Mayo 2026

www.ecodes.org



Investigación y aplicación de modelos de visión y lenguaje, geoposicionamiento y fotografía digital para generar simulaciones físicamente realistas de la subida del nivel del mar

Con el apoyo de:

VICEPRESIDENCIA TERCERA DEL GOBIERNO
GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO

Índice

1. RESUMEN EJECUTIVO 7
2. OBJETO DEL INFORME 8
   2.1. Alcance del documento 9
3. PROBLEMÁTICA DE LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR 10
   3.1. Contexto global 10
      Causas principales 11
      Proyecciones globales 12
      Efectos globales y adaptación 13
      Situación en España 14
      Impactos económicos y territoriales 14
      Vulnerabilidad del litoral español 15
      El caso del Delta del Ebro 15
      Impacto sobre el turismo costero 15
      El Mediterráneo 16
      La costa de Lugo 16
   3.2. Dimensión social y justicia climática 18
4. EVIDENCIA CIENTÍFICA DE LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR 20
   4.1. Registros históricos y observacionales 20
   4.2. Consenso científico y fuentes principales 20
   4.3. Efectos observados a escala global 21
   4.4. Efectos específicos en España 22
5. TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y PREDICCIÓN DEL NIVEL DEL MAR 23
   5.1. Altimetría satelital 23
      Misiones satelitales de la NASA y ESA 23
      Herramientas de la NASA 24
   5.2. Redes de mareógrafos y boyas 24
      Sistema internacional GLOSS 24
      Red REDMAR de Puertos del Estado 24
      Sistema de predicción NIVMAR 25

5.3. Modelos climáticos y proyecciones 25
5.4. Red de boyas oceanográficas de Puertos del Estado 26
El portal Portus y la aplicación iMar 27
5.5. Sistema SAMOA de Puertos del Estado 27
5.6. Argo: la red global de flotadores perfiladores 27
5.7. Síntesis de fuentes de datos para la herramienta 28
6. NECESIDAD DE CONCIENCIACIÓN CIUDADANA 29
6.1. La brecha entre ciencia y percepción social 29
6.2. Enfoques de comunicación climática eficaz 30
7. IA PARA INFERIR LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR 32
7.1. Machine learning para predicción del nivel del mar 32
Redes neuronales artificiales (ANN) 32
Redes LSTM y deep learning 32
Enfoques de ensamble y híbridos 33
Predicción multidecadal con clustering espectral 33
7.2. Machine learning para análisis regional 33
7.3. Aplicaciones de IA más allá de la predicción 34
7.4. Desafíos abiertos en IA para el nivel del mar 35
8. APLICAR LA IA PARA LA CONCIENCIACIÓN 37
8.1. IA generativa para visualización de impactos 37
8.2. Otras aplicaciones de IA para concienciación 38
8.3. Herramientas existentes de visualización del nivel del mar 39
9. LA HIPERPERSONALIZACIÓN PARA LA CONCIENCIA CLIMÁTICA 41
9.1. La psicología del “efecto identifiable victim” 42
9.2. Hiperpersonalización y redes sociales 43
10. POSIBILIDADES Y DESAFÍOS TÉCNICOS DE LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DEL MAR MEDIANTE FOTOGRAFÍA MÓVIL Y MODELOS 3D 44
10.1. Fundamentos Fotogramétricos y Parámetros Intrínsecos de la Cámara 44
10.2. Georreferenciación y Orientación Espacial de Alta Precisión (Sensores Extrínsecos) 45
10.3. Integración con Modelos 3D y APIs Geoespaciales 45
10.4. Limitaciones y Problemática Estocástica (Ruido Físico) 46
10.5. Esquemas de Geometría Computacional 47
11. DISEÑO TEÓRICO DE LA APLICACIÓN DE SIMULACIÓN VLM Y GENERACIÓN DE ESCENARIOS 50
11.1. Integración de Variables de Entrada al Modelo Físico 50

11.2. Secuencia del Pipeline de Simulación mediante VLM 51
11.3. Perspectivas Futuras: El potencial de "Genie 3" o Modelos Multimodales Nativos 52
12. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA 53
12.1. Visión general 53
12.2. Arquitectura funcional 53
Flujo de usuario (User Journey) 53
Clasificación de zonas de riesgo 54
Datos científicos integrados 54
12.3. Arquitectura general del sistema 55
12.4. Requisitos no funcionales 55
13. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA 56
13.1. Stack tecnológico 56
13.2. Frontend — Vue 3 + Vite (tema “Ocean Dark”) 57
13.3. Arquitectura del backend (FastAPI + Uvicorn) 57
Endpoints principales 57
Pipeline de procesamiento de imagen con VLM 58
13.4. Integración con Puertos del Estado 58
13.5. Modelo de predicción a 50 años 59
13.6. Algoritmo de simulación de inundación 59
Segmentación semántica de la escena 59
Estimación de la topografía relativa 60
Generación de la máscara de agua 60
Renderizado de efectos de agua 60
13.7. Gestión de errores y casos límite 61
13.8. Infraestructura de despliegue 62
13.9. Tests y aseguramiento de calidad 62
13.10 Versión con Google Street View (uso interno ECODES) 63
13.11. Evolución del producto — Historial de versiones 63
13.12. Consideraciones de seguridad y privacidad 64
13.13. Diseño detallado de la experiencia de usuario (UX) 65
Pantalla de inicio 65
Proceso de carga y confirmación 65
Pantalla de procesamiento educativo 65
Pantalla de resultados 66
13.14. Pipeline de procesamiento de datos oceanográficos 66

Inventario de estaciones 66
Obtención y validación de datos 67
Cálculo de parámetros derivados 67
14. CONCLUSIONES 68
14.1. Limitaciones reconocidas 69
15. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS 70
16. ANEXO A. GLOSARIO DE TÉRMINOS 75
17. ANEXO B. HERRAMIENTA VLMAR PARA USUARIOS 76
18. ANEXO C. HERRAMIENTA VLMAR-PRO PARA SIMULACIÓN A GRAN ESCALA DE ENCLAVES COSTEROS 79
19. ANEXO D. CASOS DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE ESCENARIOS COSTEROS ESPAÑOLES 85
19.1. B.1. Caso 1: Costa de Lugo 85
20. ANEXO E. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DETALLADAS 89
20.1. E.1. Requisitos del sistema 89
20.2. E.2. Formato de datos REDMAR 89
20.3. E.3. Algoritmo de búsqueda de boya más cercana 90
20.4. E.4. Prompt del VLM (generate_flood_prompt) 90
20.5. E.6. API REST: Endpoint principal 91

AUTORES

Este informe es el resultado de la colaboración entre el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA) y ECODES, dos entidades aragonesas que han trabajado con un objetivo compartido: poner la tecnología al servicio de la descarbonización.

De esta colaboración se ha materializado el desarrollo del caso real INFOMAR, una prueba de concepto para simular de forma fotorrealista y científica la subida del nivel del mar. El proyecto ha sido ganador del premio AMETIC IA I+D 2026. El equipo firmante combina perfiles de investigación aplicada y experiencia sectorial, y es responsable conjunto de la concepción, redacción y validación de los análisis, oportunidades y recomendaciones que se presentan a continuación.



PABLO BARRENECHEA ABECIA

ECODES



CIRO ARTIGOT CORDERO

ECODES



ADÁN PIÑERO ALQUEGUI

ITA



FRANCISCO ROJAS LUNA

ITA



SILVIA FERRER CASTILLÓN

ITA

SOBRE ESTE DOCUMENTO

Editado por: Fundación E

Diseño Gráfico: BAMBAM Studio

Fecha: MAYO 2026

1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente informe documenta los resultados de una investigación interdisciplinar desarrollada entre octubre de 2025 y abril de 2026 por el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA), a través de sus departamentos de Sistemas Cognitivos y *Big Data* y Ecosistema, junto con la Fundación Ecología y Desarrollo (ECODES). El trabajo aborda un reto de creciente urgencia: cómo la inteligencia artificial generativa, en su faceta de modelos de visión y lenguaje (*Vision-Language Models*, VLM), puede transformar la comunicación climática y, en particular, la concienciación ciudadana sobre la subida del nivel del mar en el litoral español.

La motivación central de este trabajo parte de una constatación documentada en la literatura científica reciente: la percepción social del riesgo climático no se determina únicamente por la evidencia científica disponible, sino por la distancia psicológica entre los datos abstractos y la experiencia cotidiana de cada persona. En un contexto en el que la subida del nivel del mar se acelera —4,62 mm/año a escala global, el ritmo más rápido en al menos 4.000 años, con más de 8.000 km de costa española y el 40 % de la población en zonas litorales expuestos— la brecha entre el consenso científico y la percepción ciudadana se convierte en un obstáculo crítico para la acción que investigamos a lo largo del documento.

El informe se estructura en tres grandes bloques: en primer lugar, un análisis exhaustivo del estado del arte que abarca la problemática global y nacional de la subida del nivel del mar, las evidencias científicas y las tecnologías de medición y predicción disponibles —desde la altimetría satelital de NASA y ESA hasta las redes REDMAR y NIVMAR de Puertos del Estado—, así como las aplicaciones de machine *learning*, *deep learning* e IA generativa al estudio y comunicación del fenómeno. En segundo lugar, se ha desarrollado un experimento aplicado mediante el diseño e implementación de una herramienta capaz de generar, sobre fotografías georreferenciadas aportadas por el propio usuario, simulaciones hiperpersonalizadas del impacto previsto a 50 años. Por último, se analizan los resultados de esta experiencia, junto con sus limitaciones reconocidas, buscando validar la hipótesis de que la hiperpersonalización visual incrementa significativamente el impacto emocional y la eficacia de la comunicación climática.

La herramienta desarrollada —desplegada en producción en mar-ecodes.ita.es y complementada con una versión profesional (VLMAR-PRO) para uso interno de ECODES sobre enclaves costeros completos— constituye un experimento práctico que combina datos oceanográficos reales de la estación mareográfica más cercana, proyecciones regionales del IPCC AR6, elevación del terreno vía *Google Elevation* API y edición fotorrealista de imágenes mediante modelos de visión y lenguaje. Su enfoque centrado en el usuario —simulando lo que cada ciudadano vería realmente en los lugares que conoce y frecuenta— la distingue de los enfoques tradicionales basados en mapas genéricos o gráficos agregados.

Esta investigación se ha desarrollado con el apoyo del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico a través de la convocatoria para el año 2024 de subvenciones en régimen de concurrencia competitiva “línea a” para el desarrollo de actividades para el interés general consideradas de interés sociales, en el ámbito de la investigación científica y técnica y protección al medio ambiente en materias de competencia estatal.

2. OBJETO DEL INFORME

El presente informe técnico tiene como objeto documentar de forma exhaustiva la conceptualización, el diseño, fundamentación científica, desarrollo tecnológico y plan de validación de una herramienta innovadora de concienciación sobre la subida del nivel del mar, basada en Inteligencia Artificial. Este trabajo es fruto de la colaboración entre el Instituto Tecnológico de Aragón (ITA), a través de su Departamento de Sistemas Cognitivos y Big Data, su departamento Ecosistema y la Fundación Ecología y Desarrollo (ECODES), organización referente en acción climática y concienciación medioambiental en España.

ITA es un centro tecnológico público ubicado en Zaragoza cuya misión es impulsar la innovación y el desarrollo tecnológico del tejido empresarial aragonés y español. Su Departamento de Sistemas Cognitivos y *Big Data* se especializa en el desarrollo de soluciones software complejas para el procesamiento de datos basadas en Inteligencia Artificial, generando conocimiento en tiempo real para resolver problemas empresariales de *Big Data*. El laboratorio AI Smart Lab tiene como visión ser referencia europea en tecnologías cognitivas para la administración pública y los sectores empresariales donde la extracción de valor de los datos suponga una ventaja competitiva.

ECODES — Fundación Ecología y Desarrollo — es una organización sin ánimo de lucro fundada en 1992 que promueve el desarrollo sostenible y la justicia climática. Centra su trabajo en seis ejes temáticos estratégicos: agua, responsabilidad social, cambio climático, salud y medio ambiente, consumo responsable y pobreza energética. ECODES impulsa campañas de concienciación, proyectos sectoriales e iniciativas alineadas con los objetivos del Acuerdo de París y la Agenda 2030.

La convergencia de ambas entidades en este proyecto responde a una necesidad identificada conjuntamente: la brecha existente entre el conocimiento científico sobre la subida del nivel del mar y la percepción ciudadana del riesgo. Mientras que la comunidad científica ha alcanzado un alto grado de consenso sobre la magnitud y aceleración de este fenómeno, los estudios de percepción social revelan que la ciudadanía aún no ha interiorizado la urgencia del problema, en parte porque las representaciones habituales (gráficos, mapas genéricos) resultan abstractas y desconectadas de la realidad cotidiana de las personas.

La hipótesis central de este trabajo es que la **hiperpersonalización** — permitir que cada persona visualice los efectos de la subida del nivel del mar sobre fotografías de su propio entorno, con datos reales de boyas y mareografías locales — puede incrementar significativamente el impacto emocional y la eficacia de la comunicación climática. Para materializar esta hipótesis, se ha diseñado y desarrollado una herramienta web que integra *Vision-Language Models* (VLM), datos oceanográficos de Puertos del Estado y modelos predictivos de nivel del mar. Asimismo, se ha desarrollado una herramienta para uso interno de ECODES que facilita la elaboración

de simulaciones de forma exhaustiva sobre enclaves concretos, no solo con el objeto de concienciar, sino de visualizar el impacto de esta subida y tomar decisiones adecuadas a los escenarios simulados.

2.1. Alcance del documento

Este informe cubre los siguientes ámbitos de forma detallada:

Problemática mundial y en España: Análisis del estado actual de la subida del nivel del mar, sus causas, evidencias científicas y efectos proyectados tanto a escala global como específicamente para el litoral español.

Estado del arte tecnológico: Revisión de las tecnologías de medición, predicción y modelización del nivel del mar, incluyendo las misiones satelitales de NASA/ESA, las redes de boyas y mareógrafos de Puertos del Estado, y los modelos climáticos del IPCC.

IA aplicada al nivel del mar: Revisión exhaustiva de la literatura científica sobre el uso de IA; *machine learning*, *deep learning* e IA generativa (LLM,VLM,*Trasnformer*, …) para la predicción y análisis del nivel del mar.

