más variables de las que estamos acostumbrados para encontrar la ruta más optima, y que detecte la habilidad del usuario para planificar una ruta en un entorno determinado y con unas condiciones ambientales concreta.



Figura 2-11 Poster del nuevo simulador VR de navegación (tomada de [44]).

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

3.1.1 Principios básicos y objetivos del programa

El objetivo principal de este trabajo es la creación de una aplicación para el planeamiento y la optimización de rutas marítimas bajo determinadas condiciones ambientales y que a su vez contribuya a la formación en esta materia mediante la evaluación de las rutas en diferentes entornos.

3.1.2 Modo de trabajo

Para llevar a cabo la programación del software empleándola programación asistida por IA, el tutor del trabajo preparó una estructura inicial de clases de código con una funcionalidad básica preparada. Se trata de una aplicación base en donde existen tres modos de operación: Navigation, Editor y Game pero sin mayor funcionalidad que un mapa de OpenStreetMaps integrado en la ventana.

Este TFG consiste en el diseño, prueba y desarrollo de las funcionalidades en cada uno de los modos de operación; además se aporta un punto de vista marino, para cumplir con las necesidades funcionales en nuestro entorno de trabajo. Así mediante un proceso iterativa utilizando IA (Gemini[45], Claude[46] y agentes de código dentro del editor Antigravity[47] se pueden ir añadiendo funcionalidades a la aplicación.

En relación con la programación asistida por IA, es importante destacar que el flujo de trabajo no ha consistido meramente en la generación de *prompts* aislados, sino en interactuar de forma dinámica con el agente de programación. De esta forma, de manera iterativa, se añaden funcionalidades a la aplicación, se realizan modificaciones y se corrigen fallos. Esta metodología se ha llevado a cabo de forma integrada directamente en la herramienta de software *Antigravity*, Figura 3-1, lo que permite una sincronización constante entre las sugerencias de la IA y la estructura del proyecto. También nos permite disponer de la posibilidad de comentar directamente en líneas independientes de código para la resolución de los fallos más complejos, o la modificación de funcionalidades muy concretas.

Complementariamente, para otro tipo de acciones se consultaron otros modelos de IA de forma externa al editor; así por ejemplo, para el diseño del *frontend*, resultó más útil trabajar fuera del editor de código. Esto se debió a que, mientras el agente del editor trabajaba de forma óptima con la lógica funcional, presentaba limitaciones al gestionar la disposición espacial de los componentes, interpretando a menudo las coordenadas de forma aislada y provocando la superposición de elementos en la pantalla. El uso de IA's online permite comprender mejor la lógica del lenguaje visual de la interfaz, facilitando una distribución de componentes más fluida y evitando errores de maquetación complejos.

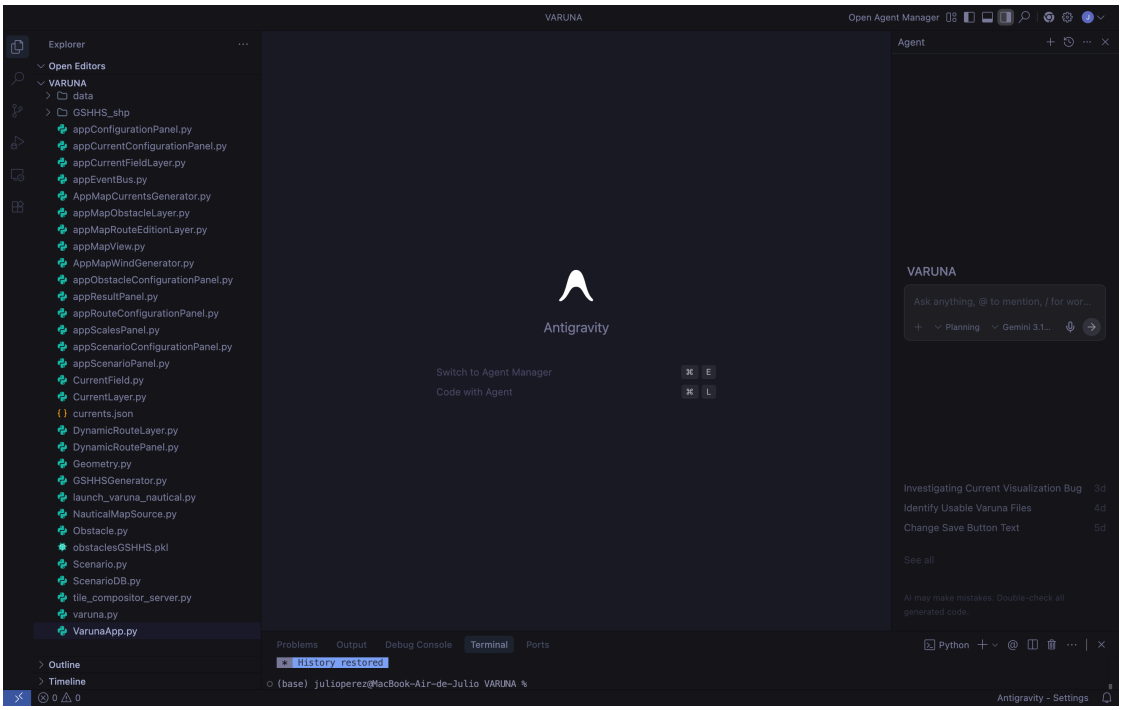


Figura 3-1. Interfaz de Antigravity (elaboración propia).

Para dar soporte al sistema visual de la aplicación, se ha empleado la librería Kivy[48], que consiste en un *framework* de código abierto en Python diseñado para el desarrollo rápido de aplicaciones con interfaces de usuario naturales (*NUI - Natural User Interfaces*).

Entre otras muchas de las razones se eligió Kivy porque la intención del proyecto es implementarlo con soporte para, en el futuro, ser empleado en una pantalla táctil. Además, la arquitectura gráfica de Kivy permite el renderizado de mapas complejos de superposición de capas de obstáculos y el movimiento fluido de elementos en tiempo real, lo cual es importante para el tipo de desarrollo a realizar

3.2 Módulo de integración de datos de costas e islas

3.2.1 Introducción

El primer objetivo que se pretende alcanzar es la definición y generación de la costa como una serie de objetos u obstáculos que puedan integrarse en el escenario de navegación que se desea modelar. Esto responde a la necesidad de realizar cálculos computacionales empleando la información de estos obstáculos, de modo que la aplicación pueda proporcionar la ruta óptima entre dos puntos a partir del campo de corrientes y de la topología de los obstáculos en el escenario.

Continuando con el visor de mapas se utiliza una fuente de teselas compuesta que superpone información náutica sobre la cartografía base de OpenStreetMap (OSM)[49]. Cada tesela (imagen 256x256 en al que se divide el mapa para evitar la latencia) que se muestra en pantalla es el resultado de combinar dos capas de imagen: la tesela base de OSM, que proporciona el fondo geográfico general con líneas de costa, batimetría somera y topografía terrestre, y la tesela correspondiente de OpenSeaMap[50], un proyecto de cartografía náutica colaborativa que añade sobre el mapa elementos propios de la navegación marítima como boyas, faros, marcas de canal, zonas de fondeo y áreas de tráfico separado. Para evitar la latencia de red durante el uso de la aplicación, las teselas compuestas se pre-descargan y almacenan localmente.

Para la definición de los obstáculos que dan forma a la costa, se llevó a cabo un proceso iterativo de evaluación de diferentes fuentes de datos. El objetivo era encontrar el equilibrio óptimo entre precisión geográfica y rendimiento computacional.

3.2.2 Metodología y validación de pruebas comparativas

Dado que la precisión de la línea de costa y el rendimiento del sistema son críticos para la navegación, no se procedió su implementación directa. En su lugar, se diseñó un ciclo de validación iterativo. Para cada fuente de datos evaluada, se desarrolló un entorno de pruebas aislado siguiendo un flujo de trabajo estandarizado de cuatro etapas:

I. Extracción y normalización: Para cada fuente, se desarrolló un *script* dedicado donde se filtran los datos geográficos dentro de un *Bounding Box* (caja delimitadora que encierra el conjunto de geometrías de un área de interés) específico, de forma que se convierte la información obtenida en una lista de objetos geométricos manipulables.

II. Serialización de datos: Los datos procesados no se consumen en tiempo real para evitar tiempos de espera de red en cada prueba. Se optó por serializar los objetos resultantes en archivos binarios Pickle (.pkl)[51], ya que es ideal para guardar y cargar estados complejos.

III. Visualización y superposición (*Layers y MapView*): Se crearon clases de visualización específicas para leer los archivos .pkl y dibujar los vectores resultantes. Así superponiéndolos en el mapa de OSM, es posible comprobar si coinciden los obstáculos y la costa visualizada o si existen desviaciones inaceptables.

IV. Pruebas de estrés y escalabilidad: Una vez cumplimentado el proceso descrito, se aumenta el tamaño de costa que quería descargar hasta llegar al punto de saturación del sistema, determinando así la viabilidad de la fuente para generar mapas de obstáculos en escenarios con grandes distancias.

A continuación, se va a describir individualmente cada una de las fuentes que se han probado. Para facilitar la comparación entre ellas, se proporcionará el número de objetos desarrollados y el tiempo que tarda cada una, además se incorporarán imágenes para poder apreciar la resolución.

3.2.3 Natural Earth (NE)

El punto de partida para la generación del entorno de obstáculos fue la base de datos de dominio público NE[52], específicamente su *dataset* de vectores físicos de "Alta Resolución" (*1:10m Physical Vectors[53]*.

Para procesar esta fuente, se desarrolló la clase llamada AppMapGenerator. Dado que el *dataset* es mundial comenzamos por la descarga de la zona de las Rias Bajas utilizando un *Bounding Box* definido para el área de las Rías Bajas (-9.2 to -8.5 lon, 42.0 to 42.8 lat). A continuación, los datos procesados se serializaron en un archivo .pkl y se visualizaron mediante la clase tipo *layer* sobre el mapa base de OpenStreetMap.

A continuación, el resultado de esta fuente fue el que se ve en la Figura 3-2. Solo fue capaz de extraer dos obstáculos en toda la zona de las Rías Bajas, y tardo un tiempo de 0.98 segundos,

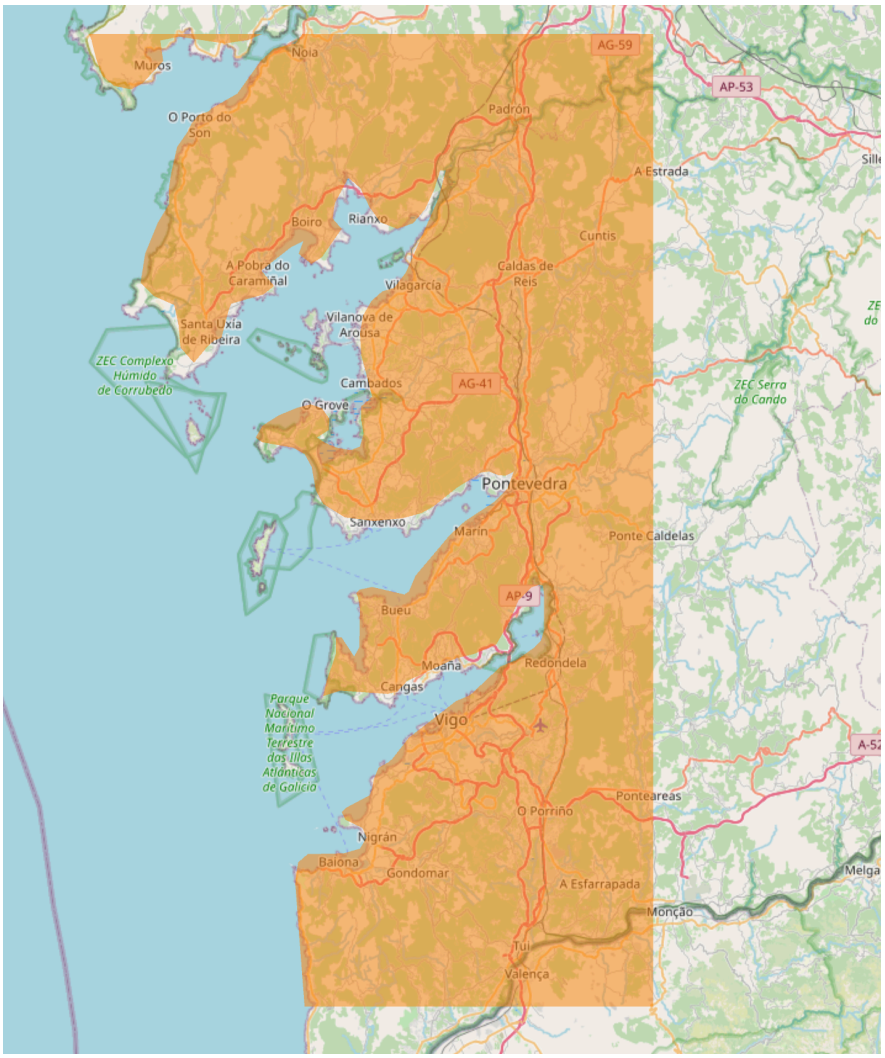


Figura 3-2 Ensayo NE Rías Bajas (elaboración propia).

Como se puede observar, con esta fuente no alcanzamos la calidad requerida par a la realización de la aplicación propuesta. La costa apenas coincide con el mapa proporcionado por OSM.

Como consecuencia en este punto, se nos planteó una duda, si la inexactitud era fallo de OSM o de los archivos de NE, cuestión que resolveremos más tarde con el desarrollo de las otras fuentes.

3.2.4 Open Street Map (OSM)

Debido al resultado de la anterior fuente se vio la necesidad de buscar otra con más resolución. El objetivo es obtener una definición del litoral con precisión métrica, capaz de representar islas, islotes, rocas y la morfología compleja de las Rías Baixas, Figura 3-3. A diferencia de la descarga estática de archivos (utilizada con Natural Earth), la integración con OpenStreetMap se diseñó bajo un modelo de consulta dinámica bajo demanda. Para ello, se interactuó con la Overpass API, un servicio web que permite realizar minería de datos granular sobre la base de datos global de OSM. La estrategia consistió en solicitar únicamente las primitivas geométricas relacionadas con la navegación dentro del *Bounding Box*.

Al visualizarlos, el resultado fue excelente, como se observa en la Figura 3-4, llegando a representar espigones y muelles. En este ensayo se extrajeron 931 obstáculos en un tiempo de 1.87 segundos.

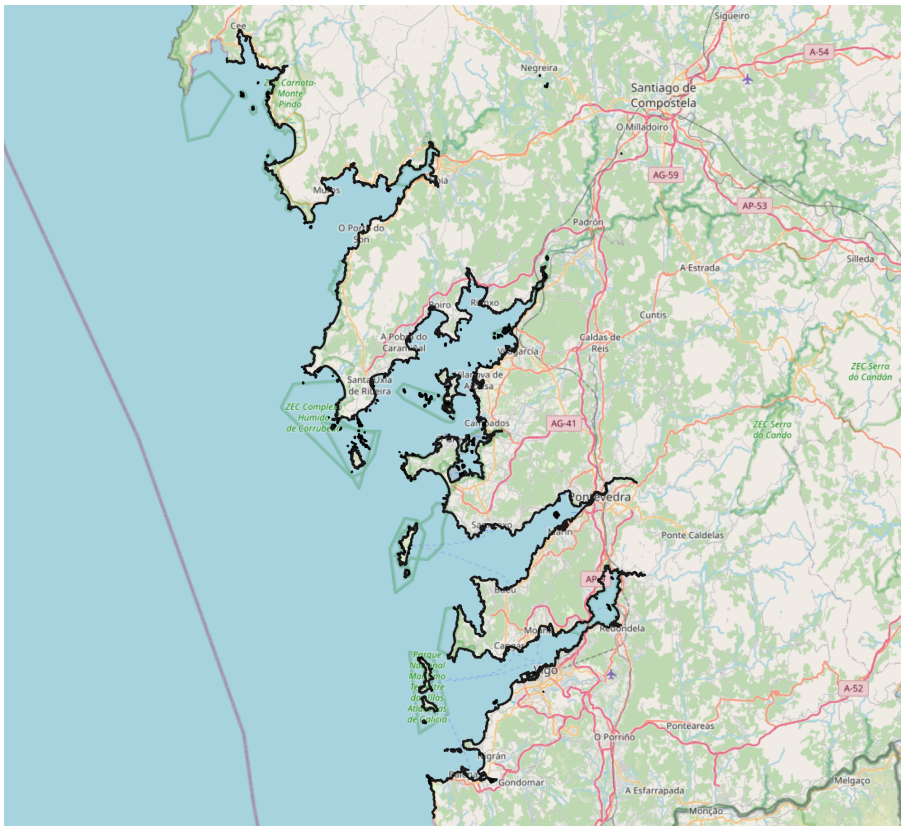


Figura 3-3 Ensayo OSM Rías Bajas (elaboración propia).

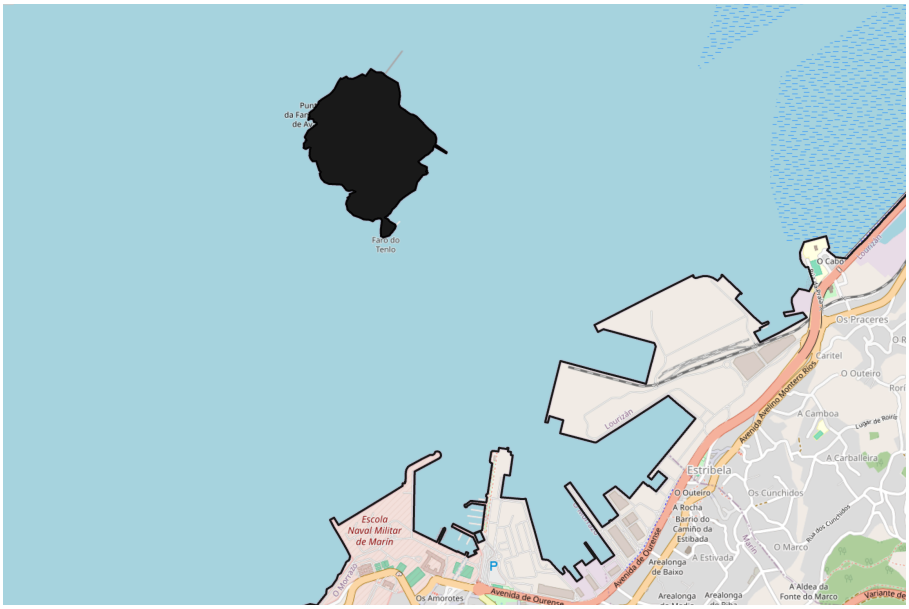


Figura 3-4 Detalle ensayo OSM Puerto de Marín, ENM e Isla de Tambo (elaboración propia).

Sin embargo, pronto se detectó que una buena apariencia visual no garantizaba un buen funcionamiento técnico. El principal problema es que esta base de datos está pensada para mostrar mapas que el ojo humano pueda ver, pero no para que un ordenador realice cálculos de navegación automáticos. Para detectar colisiones, el software necesita figuras geométricas cerradas que delimiten claramente dónde empieza la tierra y dónde termina el mar. Como los datos obtenidos eran a menudo líneas abiertas, el sistema intentaba cerrarlas de forma automática, lo que provocaba errores graves, como la aparición de líneas rectas que cruzaban rías enteras y bloqueaban el paso por el agua de manera arbitraria.

Por otra parte, los archivos de datos generados son demasiado grandes, de tal forma que un mapa de la costa de una ría gallega puede estar compuesta por decenas de miles de nodos, provocando así que los tiempos de espera aumenten demasiado y que el sistema se quede colgado esperando a la finalización visualización en el momento que se intenta generar la lista de obstáculos a partir de esta fuente de información.

Se determinó el punto de saturación en un escenario que abarcaba desde la Ria de Vigo hasta la de Camariñas, el cual puede apreciarse en la Figura 3-5. En este ensayo se tardó 3.92 segundos llegando a extraer 1434 obstáculos de costa.

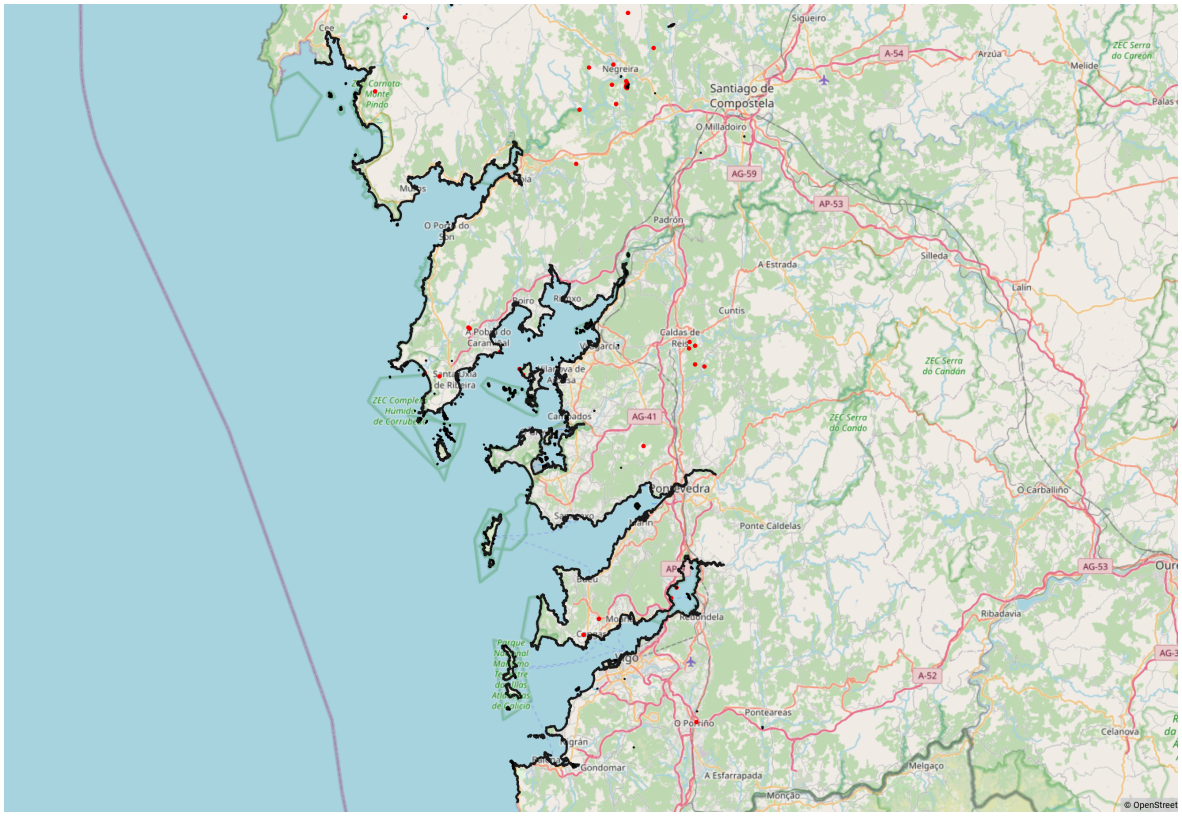


Figura 3-5 Ensayo OSM de Ría de Vigo a Ría de Camariñas (elaboración propia).

3.2.5 Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline (GSHHS)

GSHHS[54] consiste en una base de datos de conjuntos vectoriales mantenidos por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Adminstration*)[55] y la Universidad de Hawái. Esta distribuye sus datos costeros en formato *shapefile* (formato de archivo muy popular para almacenar datos geográficos vectoriales), de forma que los archivos contienen polígonos que representan todas las costas del mundo en alta resolución. Esta característica es crucial para el desarrollo del sistema.

Gracias a la lectura optimizada de esta fuente, que además garantiza la obtención de polígonos cerrados, ha sido posible generar la costa de las Rías Bajas, Figura 3-6, extrayendo 304 objetos en un tiempo de 0.53 segundos, pasando directamente a realizar una prueba posterior sobre la península ibérica e islas baleares, tal y como se puede observar en la Figura 3-7, con 530 obstáculos en 0.74 segundos. Por último, se probó el sistema ampliando la zona de evaluación a toda Europa, Figura 3-8, extrayendo 4923 en 0.49 segundos, el cual se ha considerado el punto de saturación debido las inexactitudes presentadas.

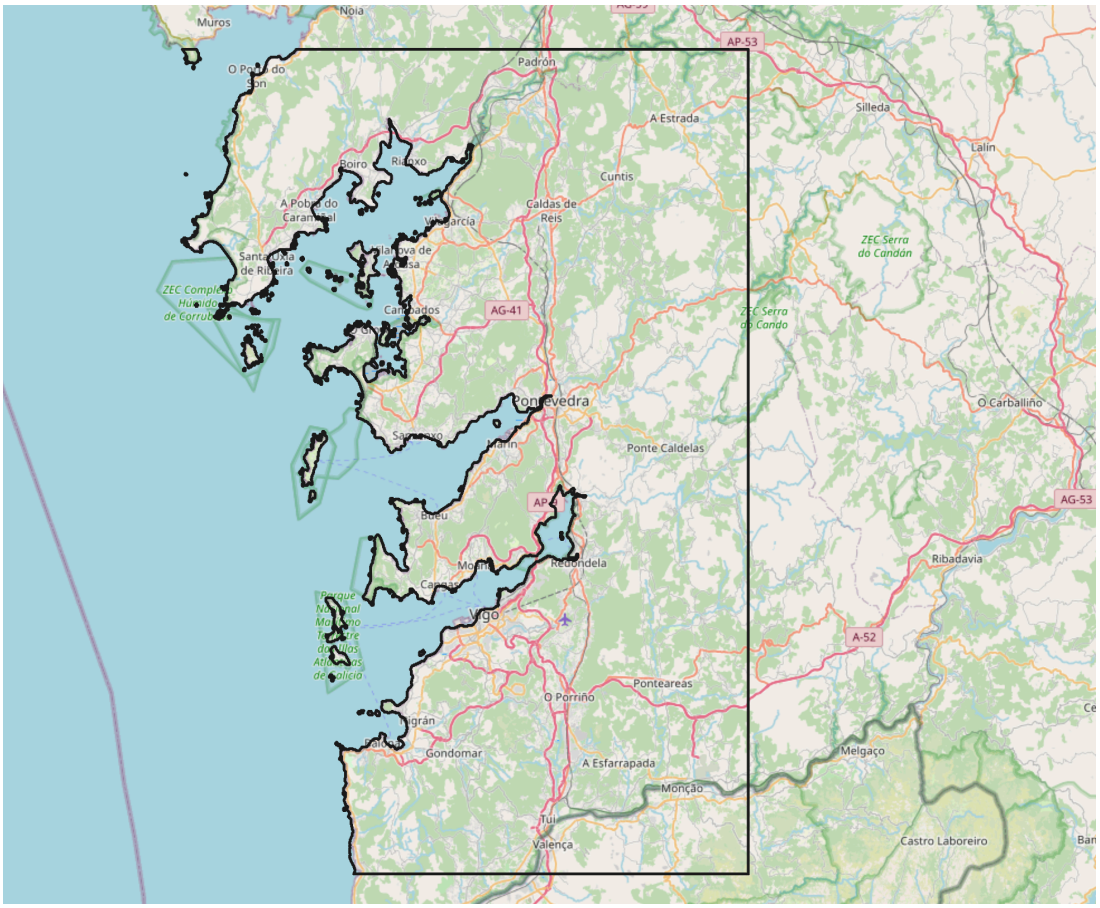


Figura 3-6. Ensayo GSHHS Rías Bajas (elaboración propia).



Figura 3-7 Ensayo GSHHS península Ibérica e Islas Baleares (elaboración propia).



Figura 3-8 Ensayo GSHHS Europa (elaboración propia).

Como se puede observar, la resolución es adecuada para cada escala llegando a alcanzar un buen nivel de detalle. Esto entre otros motivos, esto se debe a los diferentes niveles de resolución que ofrece GSHHS, la cual consiste en una distribución pre-procesada de 5 niveles de resolución, mostrados en la Tabla 3-1. Sin embargo, se aprecian imperfecciones cuando aumentamos demasiado la escala, aunque estemos configurado con resolución *Full*, Figura 3-9.

Nivel	Precisión Espacial	Idoneidad
Crude/c	25km	Nula
Low/l	5km	Baja
Intermediate/i	1km	Solo alta mar
High/h	200m	Alta
Full/f	<100m	Óptima

Tabla 3-1. Diferentes resoluciones GSHHS.

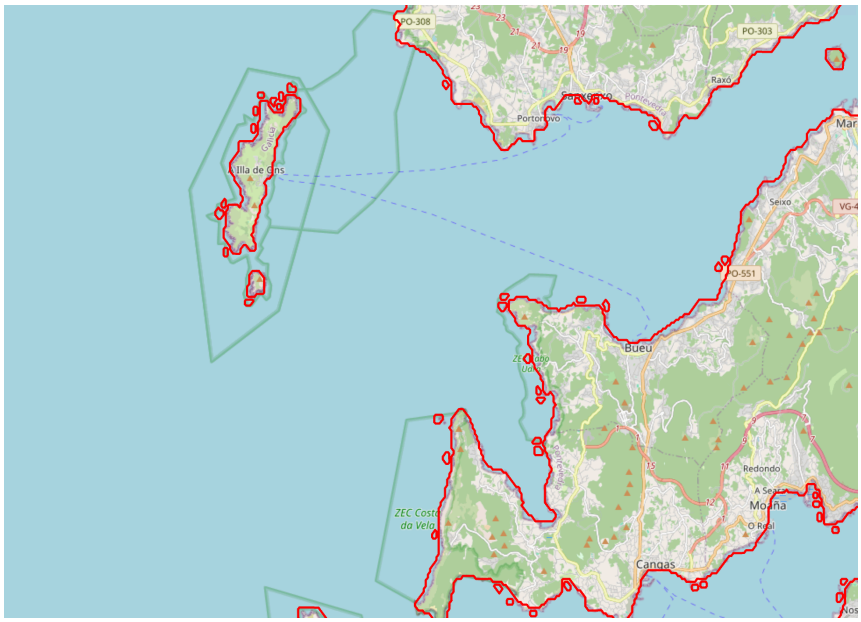


Figura 3-9. Destalle GSHHS Ría de Pontevedra (elaboración propia).

3.2.6 Conclusión

Tras el análisis exhaustivo de las tres fuentes de datos y la ejecución de las pruebas de estrés en los escenarios de Rías Baixas, Península Ibérica y Europa, se concluye con que se va a optar por la fuente de GSHHS debido a la síntesis entre el alcance y la resolución que nos ofrece. Valorando en el futuro trabajar con otra fuente cuando la escala sea menor y se determine la necesidad de una mayor precisión. A continuación, en la Tabla 3-2 se adjunta un resumen de lo estudiado.

Criterio de Evaluación	Natural Earth	OpenStreetMap	GSHHS
Resolución Espacial	Baja	Muy alta	Alta variable
Rendimiento	Muy alto, archivos muy ligeros	Baja, se satura al procesar áreas grandes	Alto, optimizado
Aptitud para calculo físico	Limitada, falsos positivos	Nula, falta de cierre de los polígonos	Perfecta integración con librerías de geometría computacional
Decisión final	Descartada por falta de precisión	Descartada por saturación de la memoria	Seleccionada

Tabla 3-2. Conclusión de las fuentes estudiadas.

3.3 Arquitectura de la interacción y adaptación dinámica de datos GSHHS

3.3.1 Introducción

Una vez seleccionada la base de datos GSHHS había que integrarla en la interfaz de una manera eficiente. Cargar la cartografía mundial completa es inviable para una simulación en tiempo real; por tanto, el sistema se ha diseñado bajo una arquitectura de estados finitos que gestiona cuándo y cómo se deben cargar los datos. Para afrontar este primer reto es primordial la comprensión de los diferentes modos existentes en la aplicación.

3.3.2 Modos de operación de la aplicación

La aplicación está diseñada con tres modos de operación distintos que permiten diferentes niveles de interacción con el mapa (*MapView*) y los elementos del escenario. Estos modos están implementados mediante un sistema de gestión de eventos centralizado (*appEventBus.py*) que coordina el comportamiento de todos los componentes de la interfaz mediante un mecanismo de subscripción y publicación de mensaje que reflejan las acciones del usuario sobre la aplicación. Los diferentes modos son los representados en la Tabla 3-3.

Modo de operación	Interacción con el mapa	Uso principal
Navegación	El usuario puede realizar zoom y desplazamiento (pan) utilizando los controles estándar del *MapView,* además de cargar condiciones ambientales reales.	Exploración visual para localizar el área de interés y conocimiento meteorológico real del escenario.
Editor	Zoom y pan habilitados. Permite clics izquierdos, derecho y doble clic para definir puntos de ruta. Los marcadores de inicio y fin pueden arrastrarse para reposicionar la ruta.	Creación y edición de escenarios. Generación dinámica de obstáculos costeros y corrientes basados en el área visible del mapa.
Game	Selección del escenario ya creado en el modo editor, además de la creación de la ruta mediante *waypoints.*	Creación de una ruta dentro de cualquiera de los escenarios creados en el modo Editor.

Tabla 3-3. Resumen modos de operación.

Todo lo anterior se controla con un panel de configuración (*appConfiguratioPanel.py*) colocado inicialmente en la parte superior de la pantalla. Allí encontramos todos los botones y elementos de interfaz necesarios para el correcto funcionamiento de cada uno de los modos de operación.

3.3.3 Problema de la carga dinámica de datos costeros

La introducción de los modos de operación de la aplicación es necesaria para la compresión del primer problema que apareció a la hora de desarrollar cada uno de estos. Se comenzó por la implementación del generador de obstáculos costeros. Inicialmente se utilizó el enfoque tradicional de cargar los elementos de una región geográfica completa, este enfoque presentaba varios problemas críticos:

I. Carga de datos excesiva: Se cargaban miles de polígonos costeros independientemente del área visible en el mapa.
II. Tiempos de procesamiento elevados: El procesamiento de toda la región podía tardar varios segundos.
III. Consumo de memoria: Almacenar geometrías completas de regiones extensas consumía recursos innecesarios.
IV. Ineficiencia en zoom cercano: Para áreas pequeñas, se procesaban datos de miles de kilómetros cuadrados.

El problema principal de esta parte del proyecto fue la adaptación de una fuente estática, al comportamiento dinámico del modo Editor.

El objetivo consistió en descargar solo la porción de tierra que aparece en la pantalla de la aplicación. Para ello se hizo necesario determinar automáticamente los límites geográficos basándose en el centro del mapa, en el zoom utilizado en el momento y en las dimensiones del *viewport* (área geográfica delimitada por los bordes de la pantalla que determina la región activa de la simulación).

Una vez definida el área de la operación, solo se descargarán los límites de las costas dentro de esa misma área, y dependiendo de las dimensiones se selecciona la resolución más adecuada para no saturar el sistema.

3.3.4 Adaptación dinámica del sistema GSHHS

Para alcanzar la solución del problema se ha elaborado un proceso que consiste en lo siguiente:

I. Captura del área visible: el sistema determina las dimensiones del *viewport* mediante el punto central (latitud, longitud) y el zoom (nivel de acercamiento) utilizado en ese momento, para determinar el ancho y el largo del escenario.
II. Cálculo del área visible: el sistema calcula cuantos metros corresponden al área visible de la pantalla. La conversión se observa en la Figura 3-10.

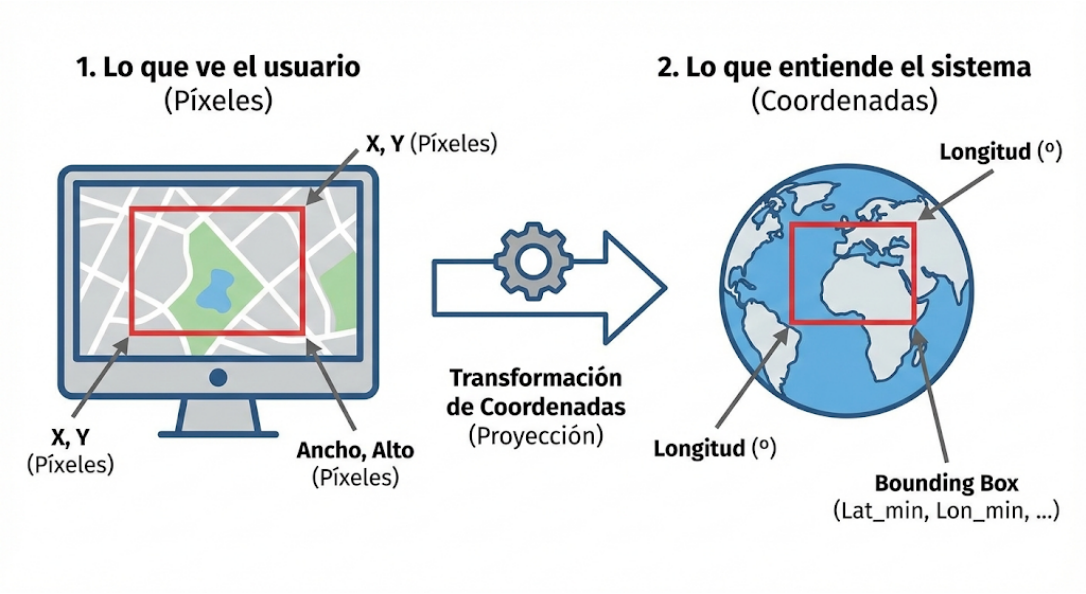


Figura 3-10. Cálculo del área visible (generada a partir de IA).

III. Definición del *Bounding Box*: se calculan los límites geográficos (coordenadas) del área visible, esto es lo que define que datos se deben cargar.
IV. Selección automática de la de resolución: como ya se ha comentado, GSHHS ofrece varios niveles de resolución, es importante tener bien ajustados estos límites de acuerdo con los km^2 del área seleccionada. A continuación, en la Tabla 3-4 se observa la configuración del tamaño del área con su correspondiente resolución.

Área del escenario	Resolución seleccionada	Detalles
<100,000km^2	f (*full*)	Máxima calidad-todos los detalles
<1,000,000km^2	h (*high*)	Alta calidad-detalles importantes
<5,000,000km^2	i (intermediate)	Calidad media -contornos principales

<10,000,000km^2	l (*low*)	Baja calidad -grandes masas
≥10,000,000km^2	c (*crude*)	Mínima calidad-solo continentes

Tabla 3-4. Configuración tamaño-resoluciones

V. Carga selectiva de datos GSHHS: tal y como se ha referido GSHHS utiliza archivos con el formato *shapefile* para la distribución de los polígonos que definen las costas de todo el mundo. Una vez se ha determinado el *bounding box* se procede a cargar todo el contenido *shapefile* de GSHHS, es decir, un archivo que contiene todas las costas del mundo con resolución completa. Para así manipularlo y continuar recortándolo mediante el proceso de *clipping*: que consiste en determinar el número de polígonos que se encuentran dentro o cortan con los límites del área geográfica que define el *bounding box*, de esta manera si el polígono se encuentra dentro se guarda al completo, si corta con los limites se recorta y se guarda la parte que está dentro y si se encuentra completamente fuera se descarta. El resultado es un filtro muy potente para pasar solo a descargar los polígonos que están presentes en el escenario. En la Figura 3-11 se representa el proceso de una manera gráfica.

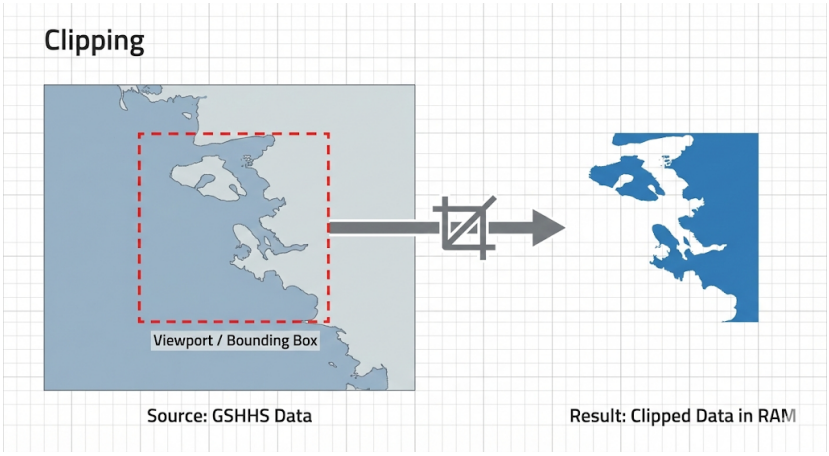


Figura 3-11. Proceso de *clipping* (generada a partir de IA).

VI. Convertir la información a formato diccionario: después del proceso de *clipping* tenemos objetos *polygon* de la librería de *Shapely*, que son estructuras complejas orientadas a operaciones geoespaciales complejas. Dentro de nuestra aplicación se requiere una estructura de datos simplificada, enfocada únicamente a la representación visual y la detección de colisiones, por ello se implementa una capa de abstracción mediante diccionarios *Python* que actúa como formato de intercambio entre los dos anteriores.

VII. Conversión a objetos: los elementos del diccionario previamente creado se convierten a objetos de la clase *Obstacle* para su posterior representación.

VIII. Integración en el escenario: los diferentes objetos se añaden al escenario donde se encapsula toda la información (dimensiones del área, centro geográfico y nivel de zoom)

IX. Creación de la capa de visualización y renderizado de la pantalla: se crea una capa específica donde se encapsulan todos los objetos que se quieren representar para continuar convirtiendo las coordenadas geográficas a pixeles y dibujar las líneas de la costa que se quiera representar.

Como conclusión, se ha elaborado un proceso optimizado que transforma datos geoespaciales globales en obstáculos visualizables en tiempo real, demostrando que es posible trabajar con *datasets* geoespaciales masivos aplicando un filtrado espacial inteligente y con selección automática de resolución según las necesidades específicas de cada caso de uso (Figura 3-12).

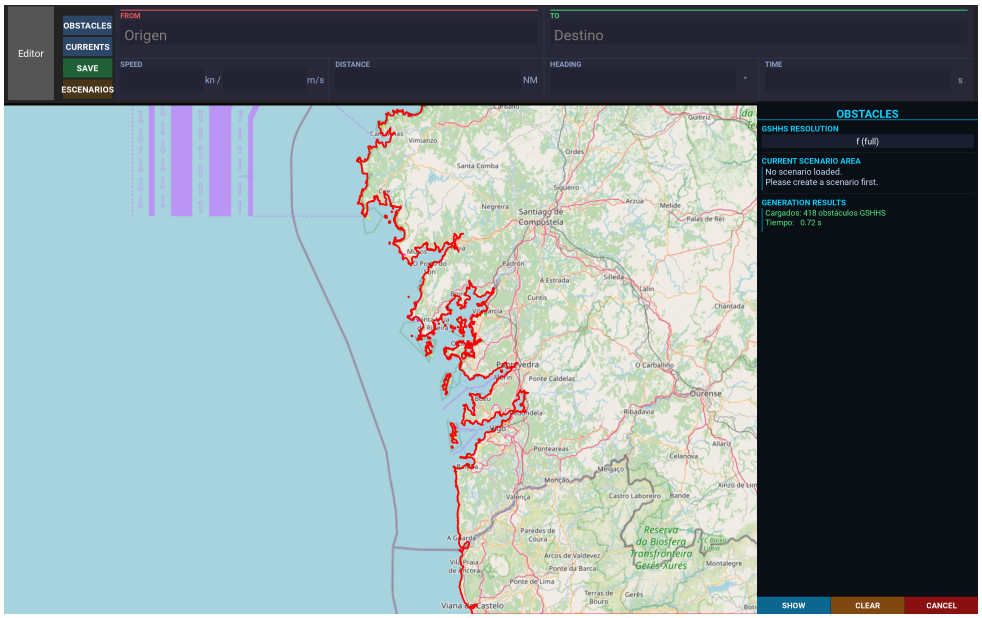


Figura 3-12. Funcionalidad de herramientas de detección de costas e islas integrada en la aplicación.

3.4 Persistencia de escenarios: creación de una base de datos en SQLite

3.4.1 Introducción

Teniendo en mente los tres modos que existen en la aplicación, se encontró la necesidad de la utilización de una base de datos para almacenar los diferentes escenarios que se crean en el modo editor.

Además, es esencial dentro de la arquitectura del proyecto, la importación de las características del entorno a los otros modos de operación. Así, se ha implementado un módulo de base de datos local.

Para el almacenamiento de los escenarios, se ha seleccionado el motor SQLite[56]. A diferencia de las bases de datos tradicionales (como MySQL o Oracle) que funcionan como en modo servidor al que hay que conectarse, SQLite funciona como una biblioteca integrada. La base de datos no es un proceso complejo corriendo en segundo plano; sino que simplemente emplea un archivo único en el disco duro. Esto significa que la aplicación es portátil; se puede copiar el archivo *.db* a otro ordenador sin necesidad de instalar ninguna aplicación.

La base de datos se ha estructurado siguiendo un modelo relacional simple pero eficiente, dividido en entidades claramente diferenciadas para evitar la redundancia de información. A continuación, se detalla la arquitectura de cada una de las tablas implementadas.

3.4.2 Escenarios

Esta tabla, cuya disposición podemos observar en la Tabla 3-5, actúa como el inventario principal de la aplicación. Su función es almacenar los datos que definen el entorno de simulación.

Para gestionar la identidad de cada simulación, el sistema asigna automáticamente un número de identificación único (*id*) a cada registro, el cual actúa como clave primaria. Junto a este identificador, se almacenan las referencias textuales (*from_id y to_id*) que permiten al usuario reconocer visualmente qué puntos lógicos se están utilizando como origen y destino en la interfaz gráfica.

Uno de los requisitos fundamentales del sistema es la capacidad de restaurar la vista del mapa exactamente como la dejó el usuario. Para lograr esto, la tabla almacena la posición geográfica de la pantalla mediante la latitud y longitud central (*center_latitude, center_longitude*), así como las dimensiones físicas del área visible (*width y height*). Estos valores son críticos, ya que definen el *Bounding Box* sobre el que trabajará el generador de obstáculos al recargar el escenario. Además, es necesario almacenar la orientación del barco que después realizará la ruta, esto se materializa en la

simulación realizada por el algoritmo para mostrarnos la ruta optima de cada uno de los escenarios. Por último, se ha tomado la decisión provisional de integrar en esta tabla el campo *solution,* aquí una vez diseñado el escenario, se almacena la ruta optima según el algoritmo proporcionado por el director del proyecto. Se trata de un campo de texto en el que se escriben los diferentes puntos de la ruta, para poder visualizarla en el programa.