Concienciación, análisis e hiperpersonalización: Fundamentación teórica de la necesidad de nuevos enfoques de comunicación climática y del potencial de la IA generativa para crear experiencias personalizadas de alto impacto.

Diseño y desarrollo de la herramienta: Arquitectura técnica completa de la aplicación web (Vue.js + Uvicorn), integración con fuentes de datos, pipeline de procesamiento de imágenes mediante VLM y algoritmos de simulación de inundación.

Simulaciones: Análisis con VLM en imágenes geoposicionadas sobre enclaves concretos de la costa para la toma de decisiones.

3. PROBLEMÁTICA DE LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

3.1. Contexto global

El aumento del nivel del mar es un indicador directo del cambio climático que calienta y, por lo tanto, expande el océano, derrite las capas de hielo y los glaciares terrestres (Mengel M. et al., 2016). Las mediciones de los mareógrafos muestran que el actual aumento global del nivel del mar comenzó a principios del siglo XX. Este fenómeno global está sufriendo variaciones significativas en los últimos años y amenaza gravemente a las comunidades costeras y también a los ecosistemas marinos.

Los datos más precisos recopilados corresponden a las mediciones de radar satelital, que revelan un aumento acelerado de 7.5 cm entre 1993 y 2017 (WCRP Global Sea Level Budget Group 2018) para una tasa promedio de 31 mm por década, debido principalmente al cambio climático antropogénico. La expansión térmica del agua contribuyó al aumento del nivel del mar en un 42 % entre 1993 y 2018, el derretimiento de glaciares templados en un 21 %, Groenlandia en un 15 % y la Antártida en un 8 % (WCRP Global Sea Level Budget Group 2018).

La subida del nivel del mar constituye una de las consecuencias más visibles y potencialmente devastadoras del cambio climático antropogénico. Según el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6, 2021), el nivel medio global del mar (GMSL) ha subido aproximadamente 0,20 metros (20 cm) entre 1901 y 2018, con un ritmo acelerado drásticamente en las últimas décadas que prácticamente ha triplicado su ratio de crecimiento. La tasa media de subida del nivel del mar pasó de 1,3 mm/año en el periodo 1901-1971 a 3,7 mm/año en el periodo 2006-2018, y ha alcanzado los 4,62 mm/año en el último decenio 2013–2022 (IPCC AR6 WGI, Capítulo 9; Hamlington et al., 2024).

Los datos paleoclimáticos demuestran que esta tasa de subida es la más rápida en al menos los últimos 3.000 años (IPCC AR6, 2021). Un artículo publicado en octubre de 2025 actualizó la curva global del nivel del mar para los últimos 11.700 años, confirmando que la subida desde 1900 es más rápida que en cualquier siglo en al menos los últimos 4.000 años (Kopp et al., 2025).

Los científicos del clima esperan que la tasa se acelere aún más durante el siglo XXI. Para el año 2100, se proyecta un aumento promedio de entre 30 y 110 cm dependiendo de las emisiones. Las capas de hielo que se deshacen en la Antártida y en Groenlandia son ahora el principal factor, por delante del deshielo de los glaciares.

Esta subida es irreversible durante siglos y agravará las inundaciones costeras (IPCC AR6, 2021).

Causas principales

Hay tres razones principales por las que el calentamiento hace que aumente el nivel del mar en el mundo: la expansión de los océanos por efecto de la dilatación térmica, la pérdida más rápida que la formación de hielo en las capas de hielo y el derretimiento de los glaciares en altitudes cada vez más altas, y en menor medida, las variaciones en el almacenamiento de agua terrestre.

Expansión térmica del océano (contribución estericoclimática): A medida que el océano absorbe calor — ha absorbido más del 90% del exceso de energía del sistema climático — el agua se expande. Esta expansión térmica representó el 38% de la subida total entre 1901 y 2018 (IPCC AR6, Fox-Kemper et al., 2021).

Pérdida de masa de hielo terrestre: La fusión de glaciares de montaña (41% de la contribución histórica) y las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida constituyen la principal fuente de masa de agua adicional. La contribución de las capas de hielo se cuadruplicó entre los periodos 1992–1999 y 2010–2019 (IPCC AR6, 2021). Los datos de la misión GRACE-FO de NASA muestran que Groenlandia pierde aproximadamente 280 Gt de hielo al año, mientras que la Antártida pierde alrededor de 150 Gt anuales.

Cambios en el almacenamiento de agua terrestre: La extracción de aguas subterráneas, la construcción de embalses y los cambios en el uso del suelo también contribuyen, aunque en menor medida, a la variación del nivel del mar (Dangendorf et al., 2024).

Desde principios del siglo XX el aumento del nivel del mar ha estado dominado por el retroceso de los glaciares y la expansión del océano, pero se espera que las contribuciones de las dos grandes capas de hielo, Groenlandia y la Antártida, aumenten en el siglo XXI. (Mengel, M., et al., 2016). Las capas de hielo almacenan la mayor parte del hielo terrestre (~99.5%), con un equivalente al nivel del mar (SLE) de 7.4 m para Groenlandia y 58.3 m para la Antártida (WCRP *Global Sea Level Budget Group* (2018).

En un año caen cerca de 8 mm de precipitaciones, en equivalente líquido, principalmente en forma de nieve sobre las capas de hielo en la Antártida y Groenlandia. Se acumulan y con el tiempo forman hielo glacial, pero gran parte de esta precipitación comienza cuando el vapor de agua se evapora de la superficie del océano. El viento arrastra parte de esta nieve o desaparece de la capa de hielo por derretimiento o por sublimación, convirtiéndose directamente en vapor de agua. El resto de la nieve sí se transforma lentamente en hielo. A pesar de que este hielo puede fluir hacia los bordes de la capa de hielo y derretirse en el borde regresando al océano o también en forma de icebergs. Cuando existe un equilibrio entre la precipitación, los procesos superficiales y la pérdida de hielo en el borde de la capa de hielo, el nivel del mar permanece igual. Sin embargo, los científicos han

descubierto que el hielo se está perdiendo a un ritmo acelerado (*Lewis*, T., 2013, *Rignot*, E., 2019).

Proyecciones globales

Las proyecciones del IPCC AR6 presentan diversos escenarios según las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP). Para finales de siglo (2100), el GMSL podría aumentar entre 0,28 m (SSP1-1.9, escenario compatible con 1,5°C) y 1,01 m (SSP5-8.5, escenario de altas emisiones), con un rango de baja probabilidad, pero alto impacto que podría alcanzar los 2 metros si se producen inestabilidades rápidas en las capas de hielo antárticas (IPCC AR6, Cap. 9).

Un estudio reciente de la Universidad Tecnológica de Nanyang y la Universidad de Delft (Grandey et al., 2024, publicado en *Earth's Future*) proyecta que, bajo un escenario de altas emisiones, el nivel del mar podría subir entre 0,5 y 1,9 metros para 2100, siendo el extremo superior 90 centímetros mayor que la proyección central del IPCC. Este estudio utiliza una metodología de fusión probabilística que combina múltiples modelos de proyección.

Escenario SSP	Subida 2050 (m)	Subida 2100 (m)	Subida 2150 (m)
SSP1-1.9 (1,5°C)	0,15 – 0,23	0,28 – 0,55	0,37 – 0,86
SSP1-2.6 (2°C)	0,17 – 0,26	0,32 – 0,62	0,46 – 0,99
SSP2-4.5 (Intermedio)	0,19 – 0,29	0,44 – 0,76	0,66 – 1,33
SSP5-8.5 (Altas emis.)	0,23 – 0,32	0,63 – 1,01	0,98 – 1,88

Tabla 1. *Proyecciones de subida del nivel medio global del mar según IPCC AR6 (2021). Rangos probables (17º–83º percentil).*

Se debe tener en cuenta la inercia climática o también denominada inercia del cambio climático, el fenómeno que provoca que el sistema climático de nuestro planeta muestre una resistencia, respondiendo con lentitud, a la hora de desviarse de un estado dinámico determinado. Engloba el conjunto de interacciones que amplían las escalas temporales frente a la sensibilidad climática, y se asocia a los factores que impulsan el cambio climático y sus respuestas.

La complejidad de muchos aspectos del sistema climático y los largos períodos de tiempo que tardan en producirse las reacciones del nivel del mar como respuesta a los cambios de temperatura en la Tierra provocan que las proyecciones del aumento del nivel del mar en el futuro sean todo un desafío.

Efectos globales y adaptación

En 2025, el Foro Económico Mundial advirtió que la subida del nivel del mar por el cambio climático afecta ya a 1.000 millones de personas en todo el mundo. Aproximadamente 230 millones de personas viven a menos de 1 metro sobre el nivel actual del mar, y 1.000 millones residen dentro de los 10 metros de elevación costera (WEF, 2025; *Kulp & Strauss*, 2019). Incluso una subida modesta de 20 cm para 2050 provocaría daños por inundaciones de al menos 1 billón de dólares anuales en las 136 mayores ciudades costeras del mundo (Hallegatte et al., 2013).

Los efectos más significativos incluyen la inundación permanente de zonas bajas costeras, la erosión acelerada de playas, la intrusión salina en acuíferos costeros, la amplificación de marejadas ciclónicas, la degradación de ecosistemas costeros como manglares y arrecifes de coral, y la aparición de los llamados “bosques fantasma” causados por la salinización de zonas forestales costeras. El IPCC advierte que eventos extremos del nivel del mar que históricamente ocurrían una vez por siglo se producirán anualmente o con mayor frecuencia en el 60-82% de los mareógrafos del mundo para 2100 (IPCC AR6, Cap. 9).

Los impactos y amenazas principales del aumento del nivel del mar se pueden agrupar en dos tipos:

- **Fenómenos extremos:** Los eventos extremos del nivel del mar, que antes ocurrían una vez por siglo, se volverán mucho más frecuentes, aumentando el riesgo para millones de personas que habitan en zonas costeras y deltas.
- **Erosión y salinización:** Las costas sufren retroceso continuo y los acuíferos subterráneos son invadidos por agua salada, afectando a la agricultura y el consumo.

La afección del aumento del nivel del mar estará condicionada al nivel que alcance en cada costa. El nivel del mar no subirá uniformemente en todas las partes del mundo, incluso podrá bajar ligeramente en algunos lugares, como el Ártico (Alexander, N., 2017).

Entre los factores locales, se encuentran otros efectos tectónicos y hundimiento progresivo de la tierra o subsidencias, mareas, corrientes y tormentas. Se espera que las inundaciones costeras sean extensas y continuas como resultado del calentamiento en varios grados sostenidos durante los próximos milenios (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2011). Por lo tanto, el aumento del nivel del mar puede afectar considerablemente a las poblaciones humanas en las regiones costeras e insulares (Bindoff, N.L. et al., 2007). Provocando el consiguiente desplazamiento de poblaciones, la pérdida y degradación de tierras agrícolas y daños en las ciudades y asentamientos poblacionales (Holder, J., 2017).

Además, otros efectos provocados por el aumento del nivel del mar serán mayores marejadas ciclónicas y tsunamis más peligrosos (*UPI,* 2018). Los entornos naturales como los ecosistemas marinos también se ven afectados, con peces, aves y plantas que pierden partes de su hábitat (National Geographic, 2017).

Las sociedades deberán adaptarse al aumento del nivel del mar, implementando una retirada controlada, a través de prácticas de construcción dura como diques, u otras más suaves como la rehabilitación de dunas y la regeneración de playas que permitan acomodarse al cambio de la costa o protegerse de la subida del nivel del mar. A veces, estas estrategias de adaptación van de la mano, pero en otras ocasiones se deben elegir entre diferentes estrategias (Thomsen, D.C., et al., 2012).

Para las llamadas “ciudades que se hunden”, la adaptación podrá verse agravada por otros problemas ambientales, como el hundimiento. Los ecosistemas naturales normalmente se adaptan al aumento del nivel del mar moviéndose hacia el interior; sin embargo, es posible que no siempre puedan hacerlo debido a barreras naturales o artificiales (Birdlife International, 2015).

Situación en España

España, con más de 8.000 kilómetros de litoral y cerca del 40% de su población residiendo en zonas costeras, es particularmente vulnerable a la subida del nivel del mar. Un estudio liderado por el Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), en colaboración con el Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA), publicado en la revista *Geosciences*, ha constatado que el ritmo de subida del nivel del mar en la Península Ibérica, las Islas Canarias y las Islas Baleares se ha duplicado en las últimas dos décadas: de 1,6 mm/año (1948–2019) a 2,8 mm/año en los últimos cinco años (Vargas et al., 2023).

Según este estudio, la expansión térmica contribuye aproximadamente 0,8 mm/año, mientras que el aumento de masa de agua — presumiblemente originado en la fusión de hielos polares — aporta adicionalmente 1,4 mm/año. Manuel Vargas, físico del Centro Oceanográfico de Málaga del IEO-CSIC, subraya que esta aceleración refleja que la amenaza climática no está en vías de solución sino agravándose.

Impactos económicos y territoriales

Un estudio publicado en *Scientific Reports* (Cortés Arbués et al., 2024, *Delft University*) analiza el impacto económico de la subida del nivel del mar en la Unión Europea. Para España, los resultados son preocupantes: las pérdidas podrían alcanzar los 50.000 millones de euros a finales de siglo (una caída del 0,88% del PIB estimado) en un escenario sin medidas de adaptación más ambiciosas.

Según un estudio publicado en Nature, unas 200.000 personas en España residen en zonas que estarán expuestas a inundaciones anuales a partir de 2050. El informe sobre cambio climático del Gobierno de España (2021) estima que la cota de inundación en la costa atlántica, cantábrica y el Mar de Alborán podría crecer un 8% para 2040, un 6% en Canarias y entre un 2–3% en el Mediterráneo y el Golfo de Cádiz.

Vulnerabilidad del litoral español

El Mediterráneo español merece atención especial. Todas las aguas que rodean la Península Ibérica y las islas se están calentando un 67% más rápido que la media global. El caso del Mediterráneo es especialmente grave, calentándose a un ritmo de dos a tres veces la media global. Según Greenpeace (Informe Crisis a Toda Costa, 2024), desde noviembre de 2024 el Mediterráneo se encuentra en una ola de calor marina constante con anomalías de hasta +4°C en el mar Balear.

La regla de Bruun permite una estimación sencilla del retroceso costero: aproximadamente 1 metro de playa perdido por cada centímetro de subida del nivel del mar. Aplicando esta regla a las tasas actuales, se estima que para 2090 Barcelona podría haber perdido hasta 70 metros de costa. En la Comunidad Valenciana, más del 60% de los arenales ya han visto disminuir su extensión. Cerca de una veintena de playas de Cádiz y Málaga presentan riesgo extremo de pérdida de anchura de entre 18 y 22 metros (Greenpeace, 2024).

Las zonas con mayor impacto de inundación permanente en 2050 se asocian principalmente a humedales existentes o urbanizados, como el Parque Natural de S'Albufera de Mallorca, la Albufera de Valencia, el Delta del Ebro y las marismas del Guadalquivir. Estas zonas constituyen no solo hábitats de alto valor ecológico sino también áreas de gran importancia turística y agrícola.

El caso del Delta del Ebro

El Delta del Ebro merece un análisis diferenciado por ser una de las zonas más vulnerables de Europa. Con una superficie de aproximadamente 320 km² y una elevación media inferior a 2 metros sobre el nivel del mar, el delta combina subsidencia natural con la reducción del aporte sedimentario causado por los embalses aguas arriba. Estudios recientes del IRTA estiman que entre el 40% y el 50% de la superficie actual del delta podría quedar inundada de forma permanente para 2100 bajo un escenario de emisiones medias (Sánchez-Arcilla et al., 2016). La producción arrocera, que sustenta la economía local, ya sufre los efectos de la intrusión salina en los acuíferos. El parque natural del Delta del Ebro, que alberga más de 300 especies de aves, vería reducido drásticamente su hábitat, con consecuencias irreversibles para la biodiversidad.

Impacto sobre el turismo costero

El turismo costero representa aproximadamente el 12% del PIB español y emplea directamente a más de 2 millones de personas. La pérdida de playas y la degradación de infraestructuras costeras amenazan directamente este sector. Un estudio del MITECO (2021) estima que el sector turístico podría perder entre 2.000 y 10.000 millones de euros anuales para 2050 debido a los efectos combinados de la subida del nivel del mar, la erosión costera y el aumento de la frecuencia de temporales

marítimos. Las Islas Baleares y las Islas Canarias, que dependen críticamente del turismo de sol y playa, serían las más afectadas proporcionalmente.

El Mediterráneo

El Mar Mediterráneo presenta características que agravan la problemática. Se trata de un mar semicerrado con un intercambio limitado con el Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar, lo que amplifica los efectos del calentamiento. La temperatura media de las aguas superficiales ha aumentado 1,6 °C en las últimas cuatro décadas, un ritmo entre 2 y 3 veces superior a la media oceánica global. Este sobrecalentamiento intensifica la expansión térmica local, aumenta la frecuencia de medicanes (ciclones mediterráneos), y genera olas de calor marinas prolongadas que devastan ecosistemas como las praderas de Posidonia oceánica, especie endémica del Mar Mediterráneo que cumple funciones ecosistémicas críticas de protección costera y captura de carbono.

La costa de Lugo

Según el informe Destrucción a toda costa 2025 de la organización ecologista Greenpeace, A Mariña lucense es una de las zonas más amenazadas de Galicia. Este informe es un análisis detallado que denuncia el deterioro continuado del litoral español, centrado en los efectos combinados del cambio climático y el urbanismo desmedido, y recogiendo más de 500 puntos críticos a lo largo de los 7.900 kilómetros de costa del Estado, entre los que destaca de forma especial el tramo que va de Ribadeo a O Vicedo.

En el informe se expone la situación límite de la costa norte de Lugo debido a la combinación de tres factores: el aumento de la temperatura del mar, el riesgo de inundaciones marinas y fluviales, y la presión urbanística derivada del turismo. La entidad subraya que la ría de Viveiro, la costa de San Cibrao y la de Burela son áreas con una “amenaza significativa” de verse afectadas por la subida del nivel del mar y fenómenos meteorológicos extremos.

Greenpeace también advierte sobre la pérdida de biodiversidad marina, acentuada por el aumento de la temperatura de las aguas que rodean la Península Ibérica. Los datos recogidos revelan que estas aguas se calientan un 67 % más rápido que la media global, y eso se traduce en una mayor intensidad de los temporales, alteración de los ecosistemas e impacto directo sobre especies de interés comercial, como el berberecho o la almeja.

La costa de Lugo, caracterizada por su clima atlántico, enfrenta fenómenos meteorológicos intensos, destacando temporales marítimos con olas de hasta 10 metros, fuertes vientos, lluvias persistentes y episodios de nieve en cotas bajas durante el invierno. Las borrascas profundas son habituales, generando avisos por FMA y alertas naranjas/rojas y condiciones adversas que afectan la navegación y seguridad costera.

Los fenómenos más relevantes que afectan a la zona incluyen:

- **Temporales Marítimos:** La costa lucense es azotada por fuertes temporales del noroeste, que provocan grandes olas y mar de fondo, siendo un riesgo constante, especialmente en invierno. También se ven afectados por el viento de NE.

- **Vientos Fuertes:** Las borrascas suelen traer rachas de viento intensas, que pueden superar los 80 km/h en la línea de costa.

- **Lluvias y Chubascos:** Precipitaciones frecuentes y a menudo intensas, típicas del clima atlántico, que pueden causar inundaciones localizadas. Si a una subida del nivel del mar por temporal marítimo con fuerte oleaje le sumamos lluvia constante e intensa, la afección por inundaciones en zonas costeras puede ser mayor. La altitud en la costa de Lugo varía desde el nivel del mar (0 msnm) en sus numerosas playas, como las famosas de Ribadeo o Viveiro, hasta aproximadamente 100-200 metros sobre el nivel del mar en los acantilados más altos y cabos de la zona, como los de la zona de Loiba o Vicedo.

- **Nieve y Aire Polar:** En situaciones de entrada de aire polar, la cota de nieve puede bajar considerablemente (hasta los 400-500 m de altitud), llegando a afectar a zonas costeras y accesos elevados.

- **Nieblas:** Son frecuentes, especialmente en épocas de transición, reduciendo la visibilidad en el mar y la costa.

Estos eventos están ligados a la llegada de borrascas atlánticas y pueden ser más intensos debido a fenómenos climáticos extremos. Los temporales marítimos en la costa lucense (A Mariña) son frecuentes, especialmente en invierno, con olas que pueden superar los 10 metros y alertas rojas/naranjas por fuerte oleaje y viento. Áreas como la ría de Viveiro, San Cibrao y Burela son vulnerables, enfrentando riesgos de inundación y erosión.

1. **Intensidad y Alertas:** En enero de 2026, se registraron alertas rojas por olas de >10m. Las alertas naranjas son comunes, indicando olas de 6-9 metros.

2. **Zonas Vulnerables:** La Mariña lucense es una de las zonas con mayor amenaza de inundación por el cambio climático, afectando la costa de Viveiro, San Cibrao y Burela.

3. **Consecuencias:** La Xunta suele suspender la actividad marítima, pesquera y deportiva (programa Xogade) ante el riesgo. El impacto incluye erosión en acantilados y playas.

4. **Tendencia:** Estudios señalan el aumento de la inestabilidad en el Atlántico Norte, resultando en temporales más severos.

Si analizamos la costa de Lugo podemos encontrar las siguientes playas susceptibles de afección por estos fenómenos costeros:

Playas situadas en rías:

- **Playa de Area Longa:** en la ría del Barquero (Vicedo)-orientación N-NE
- **Playa de San Román**: en la parte exterior occidental de la ría de Viveiro abierta al mar-orientación NE
- **Playa de Covas**: en la parte interior central de la ría de Viveiro-orientación N
- **Playa de Area**: en la parte interior oriental de la ría de Viveiro-orientación NO
- **Playa de Celeiro**: en la parte interior oriental de la ría de Viveiro-orientación NO, pero más pequeña y menos expuesta que la playa de Area
- **Playa de Esteiro**: en la parte exterior oriental de la ría de Viveiro abierta al mar-orientación NO
- **Playa de los Bloques:** en parte occidental interna de la ría Ribadeo -orientación E

Playas situadas en mar abierto, ensenadas o golfos:

- **Playa do Carro y Playa do Sarridal:** abierta al mar (Loiba)-orientación NO
- **Playa de Lago:** en la ensenada de San Cibrao-orientación E-NE
- **Playa de Limosa**: abierta al mar-orientación N-NE
- **Playa Dos Castros**: abierta al mar-orientación NE
- **Playa de Marosa:** abierta al mar-orientación NE
- **Playa de A Marosa:** abierta al mar-orientación NO
- **Playa de Areorura:** abierta al mar-orientación N
- **Playa de Dos Xuncos:** abierta al mar-orientación E
- **Playa Area Longa:** abierta al mar-orientación NE
- **Playa de Llas:** abierta al mar-orientación NE
- **Playa de San Cosme de Barreiros y Playa do Altar:** en el Golfo da Masma-orientación N
- **Playa de Benquerencia**: abierta al mar-orientación N
- **Playa de Lóngara:** abierta al mar-orientación N
- **Playa de Moledo:** abierta al mar-orientación NE
- **Playa de Las Catedrales:** abierta al mar-orientación NO y NE

3.2. Dimensión social y justicia climática

La subida del nivel del mar no afecta a todos por igual. Existe una dimensión de justicia climática que es preciso señalar: existen zonas y comunidades de personas especialmente vulnerables y que disponen de menos recursos para adaptarse. No es lo mismo la afección de la subida del nivel del mar sobre una segunda residencia vacacional que sobre el propio modo de vida de una comunidad costera. En España, esta desigualdad se manifiesta en la diferencia de capacidad adaptativa entre municipios ricos y municipios pequeños sin presupuesto para proteger su litoral.

ECODES, desde su fundación en 1992, ha situado la justicia climática como eje central de su acción. Su participación en la Alianza por el Clima, coalición de más de 400 organizaciones, y su liderazgo en la Comunidad #PorElClima evidencian su compromiso con una respuesta inclusiva y equitativa a la emergencia climática. Las migraciones climáticas constituyen otra dimensión crítica: el Banco Mundial estima que 216 millones de personas podrían convertirse en migrantes climáticos internos para 2050.

4. EVIDENCIA CIENTÍFICA DE LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

4.1. Registros históricos y observacionales

La medición sistemática del nivel del mar se remonta a mediados del siglo XIX con los primeros mareógrafos. El registro más longevo de España es el del Instituto Geográfico Nacional (IGN) en Alicante, establecido en 1870 y que sirve como datum altimétrico nacional ("cota cero"). Estos registros históricos, combinados con los datos de altimetría satelital disponibles desde 1992, proporcionan una base sólida de evidencia.

Los datos muestran inequívocamente que el nivel del mar ha subido y que la tasa de subida se está acelerando. El registro satelital combinado de TOPEX/Poseidon, Jason-1, OSTM/Jason-2, Jason-3 y Sentinel-6 Michael Freilich proporciona la serie temporal más precisa: una subida de 10 cm en los últimos 30 años con una tasa actual de 4,62 mm/año (NASA Sea Level Change Portal, 2025). Un análisis reciente de NASA revela que el nivel del mar subió de forma inesperadamente alta en 2024 (NASA, 2025).

4.2. Consenso científico y fuentes principales

El consenso científico sobre la realidad de la subida del nivel del mar y su vinculación con el calentamiento global antropogénico está respaldado por múltiples instituciones y publicaciones:

IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático): El Capítulo 9 del AR6 (Fox-Kemper et al., 2021) es la evaluación más completa y actualizada de los cambios en el océano, la criósfera y el nivel del mar, abarcando tanto observaciones como proyecciones futuras bajo diferentes escenarios.

- **NASA *Sea Level Change Team*:** Desde hace más de una década, este equipo científico coordina investigaciones sobre nivel del mar utilizando datos

satelitales, mareógrafos y modelos computacionales. Su portal sealevel.nasa.gov proporciona herramientas de visualización y acceso a datos.

- ***Copernicus Marine Service* (CMEMS):** El servicio marino de la Unión Europea proporciona datos operacionales y reanálisis del nivel del mar, incluyendo series climáticas y predicciones.

- **IEO-CSIC:** El Instituto Español de Oceanografía proporciona análisis específicos para las costas españolas, incluyendo el estudio de tendencias a largo plazo a partir de datos de mareógrafos y altimetría satelital.

4.3. Efectos observados a escala global

Los efectos ya observables de la subida del nivel del mar incluyen:

- **Aumento de inundaciones costeras:** Las inundaciones por mareas altas que ocurrían 5 veces al año durante 1960–1980 pasaron a ocurrir más de 8 veces al año en 1995–2014 (IPCC AR6, alta confianza). Se proyecta que los eventos extremos del nivel del mar serán entre 20 y 30 veces más frecuentes para 2050 y entre 160 y 530 veces más frecuentes para 2100 (IPCC AR6, confianza media).

- **Erosión costera acelerada:** Playas de todo el mundo están perdiendo superficie a tasas sin precedentes. En las islas del Pacífico, comunidades enteras han tenido que reubicarse.

- **Intrusión salina:** El avance del agua marina contamina acuíferos costeros, afectando el suministro de agua potable y la agricultura en deltas como el Ganges-Brahmaputra, el Mekong y el Nilo.

- **Degradación de ecosistemas:** Manglares, marismas, arrecifes de coral y otros ecosistemas costeros sufren estrés acumulativo por la combinación de subida del nivel del mar, calentamiento y acidificación oceánica.

- **Migración climática:** El Banco Mundial estima que para 2050, 216 millones de personas podrían verse obligadas a migrar internamente debido al cambio climático, siendo la subida del nivel del mar uno de los principales factores.