Campo	Tipo	Descripción
id	INTEGER	Identificador único del escenario
center_lat/lon	REAL	Centro geográfico de la vista
widht/height	REAL	Tamaño del escenario en metros
from_lat/lon	REAL	Coordenadas del punto de partida
to_lat/lon	REAL	Coordenadas del punto de destino
velocity	REAL	Velocidad del buque configurada
heading	REAL	Orientación del buque
solution	TEXT	Diferentes puntos de la ruta optima del escenario

Tabla 3-5. Tabla Escenarios.

3.4.3 Obstáculos

Mientras que la tabla de escenarios gestiona la configuración general, la tabla *SCENARIO_OBSTACLES* se encarga de almacenar la forma de los objetos físicos del entorno. Para que el sistema funcione de manera ágil, se ha optado por guardar cada obstáculo de forma independiente.

En esta estructura, la carga principal de la información recae sobre el campo *geometry*. En él se almacenan directamente las coordenadas geográficas de todos los vértices que definen la forma de cada obstáculo concreto. Gracias al uso del *scenario_id*, todos estos objetos quedan vinculados a su escenario correspondiente, permitiendo que el simulador los cargue y los procese de forma organizada y sencilla, la estructura exacta la podemos observar en la Tabla 3-6.

Campo	Tipo	Descripción
id	INTEGER	Identificador único del grupo de obstáculos
scenario_id	INTEGER	Vincula este escenario con el suyo de la tabla ESCENARIOS
geometry	TEXT	Coordenadas geográficas de los vértices de los obstáculos

Tabla 3-6. Tabla SCENARIO_OBSTACLES.

3.4.4 Corrientes

Siguiendo la misma filosofía de optimización empleada para la topografía costera, la tabla de corrientes (Tabla 3-7) se encarga de almacenar las variables oceanográficas del entorno, específicamente los campos vectoriales de las corrientes marinas. En la simulación naval, las corrientes no actúan como un valor único global, sino que se distribuyen a lo largo del mapa en mallas o cuadrículas espaciales, donde cada nodo contiene información matemática de velocidad y dirección.

Para garantizar la integridad del modelo y permitir la comprobación de los datos se ha tomado la siguiente decisión; cada vector de la malla se almacena de forma independiente, lo que facilita la validación de los parámetros físicos antes de su procesamiento. Cada registro cuenta con su propio identificador (*id*) y queda vinculado a su escenario mediante una clave foránea (*scenario_id*).

Al cargar la simulación, el sistema reconstruye el campo ambiental consultando directamente los componentes de cada vector (latitud, longitud, velocidad y rumbo). Este enfoque permite al algoritmo de navegación acceder a la cuadrícula exacta de corrientes necesaria para calcular la deriva del buque de forma eficiente y con total visibilidad sobre los datos de origen.

Campo	Tipo	Descripción
id	INTEGER	Identificador único del *grid* de corrientes
scenario_id	INTEGER	Vincula este escenario con el suyo de la tabla ESCENARIOS
latitude	REAL	Coordenada de latitud de los diferentes vectores
longitude	REAL	Coordenada de longitud de los diferentes vectores
velocity	REAL	Magnitud de la corriente (m/s)
heading	REAL	Dirección del vector de la corriente en grados

Tabla 3-7. Tabla SCENARIO_CURRENTS.

3.5 Flujos de almacenamiento y recuperación de la información de escenarios.

3.5.1 Introducción

El proceso de guardado de un escenario engloba tres elementos estrechamente relacionados: el propio escenario, los obstáculos que delimitan las zonas navegables y el campo de corrientes marinas. Aunque el usuario los configura de forma independiente a través de la interfaz, internamente forman una unidad, ya que los obstáculos condicionan el comportamiento de las corrientes y ambos quedan vinculados al escenario mediante un identificador común en la base de datos.

El flujo que se describe a continuación refleja exactamente lo que ocurre en el sistema cada vez que el usuario pulsa el botón de guardar. Se ha estructurado en 5 bloques secuenciales para facilitar su comprensión: primero se valida que los datos introducidos son correctos y completos, después se persiste el escenario, a continuación, los obstáculos y finalmente el campo de corrientes que se divide en dos partes. Si en cualquier punto del proceso falta información o se produce un error, el sistema lo notifica de forma inmediata sin continuar con los pasos siguientes.

3.5.2 Validación del escenario

Antes de realizar cualquier operación de guardado, el sistema comprueba que el usuario ha introducido toda la información mínima necesaria para definir un escenario válido, de forma que el flujo del proceso de validación es el que se muestra en la Figura 3-13. En concreto, se verifica que se haya marcado un punto de origen en el mapa, un punto de destino, que la velocidad del barco sea mayor que cero y si se ha introducido la orientación del barco. Si alguna de estas condiciones no se cumple, el proceso se detiene inmediatamente y se muestra un mensaje de error indicando exactamente que parámetro falta. Solo cuando las cuatro validaciones son superadas se recopilan todos los datos del escenario (nombres, coordenadas, dimensiones del área y parámetros de navegación) y se continúa con el guardado.

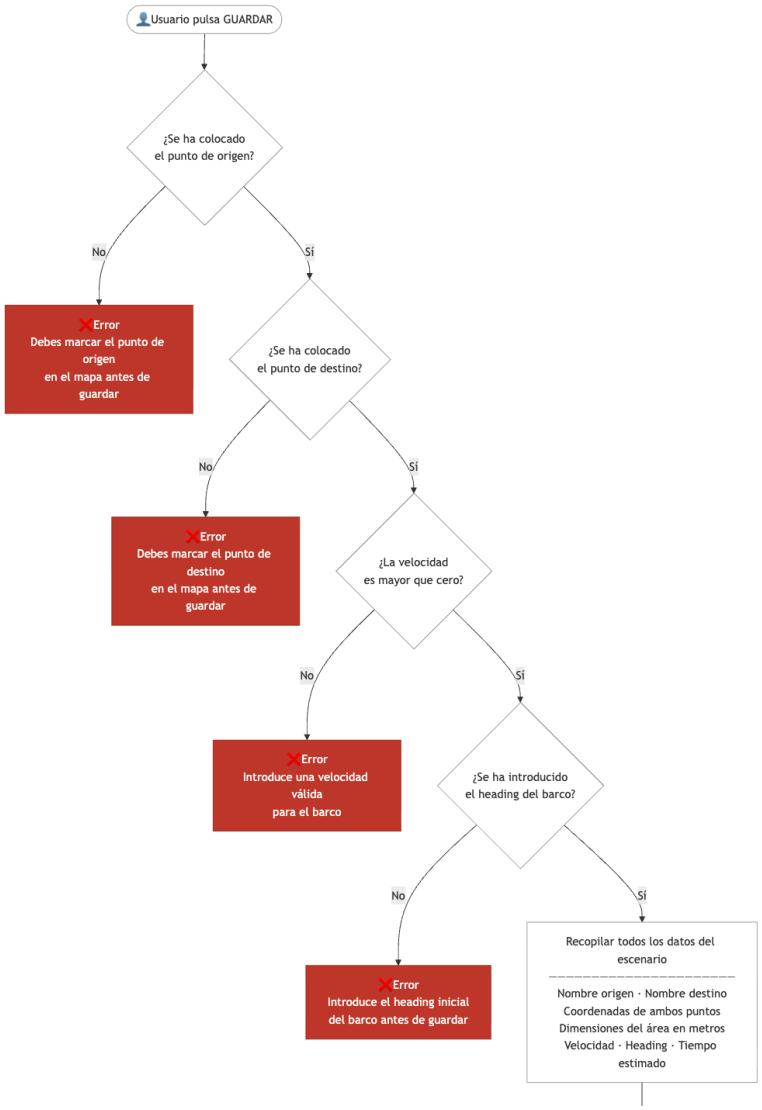


Figura 3-13. Flujo de validación del escenario (generada a partir de IA).

3.5.3 Guardado del escenario en la base de datos

Una vez validados los datos, el sistema determina si se está creando un escenario nuevo o modificando uno que ya existía (Figura 3-14). Si el escenario es nuevo, se inserta un registro en la base de datos y se le asigna un identificador único de forma automática. Si ya existía, se actualizan sus datos manteniendo el mismo identificador, de modo que el historial queda correctamente vinculado. Tras el guardado, la lista desplegable de escenarios disponibles en los modos de operación Game y Editor se refresca automáticamente para reflejar el cambio.

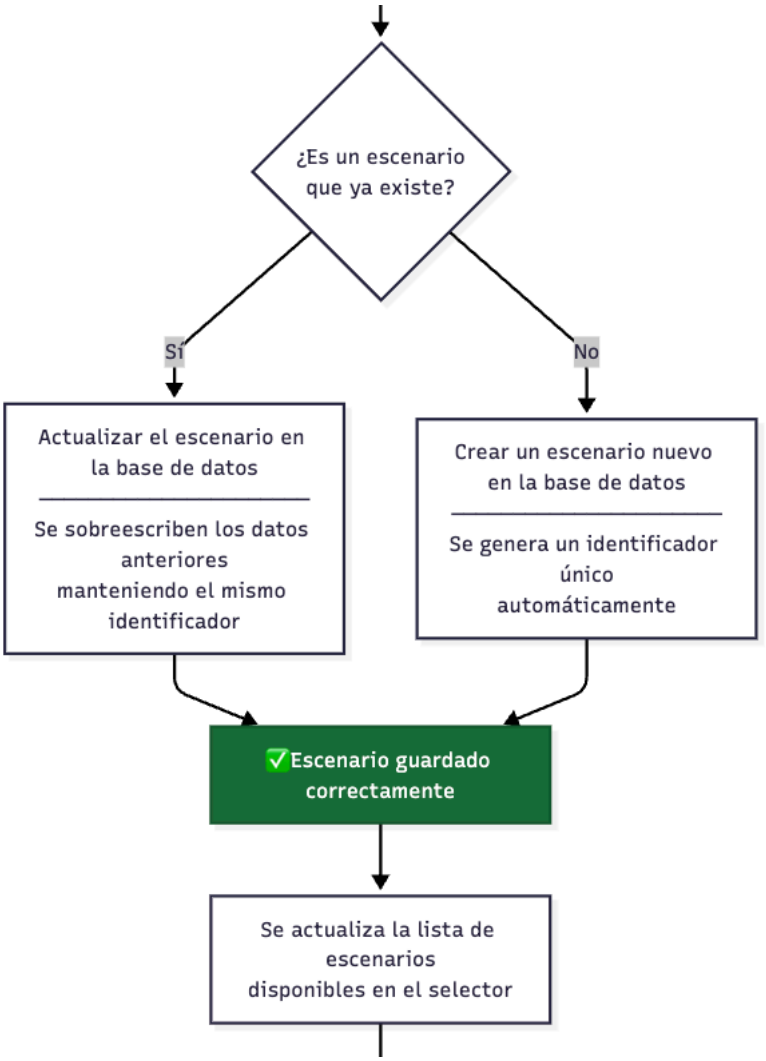


Figura 3-14. Guardado del escenario en la base de datos (generada a partir de IA).

3.5.4 Guardado de Obstáculos

Una vez guardado el escenario, el sistema procesa los obstáculos definidos en el mapa (Figura 3-15) que representan tierra firme y zonas por las que el barco no puede navegar. Si no hay ningún obstáculo definido, el proceso continúa con una advertencia, pero sin interrumpirse. Si los hay, primero se eliminan los obstáculos anteriormente guardados para ese escenario, evitando así duplicados en caso de que hayan sido editados. A continuación, los polígonos se convierten a un formato binario compacto y se almacenan en la base de datos vinculados al identificador del escenario.

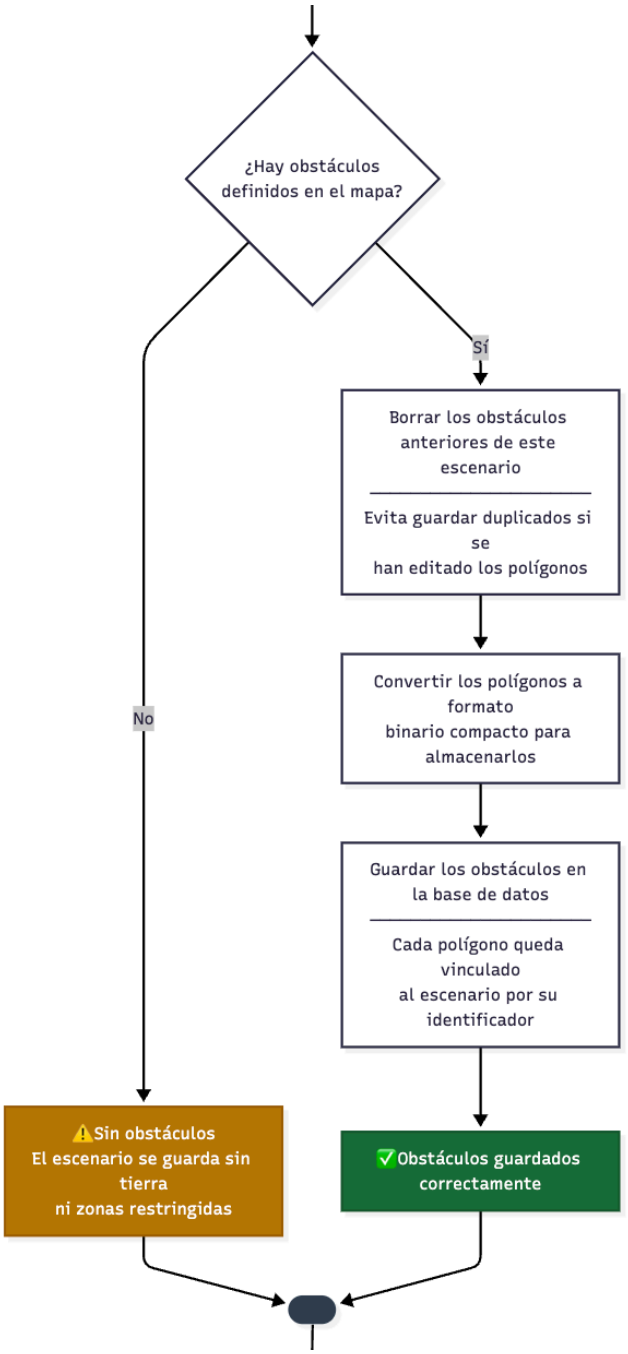


Figura 3-15. Guardado de obstáculos (generada a partir de IA).

3.5.5 Guardado del campo de corrientes

Este bloque gestiona el campo de corrientes marinas (Figura 3-16). Primero se valida que se haya seleccionado un tipo de corriente y que el mapa esté accesible. Si la resolución de la rejilla introducida está fuera del rango permitido, se corrige automáticamente sin interrumpir el proceso. A continuación, se guardan los parámetros de configuración del tipo de corriente elegido, se calcula el tamaño del área visible en el mapa y se genera el campo vectorial, asignando una dirección e intensidad a cada punto de la rejilla. Los vectores que caen sobre tierra son descartados usando los obstáculos previamente definidos.

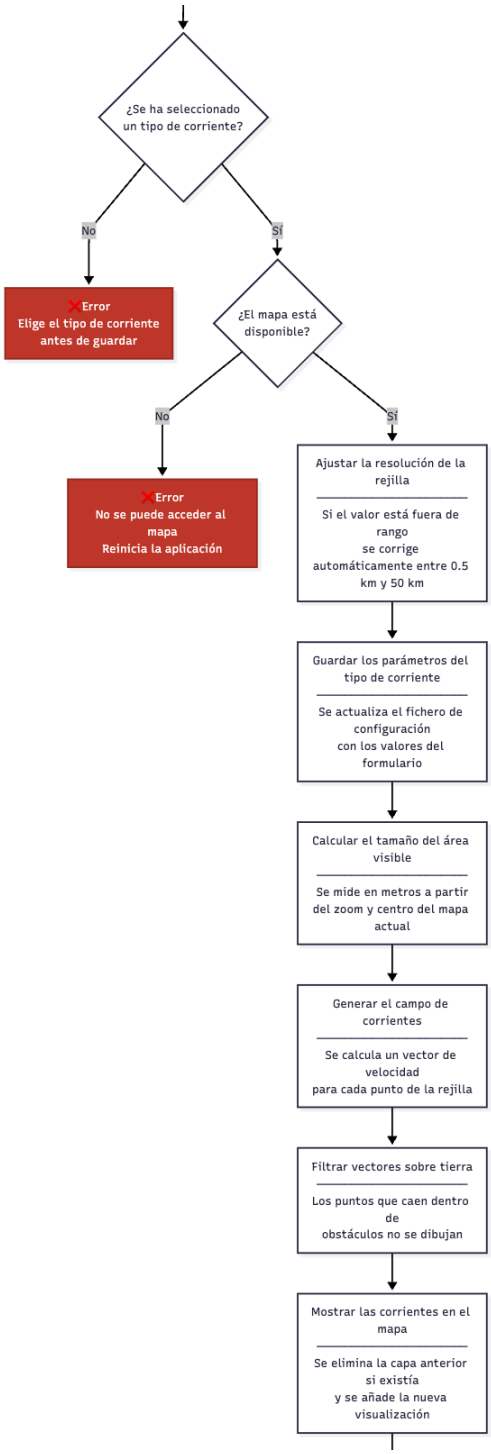


Figura 3-16. Guardado del campo de corrientes (generada a partir de IA).

3.5.6 Persistencia del campo de corrientes

Una vez generado y mostrado el campo de corrientes en el mapa, el sistema comprueba si el escenario ya dispone de un identificador en la base de datos, Figura 3-17. Si no lo tiene, significa que el escenario aún no ha sido guardado, por lo que las corrientes se muestran visualmente pero no se almacenan, y se advierte al usuario de que debe guardar el escenario primero. Si el identificador sí existe, el sistema verifica si ya había corrientes guardadas previamente para ese escenario: en caso afirmativo las reemplaza con los nuevos parámetros, y si no existían las crea por primera vez. En ambos casos el resultado es el mismo, el campo vectorial queda correctamente vinculado al escenario en la base de datos y el proceso finaliza con éxito.

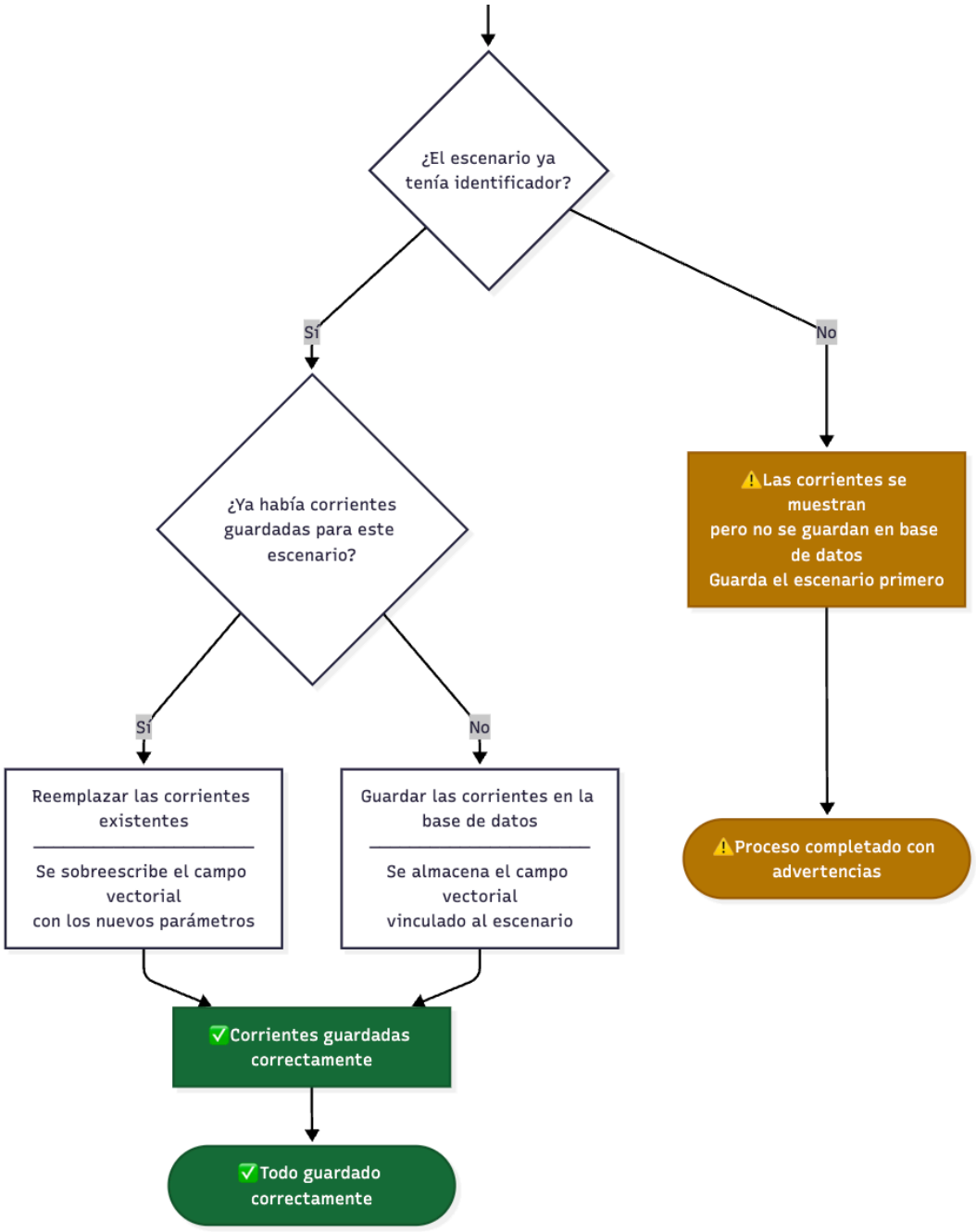


Figura 3-17. Persistencia del campo de corrientes (generada a partir de IA).

3.6 Carga de escenarios

3.6.1 Introducción

El proceso de carga de un escenario se activa en el momento en que el usuario selecciona una entrada del desplegable de escenarios disponibles. A diferencia del proceso de guardado, aquí el sistema no recibe datos introducidos manualmente, sino que los recupera íntegramente desde la base de datos, reconstruyendo el estado exacto en el que el escenario fue guardado. Esto incluye los datos de navegación, la vista del mapa, los obstáculos y el campo de corrientes. El objetivo es que el usuario retome el escenario exactamente como lo dejó, tanto en el modo editor, para modificar escenarios ya existentes, como en el modo juego, para interactuar con estos ya creados, sin necesidad de reconfigurar nada.

3.6.2 Validación de la selección

Antes de hacer ninguna consulta a la base de datos, el sistema comprueba que el texto seleccionado en el desplegable corresponde a un escenario registrado internamente, Figura 3-18. Si no hay coincidencia, la selección se ignora sin mostrar ningún error visible, ya que normalmente esto solo ocurre si el selector contiene entradas especiales como "No hay escenarios disponibles".