4.4. Efectos específicos en España

El litoral español presenta una combinación de factores que lo hacen especialmente vulnerable:

Región costera	Vulnerabilidad principal	Impacto estimado
Costa atlántica (Galicia, Cantabria, País Vasco)	Marejadas extremas, erosión	Retroceso costero de hasta 16 m; pérdidas económicas significativas
Costa mediterránea	Urbanización masiva, turismo	Retroceso de playas, inundación de infraestructuras turísticas
Delta del Ebro	Elevación mínima, subsidencia	Riesgo de inundación permanente de gran parte del delta
Albufera de Valencia	Humedal costero bajo	Salinización, pérdida de biodiversidad
Costa gaditana y malagueña	Playas estrechas, urbanización	18–22 m de pérdida de anchura de playa
Islas Baleares	Albuferas y salinas	Inundación permanente de zonas bajas
Islas Canarias	Turismo costero intensivo	+50 zonas de alto riesgo de desaparición

Tabla 2. *Vulnerabilidad del litoral español por región.*
Fuentes*: Greenpeace (2024), MITECO (2021), IEO-CSIC (2023).*

5. TECNOLOGÍAS DE MEDICIÓN Y PREDICCIÓN DEL NIVEL DEL MAR

5.1. Altimetría satelital

La altimetría satelital constituye la herramienta fundamental para la medición precisa del nivel del mar a escala global. Desde 1992, una serie continuada de misiones satelitales ha proporcionado un registro ininterrumpido de la altura de la superficie del mar con precisión milimétrica.

Misiones satelitales de la NASA y ESA

- **TOPEX/Poseidon (1992–2006):** Primera misión de altimetría de precisión dedicada al nivel del mar, fruto de la colaboración NASA-CNES. Estableció el estándar de oro para las mediciones oceánicas desde el espacio.

- **Jason-1 (2001–2013), OSTM/Jason-2 (2008–2019), Jason-3 (2016–presente):** Cada satélite se lanzó antes de la desactivación de su predecesor, permitiéndose un año de calibración cruzada en órbitas prácticamente idénticas. Esta continuidad es clave para la integridad del registro climático.

- **Sentinel-6 Michael Freilich (2020–presente):** Lanzado en noviembre de 2020, este satélite de la misión Sentinel-6/Jason-CS representa la última generación de altimetría satelital. Recopila mediciones de la altura de la superficie del mar para más del 90% de los océanos del mundo. Su gemelo, Sentinel-6B, fue lanzado en 2025 para garantizar la continuidad del registro durante al menos una década más (NASA, 2020).

- **GRACE y GRACE-FO (2002–presente):** Estas misiones miden cambios en el campo gravitatorio terrestre, lo que permite cuantificar la pérdida de masa de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida, así como cambios en el almacenamiento de agua terrestre.

- **ICESat y ICESat-2 (2003–2009; 2018–presente):** Utilizan lidár para medir con alta precisión la elevación de las capas de hielo, glaciares y la superficie del mar.

Herramientas de la NASA

La NASA ha desarrollado un conjunto de herramientas accesibles para la visualización y análisis de datos del nivel del mar:

- **Sea Level Change Portal (sealevel.nasa.gov):** Portal central que integra datos de todas las misiones satelitales, herramientas de visualización interactiva y recursos educativos. Incluye series temporales globales y regionales del nivel del mar.
- **IPCC AR6 *Sea Level Projection Tool*:** Herramienta interactiva que permite visualizar las proyecciones del IPCC AR6 desde 2020 hasta 2150 para cualquier punto del océano, desglosando las contribuciones de diferentes procesos físicos (NASA/IPCC, 2023).
- ***SEA Tool* (*Sea Level Evaluation and Assessment Tool*):** Combina datos de mediciones satelitales, mareógrafos y otras observaciones terrestres y marinas para estimar y comparar tendencias del nivel del mar resultantes de diferentes procesos físicos. Desde 2025, el SEA Tool se ha expandido a estaciones a nivel global (NASA, 2025).
- **Programa ARSET:** En 2025, el programa de formación en teledetección aplicada (ARSET) de NASA lanzó un curso específico sobre herramientas de cambio del nivel del mar para planificación y apoyo a la toma de decisiones (NASA Earthdata, 2025).

5.2. Redes de mareógrafos y boyas

Sistema internacional GLOSS

El Sistema Global de Observación del Nivel del Mar (GLOSS, por sus siglas en inglés), coordinado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO, integra una red de aproximadamente 300 estaciones de mareógrafos distribuidas por todo el mundo. El Servicio Permanente para el Nivel Medio del Mar (PSMSL) compila y distribuye datos de nivel medio mensual y anual desde estas estaciones.

Red REDMAR de Puertos del Estado

En España, Puertos del Estado ha desarrollado y mantiene la infraestructura más completa de observación del medio marino costero. La Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR), operativa desde 1992, constituye un sistema fundamental para la monitorización del nivel del mar en tiempo real y la generación de series históricas.

En su configuración actual (2024), REDMAR cuenta con 42 estaciones en funcionamiento desplegadas en las 28 Autoridades Portuarias españolas de interés general. Las estaciones utilizan sensores radar MIROS basados en tecnología de barrido de frecuencias, que ofrecen alta precisión y miden también la agitación portuaria, proporcionando datos de altura significante y periodo medio cada 20 minutos.

Los datos se registran con diferentes resoluciones temporales: series minutales (a partir de datos brutos cada 0,5 segundos), series 5-minutales, horarias, diarias, mensuales y anuales. Además, se calculan parámetros derivados como las carreras de marea (máxima, media y mínima), fundamentales para la gestión portuaria y la evaluación de riesgos costeros.

Los datos de REDMAR se integran en centros de datos internacionales como GLOSS, PSMSL, el Servicio de Monitorización de Estaciones de Nivel del Mar de la UNESCO (SLSMF) y se distribuyen a través del Servicio Copernicus Marino (CMEMS) y EMODnet.

Sistema de predicción NIVMAR

NIVMAR es el sistema de predicción del nivel del mar desarrollado por Puertos del Estado para la costa española, operativo desde 1998. Se basa en el modelo de circulación marina HAMSOM, forzado con campos de viento y presión atmosférica del modelo HRES del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), proporcionados por AEMET, y datos en tiempo cuasi-real de los mareógrafos de REDMAR.

Desde 2018, el sistema se ha evolucionado a un modelo multi-modelo que integra predicciones de nivel del mar de múltiples fuentes, incluyendo el Servicio Marino de Copernicus, utilizando la técnica estadística de *Bayesian Model Average* (BMA) para generar predicciones probabilísticas. Este sistema proporciona predicciones a 72 horas con resolución horaria.

5.3. Modelos climáticos y proyecciones

Los modelos de proyección del nivel del mar combinan diversas aproximaciones complementarias:

- **Modelos basados en procesos:** Calculan individualmente las contribuciones de la expansión térmica (mediante modelos de circulación general, GCMs), la fusión de glaciares (modelos de balance de masa), las capas de hielo (modelos dinámicos de mantos de hielo) y el almacenamiento de agua terrestre. Son los utilizados en el IPCC AR6.

- **Modelos semi-empíricos:** Aplican técnicas estadísticas y modelado físico básico a las observaciones recientes del nivel del mar y reconstrucciones paleoclimáticas. Desarrollados inicialmente porque los modelos basados en procesos subestimaban la subida observada, hoy proporcionan proyecciones concordantes con los modelos físicos (Rahmstorf et al., 2012; Vermeer & Rahmstorf, 2009).

- **Ensambles de modelos y fusión probabilística:** Los trabajos más recientes combinan múltiples modelos mediante técnicas estadísticas avanzadas para mejorar las estimaciones de incertidumbre. El estudio de Grandey et al. (2024) utiliza esta aproximación, combinando proyecciones basadas en procesos con modelos semi-empíricos.

Un hallazgo importante del estudio de Törnqvist et al. (2025, Earth's Future) es que las proyecciones del IPCC desde los años 90 han sido notablemente robustas, aunque subestimaron la contribución de las capas de hielo, que se consideró despreciable en informes anteriores. Este sesgo se ha corregido en los informes más recientes, pero subraya que la realidad podría superar incluso las proyecciones actuales.

5.4. Red de boyas oceanográficas de Puertos del Estado

Además de la red REDMAR de mareógrafos, Puertos del Estado gestiona dos redes complementarias de boyas oceanográficas que proporcionan datos fundamentales para la comprensión integral del medio marino español:

- **Red Costera:** Constituida por boyas escalares fondeadas a profundidades entre 20 y 100 metros, a distancias de la costa entre 1 y 10 millas náuticas. Estas boyas registran parámetros de oleaje (altura significante, periodo pico, dirección), temperatura del agua y, en algunos casos, corrientes superficiales. La red costera es esencial para la calibración de modelos numéricos de oleaje y para la gestión operativa de los puertos.

- **Red Exterior (aguas profundas):** Compuesta por boyas direccionales Triaxys y Wavescan fondeadas en profundidades superiores a 200 metros, algunas a más de 1.500 metros. Estas boyas, por su lejanía de la costa, transmiten información en tiempo real vía satélite cada hora. Además del oleaje, registran corrientes marinas, salinidad, viento, presión atmosférica y temperatura del aire y del agua. La red exterior proporciona condiciones de contorno para los modelos de propagación de oleaje hacia la costa.

En su conjunto, las redes de Puertos del Estado incluyen más de 80 puntos de observación distribuidos a lo largo de toda la costa española, desde el Cantábrico hasta el Mediterráneo, incluyendo las Islas Baleares y Canarias. Esta cobertura hace del sistema español uno de los más completos de Europa.

El portal Portus y la aplicación iMar

Puertos del Estado pone a disposición del público los datos de sus redes a través del portal web Portus y la aplicación móvil iMar (disponible en iOS y Android). Los usuarios pueden acceder a datos en tiempo real (actualizados al minuto para mareógrafos y cada hora para boyas), previsiones a 72 horas, y series históricas descargables. La información se organiza por parámetros (oleaje, nivel del mar, corrientes, viento, temperatura) y en tres secciones: datos en tiempo real, predicciones y datos históricos. Para el proyecto que nos ocupa, este acceso abierto a datos de calidad es un habilitador fundamental.

5.5. Sistema SAMOA de Puertos del Estado

El Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico de las Autoridades Portuarias (SAMOA) representa la integración más avanzada de información oceanográfica a nivel portuario. SAMOA combina los datos de las redes de observación con modelos numéricos de alta resolución para proporcionar a cada Autoridad Portuaria predicciones locales de oleaje, corrientes, nivel del mar y condiciones meteorológicas. El sistema incluye 26 sistemas costeros y 33 portuarios en funcionamiento, con predicciones a 72 horas de resolución horaria en superficie y diaria en profundidad.

La importancia de SAMOA para nuestro proyecto radica en que proporciona el contexto operativo en el que se integran los datos de nivel del mar: no solo la tendencia a largo plazo, sino también la variabilidad a corto plazo debida a condiciones meteorológicas, lo que permite al usuario comprender que la subida del nivel del mar se superpone a una variabilidad natural que ya genera eventos extremos.

5.6. Argo: la red global de flotadores perfiladores

La red Argo merece mención especial como complemento de las mediciones satelitales y costeras. Argo es una red global de aproximadamente 3.800 flotadores perfiladores autónomos que miden temperatura y salinidad desde la superficie hasta 2.000 metros de profundidad. Estos datos son esenciales para calcular la componente esterica (térmica) de la subida del nivel del mar, ya que permiten cuantificar cuánto del incremento observado se debe a la expansión térmica del océano y cuánto al aumento de masa de agua. Los datos Argo alimentan directamente el SEA Tool de NASA y son utilizados por el IPCC para sus proyecciones.

5.7. Síntesis de fuentes de datos para la herramienta

Fuente de datos	Parámetro	Resolución temporal	Uso en la herramienta
REDMAR (mareógrafos)	Nivel del mar histórico	Minutal a anual	Tendencia local, mareas, extremos
NIVMAR	Predicción nivel del mar	Horaria (72h)	Contexto operativo, marea meteorológica
Red Costera/Exterior	Oleaje, Tª agua	Horaria	Condiciones marítimas contextuales
IPCC AR6 (regionalizadas)	Proyección a 2100+	Decadal	Predicción a 50 años
Copernicus CMEMS	Reanálisis, predicción	Diaria a mensual	Validación cruzada predicciones
Altimetría satelital (NASA)	GMSL, tendencias	Mensual	Contexto global
Argo	T/S perfiles oceánicos	10 días	Componente estérica regional

***Tabla 3**. Fuentes de datos integradas en la herramienta y su uso específico.*

6. NECESIDAD DE CONCIENCIACIÓN CIUDADANA

6.1. La brecha entre ciencia y percepción social

A pesar del alto grado de consenso científico, la percepción ciudadana del riesgo asociado a la subida del nivel del mar permanece significativamente por debajo de lo que las evidencias justificarían. Esta brecha se debe a múltiples factores cognitivos y comunicativos que limitan la eficacia de los enfoques tradicionales de comunicación climática.

- **Distancia temporal:** Los plazos de las proyecciones (2050, 2100) exceden el horizonte de planificación personal de la mayoría de las personas, generando una sensación de irrelevancia inmediata. Como señalan Weber (2006) y Leiserowitz (2006), los riesgos climáticos se perciben como temporalmente lejanos, lo que reduce la motivación para la acción.

- **Distancia espacial:** Las representaciones habituales del nivel del mar (mapas globales, gráficos de tendencias) resultan abstractas y desconectadas de la realidad local de las personas. Los estudios de comunicación climática demuestran que la información local y tangible es significativamente más eficaz que la global y abstracta (Scannell & Gifford, 2013).

- **Gradualidad del fenómeno:** La subida del nivel del mar es un proceso gradual, imperceptible en la escala temporal humana cotidiana. A diferencia de eventos extremos puntuales (huracanes, inundaciones), no genera experiencia directa que ancle la percepción del riesgo.

- **Saturación informativa:** La abundancia de mensajes sobre cambio climático puede provocar fatiga informativa y desensibilización, especialmente cuando se utilizan formatos repetitivos que no logran conectar emocionalmente con la audiencia (Moser, 2010).

6.2. Enfoques de comunicación climática eficaz

La investigación en comunicación climática ha identificado varios principios que incrementan la eficacia del mensaje:

- **Visualización concreta:** Las representaciones visuales de los impactos superan en eficacia a las descripciones numéricas o textuales. Imágenes y vídeos que muestran cómo serán los efectos en lugares reconocibles tienen un impacto emocional medible (Sheppard, 2012; Nicholson-Cole, 2005).

- **Localidad y relevancia personal:** La información climática es más efectiva cuando se enmarca en el contexto local del receptor. Proyectos como *Climate Central's Surging Seas*, que permiten explorar escenarios de inundación para ubicaciones específicas, han demostrado alta eficacia (Strauss et al., 2012).

- **Emociones constructivas:** Los enfoques que generan preocupación sin caer en el catastrofismo, y que ofrecen vías de acción, resultan más motivadores que los mensajes alarmistas puros (O'Neill & Nicholson-Cole, 2009).

- **Interactividad y agencia:** Las herramientas que permiten al usuario explorar escenarios y tomar decisiones generan mayor *engagement* y aprendizaje (Roeser, 2012).

ECODES lleva décadas liderando iniciativas de concienciación climática en España. Desde la campaña "El clima cambia. ¿Y tú?" lanzada en 2006 en colaboración con 18 universidades españolas, hasta su plataforma CeroCO_2 y la Comunidad #PorElClima, la fundación ha desarrollado un amplio repertorio de herramientas de comunicación ambiental. ECODES participa activamente en la coalición Fundaciones por el Clima, impulsada por la Asociación Española de Fundaciones, que cuenta con más de 200 fundaciones adheridas.

Su experiencia demuestra que las herramientas más eficaces son aquellas que logran conectar la realidad global del cambio climático con la experiencia personal y local del ciudadano. El decálogo de comunicación frente al cambio climático desarrollado por ECODES enfatiza la necesidad de mensajes positivos, concretos y orientados a la acción.

La hiperpersonalización representa la frontera más avanzada en comunicación climática. Consiste en adaptar el mensaje no solo al contexto local genérico sino a la experiencia específica e individual de cada persona. En el ámbito del nivel del mar, esto se traduce en permitir que cada ciudadano visualice cómo afectará la subida del mar a los lugares concretos que conoce, frecuenta y valora emocionalmente.

Las ventajas de la hiperpersonalización incluyen la eliminación de la distancia psicológica (el impacto se muestra en un lugar personal), la generación de una respuesta emocional auténtica (no construida sobre imágenes genéricas), la creación

de un efecto “espejo” donde la persona se reconoce como afectada directa, y la facilidad de compartir la experiencia en redes sociales, amplificando el alcance del mensaje.

Hasta ahora, la hiperpersonalización a esta escala no era posible sin tecnologías de IA generativa. Los avances recientes en *Vision-Language Models* abren una ventana de oportunidad sin precedentes para crear experiencias de concienciación verdaderamente personalizadas y científicamente rigurosas.

Los estudios de percepción social del cambio climático en España revelan una paradoja significativa. Según el CIS (Centro de Investigaciones Sociológicas), más del 85% de los españoles reconocen que el cambio climático es un problema grave. Sin embargo, cuando se les pregunta por los impactos concretos que les afectarán personalmente, la respuesta es mucho más difusa. La subida del nivel del mar se percibe como un problema de “pequeñas islas del Pacífico”, no como una amenaza para las playas españolas donde las familias pasan sus vacaciones.

Esta brecha perceptiva tiene consecuencias políticas directas: sin presión ciudadana, las administraciones costeras carecen de incentivos para invertir en medidas de adaptación preventiva, que son significativamente más baratas que la respuesta reactiva tras un evento extremo. Como subraya el informe de ECODES sobre adaptación al cambio climático, invertir en adaptación ahorra dinero a largo plazo, pero esta inversión requiere apoyo social que solo puede venir de la comprensión real del riesgo.

Los eventos climáticos extremos recientes en España — incluyendo las DANA (Depresiones Aisladas en Niveles Altos) de 2024 que devastaron parte de la provincia de Valencia — han demostrado el poder de la experiencia directa para transformar la percepción del riesgo. Sin embargo, depender de las catástrofes como mecanismo de concienciación es inaceptable tanto ética como prácticamente: el coste humano y económico es inasumible. La herramienta propuesta busca precisamente simular esa experiencia directa — ver tu lugar afectado — sin el coste real de una catástrofe, creando una experiencia de alto impacto emocional pero sin consecuencias materiales.

Las investigaciones en psicología de la percepción de riesgos naturales (Slovic, 1987; Kasperson et al., 1988) demuestran que la respuesta emocional a un riesgo es el mejor predictor de la disposición a tomar medidas preventivas. Las representaciones abstractas (estadísticas, gráficos) generan respuestas cognitivas, pero no emocionales; las representaciones visuales concretas y personales generan ambas, multiplicándose el efecto motivador.

7. IA PARA INFERIR LA SUBIDA DEL NIVEL DEL MAR

7.1. *Machine learning para predicción del nivel del mar*

La aplicación de técnicas de inteligencia artificial a la predicción del nivel del mar ha experimentado un crecimiento exponencial en la última década. Una revisión exhaustiva publicada en *Archives of Computational Methods in Engineering* (Bahari et al., 2023) documenta la evolución desde los primeros modelos estadísticos hasta las arquitecturas de *deep learning* más sofisticadas.

Redes neuronales artificiales (ANN)

Los primeros trabajos utilizaron redes neuronales multicapa (MLP) para modelar la relación no lineal entre variables climáticas de entrada (temperatura del mar, presión atmosférica, viento, precipitación) y el nivel del mar. Estos modelos demostraron capacidad para capturar patrones complejos no accesibles mediante regresión lineal (das Chagas Moura et al., 2010).

Redes LSTM y *deep learning*

Las redes Long Short-Term Memory (LSTM) representan el avance más significativo en predicción temporal del nivel del mar. Su arquitectura permite capturar dependencias a largo plazo en series temporales, gestionando el problema del gradiente que se desvanece propio de las redes recurrentes simples (Gers et al., 1999). Estudios recientes demuestran que los modelos LSTM alcanzan predicciones precisas a corto y medio plazo, con RMSE significativamente inferiores a los métodos estadísticos clásicos (Zitouni et al., 2025, Frontiers in Environmental Science).

El estudio de Zitouni et al. (2025) evalúa modelos ARIMA y LSTM para predicción del nivel del mar en los Emiratos Árabes Unidos, incluyendo una interfaz web interactiva para la visualización de áreas potencialmente inundadas. Este enfoque integrado de predicción y visualización es un antecedente directo de la herramienta propuesta en el presente informe.

Enfoques de ensamble y híbridos

Los trabajos más recientes combinan múltiples modelos para mejorar la precisión. Modelos de ensamble ponderado que integran SARIMAX, LSTM y suavizado exponencial han demostrado errores de prueba tan bajos como 0,005 en pérdida normalizada (Elneel et al., 2024). Las técnicas más exitosas incluyen la hibridación, el modelado por ensamble, la descomposición de datos y la optimización de algoritmos.

Predicción multidecadal con *clustering* espectral

Un trabajo publicado en *Artificial Intelligence for the Earth Systems* (2024) por un equipo de la NASA desarrolla un marco de aprendizaje supervisado basado en redes neuronales totalmente conectadas (FCNN) para predecir tendencias del nivel del mar 30 años en el futuro a resolución espacial de 2°. El método incorpora datos de altímetros y simulaciones de modelos climáticos de gran ensamble (Large Ensembles). Se utiliza *clustering* espectral para segmentar el océano en regiones con dinámicas similares, entrenando un modelo ML dedicado por región, lo que mejora significativamente las predicciones frente a un modelo único global.

7.2. Machine learning para análisis regional

Nieves et al. (2021, Scientific Reports) presentan un enfoque de machine learning para predicción del nivel del mar costero regional que combina procesos gaussianos (GP) y redes neuronales recurrentes (RNN). Las RNN capturan comportamiento dinámico y efectos de memoria, realizando predicciones más allá de los datos de entrenamiento sin necesidad de datos adicionales. Este enfoque demuestra la utilidad del ML para estimar la tendencia probable del nivel del mar regional a corto y medio plazo.

Guillou et al. (2021, Continental Shelf Research) aplican métodos de ML a la predicción del nivel del mar en la zona superior de un estuario, comparando regresión múltiple y perceptrón multicapa. Ambos métodos muestran buen rendimiento utilizando solo cuatro variables de entrada (coeficiente mareal, presión atmosférica, velocidad del viento y caudal fluvial).

Una revisión publicada en *Science of the Total Environment* (2024) realiza el análisis más completo de métodos de ML para modelización y predicción del cambio del nivel del mar. Sus hallazgos clave incluyen:

- **Superioridad del *deep learning*:** Las redes neuronales artificiales, especialmente los modelos de *deep learning* y sus variantes híbridas, superan a las técnicas de regresión tradicional y a los métodos de ML más simples en la predicción a corto plazo de anomalías del nivel del mar.

- **Dominancia del aprendizaje supervisado:** Los enfoques de aprendizaje supervisado dominan el campo, mientras que los métodos semi-supervisados destacan en proyecciones a corto plazo.

- **Importancia de datos multi-parámetro:** El rendimiento mejora significativamente cuando se incorporan múltiples parámetros de entrada como precipitación, dirección del viento, corrientes oceánicas y temperatura de la superficie del mar.

- **Extracción automática de características:** El *deep learning* es más efectivo gracias a su capacidad de extracción automática de características y almacenamiento de memoria, reduciendo la necesidad de ingeniería de *features* manual.

Técnica ML	Aplicación principal	Ventajas	Referencia
LSTM	Predicción temporal	Captura dependencias a largo plazo	Zitouni et al. (2025)
FCNN + *Clustering*	Predicción multidecadal global	Especialización regional	AIES NASA (2024)
GP + RNN	Predicción costera regional	Cuantificación de incertidumbre	Nieves et al. (2021)
Ensamble ponderado	Predicción a largo plazo	Robustez, menor error	Grandey et al. (2024)
Random Forest / KNN	Clasificación de niveles	Simplicidad, interpretabilidad	Islam et al. (2019)
SVR + PSO	Predicción de surges	Optimización de hiperparámetros	das Chagas Moura (2010)

***Tabla 4**. Principales técnicas de ML aplicadas a la predicción del nivel del mar.*

7.3. Aplicaciones de IA más allá de la predicción

Además de la predicción directa del nivel del mar, la inteligencia artificial se está aplicando a una variedad de problemas relacionados que enriquecen el ecosistema de herramientas disponibles para la gestión costera:

- **Detección de cambios costeros por satélite:** Redes neuronales convolucionales (CNN) y modelos de segmentación semántica se utilizan para detectar automáticamente cambios en la línea de costa a partir de series temporales de imágenes satelitales (Landsat, Sentinel-2). Proyectos como *CoastSat* (Vos et al., 2019, Environmental Modelling & Software) utilizan ML

para extraer líneas de costa de imágenes satelitales con precisión submétrica, permitiendo cuantificar el retroceso costero a escala global.

- **Predicción de marejadas ciclónicas:** Los modelos de *deep learning* se están mostrando eficaces como emuladores rápidos de modelos hidrodinámicos complejos para la predicción de *storm surge*. Donde un modelo físico completo puede requerir horas de cálculo en un supercomputador, un emulador basado en redes neuronales puede producir resultados comparables en segundos, permitiendo la generación de conjuntos probabilísticos de predicciones.

- **Clasificación de vulnerabilidad costera:** Modelos de *Random Forest* y *Gradient Boosting* se utilizan para clasificar segmentos costeros según su vulnerabilidad a la erosión y la inundación, integrando variables geomorfológicas, oceanográficas, climáticas y socioeconómicas. Estos modelos permiten priorizar las inversiones en protección costera.

- **Optimización de infraestructuras de defensa:** Algoritmos genéticos y aprendizaje por refuerzo se aplican al diseño óptimo de infraestructuras de protección costera (diques, espigones, playas artificiales), minimizando costes y maximizando la eficacia bajo diferentes escenarios de subida del nivel del mar.

- ***Downscaling* climático:** Las técnicas de super-resolución basadas en *deep learning* (GANs, modelos de difusión) se utilizan para mejorar la resolución espacial de las proyecciones climáticas, pasando de la resolución típica de los GCMs (100–200 km) a escalas regionales (1–10 km) necesarias para la planificación costera local.

7.4. Desafíos abiertos en IA para el nivel del mar

A pesar de los avances significativos, persisten desafíos importantes que la investigación actual está abordando:

- **Cuantificación de incertidumbre:** La mayoría de los modelos de ML producen predicciones puntuales sin estimaciones robustas de incertidumbre. Los enfoques bayesianos (como los procesos gaussianos utilizados por Nieves et al., 2021) y las técnicas de Monte Carlo *dropout* ofrecen vías prometedoras pero aún no están generalizadas.

- **Generalización espacial:** Un modelo entrenado con datos de una región costera puede no generalizar bien a otra con dinámicas diferentes. La transferencia de aprendizaje (*transfer learning*) y el aprendizaje multi-tarea son líneas activas de investigación para abordar este problema.

- **Interpretabilidad:** Los modelos de *deep learning* son frecuentemente “cajas negras”, lo que limita la confianza de los científicos y planificadores en sus predicciones. Técnicas de IA explicable (XAI) como SHAP, LIME y *attention*

maps se están aplicando para mejorar la interpretabilidad de los modelos de predicción del nivel del mar.

- **Datos de entrenamiento limitados:** El registro satelital de altimetría tiene solo 30 años, y las series de mareógrafos, aunque más largas, presentan lagunas y heterogeneidades. La augmentación de datos mediante simulaciones físicas y técnicas de pre-entrenamiento auto-supervisado están ayudando a mitigar esta limitación.

- **Eventos extremos:** Los modelos de ML tienden a subestimar los eventos extremos (colas de la distribución) porque estos son, por definición, escasos en los datos de entrenamiento. El uso de funciones de pérdida asimétricas y técnicas de aprendizaje de valores extremos (*Extreme Value Theory* + ML) son enfoques emergentes.

8. APLICAR LA IA PARA LA CONCIENCIACIÓN

8.1. IA generativa para visualización de impactos

La IA generativa abre posibilidades sin precedentes para la comunicación climática. A diferencia de los enfoques tradicionales que requieren modelado 3D manual o fotomontajes artesanales, los modelos generativos pueden producir visualizaciones realistas de escenarios futuros de forma automática y escalable.

- **Modelos de difusión:** Arquitecturas como Stable Diffusion y DALL-E pueden generar imágenes realistas de escenarios de inundación. Sin embargo, su control preciso sobre el nivel exacto del agua es limitado, lo que reduce su utilidad para aplicaciones científicamente rigurosas.

- ***Inpainting* inteligente:** Técnicas de *inpainting* guiado permiten modificar selectivamente regiones de una imagen existente, añadiendo efectos de agua realistas sobre la geometría detectada del terreno.

- ***Vision-Language Models* (VLM):** Los VLM representan el avance más relevante para este proyecto. Al integrar un codificador visual (típicamente un *Vision Transformer*) con un modelo de lenguaje de gran escala, los VLM pueden comprender tanto el contenido visual de una imagen como las instrucciones textuales del usuario, permitiendo manipulaciones semánticas precisas.