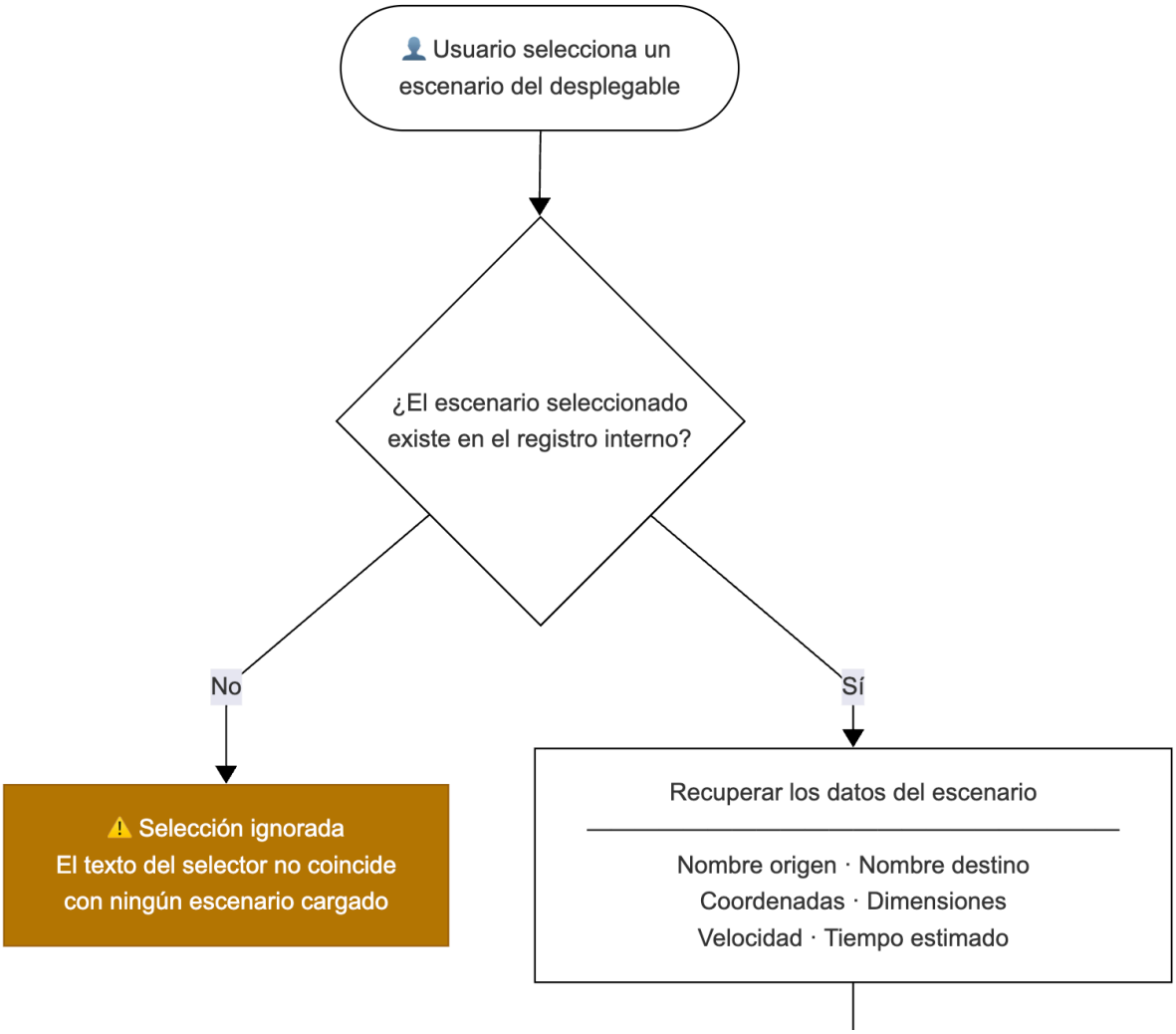


Figura 3-18. Validación de la selección (generada a partir de IA).

3.6.3 Restaurar la vista y los puntos FROM y TO

Una vez confirmado el escenario, se calculan la distancia entre origen y destino y el nivel de *zoom* necesario para que el área quede visible en pantalla, Figura 3-19. El mapa se centra y se ajusta, los marcadores de origen y destino se colocan en sus posiciones correspondientes y se eliminan los *waypoints* de cualquier escenario anterior. Finalmente se actualizan los campos de velocidad, distancia y tiempo en la interfaz.

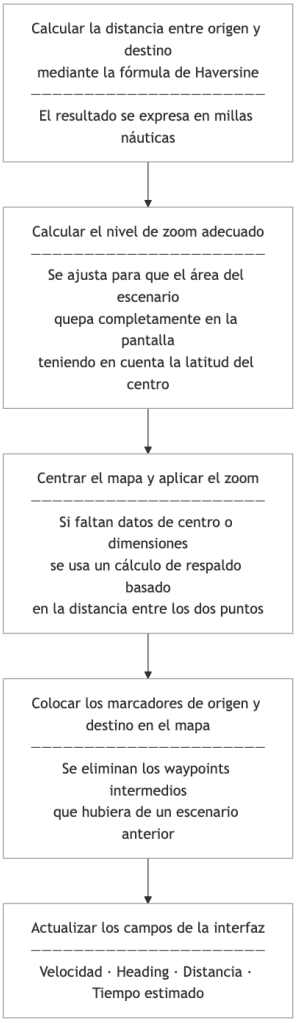


Figura 3-19. Restaurar la vista (generada a partir de IA).

3.6.4 Carga de los obstáculos

Para iniciar el proceso de visualización de los obstáculos sobre el mapa, se consulta la base de datos en busca de los obstáculos asociados al escenario. Si no hay ninguno guardado, se elimina cualquier capa de obstáculos que pudiera haber en el mapa de una carga anterior. Si los hay, los polígonos se reconstruyen desde el formato binario en el que fueron almacenados, se asocian al objeto de escenario y se añaden como una nueva capa visual en el mapa, quedando también disponibles para la detección de colisiones durante la edición de rutas, Figura 3-20.

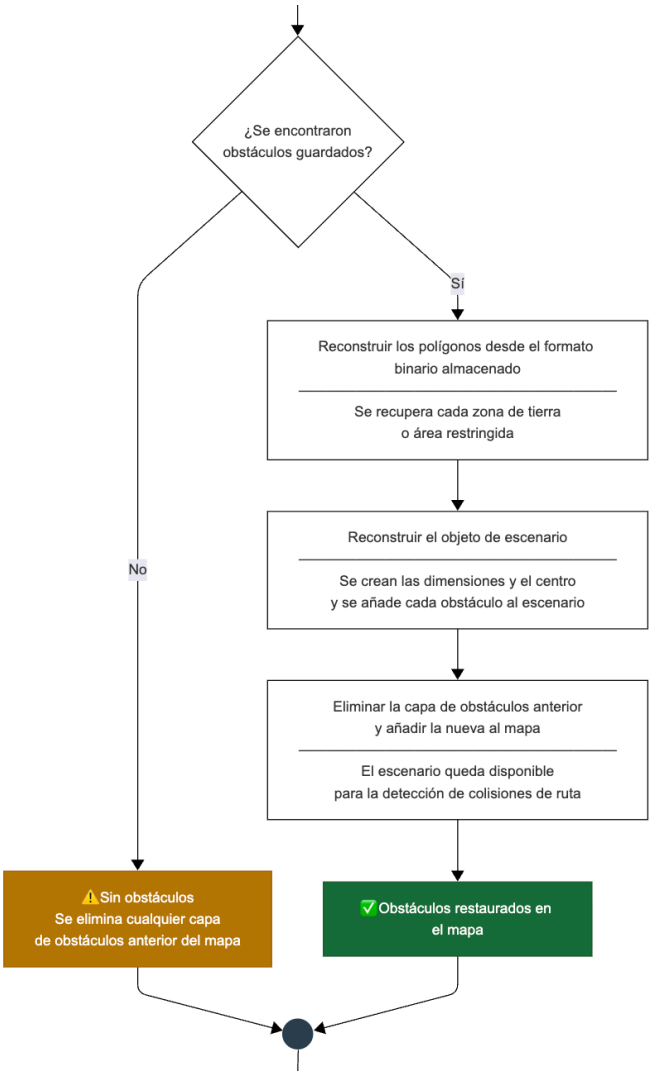


Figura 3-20. Carga de los obstáculos (generada a partir de IA).

3.6.5 Carga de las corrientes

Por último, se recupera el campo de corrientes guardado para el escenario, Figura 3-21. Se recupera la resolución de rejilla con la que se generó el campo originalmente, y si no estaba almacenada se aplica el valor por defecto. La capa anterior de corrientes se elimina y se añade la nueva, generando los vectores que siguen el campo vectorial recuperado.

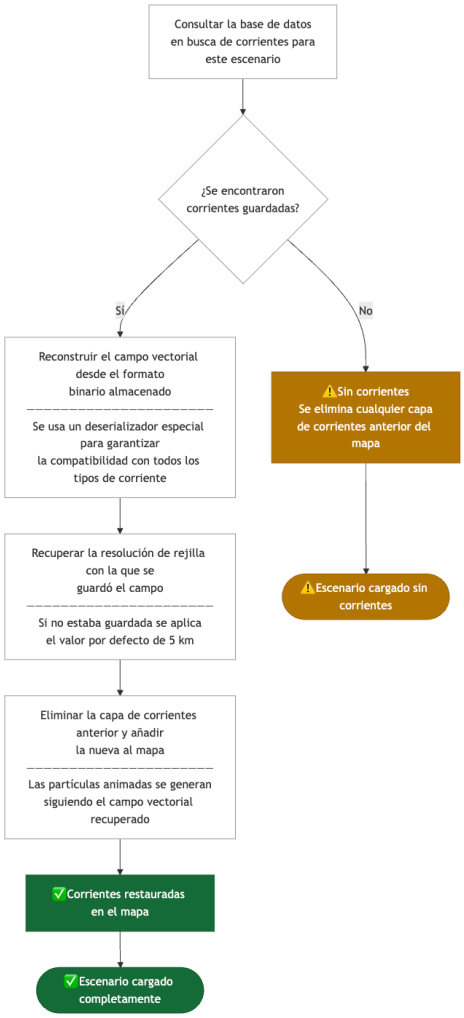


Figura 3-21. Carga de las corrientes (generada a partir de IA).

3.7 Aplicación en modo Editor y configuración de escenarios

3.7.1 Introducción

Un escenario es la unidad básica de trabajo: define el espacio geográfico sobre el que se desarrolla la navegación, las restricciones físicas del entorno y las condiciones de corriente a las que se enfrenta el barco. Su diseño implica tres decisiones que están relacionadas entre sí: dónde transcurre la ruta, qué obstáculos delimitan el espacio navegable y qué tipo de corriente actúa sobre el barco a lo largo del trayecto. Una vez configurado y guardado, el escenario puede cargarse en cualquier momento y reproducir exactamente las condiciones con las que fue creado, en los modos de operación que lo requieran.

El modo Editor es el entorno de creación de escenarios de la aplicación. Permite al usuario definir todos los elementos que componen un escenario de navegación: el área geográfica de trabajo, el punto de origen y destino de la ruta, los parámetros de navegación del barco, los obstáculos físicos del entorno y el tipo de corriente marina que actuará sobre la embarcación. Una vez configurados todos estos elementos, el escenario puede guardarse en la base de datos y quedar disponible para los modos de operación *Game* y el panel de edición de escenarios ya creados en el modo Editor.

3.7.2 Panel de configuración del escenario

El panel de configuración del modo Editor, Figura 3-22, se divide en dos filas de contenido. La primera fila contiene los campos de identificación del escenario, estructurados en dos bloques simétricos

denominados FROM y TO, que representan el punto de origen y el punto de destino de la ruta respectivamente. Cada bloque dispone de un campo de texto para introducir el nombre del lugar y una etiqueta de coordenadas que se actualiza automáticamente cuando el usuario coloca el marcador correspondiente sobre el mapa. La colocación de los marcadores se realiza mediante pulsación directa sobre el mapa: el primer toque sitúa el origen y el segundo el destino.

La segunda fila del panel contiene cuatro métricas numéricas distribuidas en columnas iguales: la velocidad del barco, expresada simultáneamente en nudos y en metros por segundo con conversión automática bidireccional; la distancia entre origen y destino en millas náuticas, actualizada en tiempo real conforme se colocan los marcadores al hacer *click* sobre el mapa interactivo, el rumbo en grados; la orientación del barco en el momento inicial para la realización de la ruta y el tiempo estimado de navegación en segundos.

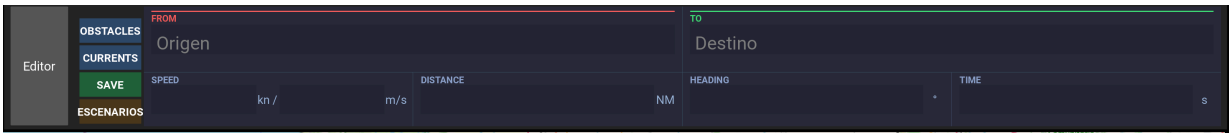


Figura 3-22. Panel de configuración del escenario modo Editor (elaboración propia).

3.7.3 Generación de obstáculos

La generación de obstáculos se activa mediante el botón OBSTACLES del panel izquierdo, que despliega el panel de configuración de obstáculos, Figura 3-23, sobre el área del mapa. Este panel permite seleccionar la resolución de la base de datos GSHHS con la que se extraerán los contornos costeros: desde la resolución más aproximada, pensada para escenarios de gran escala, hasta la más detallada, adecuada para zonas costeras complejas como rías o archipiélagos, contando también con el modo automático que selecciona la óptima según el tamaño del *viewport*.

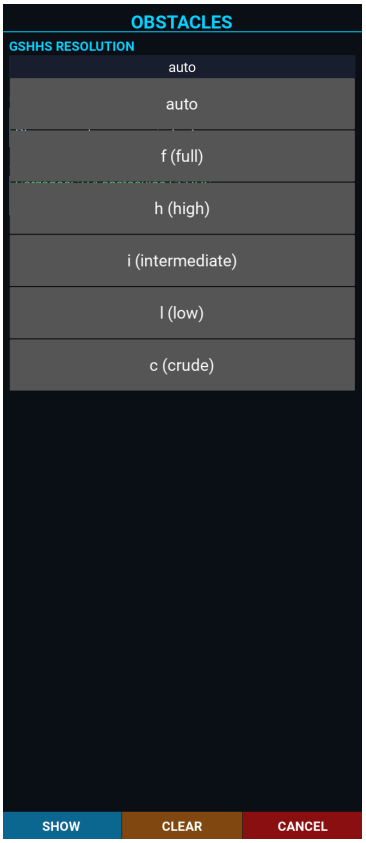


Figura 3-23.Panel de configuración de obstáculos (elaboración propia).

Una vez confirmada la resolución, el sistema lanza el proceso de generación. Se calcula el área geográfica visible en ese momento en el mapa, transformando las dimensiones del *viewport* en píxeles a metros, teniendo en cuenta la latitud del centro para corregir la distorsión de escala. A continuación, el generador GSHHS extrae todos los polígonos de tierra que intersecan con el área del escenario y los incorpora como obstáculos de tipo polígono (proceso de *clipping* previamente explicado). Los vértices de cada polígono se almacenan en coordenadas geográficas y se proyectan a pantalla en tiempo real mediante la capa correspondiente, que dibuja los contornos en rojo sobre el mapa y se recalcula automáticamente en cada desplazamiento o cambio de zoom, Figura 3-24. El panel de obstáculos muestra estadísticas del proceso, incluyendo el número de polígonos generados y el tiempo de procesamiento.

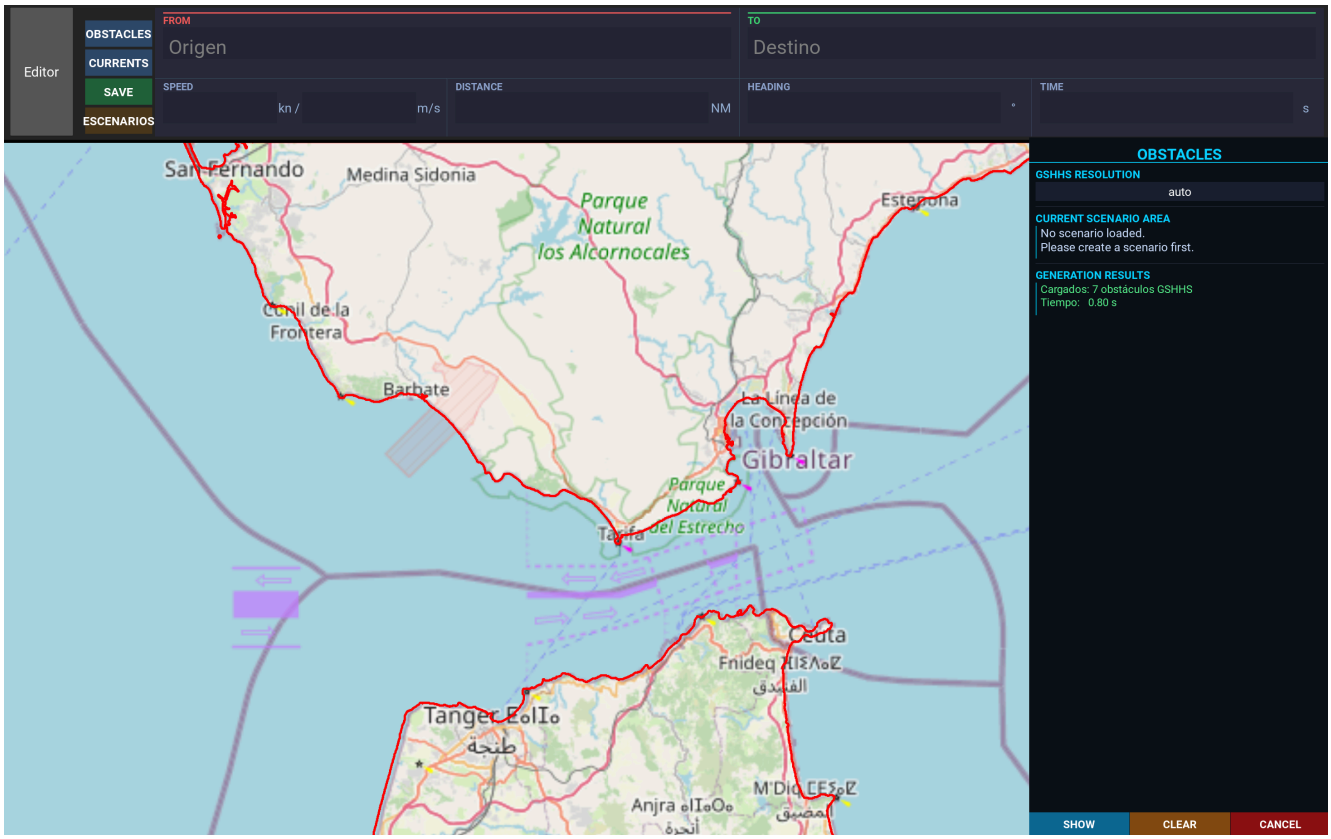


Figura 3-24. Ejemplo de generación de obstáculos (elaboración propia).

3.7.4 Configuración y generación de corrientes

El botón CURRENTS abre el panel lateral de configuración de corrientes, desde el cual el usuario puede seleccionar el tipo de corriente que quiere asociar al escenario. El sistema soporta seis tipos de corriente obtenidas de forma analítica (fórmulas matemáticas), además de una en la que se han descargado datos reales procedentes del servicio Copernicus Marine, Figura 3-25. Los parámetros que permiten configurar las opciones asociadas a cada tipo de corriente disponible se definen en un fichero de configuración tipo *.json*, que establece los rangos de los distintos factores, a partir de los cuales se generan los vectores del campo de corrientes.

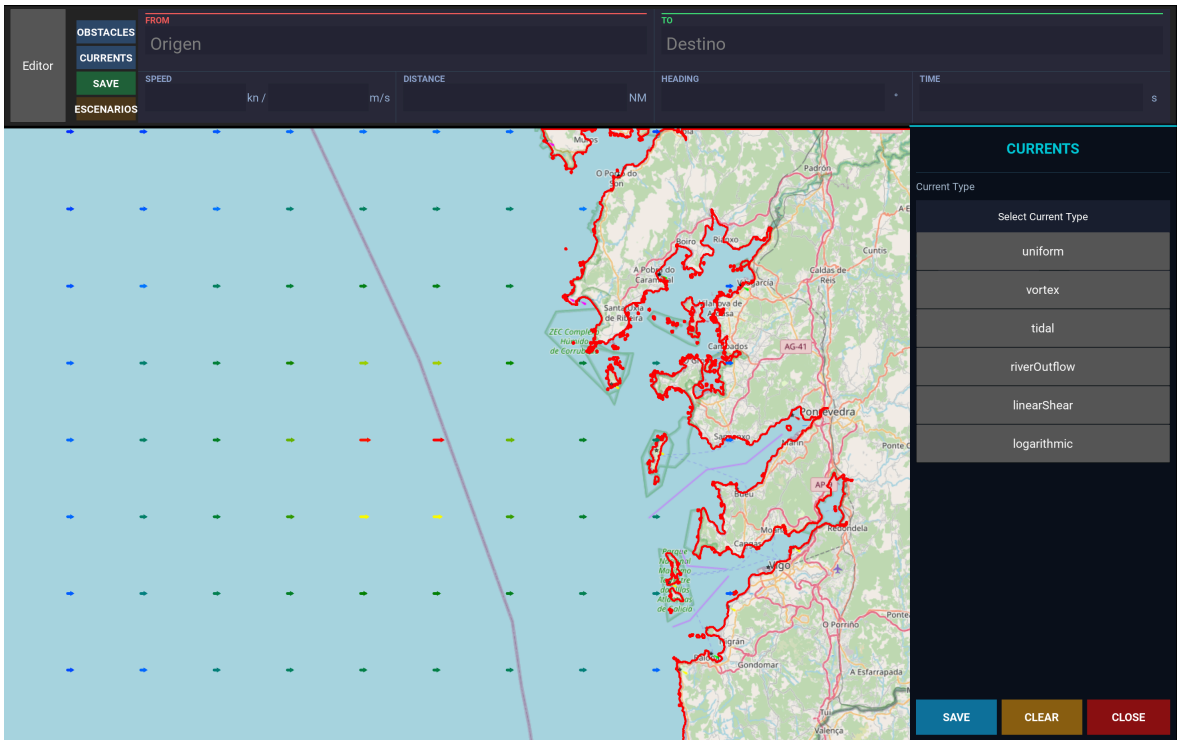


Figura 3-25. Escenario con corriente real para el día 16/02/2026 con el panel de configuración de corrientes a la derecha (elaboración propia).

El panel también permite configurar la resolución de la rejilla de vectores, es decir, la separación en kilómetros entre los puntos de muestreo del campo de corrientes, así como los diferentes parámetros según el tipo de corriente, Figura 3-26. Una vez generado el campo, el sistema filtra los vectores que caen sobre zonas de tierra utilizando los obstáculos previamente calculados, de modo que la visualización solo muestre corrientes sobre agua navegable.

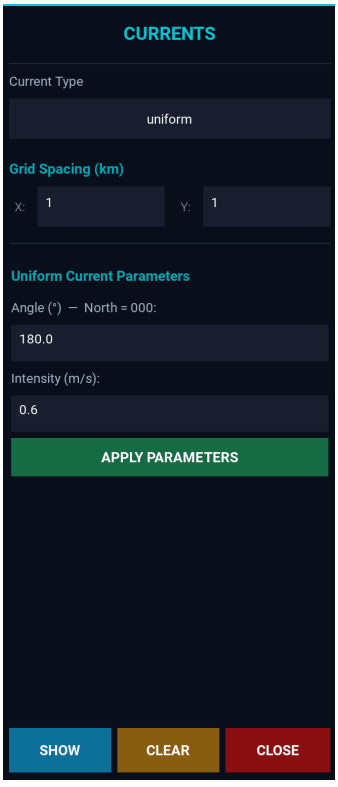


Figura 3-26. Ejemplo configuración del *grid* y de la corriente *uniform* (elaboración propia).