Los *Vision-Language Models* son modelos de IA multimodal que fusionan capacidades de visión por computador y procesamiento de lenguaje natural. Estos modelos aprenden a mapear relaciones entre datos textuales y visuales, permitiendo generar texto a partir de entradas visuales o comprender instrucciones en lenguaje natural en el contexto de información visual (IBM, 2025; NVIDIA, 2025).

La mayoría de los VLM modernos siguen una arquitectura de tres componentes:

- **Codificador visual (Vision Encoder):** Típicamente basado en CLIP o SigLIP, utiliza una arquitectura *Vision Transformer* (ViT) que procesa la imagen en parches de 16×16 píxeles, tratándolos como secuencias análogas a tokens lingüísticos. Una imagen de 1024×1024 genera 4.096 tokens visuales.

- **Capa de proyección (*Projector/Adapter*):** Traduce las representaciones del codificador visual al espacio de *embeddings* del modelo de lenguaje. Puede ser

una capa lineal simple (como en LLaVA y VILA) o capas de atención cruzada más complejas (como en Llama 3.2 Vision).

- **Modelo de lenguaje (LLM Backbone):** Recibe tanto los tokens textuales del usuario como los e*mbeddings* visuales proyectados como secuencia unificada, realizando razonamiento *cross-modal* para generar respuestas textuales coherentes.

Para la aplicación de concienciación sobre el nivel del mar, los VLM ofrecen capacidades críticas como la comprensión espacial (identificar el horizonte, la línea de costa, edificios y terreno en una fotografía), la estimación de profundidad y escala (calcular proporciones relativas para simular niveles de agua creíbles), el razonamiento físico (entender cómo interactuaría el agua con las estructuras y el terreno visible), y la generación de instrucciones para edición (producir descripciones precisas de las modificaciones a realizar sobre la imagen).

8.2. Otras aplicaciones de IA para concienciación

- ***Chatbots* climáticos personalizados:** Asistentes conversacionales basados en LLM que pueden adaptar su discurso al nivel de conocimiento, intereses y contexto geográfico del usuario, proporcionando información relevante y personalizada sobre los impactos locales del cambio climático.

- **Simuladores interactivos:** Aplicaciones web que permiten al usuario explorar diferentes escenarios de emisión y visualizar sus consecuencias en mapas interactivos. Herramientas como el IPCC AR6 *Sea Level Projection Tool* de NASA o *Climate Central* ya ofrecen esta funcionalidad a escala global.

- **Realidad aumentada (AR):** Aplicaciones móviles que superponen visualizaciones de inundación sobre la vista real de la cámara, creando experiencias inmersivas. Aunque prometedoras, estas aplicaciones requieren modelos 3D del terreno y su precisión depende del GPS del dispositivo.

- **Narrativas generadas por IA:** Historias personalizadas generadas por modelos de lenguaje que describen cómo sería la vida cotidiana en un futuro afectado por la subida del mar, adaptadas al contexto local del lector.

- **Análisis de redes sociales:** Modelos de NLP que analizan la percepción pública del cambio climático en redes sociales, permitiendo adaptar las campañas de concienciación a las preocupaciones reales de los ciudadanos.

8.3. Herramientas existentes de visualización del nivel del mar

Es importante situar nuestra herramienta en el contexto de las soluciones existentes para la visualización de la subida del nivel del mar:

- ***Climate Central Surging Seas*:** Una de las herramientas más conocidas, permite explorar escenarios de inundación para cualquier ubicación costera de Estados Unidos mediante mapas interactivos basados en DEM. Fortalezas: amplia cobertura, datos de alta resolución. Limitaciones: solo disponible para EE.UU., presentación en mapa 2D (vista cenital), sin personalización con fotos del usuario.

- **NOAA *Sea Level Rise Viewer*:** Visor interactivo que permite seleccionar niveles de subida (de 1 a 10 pies) y visualizar las áreas afectadas sobre imágenes aéreas. Fortalezas: gran precisión topográfica, integración con datos de mareas. Limitaciones: limitado a costas de EE.UU., vista aérea (no a nivel de calle), sin componente emocional personalizado.

- ***Google Earth* + capas de inundación:** Permite superponer capas de inundación sobre el globo de *Google Earth*. Fortalezas: cobertura global, interfaz familiar. Limitaciones: precisión limitada del DEM en muchas regiones, las capas de inundación son estáticas y genéricas, no hay conexión con datos oceanográficos locales.

- ***Flood Map* (floodmap.net):** Herramienta simple que permite seleccionar un nivel de subida y visualizar las áreas inundadas en un mapa. Fortalezas: simplicidad, cobertura global. Limitaciones: baja precisión, presentación 2D, sin datos científicos locales.

Ninguna de estas herramientas ofrece la combinación de personalización con fotografía del usuario, datos oceanográficos locales reales (boyas/mareógrafos), proyecciones científicas regionalizadas y simulación visual mediante VLM que caracteriza nuestra propuesta. La tabla siguiente resume esta comparativa:

Herramienta	Cobertura	Personalización	Datos locales	Vista
Climate Central	EE.UU.	No	Sí (DEM)	Mapa 2D
NOAA Viewer	EE.UU.	No	Sí (DEM + mareas)	Aérea
Google Earth	Global	No	No	Satélite 3D
Flood Map	Global	No	No	Mapa 2D
NASA Sea Level Tool	Global	No	Sí (IPCC)	Gráficos
Nuestra herramienta	España (expandible)	Sí (foto usuario)	Sí (REDMAR + IPCC)	Foto realista

***Tabla 5**. Comparativa de herramientas de visualización del nivel del mar.*

Más allá del nivel del mar, la aproximación metodológica desarrollada en este proyecto es transferible a otros ámbitos de comunicación ambiental. La combinación de datos científicos geolocalizados con VLM para generar visualizaciones personalizadas podría aplicarse a la visualización del retroceso glaciar (fotos de glaciares tomadas por turistas transformadas para mostrar su estado futuro), a la desertificación (fotos de paisajes rurales transformadas para mostrar la aridificación proyectada), al efecto isla de calor urbano (fotos de ciudades con superposición de mapas de temperatura), o a la pérdida de biodiversidad (fotos de ecosistemas con eliminación de especies amenazadas). Cada una de estas aplicaciones requeriría fuentes de datos específicas y adaptaciones del pipeline VLM, pero la arquitectura básica — foto del usuario + datos locales + IA generativa = visualización personalizada — es común y constituye una contribución metodológica del presente proyecto.

9. LA HIPERPERSONALIZA-CIÓN PARA LA CONCIENCIA CLIMÁTICA

La hiperpersonalización en la comunicación climática se fundamenta en décadas de investigación en psicología ambiental, comunicación de riesgos y teoría del procesamiento de información. El concepto central es que la eficacia de un mensaje aumenta exponencialmente cuando se reduce la distancia psicológica entre el receptor y la amenaza (Liberman & Trope, 2008, Construal Level Theory).

La Teoría del Nivel de Constructo establece que los eventos lejanos (en tiempo, espacio, o probabilidad) se procesan de forma abstracta, mientras que los eventos cercanos se procesan de forma concreta y emocional. Aplicado a la subida del nivel del mar, esto significa que mostrar un gráfico global de tendencias (procesamiento abstracto) es significativamente menos impactante que mostrar la playa favorita de una persona inundada (procesamiento concreto).

La propuesta central de este proyecto es radical en su simplicidad: que cada persona pueda subir una fotografía de un lugar costero que conoce y recibir una visualización realista de cómo se vería ese mismo lugar afectado por la subida del nivel del mar, calculada con datos reales y proyecciones científicas. Esta aproximación reúne simultáneamente todos los principios de comunicación eficaz identificados por la investigación:

- **Localidad extrema:** No es un mapa genérico ni una fotografía de archivo; es el lugar que la persona ha elegido personalmente, con el que tiene una conexión emocional directa.
- **Concrección visual:** La imagen resultante es tangible, comprensible al instante, sin necesidad de interpretar gráficos o datos numéricos.
- **Rigor científico:** La subida aplicada no es arbitraria; se calcula a partir de datos históricos reales de la boya o mareógrafo más cercano y de proyecciones validadas científicamente.
- **Transparencia:** El usuario puede ver de dónde proceden los datos (la boya concreta, las series históricas, el modelo de predicción), lo que refuerza la credibilidad.

- **Compartibilidad:** La imagen resultante es inherentemente compartible en redes sociales, generando conversaciones y amplificando el impacto de la concienciación más allá del usuario individual.

Las herramientas existentes de visualización de la subida del nivel del mar (*Climate Central Surging Seas, NASA Sea Level Projection Tool, Google Earth* con capas de inundación) utilizan modelos digitales de elevación (DEM) y mapas 2D para mostrar áreas inundadas. Aunque útiles para la planificación, estas herramientas carecen del impacto emocional de una fotografía personal transformada.

La herramienta propuesta va un paso más allá: toma la fotografía real del usuario (con su perspectiva, encuadre y contenido emocional único) y aplica sobre ella una simulación de inundación basada en datos locales reales, produciendo una experiencia "antes y después" de alto impacto visual y emocional. Ningún sistema actualmente disponible ofrece esta combinación de personalización, rigor científico y automatización mediante IA.

La investigación académica sobre comunicación visual del cambio climático ha crecido significativamente en la última década, proporcionando una base teórica sólida para nuestro enfoque. Sheppard (2012), en su obra de referencia *"Visualizing Climate Change",* establece que las visualizaciones deben ser científicamente precisas, emocionalmente resonantes, localmente relevantes y orientadas a la acción para ser eficaces. Nuestro proyecto cumple los cuatro criterios.

Nicholson-Cole (2005) advierte que el uso de imágenes catastróficas o apocalípticas puede ser contraproducente, generando sentimientos de impotencia que paralizan en lugar de motivar. Por ello, la herramienta se diseña para mostrar el escenario "más probable" (no el peor caso extremo), acompañado de información sobre las acciones que pueden mitigar el problema. El mensaje implícito no es "esto es inevitable y no puedes hacer nada", sino "esto es lo que ocurrirá si no actuamos; todavía estamos a tiempo".

O'Neill y Nicholson-Cole (2009) demuestran que las imágenes icónicas de impactos climáticos (osos polares en témpanos, glaciares retrocediendo) generan concienciación, pero no *engagement* personal. Las imágenes locales y cotidianas, en cambio, activan tanto la preocupación como la autoeficacia percibida. Este hallazgo es el fundamento directo de nuestro enfoque de hiperpersonalización: la imagen de la playa favorita del usuario inundada es infinitamente más eficaz que un oso polar en un témpano de hielo.

9.1. La psicología del "efecto identifiable victim"

La investigación psicológica ha demostrado que las personas responden con mayor intensidad emocional a víctimas identificables que a estadísticas de víctimas anónimas (Jenni & Loewenstein, 1997; Small et al., 2007). Este fenómeno, conocido

como el “efecto de la víctima identificable”, se extiende a los lugares: un lugar identificable y personalmente significativo genera mayor respuesta emocional que un lugar genérico o abstracto.

La herramienta explota este mecanismo psicológico de forma ética y constructiva: al mostrar un lugar que el usuario conoce y valora emocionalmente (su playa, su paseo marítimo, el pueblo costero de sus abuelos), se activa una conexión emocional que las presentaciones genéricas no pueden reproducir. El usuario no ve “una playa cualquiera” inundada: ve su playa. Y esa diferencia es, según la evidencia psicológica, determinante para la motivación a la acción.

9.2. Hiperpersonalización y redes sociales

Un efecto multiplicador crítico de la hiperpersonalización es su potencial de viralización en redes sociales. Las imágenes personalizadas son inherentemente compartibles porque contienen un lugar reconocible para el círculo social del usuario, generan curiosidad y debate (“¿has visto cómo quedará nuestra playa?”), invitan a otros a probar la herramienta con sus propios lugares, y producen un efecto cascada, donde cada usuario se convierte en vector de concienciación.

Estudios de difusión de contenido climático en redes sociales (Pearce et al., 2019) muestran que el contenido visual localizado tiene tasas de interacción significativamente superiores al contenido global o abstracto. Una imagen de la Barceloneta inundada compartida por un vecino de Barcelona tendrá más impacto en su red social que un informe del IPCC, no porque sea más científico, sino porque es más relevante emocionalmente para esa comunidad concreta.

La herramienta incluirá botones de compartición directa en las principales redes sociales (X/Twitter, Instagram, Facebook, LinkedIn, WhatsApp) con texto preformateado que incluya la fuente de los datos y un enlace a la herramienta, fomentando que los receptores del mensaje también la utilicen. Se estima que cada usuario que comparta su visualización alcanzará una media de 150–300 contactos, generando un efecto multiplicador que puede ser monitorizado mediante analíticas de compartición.

10. POSIBILIDADES Y DESAFÍOS TÉCNICOS DE LA ESTIMACIÓN DEL NIVEL DEL MAR MEDIANTE FOTOGRAFÍA MÓVIL Y MODELOS 3D

La ubicuidad de los teléfonos inteligentes de última generación abre una vía inédita para la monitorización colaborativa y la simulación del impacto del cambio climático en las costas. No obstante, derivar mediciones altimétricas precisas del nivel del mar a partir de una lente civil requiere una orquestación compleja de fotogrametría, sensórica inercial y visión por computador.

10.1. Fundamentos Fotogramétricos y Parámetros Intrínsecos de la Cámara

Para que una fotografía deje de ser un plano 2D y se convierta en un instrumento de medición geométrica, es imperativo extraer y normalizar sus parámetros intrínsecos. Los metadatos EXIF (Exchangeable Image File Format) proporcionan el punto de partida: la distancia focal real (f_{real}), el tamaño del sensor y la resolución de la imagen (Salinas, 2024).

La proyección del mundo tridimensional en el plano bidimensional del sensor produce una distorsión de perspectiva. Para calcular la métrica real de los elementos fotografiados respecto al mar, se debe aplicar la equivalencia de la distancia focal a un formato estándar de 35 mm:

$$f_{eq} = f_{real} \times \frac{36 \text{ mm}}{\text{ancho del sensor}}$$.

Conociendo la matriz intrínseca de la cámara, el campo de visión (FOV) y aplicando algoritmos de estimación de profundidad monocular (Depth Estimation), es posible

establecer un mapeo píxel-a-metro continuo en la escena, condicionando siempre que la distancia cámara-sujeto sea calculable matemáticamente (Salinas, 2024).

10.2. Georreferenciación y Orientación Espacial de Alta Precisión (Sensores Extrínsecos)

Las normativas para fotografía georreferenciada exigen conocer no solo las coordenadas geográficas (latitud y longitud), sino la posición absoluta (X, Y, Z) y la pose de la cámara (Roll, Pitch, Yaw) en el momento del disparo (FEGA, 2023).

El gran problema radica en la altitud (Eje Z). El receptor GNSS de un smartphone civil tiene un error vertical de ± 5 metros, invalidando cualquier cálculo centimétrico del mar. Para solucionar esto, el sistema debe recurrir al *Visual Positioning System* (VPS) integrado en APIs como *ARCore Geospatial*. El VPS compara la imagen captada con el gemelo digital de *Google Street View* y *Google Earth 3D*, triangulando características visuales (*Feature Points*) para afinar la altitud EGM96 a un margen de error sub-métrico, la cual debe convertirse al elipsoide WGS84 para estandarizar el cálculo geoespacial (*Google ARCore*, 2023). El giroscopio y el acelerómetro (IMU) proporcionan el vector de gravedad para corregir el ángulo de cabeceo (Pitch), fundamental para determinar dónde interseca la línea de visión con el horizonte marino.

10.3. Integración con Modelos 3D y APIs Geoespaciales

La estimación del nivel de la lámina de agua desde la fotografía se optimiza exponencialmente al proyectar el rayo visual (Raycasting) sobre un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de alta resolución o un modelo 3D del terreno preexistente.

Mediante redes neuronales de segmentación semántica de alto rendimiento, como el *Segment Anything Model* (SAM) o equivalentes, se aísla la máscara correspondiente al "agua" en la fotografía (Blanch et al., 2025). Al cruzar los píxeles del límite agua-tierra de la imagen con el modelo 3D georreferenciado, obtenemos Puntos de Control Terrestre (GCPs) virtuales. Esto permite deducir la cota altimétrica exacta a la que se encuentra la lámina de agua fotografiada sin necesidad de instalar estaciones topográficas físicas en la playa.

10.4. Limitaciones y Problemática Estocástica (Ruido Físico)

A pesar del soporte algorítmico, el uso de smartphones se enfrenta a desafíos inherentes a la dinámica de fluidos costera:

- El **efecto del oleaje** (*Wave Run-up*): Una foto captura un instante (1/500s). El oleaje (*Swash*) y la configuración morfológica de la playa pueden hacer que el nivel de agua en la orilla en ese instante sea hasta 1 metro superior al Nivel Medio del Mar (NMM) real.

- *Refracción atmosférica:* A distancias largas, la curvatura terrestre y la refracción óptica alteran la posición aparente del horizonte.

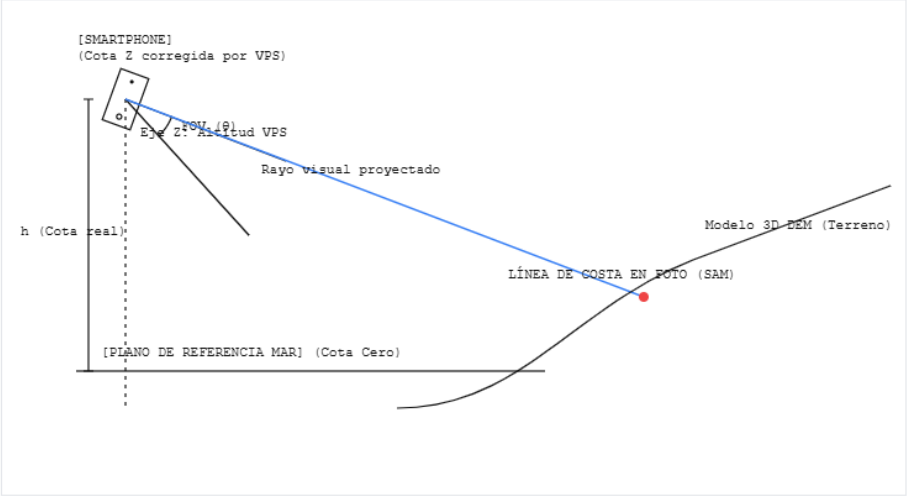
- **Deriva Inercial** (*Drift*): Si el usuario calibra mal la brújula del móvil, el error de orientación angular (Yaw) proyectará el cálculo de distancia a coordenadas erróneas del modelo 3D.

10.5. Esquemas de Geometría Computacional

ESQUEMA 1

RECONSTRUCCIÓN ALTITUDINAL (CÁMARA - PLANO - MAR)

Trazado geométrico y proyección espacial entre el sensor móvil georreferenciado por VPS, la visual de cámara y el plano topográfico DEM.



Eje Z (Altitud): Cota vertical corregida mediante comparación VPS con el gemelo digital terrestre.

Rayo de Proyección: Intersección física de los píxeles segmentados de agua/tierra sobre la malla del terreno DEM.

ESQUEMA 2

FILTRADO DE RUIDO DINÁMICO (INSTANTE VS ABSOLUTO)

Proceso de depuración matemática que descarta factores meteorológicos y oscilaciones temporales para aislar la cota de agua real estable.



ESQUEMA 3

PIPELINE DE SIMULACIÓN MULTIMODAL VLM

Estructura de flujo de datos secuencial desde la captura fotográfica inicial hasta la generación de imágenes predictivas de inundación mediante inteligencia artificial.

01 ENTRADA Y GEORREFERENCIACIÓN

Captura de imagen de smartphone + extracción de metadatos EXIF (focal, sensor) y posicionamiento VPS (coordenadas tridimensionales precisas).

02 MAPEO DE PROFUNDIDAD (DEPTH MAP)

Inferencia monocular de profundidad de la escena. Detección y clasificación de la topología física costera respecto a la cámara.

03 ESTABLECIMIENTO DE REFERENCIA

Cruce de marea astronómica y condiciones climáticas de la DANA/AEMET para fijar el plano del mar físico como Cota Absoluta.

04 FORZAMIENTO CLIMÁTICO (+0.85M)

Simulación de incremento del nivel medio del mar para el año 2100 bajo escenarios de calentamiento global (IPCC / NOAA).

05 PROMPTING VLM & RENDERING

Generación final del escenario simulado inundando selectivamente los píxeles correctos mediante instrucciones físicas dirigidas:

```
"System: Actúa como un motor físico. Inunda las estructuras de la imagen que se encuentren bajo la cota +0.85m.
Renderiza agua fotorrealista sobre la playa y bancos, manteniendo los reflejos originales..."
```

11. DISEÑO TEÓRICO DE LA APLICACIÓN DE SIMULACIÓN VLM Y GENERACIÓN DE ESCENARIOS

El propósito final de la herramienta hiperpersonalizada no es solo calcular la cota actual, sino simular iterativamente y de forma realista cómo interactuará la subida del nivel del mar (SLR) con la geometría local. Para ello, se propone una arquitectura software que fusiona modelos físicos deterministas con la potencia generativa de los Modelos de Visión y Lenguaje (VLM).

11.1. Integración de Variables de Entrada al Modelo Físico

Para aislar el Nivel Medio del Mar (NMM) de anomalías transitorias captadas en la fotografía, el sistema requiere la ingesta automatizada (vía APIs RESTful) de metadatos acoplados al *timestamp* (hora exacta) y a las coordenadas de la foto:

- **Marea Astronómica y Meteorológica:** Conexión con la red REDMAR y el sistema NIVMAR de Puertos del Estado para conocer la cota de pleamar/bajamar en el instante exacto de la foto.
- **Dinámica Convectiva y Viento:** Datos de la estación AEMET más cercana (fuerza del viento, presión atmosférica). Las bajas presiones extremas (como en el caso de DANAs) elevan mecánicamente el nivel del mar localmente (efecto barométrico) (AEMET, 2024).
- **Anomalías de Temperatura Superficial (SST):** Usando *datasets* altimétricos multimodelo como PolyU2025 SLA y predicciones estacionales (Copernicus C3S), se ajusta la dilatación térmica regional que sufre la lámina de agua (Yuan et al., 2025; Pulido et al., 2026).

11.2. Secuencia del Pipeline de Simulación mediante VLM

El motor de la aplicación sigue una arquitectura *End-to-End* en cinco etapas secuenciales:

- **Adquisición y Extracción** (*Input*): El usuario captura la fotografía costera. La app extrae latitud, longitud (VPS), altitud, rotación IMU y matriz intrínseca de la cámara (EXIF).
- **Mapa de Profundidad Relativo** (*Depth Mapping*): Una red neuronal pre-entrenada (ej. Depth Anything) genera un mapa de profundidad denso. Utilizando la pose de la cámara, este mapa se rota para alinear su plano horizontal con el nivel del mar actual de la fotografía. Se establece la topología del terreno: qué elementos de la foto (paseo marítimo, bancos, arena) están a qué diferencia relativa de altura del mar fotografiado.
- **Calibración a Referencia Absoluta:** Al mapa de profundidad 3D inferido se le resta la marea y el oleaje calculados en el Apartado A. El mar de la fotografía pasa a ser una "Cota Cero Absoluta" topográfica.
- **Forzamiento Climático** (*SLR Simulation*): Se interroga al modelo del IPCC (AR6 Sea Level Projection Tool - NASA) con las coordenadas. Se obtiene la delta altimétrica positiva esperada (Ej: $+0.85$ metros para el SSP5-8.5 en 2100). En la matriz tridimensional del mapa de profundidad de la foto, se eleva matemáticamente el nivel del agua $+0.85$ metros.
- ***In-painting* y Renderizado Semántico Generativo** (VLM Prompting): Se introduce en un VLM avanzado (con capacidad ControlNet o In-painting guiado por profundidad) la foto original, la máscara de agua original, la nueva máscara de agua calculada en el paso 4, y un prompt estructurado mediante sistema (System Prompting).

Ejemplo de *Prompt* subyacente*: "Eres un motor de renderizado físico. Basado en el mapa de profundidad provisto, el nivel del agua es ahora 0.85 metros más alto. Genera agua fotorrealista que inunde y cubra los píxeles que corresponden a los escalones, la playa y la base de la papelera. Añade refracción del agua sobre el hormigón hundido y reflejos especulares consistentes con la iluminación del cielo original. Mantén intactos los elementos que superan esa cota de profundidad".*

11.3. Perspectivas Futuras: El potencial de "Genie 3" o Modelos Multimodales Nativos

En el corto y medio plazo, el ecosistema de IA generativa evolucionará hacia arquitecturas como la hipotética iteración avanzada de modelos fundacionales al estilo Gemini (Genie 3). La gran revolución de estos modelos será su comprensión "espacial nativa".

A diferencia del pipeline actual (que requiere algoritmos matemáticos externos para el cálculo 3D, bases de datos separadas y un VLM actuando solo al final como "pintor"), las arquitecturas futuras como Genie 3 actuarán como razonadores espaciales unificados. Como ya demostró el proyecto *Groundsource* al transformar noticias desestructuradas directamente en polígonos geoespaciales interactivos en mapas de Google (Google Research, 2024), Genie 3 podrá:

- Recibir directamente la fotografía cruda y su *timestamp*.
- Entender intrínsecamente la geolocalización, auto-consultar el modelo climático de la zona sin APIs puente y extraer la topografía visual infiriendo la cámara en espacio tridimensional de forma autónoma.
- Comprender el comportamiento volumétrico de los fluidos (mecánica de fluidos nativa en el espacio latente), renderizando cómo las olas colisionarían de forma realista contra un muro de contención en el escenario futuro inundado, sin necesidad de calcular un *Depth Map* intermedio o usar *ControlNet*.

Esto transformará la aplicación de una cadena de microservicios complejos a una simple llamada unificada de Inferencia Inteligente a un modelo multimodal masivo, democratizando el desarrollo de interfaces hiperpersonalizadas para concienciación climática.

12. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

12.1. Visión general

La herramienta se concibe como una aplicación web accesible que permite a cualquier ciudadano, sin conocimientos técnicos, visualizar los efectos de la subida del nivel del mar sobre un lugar costero de su elección. El flujo de usuario se diseña para ser lo más simple posible: subir una fotografía y obtener una visualización del impacto con datos reales.

12.2. Arquitectura funcional

El sistema, denominado **"Visor de Subida del Nivel del Mar"**, está desplegado en producción en la URL **mar-ecodes.ita.es** sobre una máquina virtual del Instituto Tecnológico de Aragón. Su propuesta de valor única combina datos locales reales (estación mareográfica REDMAR más cercana), proyecciones científicas regionales (NASA IPCC AR6 Tool, datos grillados para toda España), elevación real del terreno (Google Elevation API) y visualización fotorrealista generada por un VLM capaz de editar imágenes. La interfaz es 100% web, sin instalación, optimizada para móvil con captura directa desde cámara.

Flujo de usuario (User Journey)

- **Paso 1 — Obtención de la fotografía y geolocalización:** El usuario llega a la aplicación y encuentra una única acción posible: subir o tomar una foto de una zona costera. En móvil, puede pulsar el botón de cámara, que activa directamente capture="*environment"* del input file, abriendo la cámara trasera del dispositivo. En escritorio, puede arrastrar y soltar (drag & drop) o seleccionar desde el explorador de archivos. La librería exifr lee los metadatos EXIF directamente en el navegador, extrayendo coordenadas GPS antes del envío al servidor.

- **Paso 2 — Envío y procesamiento:** La app construye un *FormData* con la imagen, latitud y longitud en decimal, y envía un POST /api/process al *backend*. La interfaz entra en el estado de carga, mostrando un *overlay* con animaciones de olas SVG y un indicador de progreso por pasos.

- **Paso 3 — Pipeline del *backend* (7 etapas):** El servidor procesa la solicitud en secuencia: (1) Lectura del GPS desde EXIF con Pillow o parámetros del formulario; (2) Consulta de elevación del terreno vía Google Elevation API; (3)

Búsqueda de la estación REDMAR más cercana mediante distancia *haversine* sobre 30 puntos, obteniendo nivel medio e histórico máximo; (4) Localización del punto más cercano en la malla de datos grillados del IPCC AR6 para obtener la proyección de subida SSP2-4.5 a 2075; (5) Generación del gráfico de riesgo con matplotlib; (6) Generación de imagen con VLM si la zona no está en categoría NO_RISK; (7) Respuesta JSON con todas las métricas e imágenes en base64.