A continuación, entrando en detalle en los diferentes tipos de corrientes analíticas, se ha tratado de simplificar cada uno de los parámetros que definen los *grids*, quedando de la siguiente manera:

- *Uniform*: Corriente constante en todo el mapa, misma dirección y velocidad en todos los puntos, Tabla 3-8.

PARAMETRO	SIGNIFICADO
Angle	Dirección
Intensity	Velocidad en m/s

Tabla 3-8. Parámetros de la corriente uniform.

- *Vortex*: Corriente circular alrededor de un centro con decaimiento gaussiano, Tabla 3-9.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
x	Centro horizontal, % desde el centro al borde
y	Centro vertical, % desde el centro al borde
Radius	Radio del vortice % de la mitad del escenario
Intensity	Velocidad máxima en m/s

Tabla 3-9. Parámetros de la corriente *vortex*.

- *Tidal*: Corriente uniforme que oscila sinusoidalmente con el tiempo (cambia de sentido), Tabla 3-10; a t=0 la corriente está al máximo. Como la variación de tiempo está desactivada, se muestra la corriente estática al máximo.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
angle	Dirección principal en grados
Max intensity	Velocidad máxima en m/s (la corriente varía entre +max y -max)
period	Periodo de oscilación en horas

Tabla 3-10. Parámetros de la corriente *tidal*.

- *River Outflow:* Corriente que emana desde un punto fuente y se debilita con la distancia, Tabla 3-11.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
x	Posición horizontal del origen, % desde el centro al borde
y	Posición vertical del origen, % desde el centro al borde
Angle	Dirección principal del flujo en grados náuticos
Intensity	Velocidad en el punto de origen en m/s
Decay	Exponente de decaimiento (mayor = se debilita más rápido)

Tabla 3-11. Parámetros de la corriente *river outflow*.

- *Linear Shear*: corriente que cuya intensidad varia linealmente de un lado al otro del escenario, Tabla 3-12.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
angle	Dirección de la corriente en grados
Max intensity	Velocidad en el borde izquierdo en m/s
Min intensity	Velocidad en el borde derecho en m/s

Tabla 3-12. Parámetros de la corriente *linear shear*.

- *Logarithmic:* corriente de aceleración gradual con origen puntual, Tabla 3-13.

PARÁMETRO	SIGNIFICADO
x	Coordenada x (v=0)
y	Coordenada y (v=0)
angle	Dirección en grados
Max_intensity	Máxima intensidad de la corriente
distance_to_max	Distancia desde el origen donde se alcanza la velocidad máxima

Tabla 3-13. Parámetros de la corriente *logarithmic*.

3.7.5 Guardado del escenario

Una vez configurados todos los elementos, el botón SAVE lanza el proceso de validación y persistencia previamente descrito. El sistema verifica que los campos obligatorios estén completos, y si alguno de estos elementos falta, se muestra un *popup* con la lista de campos pendientes. Si todas las validaciones son superadas, el escenario se guarda en la base de datos de SQLite, junto con sus obstáculos y su campo de corrientes, y la interfaz se reinicia automáticamente para permitir la creación de un nuevo escenario.

El panel izquierdo también incluye el botón ESCENARIOS, Figura 3-27, que permite cargar un escenario previamente guardado para modificarlo. Al seleccionar un escenario de la lista, el sistema recupera todos sus datos de la base de datos, restaura los marcadores en el mapa, ajusta el zoom y el centro de la vista a las dimensiones originales del escenario, y carga las capas de obstáculos y corrientes. En este caso, al pulsar SAVE el sistema detecta que existe un identificador de escenario activo y realiza la operación de actualización.

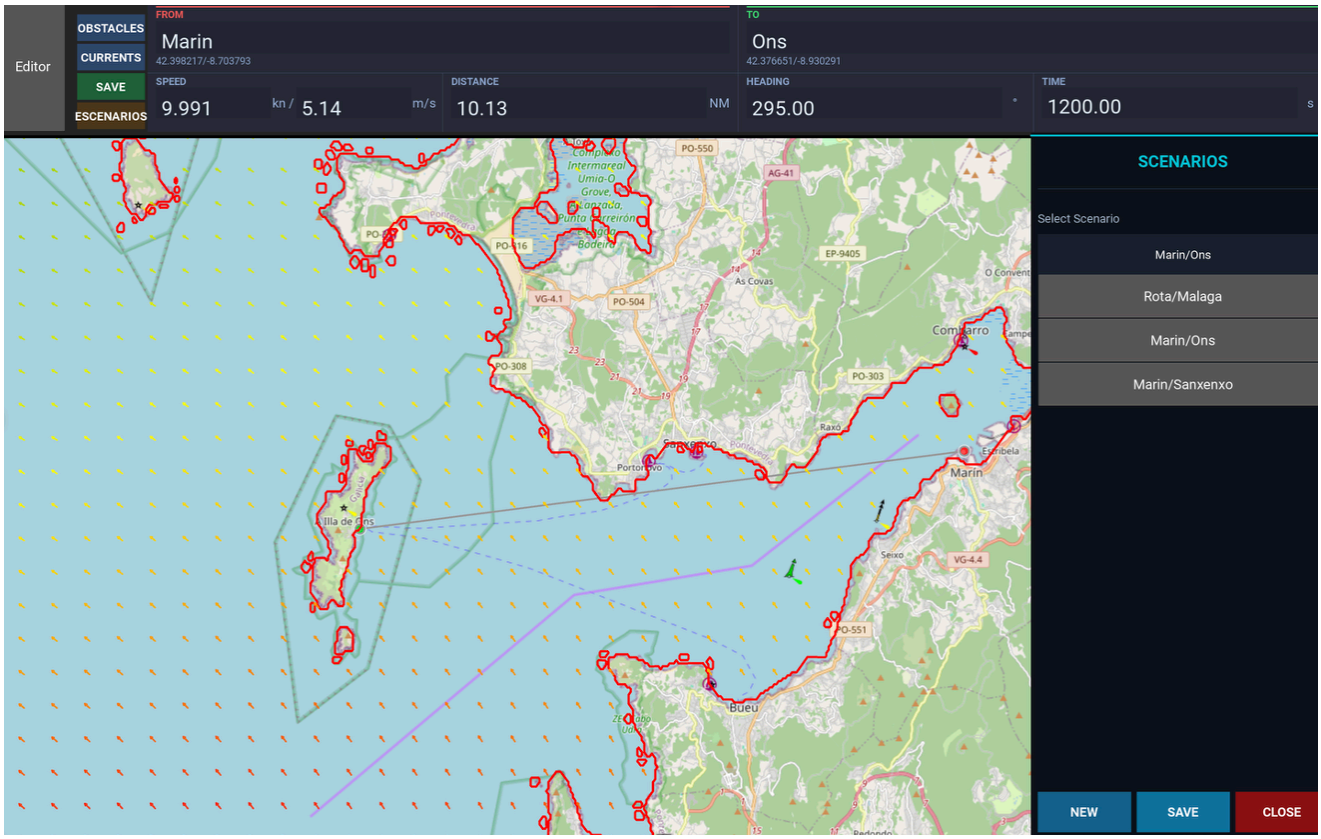


Figura 3-27. Panel de Edición de los escenarios (elaboración propia).

3.8 Modo Game

3.8.1 Introducción

El modo Game es el entorno de simulación de navegación en donde el usuario (jugador) va a poder decidir cuál cree que es la mejor derrota que seguir en el escenario visualizado. A diferencia del modo Editor, que está orientado a la creación y configuración de escenarios, el modo Game permite al usuario practicar la planificación de rutas marítimas bajo las condiciones de un escenario previamente guardado. El objetivo es trazar una ruta desde el origen hasta el destino evitando la costa (obstáculos), con un campo de corrientes determinado y minimizando la distancia recorrida dentro del tiempo disponible.

3.8.2 Selección y carga del escenario

El punto de partida del modo Game es la selección del escenario sobre el que se va a operar, Figura 3-28. El panel superior muestra un desplegable con todos los escenarios disponibles en la base de datos. Al seleccionar un escenario, el sistema ejecuta automáticamente el proceso de carga ya previamente descrito: recupera los datos del escenario, centra el mapa sobre el área geográfica correspondiente, ajusta el nivel de zoom para que el área quede completamente visible en pantalla, coloca los marcadores de origen y destino, y carga las capas de obstáculos y corrientes asociadas.

El campo de tiempo se rellena con el valor asignado en la creación del escenario desde el modo Editor, este parámetro, aunque es de libre elección por el diseñador, suele ir a la par con la dificultad de la ruta, se trata del tiempo disponible para el trazado de la derrota en el modo Game. El tiempo permanece estático hasta que el usuario pulsa el botón START, que a la vez activa todas las funciones de trazado de la ruta estimada por parte del usuario.

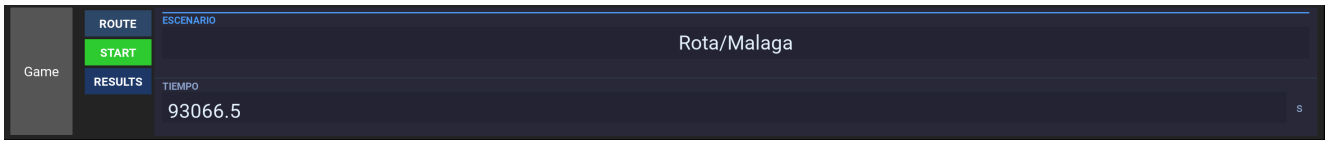


Figura 3-28. Panel de configuración modo Game (elaboración propia).

3.8.3 Interacción durante el diseño

Una vez iniciada la operación con el botón START, el temporizador comienza la cuenta atrás y la capa de edición de ruta se activa para permitir la interacción del usuario. El comportamiento de la capa en modo Game es deliberadamente más restrictivo que en el modo Editor: los marcadores de origen y destino son fijos y no pueden moverse, ya que están definidos por el escenario cargado. La única interacción permitida es la adición de *waypoints* intermedios, que se colocan mediante doble pulsación sobre cualquier punto del mapa. Los *waypoints* son arrastrables y pueden eliminarse con el botón derecho del ratón. Podemos observar un ejemplo de ruta en la Figura 3-29.

Cada *waypoint* colocado queda registrado en la capa de edición de ruta y la línea de ruta se actualiza en tiempo real, trazando el recorrido completo desde el origen, pasando por todos los *waypoints* en orden de inserción, hasta el destino. El sistema verifica en cada colocación o arrastre que el punto no caiga dentro de un obstáculo: si el usuario intenta situar un *waypoint* sobre tierra, se muestra un aviso emergente y el punto no se registra.

Cuando el temporizador llega a cero, el juego finaliza automáticamente, se detiene la interacción y se muestra un *popup* de notificación. El usuario también puede detener la partida manualmente pulsando el botón STOP, que en ese momento sustituye al botón START. Al detener la partida, el temporizador se reinicia al valor inicial y la ruta permanece visible en el mapa, aunque la edición queda deshabilitada.

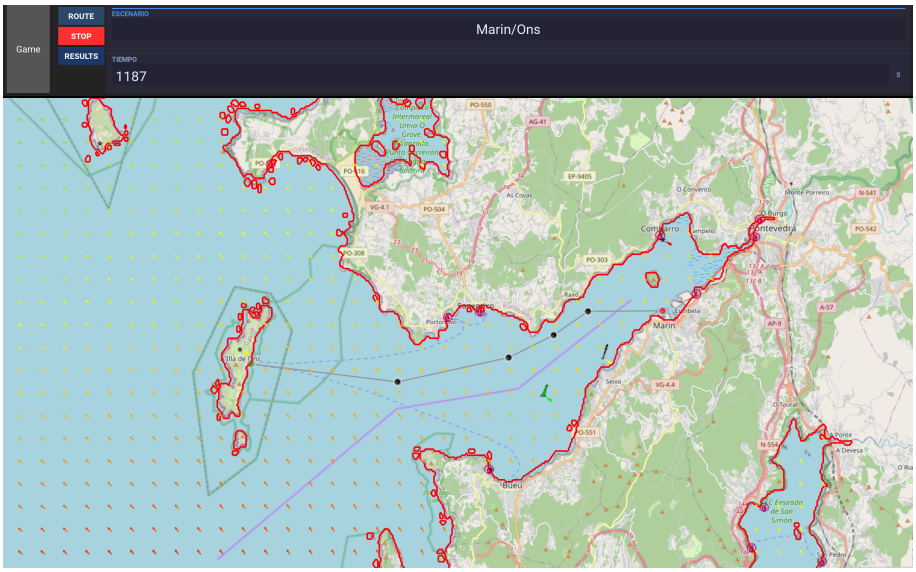


Figura 3-29. Ejemplo de ruta Marín/Ons (elaboración propia).

3.8.4 Panel Route

El botón ROUTE abre un panel lateral que muestra el detalle de la ruta trazada en ese momento, Figura 3-30. El panel lista todas las paradas en orden, desde el origen hasta el destino, incluyendo los *waypoints* intermedios, cada uno identificado con su etiqueta (FROM, WP 1, WP 2, ..., TO), sus coordenadas geográficas en formato decimal, y su posición relativa dentro de la secuencia total. Entre cada par de paradas consecutivas se muestra el rumbo del tramo en grados y su equivalente cardinal. El panel se actualiza automáticamente cada vez que se añade, mueve o elimina un *waypoint*.

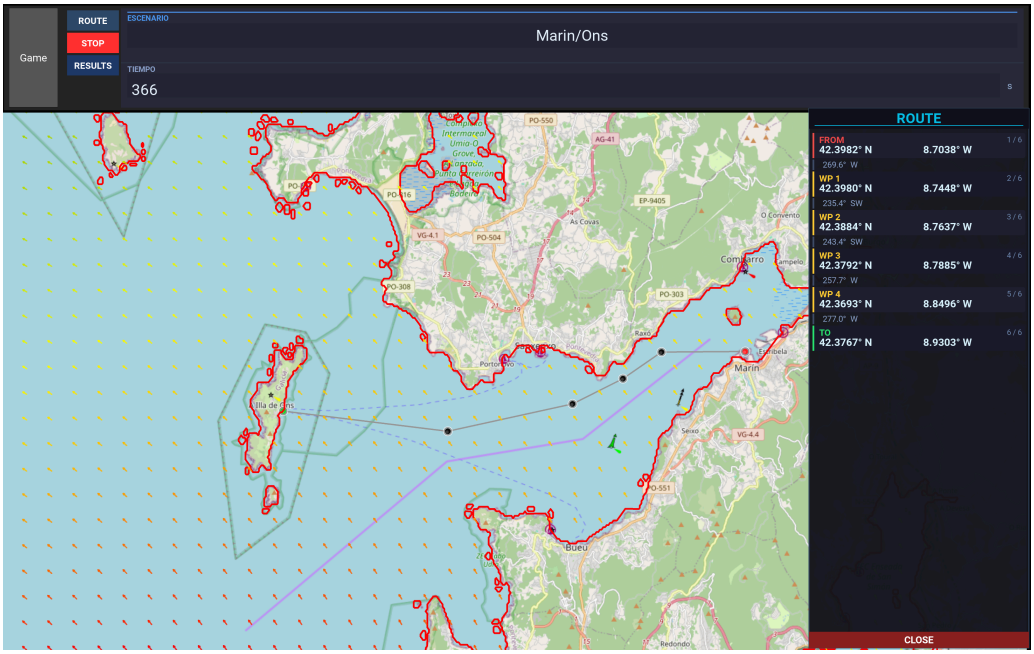


Figura 3-30. *Route Panel* (elaboración propia).

3.8.5 Panel de resultados

Al finalizar la partida, el usuario puede consultar los resultados pulsando el botón RESULTS. El panel de resultados muestra el número de waypoints creados durante la partida y la distancia total de la ruta en millas náuticas, calculada sumando las distancias de cada tramo, además de la puntuación

obtenida del 0/100 en comparación con la ruta optima proporcionada por el algoritmo. Al cerrar el panel de resultados, la lista de *waypoints* se elimina y el escenario vuelve a su estado inicial.

Una de las funciones más interesantes que tiene la aplicación es la integración de un algoritmo matemático orientado a resolver el problema de optimización de rutas en entornos con corrientes y obstáculos, proporcionado por el director de este proyecto y que forma parte de sus líneas de investigación. Este algoritmo es una solución híbrida que emplea un planificador global, basado en rutas sobre grafos, que es el algoritmo A*, el cual es combinado con un planificador local que genera el modelo de navegación entre nudos del grafo empleando la solución analítica óptima asumiendo corrientes uniformes a nivel local, lo cual asegura que las etapas de navegación seleccionadas son alcanzables en las condiciones de navegación del escenario. De esta forma, esta solución encuentra una trayectoria como mínimo subóptima (el entorno de código en la parte de investigación, con que yo como alumno no he trabajado, permite evaluar su rendimiento en base a software genérico de optimización) para cada escenario teniendo en cuenta el *grid* de corrientes que se ha configurado, así como la presencia de obstáculos.

La visualización de las soluciones se activa también en este panel, en la Figura 3-31 observamos tanto la ruta trazada por el usuario como la solución al escenario en color amarillo. Esta herramienta significa un cambio en la filosofía del programa, ganando la función evaluadora, y contribuyendo a la vez en el desarrollo de los futuros oficiales/capitanes.

Finalmente, cuando se muestra la solución, el usuario puede realizar un análisis comparativo crítico de su propia trayectoria; al observar el trazado ideal en amarillo, se identifica de manera inmediata en qué puntos nos desviamos de la ruta más eficiente, permitiendo la comprensión visual de cómo el *grid* de corrientes o la disposición de los obstáculos condicionan la navegación.

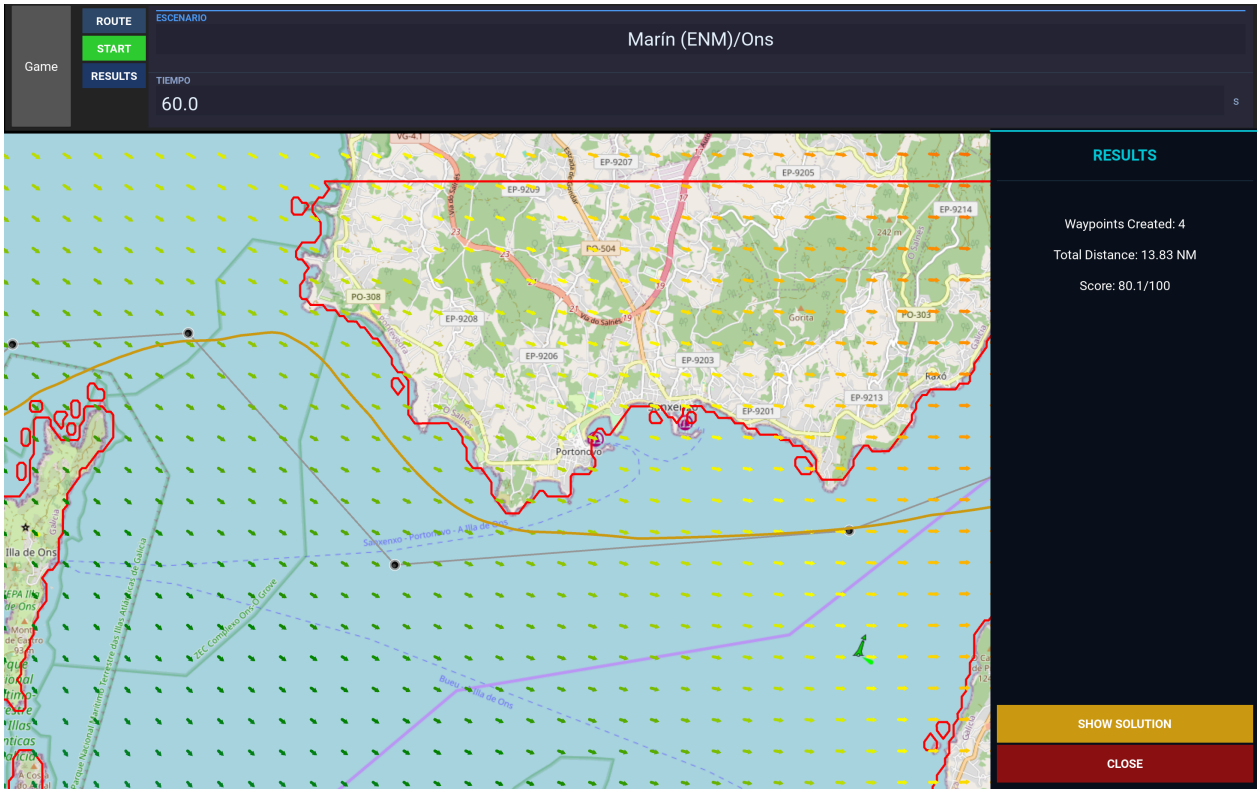


Figura 3-31. *Results Panel* (elaboración propia).

3.8.6 Evaluador de rutas marítimas.

A continuación, se va a explicar la decisión que se ha tomado para evaluar las rutas trazadas por los usuarios. Es necesario mencionar que la solución proporcionada por el programa no es perfecta, y

muchas veces es poco práctica teniendo en cuenta que se tiene que realizar navegando. Sin embargo, el objetivo principal es comparar la ruta dibujada manualmente con la solución matemática óptima, asignando una puntuación de rendimiento del 0 al 100.

El método calcula una puntuación utilizando un margen de error adaptable. En lugar de aplicar una penalización rígida, el sistema ajusta su severidad de forma proporcional al tamaño total del escenario. Las fases del proceso son las siguientes:

1. Estandarización de trazados**:** El sistema toma la ruta óptima y la ruta dibujada por el usuario y divide ambas en exactamente 100 puntos equidistantes
2. Cálculo del error medio: Para cada uno de los 100 puntos, se mide la distancia real en km entre el punto de la ruta óptima y el punto de la ruta del usuario.
3. Cálculo de la tolerancia dinámica: El sentido de este paso está en que el sistema no penalice igual en un escenario grande que en uno pequeño. En este proceso el sistema se escala automáticamente al tamaño de cada escenario. Se ha establecido un mínimo de 1,5 km para que en los escenarios pequeños no sea demasiado estricto.

$$tolerancia = \max\left(1.5, distancia\ total\ ruta\ optima \times 0.10\right)$$

4. Puntuación Final: Se aplica una curva matemática de decaimiento exponencial que evalúa el desvío cometido frente a la tolerancia permitida, de esta manera se obtiene la Tabla 3-14.

$$\text{Score} = 100 * e^{-\left(\frac{Desvio\ Promedio}{Tolerancia\ Dinamica}\right)}$$

Error medio vs tolerancía	Puntuación
Error =0 (ruta perfecta)	100/100
Error=tolerancia	36.8/100
Error=2 x tolerancia	13.5/100
Error muy grande	0/100

Tabla 3-14. Tabla decaimiento exponencial.

Este sistema garantiza que la evaluación sea justa sin importar la escala del mapa. Un error de 1.5 km en un viaje corto (ej. 15 km) es visual y tácticamente grave, desplomando la nota a un ~36/100. Sin embargo, en un viaje largo (ej. 200 km), la tolerancia sube a 20 km, por lo que ese mismo desvío de 1.5 km resulta casi imperceptible y la puntuación se mantiene rozando el 100/100.

3.9 Modo Navigation

3.9.1 Introducción

El modo Navigation es el entorno de visualización de condiciones oceanográficas reales. A diferencia de los otros dos modos, no está orientado a la creación de escenarios ni a la simulación de rutas, sino a proporcionar al usuario una vista en tiempo real de las corrientes marinas y el viento sobre cualquier zona geográfica que tenga en pantalla. Además, para aportar una dimensión práctica adicional, incorpora la funcionalidad *Dynamic Route*, que permite al usuario trazar una ruta directa sobre el mapa y observarla superpuesta a las capas de viento y corriente activas.

Al activar el modo *Navigation*, el panel inferior se reconfigura mostrando tres botones de acción: VIENTO, CORRIENTE y ESCALAS, junto a un indicador GPS que muestra en tiempo real las coordenadas geográficas bajo el cursor del ratón mientras este se desplaza sobre el mapa. Y, por último, el botón *Dynamic Route*, que activa el panel lateral homónimo para la definición visual de la ruta, Figura 3-32.



Figura 3-32. Panel de configuración modo Navigation (elaboración propia).

3.9.2 Descarga y visualización de corrientes reales

El botón CORRIENTE lanza el proceso de descarga de datos oceanográficos reales para el área geográfica visible en ese momento en el mapa. El sistema obtiene los límites exactos del *viewport* actual mediante el bounding box del mapa y los pasa al generador, que se conecta al servicio Copernicus Marine Service y descarga datos.

La descarga solicita las componentes horizontales de la corriente superficial a una profundidad de 0,5 metros, que corresponde a la capa superficial del océano. El rango temporal se calcula automáticamente tomando como referencia el instante UTC actual. Una vez descargado el *dataset*, se muestrean opcionalmente a un *grid*, y se calculan la magnitud y dirección del vector en cada punto. El resultado se serializa en un archivo *.pkl* que es cargado por la capa correspondiente para su visualización sobre el mapa como flechas coloreadas, Figura 3-33.

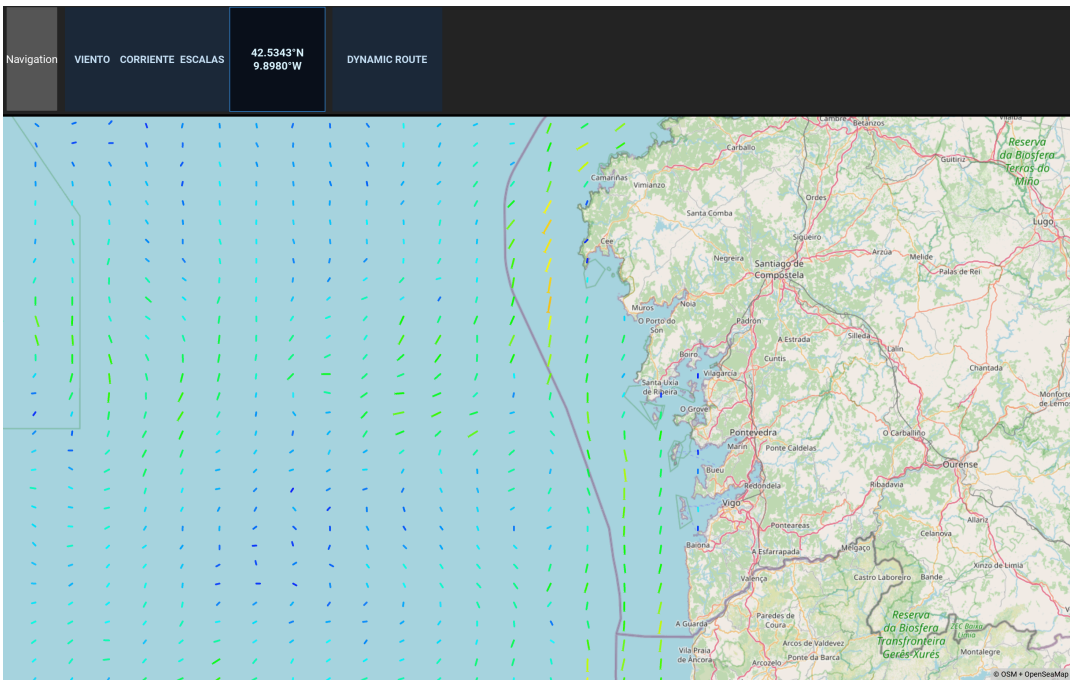


Figura 3-33. Corrientes reales (elaboración propia).

El botón actúa como un interruptor: si la capa ya está visible, una segunda pulsación la elimina del mapa. Esto permite al usuario alternar entre ver y ocultar las corrientes sin tener que cambiar de modo.

3.9.3 Descarga y visualización del viento real

El botón VIENTO sigue el mismo mecanismo que el botón CORRIENTE, pero accediendo al conjunto de datos de viento, que contiene observaciones globales de viento a 10 metros de altura.

La capa de viento se visualiza en la misma capa que las corrientes, y utiliza una escala de normalización diferente basada en la escala *Beaufort*. Al igual que las corrientes, el botón actúa como interruptor y la capa puede activarse y desactivarse independientemente, Figura 3-34.

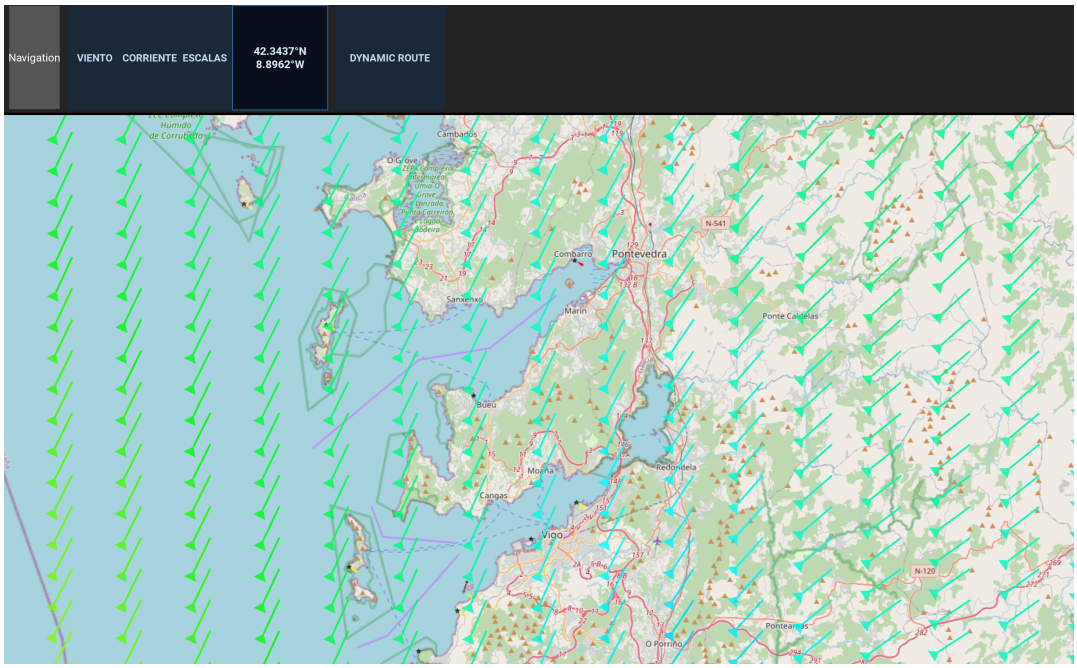


Figura 3-34. Viento real (elaboración propia).

3.9.4 Panel de escalas

El botón ESCALAS, despliega un panel lateral que muestra la leyenda de colores de ambas capas de visualización, Figura 3-35. El panel contiene dos secciones diferenciadas: una para corrientes marinas, con la escala de 0 a 1 m/s dividida en seis bandas etiquetadas tanto en m/s como en nudos (calma, suave, moderada, fuerte, muy fuerte, extrema); y otra para el viento, con la escala Beaufort de 0 a más de 20,7 m/s igualmente en ambas unidades. Cada sección incluye una barra de gradiente visual, una tabla de tramos con el color correspondiente y una nota sobre la escala de tamaño de las flechas, que es proporcional a la magnitud con un mínimo de 10 píxeles y un máximo de 100 píxeles. El panel se cierra mediante su propio botón CERRAR.



Figura 3-35. Panel de escalas (elaboración propia).

3.9.5 Indicador GPS

Por último, durante todo el tiempo que el modo Navigation está activo, el panel inferior muestra un indicador GPS, Figura 3-36 que actualiza las coordenadas geográficas bajo el cursor del ratón en tiempo real. Esto se consigue convirtiendo las coordenadas de pantalla a latitud y longitud, y las muestra con cuatro decimales y con indicación de hemisferio (N/S, E/W). Cuando el cursor sale del área del mapa, el indicador se vacía automáticamente.



Figura 3-36. Panel GPS (elaboración propia).

3.9.6 Dynamic Route

La funcionalidad *Dynamic Route* representa una de las líneas de desarrollo futuro más relevantes del sistema. El objetivo es permitir al usuario definir visualmente un destino sobre el mapa en modo *Navigation* y que el sistema calcule automáticamente la ruta óptima hacia ese punto teniendo en cuenta las condiciones ambientales activas en tiempo real, es decir, las corrientes marinas y el viento descargados para el área visible.

En su estado actual, la capa *Dynamic Route* ya permite al usuario establecer un punto de origen mediante doble clic, representado con un marcador rojo, y un punto de destino con un segundo doble clic, representado con un marcador verde, trazando una línea directa entre ambos, Figura 3-37. El panel lateral asociado muestra las coordenadas geográficas de cada punto y ofrece controles para reiniciar o cerrar la capa.

La evolución prevista de esta funcionalidad contempla dos mejoras principales. En primer lugar, la integración de un algoritmo de optimización de rutas que, partiendo de los campos vectoriales de corriente y viento activos, calcule el trayecto de menor coste energético o menor tiempo entre origen y destino, en lugar de la línea recta actual. En segundo lugar, la vinculación del punto de origen con la posición GPS del dispositivo, de forma que el marcador de inicio se actualice automáticamente con la ubicación real del usuario en cada momento, convirtiendo la funcionalidad en una herramienta de navegación asistida en tiempo real.

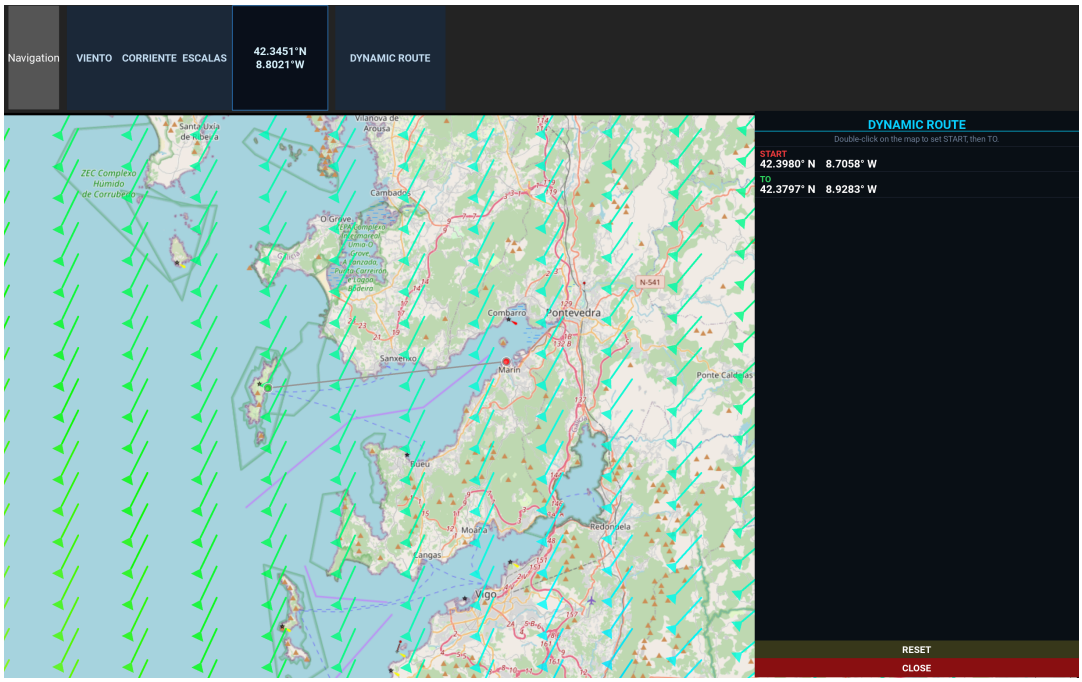


Figura 3-37. Funcionalidad Dynamic Route (elaboración propia).

3.10 Arquitectura del código

El diseño arquitectónico de la aplicación se fundamenta en un modelo modular y orientado a eventos, estructurado para garantizar la escalabilidad y el desacoplamiento entre la simulación y la interfaz de usuario. Esta arquitectura se compone por 4 pilares fundamentales:

1. Bus de eventos centralizado (appEventBus): Actúa como el núcleo de comunicación de la aplicación. Implementa un patrón de publicación-suscripción que permite que los paneles de configuración y el motor de visualización interactúen de forma asíncrona. Gracias a este diseño, un cambio en los parámetros físicos del escenario (como la intensidad de un vórtice o el cambio de una boya) se propaga instantáneamente a todos los módulos suscritos sin necesidad de referencias directas entre clases, minimizando la complejidad del código.
2. Interfaz modular basada en paneles: Utilizando el *framework* Kivy, la interfaz se ha fragmentado en componentes especializados (appConfigurationPanel…). Esta granularidad permite gestionar de forma independiente los distintos modos de operación (Navegación, Editor y Juego), facilitando la actualización de nuevas herramientas de control sin afectar al rendimiento de la renderización cartográfica.
3. Sistema de visualización por capas: La representación cartográfica se basa en una extensión personalizada de MapView. El sistema organiza la información mediante capas de visualización independientes (*Layers*). Esto permite superponer en tiempo real datos vectoriales dinámicos sobre información geográfica estática y cartografía náutica profesional servida localmente.
4. Capa de persistencia de datos: La gestión de escenarios y configuraciones de usuario se centraliza en un motor SQLite, asegurando la integridad de los datos y permitiendo la carga rápida de entornos guardados. La aplicación complementa esto con un sistema de caché de archivos binarios (.pkl) para el procesamiento eficiente de grandes volúmenes de datos oceanográficos procedentes de fuentes externas como Copernicus.

En conjunto, esta arquitectura permite que la aplicación funcione como un sistema reactivo, donde la manipulación de variables físicas y la navegación en tiempo real se traducen en una experiencia fluida, robusta y fácilmente extensible para futuras líneas de investigación o funcionalidades adicionales. En la Tabla 3-15, podemos observar el nombre de cada uno de los archivos con su función dentro de la

aplicación. Además, en la Figura 3-38 tenemos un código QR que nos lleva a un repositorio privado donde se localiza todo el código.

ARCHIVO	FUNCIÓN
VarunaApp.py	Lanzador que contiene la clase principal de la aplicación Kivy
Launch_varuna_nautical.py	Lanzador que activa el servidor de cartas naúticas
Varuna.py	Lanzador simple alternativo
appConfigurationPanel.py	Panel de control Principal
appScenarioPanel.py	Contenedor principal de la vista del mapa y paneles
appCurrentConfigurationPanel.py	Configuración de las corrientes sintéticas
appObstacleConfigurationPanel.py	Configuración de los obstáculos
appRouteConfigurationPanel.py	Información sobre la ruta creada
appResultPanel.py	Panel de resultados
appScaesPanel.py	Leyenda de escalas a color
appScenarioConfigurationPanel.py	Gestión y carga de escenarios
DynamicRoutePanel.py	Información de la ruta dinámica óptima
appMapView.py	Vista de mapa
appEventBus.py	Sistema de comunicación interna entre componentes
appCurrentFieldLayer.py	Capa de las corrientes
appMapObstacleLayer.py	Visualiza los obstáculos del mapa
appMapRouteEditionLayer.py	Diseño de rutas
CurrentLayer.py	Datos reales de viento y corrientes descargados de Copernicus
DynamicRouteLayer	Ruta óptima calculada en tiempo real
Scenario.py	Modelo de datos para los escenarios
ScenarioDB.py	Gestión de la base de datos de los escenarios
CurrentField.py	Lógica matemática para generar campos de vectores de corrientes
GSHHSGenerator.py	Genera obstáculos automáticos basados en las líneas de costa reales

Geometry.py	Utilidades geométricas y cálculos especiales
Obstacle.py	Modelo de datos para obstáculos individuales
NauticalMapSource.py	Fuente de datos para los elementos náuticos
Tile_compositor_server.py	Servidor interno que fusiona capas de mapas náuticos
appMapCurrentsGenerator.py	Descargan y procesan datos reales de Copernicus

Tabla 3-15. Archivos Varuna.

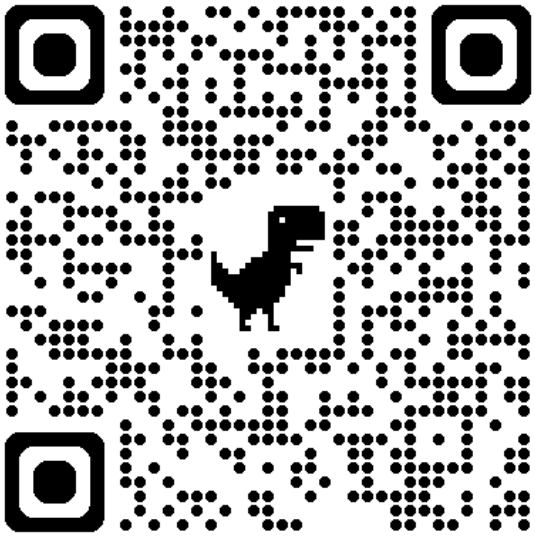


Figura 3-38. Código QR de la aplicación (elaboración propia).

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Introducción

En este apartado se van a presentar y analizar los resultados obtenidos tras el desarrollo del entorno de simulación para la planificación de rutas marítimas. A través de una serie de pruebas operativas y escenarios de estrés, se ha buscado verificar no solo la funcionalidad técnica de la aplicación, sino también su utilidad como herramienta educativa para la formación de oficiales/capitanes. En las secciones siguientes, se detallará el comportamiento del sistema frente a datos ambientales reales y se expondrán las conclusiones derivadas de las limitaciones cartográficas y algorítmicas detectadas durante el proceso de validación.

4.2 Análisis crítico de la cartografía

Durante la fase de pruebas, se ha realizado un análisis profundo sobre la fiabilidad de las fuentes cartográficas empleadas. Se debe recalcar que el mapa base, aunque incorpora elementos náuticos detallados de OpenSeaMap (como boyas, faros y marcas de canal), no posee carácter oficial y se posiciona estrictamente como una herramienta de ayuda a la decisión y formación. Se evaluó inicialmente la integración de cartas náuticas digitales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM)[57]. En concreto, se estudió la sección de Infraestructura de Datos Espaciales del Instituto Hidrográfico de la Marina (IDEIHM)[58] llegando a consultar con personal especializado de dicho organismo. Sin embargo, se concluyó que la implementación de esta cartografía oficial presentaba desafíos técnicos significativos debido al gran volumen de los datos y a la complejidad de los protocolos de descarga, lo que hubiera comprometido los plazos de desarrollo. En consecuencia, para alcanzar una fiabilidad total en navegación real, el desarrollo futuro debería orientarse hacia la integración de estándares S-100 del IHM.

4.3 Limitaciones de la resolución y propuesta de una solución hibrida

Durante el desarrollo de la aplicación, se realizó un estudio donde se compararon tres fuentes para decidir cuál era la opción más viable. Finalmente se optó por la utilización de la base de datos GSHHS para la definición de la costa, ya que permite una carga ágil de polígonos cerrados y una integración perfecta con las librerías de geometría computacional.

No obstante, los resultados de las pruebas de optimización matemática han revelado que, en escalas de zoom muy elevadas o en zonas de morfología costera compleja, la resolución de GSHHS resulta insuficiente. Un ejemplo sería el que observamos en la Figura 4-1, donde vemos que no está recogido

en la base de datos el puente de cruce a la isla de Arosa, un puente de pequeñas dimensiones por el que la gran mayoría de los barcos no podrían pasar por debajo, Figura 4-2.

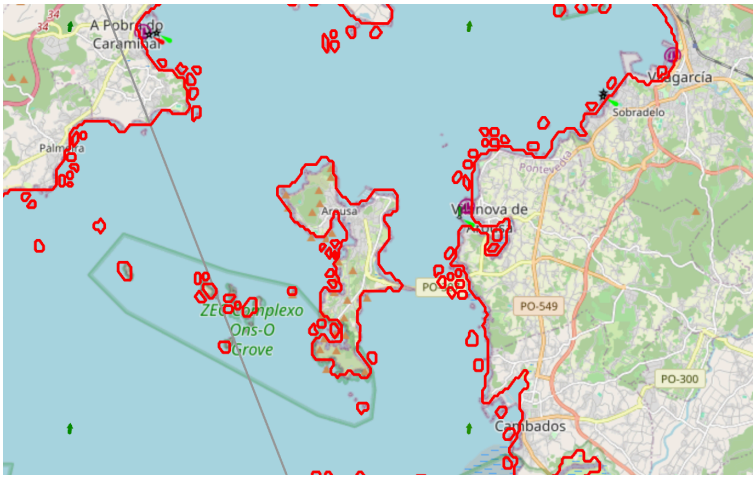


Figura 4-1. Resolución de la fuente GSHHS en la ría de Arosa (elaboración propia).



Figura 4-2. Puente de cruce a la isla de Arosa[59].

Esta limitación provoca que el algoritmo de búsqueda de la ruta óptima pueda proponer trayectorias que, aunque válidas matemáticamente sobre el modelo, podrían rozar peligros costeros no representados con precisión métrica en esta fuente, como se puede observar en el ejemplo de la Figura 4-3.



Figura 4-3. Solución escenario Marín/Sanxenxo (elaboración propia).

4.4 Análisis del algoritmo de optimización

El núcleo del motor de cálculo de la aplicación se fundamenta en la resolución del problema de navegación de Zermelo, el cual busca determinar la trayectoria de tiempo mínimo para un buque que navega a través de un campo de corrientes dado. Para su ejecución computacional, el software emplea una malla de celdas hexagonales sobre la que evalúa el coste de tránsito en cada unidad de superficie. No obstante, las pruebas de estrés han revelado limitaciones críticas asociadas a la escala de los escenarios. En áreas geográficas de gran extensión, el tamaño de los hexágonos aumenta proporcionalmente para mantener la viabilidad del cálculo, lo que reduce drásticamente la fidelidad de la ruta. Este fenómeno provoca comportamientos que se alejan de la lógica náutica profesional, como recalibraciones de ruta que implican navegar millas en dirección contraria al destino o realizar cambios de rumbo erráticos que no responden a la cinemática propia de un buque realizando una ruta marítima, Figura 4-4.

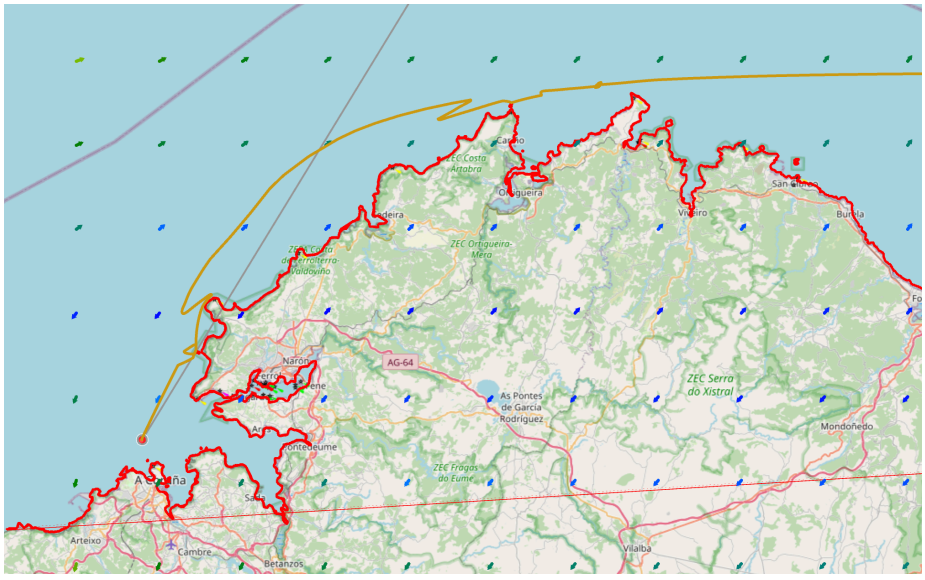


Figura 4-4. Solución escenario ACoruña/Santander (elaboración propia).

Asimismo, se ha observado que la solución matemática pura tiende a trazar trayectorias que pasan peligrosamente cerca de los obstáculos costeros, Figura 4-5, al carecer de un margen de seguridad dinámico. Esta "perfección matemática" del algoritmo resulta poco práctica en la vida real, ya que el

comandante/capitán prioriza siempre la seguridad estructural y la estabilidad sobre el ahorro mínimo de tiempo.

Además, esta capacidad de análisis en escenarios cercanos a las condiciones reales constituye una herramienta de gran valor para la línea de investigación del tutor del proyecto, ya que permite evaluar con mayor rigor el comportamiento de los algoritmos de optimización de rutas bajo restricciones operativas verosímiles. En este sentido, la incorporación de factores como márgenes dinámicos de seguridad, proximidad a obstáculos y criterios de navegación realistas no solo mejora la robustez de las soluciones obtenidas, sino que también abre la puerta a perfeccionar el desempeño de dichos algoritmos en trabajos futuros, orientándolos hacia propuestas más aplicables, seguras y eficientes desde el punto de vista operativo.

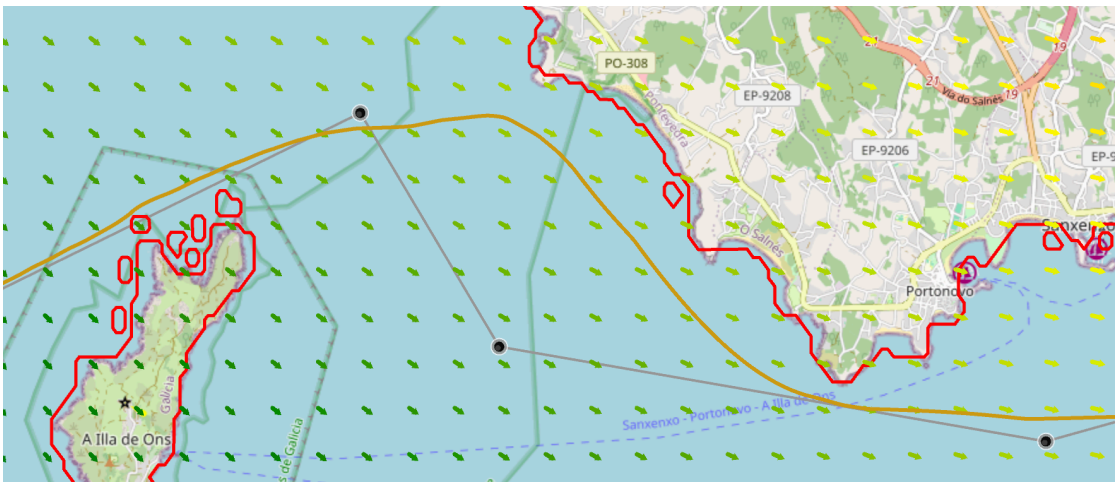


Figura 4-5. Solución escenario Marín/Ons (elaboración propia).

4.5 Análisis de los escenarios y gestión de la optimización

La validación del sistema se ha orientado en torno a la configuración de diversos entornos de simulación, cuyos parámetros técnicos se encuentran centralizados en la arquitectura de la base de datos. En total, se han diseñado y ejecutado seis escenarios de prueba con distintos niveles de complejidad geográfica y ambiental. Los resultados obtenidos revelan que el algoritmo fue capaz de converger hacia una solución óptima en cuatro de los seis casos propuestos. No obstante, se ha identificado una limitación crítica: cuando el escenario presenta una gran amplitud geográfica combinada con una elevada densidad de obstáculos costeros o marítimos, la capacidad de resolución del motor de optimización se ve comprometida, resultando incapaz de hallar una trayectoria válida en un tiempo computacional razonable, como es el caso del escenario Vigo/Muros, Figura 4-6.

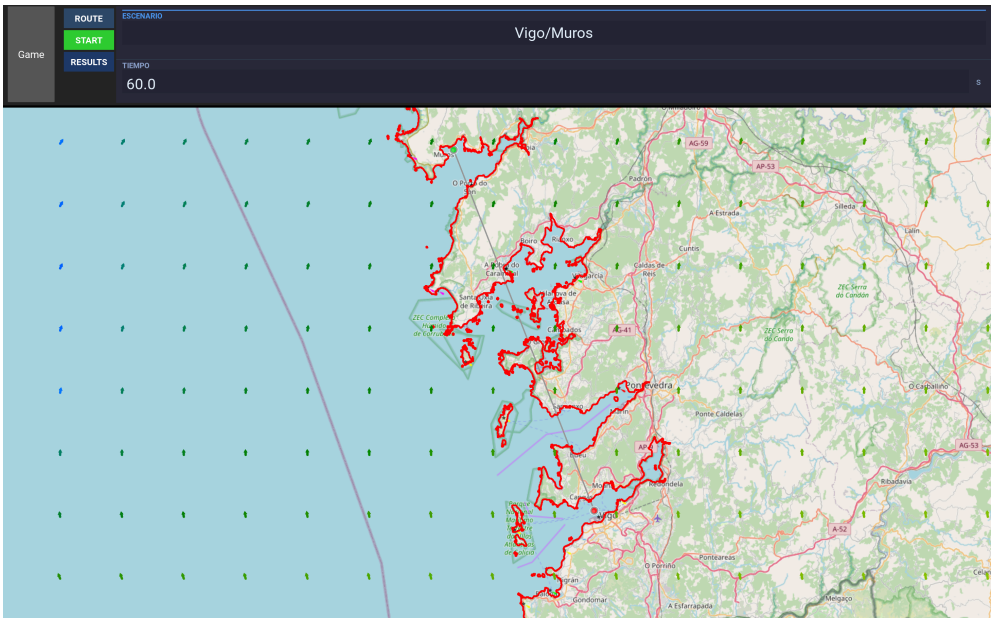


Figura 4-6. Escenario Vigo/Muros (elaboración propia).

Del mismo modo, esta limitación no debe interpretarse únicamente como una debilidad del sistema, sino también como una oportunidad clara de mejora dentro de la investigación. En particular, los escenarios con elevada densidad de objetos y gran complejidad espacial ponen de manifiesto la necesidad de introducir técnicas más avanzadas de optimización en los cálculos numéricos, con el fin de reducir la carga computacional y mejorar la eficiencia del proceso de búsqueda. Así, abordar este tipo de problemas complejos permite identificar líneas de trabajo futuras orientadas al perfeccionamiento del algoritmo, favoreciendo el desarrollo de soluciones más escalables y robustas ante entornos de navegación especialmente exigentes.

Además, se ha de mencionar, que el proceso de obtención de la ruta óptima desde el punto de vista matemático no es un proceso automatizado ni integrado de forma nativa en la interfaz de usuario de la aplicación principal. Para la generación de estas soluciones, es necesario recurrir a un flujo de trabajo externo que requiere la ejecución de un software adicional proporcionado por la dirección del proyecto. Este programa externo procesa los campos vectoriales y la geometría de los obstáculos para calcular la solución de Zermelo, almacenando posteriormente el resultado en la base de datos. Una vez generada la solución, se debe proceder a la migración manual de la base de datos hacia el directorio de la aplicación para que esta pueda leer y representar visualmente la trayectoria calculada.

Este flujo de trabajo ha demostrado ser un proceso notablemente lento y complejo durante la fase de validación. La fragmentación del software en dos entornos independientes introduce una fricción operativa considerable, manifestándose frecuentemente problemas de compatibilidad y errores en la integridad de los datos durante la migración de una aplicación a otra. Estas dificultades técnicas no solo ralentizan el ciclo de pruebas, sino que evidencian la necesidad de una futura unificación de los motores de cálculo y visualización para transformar el prototipo actual en una herramienta de planificación ágil y plenamente autónoma.

Asimismo, esta situación pone de relieve la conveniencia de abordar en el futuro una integración más estrecha entre ambos entornos de trabajo, de modo que el intercambio de información deje de depender de procesos intermedios susceptibles de introducir errores o pérdidas de consistencia. Avanzar hacia una arquitectura unificada, o al menos hacia una comunicación plenamente sincronizada entre los dos sistemas, permitiría agilizar significativamente las tareas de validación, reducir los problemas de compatibilidad y dotar al conjunto de una mayor solidez operativa. En este sentido, dicha integración se perfila como una línea de mejora prioritaria para evolucionar desde un prototipo funcional hacia una solución más madura, eficiente y preparada para su aplicación práctica.

4.6 Cumplimiento funcional y capacidad de la simulación operativa

La aplicación desarrollada ha demostrado cumplir con éxito su propósito fundamental: proporcionar un entorno interactivo para el diseño y evaluación de derrotas marítimas. El sistema permite al usuario no solo trazar rutas sobre una cartografía dinámica, sino también extraer información técnica de alto valor para la navegación, como los rumbos verdaderos de cada tramo y las coordenadas GPS precisas de cada punto de paso.

Continuando con el diseño de los diferentes escenarios, se ha conseguido la creación de un entorno dinámico y visual, donde de una manera sencilla, se seleccionan al gusto, los condicionantes de cada ejercicio. Desde lo más sencillo, como es el establecimiento de los puntos inicial y final, así como la elección del zoom requerido, la modificación de cada uno de los parámetros de las diferentes corrientes proporcionadas o incluso la resolución requerida de los obstáculos costeros. En conclusión, personalización con un nivel adecuado de detalle, para la recreación de prácticamente cualquier escenario posible. Un hito significativo en la validación ha sido la implementación del escenario entre la Base Naval de Rota y el Puerto de Málaga (Figura 4-7). Para este caso de estudio, se integraron datos reales descargados del servicio Copernicus Marine, consiguiendo, de esta manera, la recreación de un escenario real.

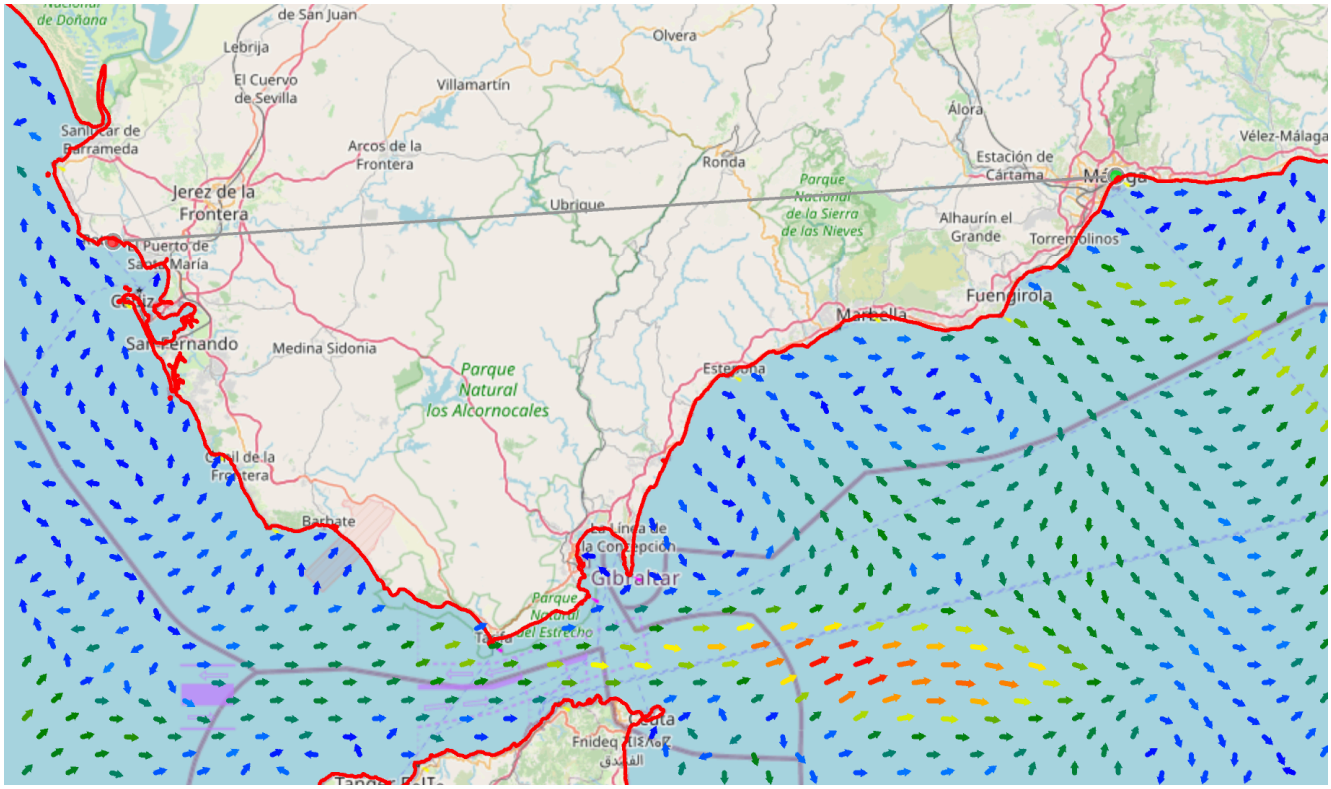


Figura 4-7. Escenario Base Naval de Rota/Puerto de Malaga (elaboración propia).

Además, se ha conseguido la consulta actual de datos meteorológicos en tiempo real. Esto de cara a la planificación de rutas marítimas es de gran importancia, ya que las consultas instantáneas de las condiciones aportan información de gran valor ayudando, a las decisiones que se vayan a tomar. El motor de visualización es capaz de representar fielmente campos vectoriales dinámicos de viento y corriente, sentando las bases para el proyecto de "Ruta Dinámica". Aunque dicha funcionalidad está todavía en fase de implementación técnica, los cimientos estructurales permiten ya observar la interacción entre la derrota trazada y el medio actual.

El grueso de la aplicación se encuentra en el modo GAME, donde se realiza una planificación en los escenarios previamente diseñados de manera sencilla y eficaz. Además, la obtención de una ruta matemáticamente optima según el escenario y el campo de corrientes, es de gran utilidad, ayudándonos

cuantiosamente en numerosos campos, como la optimización de los costes operativos asociados a cada derrota trazada o, por ejemplo, la disminución del impacto que tiene nuestros viajes en el medio ambiente. Se trata del futuro, siguiendo esta filosofía y trabajando en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, se conseguirá una disminución muy grande en esfuerzos que finalmente penalizan en gran medida la eficacia de nuestras acciones en el medio marítimo.

Por último, se ha de mencionar la contribución a la formación, no solo de los futuros oficiales de la Armada, si no de cualquiera que se vaya a enfrentar a una travesía en la mar. Con el uso de esta funcionalidad, conseguimos familiarizarlos con situaciones que se asemejan a la realidad, automatizando las decisiones relacionadas con la ruta y asimilando el comportamiento que tienen las corrientes en los barcos. Además, el sistema de evaluación automatizado garantiza que la puntuación del usuario sea proporcional a la escala del escenario elegido.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Introducción

Tras la culminación del desarrollo y la fase de pruebas del programa, es posible afirmar que se han sentado las bases tecnológicas para una herramienta avanzada de planificación y optimización de derrotas marítimas. Si bien los objetivos principales de diseño, visualización e integración de datos ambientales han sido alcanzados, el proceso de validación ha puesto de manifiesto diversas áreas de mejora y retos técnicos que marcan el camino para evoluciones posteriores. Este capítulo final sintetiza las lecciones aprendidas y proyecta las líneas de investigación y desarrollo necesarias para transformar este prototipo en una herramienta de grado profesional

5.2 Integración de la cartografía oficial y el desarrollo de la costa

Como se ha analizado en el capítulo de resultados, la dependencia de fuentes cartográficas no oficiales como OpenSeaMap limita el uso del software a entornos formativos o de apoyo a la decisión. Una de las líneas futuras más críticas es la integración de cartas náuticas electrónicas oficiales (ENC) bajo los estándares S-57 o el nuevo estándar S-100 del Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM). Esta implementación permitiría pasar de un mapa de ayuda visual a un sistema con capacidad real de navegación segura, integrando sondas de profundidad y avisos a los navegantes en tiempo real.

En estrecha relación con lo anterior, se hace imperativo mejorar la precisión en la definición del litoral. La transición desde la base de datos GSHHS hacia un modelo centrado en la definición de costas permitiría al algoritmo de optimización operar con precisión métrica en zonas de canales y puertos. Esto evitaría los trazados erráticos cerca de costa y garantizaría que las soluciones matemáticas sean plenamente ejecutables por un buque real.

5.3 Veriles y calado dinámico

Para que el algoritmo de optimización proporcione soluciones plenamente realistas y seguras, una línea de desarrollo crítica es la implementación de veriles de seguridad. Actualmente, el sistema identifica la costa como una frontera binaria (tierra o mar); sin embargo, en la navegación real, el límite está condicionado por el calado del buque y la sonda disponible. Por ello sería de gran utilidad la implementación en el software de un apartado donde según el calado del buque se calcule automáticamente el veril de seguridad.

Por otra parte, la integración de datos batimétricos de alta resolución permitiría al software generar automáticamente áreas de exclusión basadas en el margen de seguridad bajo la quilla. De este modo, la malla de obstáculos dejaría de ser estática para adaptarse a las características específicas del buque

simulado, garantizando que la ruta propuesta no solo evite colisiones con tierra firme, sino también varadas en zonas de poca profundidad.

5.4 Integración del RIPA

Uno de los saltos cualitativos más importantes para la madurez del software es la codificación del Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes en la Mar (RIPA) dentro de la lógica del algoritmo. La trayectoria "matemáticamente óptima" a menudo entra en conflicto con la normativa vigente, especialmente en canales angostos o en Dispositivos de Separación de Tráfico (DST) como, por ejemplo, el del Estrecho de Gibraltar o el de Finisterre, Figura 5-1.

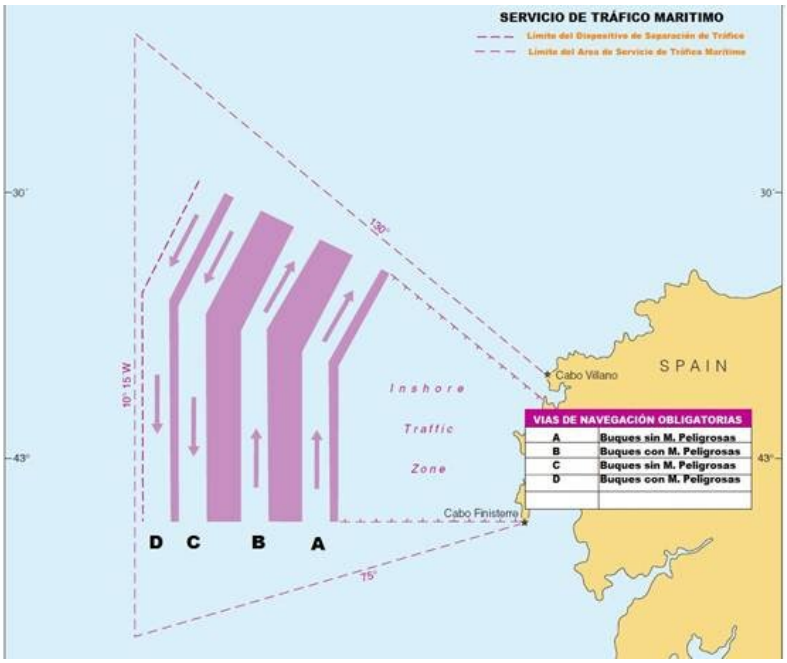


Figura 5-1. DST Finisterre[60].

Se propone evolucionar el motor de cálculo para que reconozca estas áreas de especial sensibilidad. El algoritmo no debería limitarse a buscar el tiempo mínimo, sino que debería aplicar penalizaciones de "coste infinito" a aquellas trayectorias que impliquen navegar en sentido contrario al flujo de un DST o cruzar canales de forma no perpendicular, tal y como exige el RIPA. Esta mejora convertiría al programa en un sistema de instrucción avanzado, capaz de sugerir rutas que sean, a la vez, eficientes y legalmente correctas.

5.5 Monitorización del tráfico marítimo mediante AIS

La toma de decisiones en el puente de mando no depende únicamente de las condiciones ambientales o de la configuración geométrica de la costa, sino también de la evolución continua del tráfico marítimo circundante y de la propia situación instantánea del buque. Por ello, una de las líneas de desarrollo futuro con mayor potencial consiste en avanzar hacia la integración de flujos de datos operativos en tiempo real dentro del sistema, especialmente mediante la incorporación de información procedente del AIS (Automatic Identification System), así como de variables meteorológicas y oceanográficas actualizadas. La posibilidad de disponer en todo momento de la posición, rumbo y velocidad del buque propio, junto con la localización y movimiento de los barcos circundantes, permitiría construir un entorno de simulación mucho más próximo a las condiciones reales de navegación. A ello se añadiría la inclusión de factores como corrientes marinas, oleaje y viento, cuyo efecto resulta determinante tanto en la seguridad de la derrota como en el rendimiento final de la ruta seleccionada.

5.6 Unificación del motor de cálculo y autonomía del software.

Actualmente, el flujo de trabajo para la obtención de rutas óptimas presenta un cuello de botella operativo debido a la necesidad de migrar bases de datos entre el software de cálculo (proporcionado por la dirección del proyecto) y la interfaz de visualización de la aplicación. Una línea de desarrollo prioritaria es la integración nativa del algoritmo de Zermelo dentro del propio entorno de la aplicación. Conseguir que el motor de cálculo resuelva las ecuaciones diferenciales del navegante directamente en la aplicación eliminaría los riesgos de integridad de datos durante la migración y permitiría una experiencia de usuario fluida, donde la optimización sea un proceso instantáneo y transparente.

Asimismo, esta integración supondría un reto relevante desde el punto de vista investigador, al exigir algoritmos numéricos más robustos, rápidos y escalables, capaces de responder en tiempos computacionales reducidos ante escenarios complejos, extensos y con elevada densidad de objetos móviles. En consecuencia, el desarrollo de una arquitectura capaz de unificar los módulos de cálculo, visualización y adquisición de datos en tiempo real se perfila como un paso fundamental para evolucionar desde el prototipo actual hacia una solución plenamente funcional. En última instancia, la meta sería disponer de una herramienta útil y práctica para la navegación, capaz de asistir al comandante o capitán mediante recomendaciones de ruta optimizadas y continuamente actualizadas a partir de la posición del buque, el tráfico circundante y las condiciones reales de viento, oleaje y corrientes.

5.7 Complejidad de los impactos ambientales: El factor viento

Si bien las corrientes marinas han sido el foco principal de optimización en este trabajo, el viento representa un desafío técnico de mayor envergadura. A diferencia de las corrientes, que actúan como un desplazamiento del medio en el que flota el buque, el viento ejerce fuerzas aerodinámicas sobre la superestructura (obra muerta), provocando un efecto de abatimiento que depende directamente de la geometría específica del barco.

La integración del viento en el cálculo de rutas óptimas requiere modelar diagramas de polares para cada tipo de buque, ya que una misma intensidad de viento afecta de manera radicalmente distinta a un patrullero que a un portaeronaves. Futuras versiones del software deberán sustituir el modelo vectorial simple por uno de fuerzas cruzadas, donde el impacto del viento se calcule en función del ángulo de incidencia y la superficie expuesta, complicando el problema matemático de Zermelo pero aportando fidelidad a la navegación simulada.

5.8 Desarrollo completo de la ruta dinámica con seguimiento GPS.

El concepto de "Ruta Dinámica", cuya arquitectura base ya ha sido implementada en este proyecto, representa el siguiente nivel en la navegación asistida. Se propone completar esta funcionalidad mediante la integración de protocolos de posicionamiento GPS en tiempo real. En este modo, el punto de origen de la ruta dejaría de ser estático para vincularse a la posición real del buque. El sistema debería ser capaz de recalcular y actualizar la solución óptima de forma asíncrona conforme el buque avanza y las condiciones de corriente y viento evolucionan, proporcionando al oficial de guardia una corrección constante de su derrota para mantener siempre el tiempo mínimo de llegada o el menor consumo.

En este contexto, el objetivo final no sería únicamente mejorar la representación visual del escenario, sino integrar el algoritmo de optimización de rutas en tiempo real dentro de un entorno real de operación. De este modo, el sistema dejaría de ser solo una herramienta de validación o análisis en escenarios predefinidos para convertirse en una aplicación práctica de apoyo a la decisión, capaz de recalcular o ajustar la trayectoria prevista en función de la evolución del tráfico y de las condiciones meteorológicas y marítimas. Esta capacidad aportaría un valor muy significativo desde el punto de vista operativo, ya que permitiría combinar la eficiencia matemática del algoritmo con criterios de navegación realistas, priorizando en todo momento la seguridad, la viabilidad de la maniobra y la adaptación dinámica al entorno.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] *Towards a green and just transition*. en Review of maritime transport / United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, no. 2023. New York, New York: United Nations Publications, 2023.

[2] Armada, «Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/iniciohome/prefLang-es/

[3] «Page not found | CMEMS». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://marine.copernicus.eu/page-not-found

[4] «2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx

[5] «International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx

[6] «International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx

[7] O. P. Center, «Ocean Prediction Center». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ocean.weather.gov/

[8] «S-100 Universal Hydrographic Data Model | IHO». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://iho.int/en/s-100-universal-hydrographic-data-model

[9] International Chamber of Shipping, Ed., *Bridge procedures guide*, 6th edition. London: Marisec Publications, 2022.

[10] «GreenVoyage2050». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://greenvoyage2050.imo.org/

[11] «Maritime Safety Information». Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://msi.nga.mil/Publications/APC

[12] «Maritime Safety Information». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://msi.nga.mil/Publications/APC

[13] «Standards and Specifications | IHO». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://iho.int/en/standards-and-specifications

[14] «International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en:

https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx
[15] «International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx
[16] *Towards a green and just transition*. en Review of maritime transport / United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, no. 2023. New York, New York: United Nations Publications, 2023.
[17] M. Krichen, «Deep Reinforcement Learning», en *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, jul. 2023, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10306453.
[18] «Servicios costeros | CMEMS». Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://marine.copernicus.eu/es/servicios/mercados/servicios-costeros
[19] O. P. Center, «Ocean Prediction Center». Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ocean.weather.gov/
[20] «Digitalization in the maritime industry», DNV. Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/digitalization-in-the-maritime-industry/
[21] «NAPA Voyage Optimization», NAPA. Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.napa.fi/software-and-services/ship-operations/napa-fleet-intelligence/voyage-optimization/
[22] «Gemelo Digital · Gemelo Digital», Navantia. Accedido: 17 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.navantia.es/es/producto/digital-twin/
[23] F. I. Gómez, «Piratería en el Índico», Ejércitos - Sitio Web sobre Defensa, Armamento y Fuerzas Armadas. Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.revistaejercitos.com/focus/seguridad-maritima/pirateria-en-el-indico/
[24] D. Šakan, I. Rudan, S. Žuškin, y D. Brčić, «Near Real-time S-AIS: Recent Developments and Implementation Possibilities for Global Maritime Stakeholders», *Pomorstvo*, vol. 31, n.º 1, pp. 211-218, dic. 2018, doi: 10.31217/p.31.1.6.
[25] K. dice, «Polares IMOCA y calculador de VMC», Barcelona World Race 2010-2011. Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://barcelonaworldrace.wordpress.com/2011/02/07/polares-imoca-y-calculador-de-vmc/
[26] «Modern Marine Weather by David Burch». Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.starpath.com/wx/
[27] «Calcular rumbo verdadero conociendo deriva y abatimiento». Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.paranauticos.com/notas/Tecnicas/Navegacion/rv-con-deriva-abatimiento.htm
[28] «FURUNO ENVISION AR Navigation System | FURUNO». Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.furuno.com/special/en/envision/
[29] «Saab transponder sets new standard for global maritime communication», Start. Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.saab.com/newsroom/stories/2025/march/saab-transponder-sets-new-standard-for-global-maritime-communication
[30] «Starlink | Residencial», Starlink. Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://starlink.com/es/residential?referral=RC-481067-34312-6&utm_source=google&utm_medium=paid&utm_campaign=sls_es_src_ggl_brd_stk-pe&utm_content=sls_es_src_ggl_brd_stk-pe_res_ult_v4s_txt_es-es_pmo-0-29&utm_term=stk-pe_starlink&gad_source=1&gad_campaignid=21037050429&gbraid=0AAAAAok2xKlE72NvOTQWIU8DPOJHpIDnY&gclid=Cj0KCQiA6Y7KBhCkARIsAOxhqtPy4EgfwiGaZEhD1AgMF30NMQSsGRlihi8wnjdswtevav_XW4YVFkcaAsn5EALw_wcB

[31] «OneWeb - Europa Satellite». Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.europasatellite.com/es-eu/OneWeb.htm
[32] N. P. Sancho y M. Alba, «TRABAJO FINAL DE MÁSTER "EL RÉGIMEN JURÍDICO DE LOS BUQUES NO TRIPULADOS"».
[33] Y. Ma, Q. Liu, L. Yang, y M. He, «Recognition of marine navigators' workload based on eye movement features using bridge simulation», *Saf. Sci.*, vol. 178, p. 106607, oct. 2024, doi: 10.1016/j.ssci.2024.106607.
[34] «MSC.1-Circ.1638 - Outcome Of The Regulatory Scoping ExerciseFor The Use Of Maritime Autonomous Surface Ships... (Secretariat).pdf». Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/PressBriefings/Documents/MSC.1-Circ.1638%20-%20Outcome%20Of%20The%20Regulatory%20Scoping%20ExerciseFor%20The%20Use%20Of%20Maritime%20Autonomous%20Surface%20Ships...%20(Secretariat).pdf
[35] «km-insights-magasine---may-2025---low-res.pdf». Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.kongsberg.com/contentassets/6b11f54e8efc4e32b752be5e679067ae/km-insights-magasine---may-2025---low-res.pdf
[36] «Remote and autonomous vessels | Engineering and support». Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.kongsberg.com/maritime/ship-types/autonomous-ships/
[37] «Regulatory», DNV. Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.dnv.com/maritime/autonomous-remotely-operated-ships/regulatory/
[38] Y. Man, M. Lundh, T. Porathe, y S. Mackinnon, «From Desk to Field - Human Factor Issues in Remote Monitoring and Controlling of Autonomous Unmanned Vessels», presentado en Procedia Manufacturing, jul. 2015. doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.635.
[39] A. Yu, I. Kolotylo, H. A. Hashim, y A. E. E. Eltoukhy, «Electronic Warfare Cyberattacks, Countermeasures, and Modern Defensive Strategies of UAV Avionics: A Survey», *IEEE Access*, vol. 13, pp. 68660-68681, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3561068.
[40] «Maritime Law for MASS», Comite Maritime International - CMI. Accedido: 18 de diciembre de 2025. [En línea]. Disponible en: https://comitemaritime.org/work/mass/
[41] L. Carey, «All Hands Off Deck? The Legal Barriers to Autonomous Ships», *SSRN Electron. J.*, 2017, doi: 10.2139/ssrn.3025882.
[42] R. V. Caro, «¿Es lo mismo un buque autónomo que uno inteligente?», Fundación Exponav en Ferrol. Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/es-lo-mismo-un-buque-autonomo-que-un-buque-inteligente/
[43] «(2) Facebook». Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.facebook.com/armadaesp/photos/pr%C3%A1cticas-de-los-alumnos-de-la-escuela-naval-militar-en-el-simulador-de-navegaci/1585971151727765/
[44] «Inicio», Addocean. Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://addocean.com/
[45] «Google Gemini», Gemini. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://gemini.google.com
[46] «Claude», Claude. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://claude.ai/new
[47] «Google Antigravity», Google Antigravity. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://antigravity.google/
[48] «Kivy: Cross-platform Python Framework for NUI». Accedido: 21 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.kivy.org/
[49] «OpenStreetMap», OpenStreetMap. Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.openstreetmap.org/
[50] «OpenSeaMap - La Carta Náutica libre». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://map.openseamap.org/?lang=es

[51] «pickle — Serialización de objetos Python — documentación de Python - 3.8.20». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://docs.python.org/es/3.8/library/pickle.html
[52] «Natural Earth - Free vector and raster map data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m scales». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.naturalearthdata.com/
[53] «Natural Earth » 1:10m Physical Vectors - Free vector and raster map data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m scales». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.naturalearthdata.com/downloads/10m-physical-vectors/
[54] N. G. D. Center, «Shoreline/Coastline Databases | NCEI». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/shorelines.html
[55] «National Oceanic and Atmospheric Administration Home». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.noaa.gov/
[56] «SQLite Home Page». Accedido: 4 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.sqlite.org/index.html
[57] Armada, «Inicio - IHM - Instituto Hidrográfico de la Marina - Armada - Ministerio de Defensa - Gobierno de España». Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/cienciaihm1/prefLang-es/00introduccion
[58] «Inicio», IdeIHM. Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://ideihm.covam.es/portal/
[59] «Puente de A Illa de Arousa», Minube. Accedido: 15 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.minube.com.mx/rincon/puente-de-a-illa-de-arousa-a3704104
[60] Elpescador56, «El robalo: El Dispositivo de Separación de Tráfico de Finisterre», El robalo. Accedido: 16 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://elpescador56.blogspot.com/2012/02/el-dispositivo-de-separacion-de-trafico.html

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado, centrado en el diseño de un entorno de simulación para la planificación y optimización de rutas marítimas, conlleva una serie de implicaciones que trascienden el ámbito puramente técnico para incidir directamente en los pilares de la sostenibilidad, la economía operativa y la seguridad en la mar. En el contexto actual de crisis climática y bajo el marco de las estrictas regulaciones de la Organización Marítima Internacional (OMI), la optimización de la derrota se erige como una de las estrategias más eficaces para la descarbonización del sector marítimo a corto plazo. Al permitir que la planificación integre variables como corrientes, vientos y estados de la mar en un entorno virtual, el sistema facilita la elección de la ruta que minimiza la resistencia al avance del buque. Esta eficiencia se traduce de forma inmediata en una reducción drástica del consumo de combustible fósil y, por consiguiente, en una menor emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. De este modo, la herramienta no solo cumple un propósito operativo, sino que se alinea con el compromiso ético de la Armada Española de reducir su huella de carbono y proteger la biodiversidad marina, evitando el tránsito innecesario por zonas de especial sensibilidad ambiental o minimizando el impacto acústico derivado de una propulsión ineficiente.

Desde la vertiente económica, el impacto es igualmente significativo, dado que el combustible representa uno de los mayores costes en el presupuesto operativo de cualquier flota militar o civil. La capacidad de este software para predecir y calcular rutas más eficientes permite un ahorro sustancial de recursos públicos, optimizando cada milla navegada. Además, la planificación inteligente evita someter a la plataforma a esfuerzos estructurales innecesarios provocados por condiciones meteorológicas adversas, lo que repercute directamente en la reducción de averías y en el alargamiento del ciclo de vida de la maquinaria del buque. Esta eficiencia económica se traduce en una mayor resiliencia logística, permitiendo que la Armada pueda mantener sus compromisos operativos con una gestión de recursos más responsable y sostenible.

En el plano social y ético, la implicación más relevante es la mejora de la seguridad de la vida humana en la mar. El entorno de simulación permite ensayar y validar decisiones críticas en un entorno seguro antes de su ejecución real, dotándoles de una conciencia situacional superior ante escenarios dinámicos y peligrosos. Asimismo, el desarrollo de este tipo de tecnología refuerza la soberanía tecnológica nacional, garantizando que el planeamiento de misiones críticas no dependa de soluciones externas y asegurando la total confidencialidad y autonomía operativa. En última instancia, este trabajo cumple una función educativa esencial en la Escuela Naval Militar, sirviendo como plataforma para la formación de las futuras promociones de oficiales, quienes deben estar familiarizados con herramientas digitales avanzadas que promuevan una navegación segura, eficiente y comprometida con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa. De esta manera, el proyecto se consolida como una aportación integral que equilibra la excelencia tecnológica con una responsabilidad profunda hacia el medio ambiente, la economía y la seguridad del personal que sirve en la mar.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Terminar este proyecto ha supuesto un punto de inflexión en mi formación como oficial e ingeniero, permitiéndome explorar la tecnología aplicada al ámbito marítimo desde una perspectiva innovadora. Uno de los aspectos más significativos de este proceso ha sido la integración de la Inteligencia Artificial mediante técnicas de *code vibing*, lo cual ha transformado radicalmente mi papel como desarrollador. En lugar de centrarme en la escritura mecánica de código, esta metodología me ha permitido elevar mi visión hacia el diseño arquitectónico y la estructura lógica de la aplicación. Gracias a este enfoque, he podido dedicar el grueso de mi esfuerzo a la toma de decisiones estratégicas sobre los flujos de funcionamiento del programa y a la organización de sus componentes, garantizando que el entorno de simulación sea fiel a las necesidades operativas de la navegación.

Estoy convencido de que este proyecto no solo representa un logro académico personal, sino que constituye una aportación tangible a la Armada, proporcionando una base tecnológica que mejora la seguridad en la mar y ofrece una herramienta didáctica de alto valor para la formación de las futuras promociones de oficiales. En definitiva, este camino recorrido me ha enseñado a liderar proyectos técnicos desde la estructura y la visión de conjunto, preparándome para afrontar con solvencia y humanidad los desafíos de una Armada moderna, digitalizada y comprometida con la excelencia operativa.

ANEXO III: DICCIONARIO DE SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

- AIS: *Automatic Identification System* (Sistema de Identificación Automática).
- API: *Application Programming Interface* (Interfaz de Programación de Aplicaciones).
- BTW: *Bearing To Waypoint* (Demora al punto de paso).
- COG: *Course Over Ground* (Rumbo sobre el fondo).
- CPU: *Central Processing Unit* (Unidad Central de Procesamiento).
- CSV: *Comma Separated Values* (Valores separados por comas).
- CUD: Centro Universitario de la Defensa.
- DTW: *Distance To Waypoint* (Distancia al punto de paso).
- DST: Dispositivo de separación de tráfico.
- ECDIS: *Electronic Chart Display and Information System* (Sistema de Información y Visualización de Cartas Electrónicas).
- ENC: *Electronic Navigational Chart* (Carta Náutica Electrónica).
- ENM: Escuela Naval Militar.
- ETA: *Estimated Time of Arrival* (Tiempo Estimado de Llegada).
- ETID: Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa.
- GEI: Gases de Efecto Invernadero.
- GRIB: *General Regularly-distributed Information in Binary* (Formato estándar de datos meteorológicos).
- GSHHS: *Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database*.
- GUI: *Graphical User Interface* (Interfaz Gráfica de Usuario).
- HDG: *Heading* (Rumbo de aguja o proa del buque).
- IA: Inteligencia Artificial.
- IHM: Instituto Hidrográfico de la Marina.
- IMO: *International Maritime Organization* (Organización Marítima Internacional).
- JSON: *JavaScript Object Notation* (Formato de intercambio de datos).
- LOA: *Length Overall* (Eslora total del buque).
- MMSI: *Maritime Mobile Service Identity* (Identidad del Servicio Móvil Marítimo).
- NUI: *Natural Users Interface*.
- ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- OHI: Organización Hidrográfica Internacional.
- OMI: Organización Marítima Internacional.
- OS: *Operating System* (Sistema Operativo).
- OSM: *OpenStreetMap*.
- POO: Programación Orientada a Objetos.
- RAM: *Random Access Memory* (Memoria de Acceso Aleatorio).
- RIPA: Reglamento internacional para prevenir los abordajes en la mar.
- S-100: Estándar Universal de Datos Hidrográficos de la OHI.
- SOG: *Speed Over Ground* (Velocidad sobre el fondo).
- SQL: *Structured Query Language* (Lenguaje de Consulta Estructurado).
- STW: *Speed Through Water* (Velocidad en el agua).
- TFG: Trabajo Fin de Grado.
- UI: *User Interface* (Interfaz de Usuario).
- UX: *User Experience* (Experiencia de Usuario).
- WGS84: *World Geodetic System 1984* (Sistema geodésico de coordenadas mundial).
- WPT: *Waypoint* (Punto de paso de una ruta).
- XTE: *Cross Track Error* (Error de desviación de la derrota).

ANEXO IV: LIBRERÍAS Y MÓDULOS DE PROGRAMACIÓN

- __future__: Módulo que permite utilizar funcionalidades de versiones más recientes de Python en versiones anteriores, garantizando la compatibilidad del código y una transición suave entre actualizaciones del lenguaje.
- argparse: Herramienta para el diseño de interfaces de línea de comandos, permitiendo que el simulador reciba parámetros y configuraciones externas de forma estructurada durante su ejecución.
- ast (*Abstract Syntax Trees*): Utilizado para procesar y analizar la estructura sintáctica del código Python, lo que facilita la validación de expresiones o la transformación de datos de entrada complejos.
- concurrent (y concurrent.futures): Proporciona una interfaz de alto nivel para la ejecución asíncrona de tareas. Se ha empleado para mejorar el rendimiento del simulador mediante el uso de hilos o procesos en tareas que requieren computación paralela.
- copernicusmarine: Librería oficial para el acceso programático a los servicios del *Copernicus Marine Service*, fundamental en este proyecto para la descarga automática de modelos oceanográficos de corrientes y estados de la mar.
- datetime: Módulo esencial para el manejo de fechas y horas, utilizado específicamente para el cálculo de los Tiempos Estimados de Llegada (ETA) y la sincronización de datos meteorológicos temporales.
- geopandas: Extensión de la librería *pandas* que permite el manejo avanzado de datos geoespaciales, facilitando la gestión de capas cartográficas y la realización de operaciones espaciales sobre la costa.
- haversine: Librería especializada en el cálculo de la distancia ortodrómica entre coordenadas geográficas (latitud y longitud), vital para determinar las distancias reales de navegación en la esfera terrestre.
- http.server y http: Proporcionan las clases necesarias para implementar servidores web básicos, permitiendo la comunicación o el intercambio de datos y recursos a través de protocolos de red.
- io: Gestiona los flujos de entrada y salida de datos (*streams*), permitiendo el tratamiento de archivos y datos directamente en la memoria para optimizar la velocidad del sistema.
- json: Utilizado para la serialización y lectura de datos en formato JSON, empleado habitualmente para almacenar la configuración del entorno y para la comunicación con APIs externas.
- kivy: Framework de código abierto orientado al desarrollo de interfaces gráficas de usuario (GUI) modernas e interactivas, que constituye la base visual del simulador.
- kivy_garden (y kivy_garden.mapview): Conjunto de complementos para Kivy que permite integrar mapas dinámicos y visualizaciones cartográficas interactivas dentro de la aplicación.
- math: Proporciona las funciones matemáticas de bajo nivel (trigonometría, logaritmos, etc.) necesarias para los cálculos físicos de navegación, rumbos y alcances.
- numpy: Librería fundamental para la computación científica que permite el manejo eficiente de grandes matrices, clave para procesar la cinemática del buque y los campos vectoriales de corrientes.
- os: Permite la interacción directa con el sistema operativo para realizar tareas de gestión de archivos, directorios y configuración de rutas del sistema.
- pathlib: Ofrece una interfaz orientada a objetos para el manejo de rutas de archivos, asegurando que el simulador sea compatible tanto en sistemas Windows como Linux/macOS.
- pickle: Módulo utilizado para la serialización de objetos complejos de Python, permitiendo guardar y recuperar estados completos de una simulación de forma rápida.
- PIL (Pillow): Biblioteca de procesamiento de imágenes encargada de la gestión de iconos, texturas y la representación visual de elementos gráficos en la interfaz.

- pyomo: Lenguaje de modelado matemático empleado para formular y resolver los problemas de optimización de rutas, permitiendo encontrar la trayectoria más eficiente bajo distintas restricciones.
- re: Implementa operaciones con expresiones regulares, necesarias para el procesamiento, filtrado y validación de cadenas de texto y formatos de datos específicos.
- requests: Librería estándar para realizar peticiones HTTP, utilizada en este trabajo para la descarga de datos y la interacción con servicios web meteorológicos.
- scipy: Biblioteca de herramientas científicas utilizada para realizar tareas avanzadas como la interpolación de datos ambientales y la resolución de algoritmos de optimización.
- shapely: Librería para el análisis de objetos geométricos en el plano, pieza fundamental para la detección de colisiones entre el buque y la costa y para validar la navegabilidad de las zonas.
- sqlite3: Interfaz para la base de datos relacional SQLite, encargada de la persistencia de todos los datos del proyecto, incluyendo rutas guardadas, obstáculos y escenarios de entrenamiento.
- struct: Permite la conversión entre datos de Python y estructuras binarias, necesario para la lectura e interpretación de formatos de archivos técnicos procedentes de sensores o modelos antiguos.
- sys: Proporciona acceso a variables y funciones que interactúan estrechamente con el intérprete de Python, permitiendo gestionar la ejecución y los parámetros del sistema.
- threading: Módulo para la gestión de hilos de ejecución concurrentes, lo que permite que la interfaz del simulador no se congele mientras se realizan cálculos pesados en segundo plano.
- time: Contiene funciones para el manejo del tiempo, utilizadas para controlar la velocidad de la simulación y medir el rendimiento de los algoritmos de optimización.
- tqdm: Utilidad que genera barras de progreso visuales en la consola, facilitando el seguimiento de los procesos de carga de datos masivos o cálculos intensivos.
- traceback: Facilita el rastreo y la gestión de errores durante la ejecución, permitiendo una depuración más ágil durante el desarrollo del software.
- typing: Proporciona soporte para la indicación de tipos de datos (*type hints*), lo que mejora la legibilidad del código y ayuda a prevenir errores de lógica durante la programación.
- xarray: Herramienta diseñada para trabajar con arrays multidimensionales etiquetados, optimizada para la lectura de archivos NetCDF, el estándar en la representación de datos oceanográficos.
- zlib: Librería utilizada para la compresión y descompresión de datos, permitiendo reducir el espacio de almacenamiento de los archivos de datos ambientales masivos.