- **Paso 4 — Visualización de resultados:** La interfaz muestra 4 tarjetas métricas (ubicación, elevación, nivel del mar actual, proyección de subida), una comparativa de imágenes (foto original vs. imagen generada por IA con año 2075 animado), un gráfico de elevación con código de colores, una barra de advertencia con nivel histórico máximo y nivel máximo proyectado, y un *badge* con enlace a la fuente NASA IPCC AR6.

Clasificación de zonas de riesgo

El sistema clasifica automáticamente cada ubicación en tres categorías de riesgo basadas en la comparación entre la elevación del terreno y el nivel del mar futuro proyectado:

Zona	Condición	Comportamiento
NO_RISK	elevation > future_max_sea + 5,0 m	No se llama al VLM. Se muestra un *placeholder* explicativo indicando zona segura.
SAFE	elevation > future_max_sea	El VLM genera una imagen enfatizando zonas bajas anegadas cercanas; el observador permanece sobre el nivel del agua.
FLOODED	elevation ≤ future_max_sea	El VLM genera una imagen donde toda la escena aparece sumergida hasta el nivel máximo proyectado.

***Tabla 6**. Clasificación de zonas de riesgo y comportamiento del sistema.*

La lógica NO_RISK, introducida en la versión 2.05, evita generar imágenes absurdas para lugares muy por encima del nivel del mar proyectado (montañas, mesetas interiores) y reduce el consumo de la API del VLM en casos sin valor añadido.

Datos científicos integrados

Proyecciones NASA IPCC AR6: El archivo spain_sea_level_projections.json contiene datos grillados de proyecciones de subida del nivel del mar relativo a la línea base 1995–2014, para todos los escenarios de emisiones del IPCC AR6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) y los años clave de proyección (2030, 2050, 2075, 2100, 2150). Los datos cubren cinco regiones: Atlántico Norte (7 puntos: Bilbao, Santander, A Coruña, Vigo, Ferrol, Gijón, Vilagarcía), Atlántico Sur (3 puntos: Huelva, Cádiz,

Algeciras), Mediterráneo (9 puntos: Barcelona, Tarragona, Valencia, Alicante, Cartagena, Almería, Motril, Málaga, Ceuta), Baleares (3 puntos: Palma, Ibiza, Mahón) y Canarias (4 puntos: Las Palmas, Santa Cruz de Tenerife, Arrecife, Los Cristianos). Los parámetros fijados en la versión actual son el escenario SSP2-4.5 (emisiones moderadas, trayectoria "continuista") y el año horizonte 2075.

Red REDMAR: Se integran 30 estaciones de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado, organizadas por regiones: Cantábrico (Pasajes, Bilbao, Santander, Gijón, Avilés, Ferrol, A Coruña), Atlántico (Vigo, Vilagarcía, Huelva, Cádiz, Algeciras), Mediterráneo (Málaga, Motril, Almería, Cartagena, Alicante, Valencia, Tarragona, Barcelona), Baleares (Palma, Ibiza, Mahón) y Canarias (Las Palmas, Santa Cruz de Tenerife, Arrecife, Los Cristianos, La Restinga). Para cada estación se almacena el nivel medio y el nivel máximo histórico registrado.

12.3. Arquitectura general del sistema

La arquitectura sigue un patrón clásico de aplicación web con separación *frontend/backend*, *proxy* inverso y servicios externos:

El navegador del usuario ejecuta la SPA de Vue 3 con tres componentes principales (UploadZone, LoadingOverlay, ResultsPanel). Las solicitudes POST /api/process se envían a Nginx (puertos 80/443), que actúa como servidor de archivos estáticos para la SPA y como proxy inverso hacia el backend FastAPI (puerto 8001). El *backend* ejecuta el pipeline de 7 etapas, consultando la Google Elevation API para la altitud del terreno y el VLM multimodal para la generación de la imagen de inundación. Los datos REDMAR y las proyecciones NASA se almacenan localmente como ficheros JSON.

12.4. Requisitos no funcionales

- **Accesibilidad:** Interfaz web responsive compatible con dispositivos móviles y de escritorio. Cumplimiento de WCAG 2.1 nivel AA.
- **Rendimiento:** Tiempo de procesamiento objetivo inferior a 30 segundos desde la subida de la imagen hasta la presentación del resultado.
- **Privacidad:** Las imágenes subidas se procesan en memoria y se eliminan tras la generación del resultado, salvo consentimiento explícito del usuario para su uso en investigación.
- **Escalabilidad:** Arquitectura basada en contenedores que permite escalado horizontal según demanda.
- **Idioma:** Interfaz inicialmente en español con soporte para internacionalización futura.

13. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA

13.1. Stack tecnológico

La herramienta se ha desarrollado con un *stack* tecnológico moderno optimizado para el procesamiento de IA y la experiencia de usuario:

Componente	Tecnología	Justificación
Frontend	Vue 3.5 + Vite 7 + TypeScript 5.9	*Framework* reactivo SPA, build ultra-rápido, tipado estático
GPS en cliente	exifr 7.1.3	Lectura EXIF/GPS en navegador antes del envío
Tipografía web	Inter (Google Fonts)	Variable *weight*, legibilidad óptima
Backend / API	Python 3.11 + FastAPI + Uvicorn	Framework HTTP asíncrono, ASGI server de alto rendimiento
Gestor de procesos	Gunicorn (2 workers)	Worker UvicornWorker, timeout 120s para latencia VLM
Procesamiento imagen	Pillow ≥10.0 + matplotlib ≥3.7	Lectura EXIF, manipulación imagen, gráficos de riesgo
Elevación terreno	Google Elevation API	Altitud real del terreno en coordenadas GPS
VLM multimodal	Google Gemini (adaptable)	Edición fotorrealista de imágenes condicionada por *prompt*
Datos REDMAR	30 estaciones hardcoded	Niveles mareográficos actuales de referencia
Proyecciones NASA	JSON grillado IPCC AR6	Subida regional SSP2-4.5 a 2075
Proxy inverso	Nginx (VM) / nginx:alpine (Docker)	Estáticos Vue, proxy API, TLS, *timeouts* VLM
Contenedorización	Docker + Docker Compose	Despliegue reproducible con *health checks*
DNS/Dominio	mar-ecodes.ita.es (DNS ITA)	Subdominio institucional con HTTPS

***Tabla 7**. Stack tecnológico real de la herramienta en producción.*

13.2. Frontend — Vue 3 + Vite (tema "Ocean Dark")

El *frontend* se implementa como una *Single Page Application* (SPA) con Vue.js 3 utilizando la *Composition* API para una gestión de estado reactiva y modular. La interfaz se organiza en tres vistas principales:

- **Vista de carga:** Zona de arrastrar y soltar (*drag & drop*) para la subida de fotografías, con previsualización instantánea, validación de formato (JPEG, PNG, WebP) y tamaño máximo (20 MB). Detección automática de coordenadas EXIF con *fallback* a selección manual en mapa.
- **Vista de procesamiento:** Pantalla de progreso que muestra las etapas del pipeline en tiempo real: geolocalización, búsqueda de boya, obtención de datos, cálculo de subida, análisis VLM y generación de imagen. Cada etapa incluye una breve explicación educativa.
- **Vista de resultados:** Comparativa interactiva con slider deslizante "antes/después", ficha técnica con los datos utilizados, enlaces a las fuentes de datos originales (Puertos del Estado, IPCC) y botones de compartir en redes sociales y descarga.

13.3. Arquitectura del backend (FastAPI + Uvicorn)

El *backend* se implementa con FastAPI, un *framework* web moderno de Python que proporciona validación automática de datos con *Pydantic*, documentación OpenAPI auto-generada, y soporte nativo para operaciones asíncronas. El servidor ASGI Uvicorn proporciona alto rendimiento con soporte para concurrencia basada en asyncio.

Endpoints principales

La API expone los siguientes *endpoints*:

- **POST /api/upload:** Recibe la imagen, extrae metadatos EXIF y devuelve las coordenadas GPS junto con una previsualización redimensionada.
- **POST /api/locate-buoy:** Recibe coordenadas y devuelve información de las boyas más cercanas (histórica y de predicción), incluyendo distancia, nombre y tipo.

- **GET /api/buoy-data/{buoy_id}:** Obtiene los datos históricos completos de la boya indicada: series de nivel medio, pleamares/bajamares, carreras de marea y tendencia.
- **GET /api/prediction/{buoy_id}:** Obtiene la predicción de nivel del mar a 50 años para la boya indicada.
- **POST /api/simulate:** Recibe la imagen original y los parámetros de subida; invoca el pipeline VLM y devuelve la imagen simulada junto con la ficha técnica.

Pipeline de procesamiento de imagen con VLM

El pipeline de procesamiento de imagen constituye el núcleo innovador del sistema y se ejecuta en las siguientes fases:

- **Fase 1 – Análisis de escena:** El VLM recibe la imagen original junto con un prompt específico que le solicita identificar: la línea de costa o nivel actual del agua, la topografía visible (pendientes, zonas bajas, estructuras), los elementos de referencia para la escala (personas, edificios, vehículos) y la estimación de la perspectiva y punto de vista.
- **Fase 2 – Cálculo de máscara de inundación:** Utilizando la información del análisis de escena y los centímetros de subida calculados, se genera una máscara de inundación que indica qué píxeles de la imagen quedarían bajo el agua. Esta máscara respeta la geometría de la escena: el agua sube uniformemente siguiendo las cotas de elevación detectadas.
- **Fase 3 – Generación de efectos de agua:** Se aplican efectos realistas sobre la máscara de inundación: transparencia parcial del agua (se ven objetos sumergidos superficialmente), reflexión difusa del cielo y entorno en la superficie del agua, ondulaciones y textura de superficie acuosa, turbiedad progresiva con la profundidad, y línea de contacto agua-tierra realista con efectos de orilla.
- **Fase 4 – Composición final:** La imagen con los efectos de agua se fusiona con la imagen original, generando el resultado final. Se añade una marca de agua discreta con el logo del proyecto y la fecha de generación.

13.4. Integración con Puertos del Estado

La integración con los datos de Puertos del Estado se realiza a través de su portal de datos oceanográficos (Portus). Se implementa un módulo de acceso a datos que incluye un índice espacial precalculado de las 42 estaciones REDMAR con sus coordenadas para la búsqueda de la boya más cercana, una caché local de series

históricas para minimizar consultas redundantes, y funciones de cálculo de parámetros derivados (tendencias, extremos, mareas).

Los parámetros obtenidos de cada mareógrafo incluyen: nivel medio del mar (mensual y anual), pleamar máxima astronómica (PMMA), bajamar mínima astronómica (BMMA), nivel medio de las pleamares vivas (NMPMV), nivel medio de las bajamares vivas (NMBMV), carrera de marea máxima, media y mínima, y la tendencia de nivel medio del mar (mm/año) calculada por regresión lineal sobre la serie histórica.

13.5. Modelo de predicción a 50 años

La predicción de la subida del nivel del mar a 50 años se basa en una combinación ponderada de tres fuentes de información:

- **Tendencia local histórica:** Extrapolación de la tendencia calculada a partir de las series de REDMAR, ajustada por la aceleración observada en las últimas décadas.
- **Proyecciones regionalizadas del IPCC AR6:** Se utilizan las proyecciones del escenario SSP2-4.5 (intermedio, considerado “más probable”) para la región costera correspondiente, extraidas de la herramienta NASA IPCC AR6 *Sea Level Projection Tool*.
- **Modelos del Servicio Marino de Copernicus:** Datos complementarios de los modelos operacionales de CMEMS para la región costera española.

El resultado se presenta como la subida más probable (mediana de las tres fuentes) acompañada de un rango de incertidumbre. Para la simulación visual, se utiliza la subida más probable combinada con la marea viva máxima, representando el peor escenario realista recurrente.

13.6. Algoritmo de simulación de inundación

El algoritmo de simulación de inundación constituye la pieza central del pipeline de procesamiento y se diseña para producir resultados visualmente realistas manteniendo la fidelidad científica. El proceso se descompone en cuatro etapas computacionales:

Segmentación semántica de la escena

En la primera etapa, el VLM realiza una segmentación semántica de la imagen, clasificando cada región en categorías relevantes: cielo, agua existente, arena/playa, vegetación, edificios/infraestructuras, terreno rocoso, personas/objetos móviles y

otros. Esta segmentación es fundamental para determinar qué zonas serán afectadas por la subida del agua y cómo se comportará visualmente el agua en cada tipo de superficie. El VLM utiliza su comprensión multimodal para realizar esta segmentación a partir del *prompt*: se le instruye para identificar la línea de costa actual, la geometría del terreno y los elementos que proporcionarán escala (personas, coches, edificios con alturas conocidas).

Estimación de la topografía relativa

La segunda etapa es la más crítica desde el punto de vista de la precisión: estimar la topografía relativa de la escena a partir de una única imagen 2D. Se emplean dos estrategias complementarias. La primera utiliza las capacidades de estimación de profundidad monocular del VLM, que puede inferir distancias relativas y alturas a partir de indicios visuales (perspectiva, tamaño relativo de objetos, gradientes de textura, oclusión). La segunda utiliza los elementos de referencia identificados (personas de altura media 1,70 m, coches de altura media 1,50 m, farolas estándar de 4–6 m) para establecer una escala métrica aproximada. Con esta información, se genera un mapa de elevación relativa: para cada píxel por debajo de cierta altura sobre el nivel del agua actual, se calcula si quedaría sumergido con la subida prevista.

Generación de la máscara de agua

A partir del mapa de elevación relativa y la subida en centímetros calculada, se genera una máscara binaria que indica qué píxeles quedarán bajo el agua. Esta máscara se suaviza mediante un filtro gaussiano para evitar bordes artificiales y se ajusta para respetar la física básica del agua: el nivel es horizontal (corregido por perspectiva), el agua fluye hacia las zonas más bajas y no puede estar a diferentes alturas en zonas conectadas, y los objetos que emergen sobre el nivel del agua (edificios, postes) se mantienen visibles. Se genera también un mapa de profundidad del agua (diferencia entre el nivel del agua y la elevación del terreno) que se utilizará para los efectos de renderizado.

Renderizado de efectos de agua

La etapa final aplica efectos visuales realistas sobre la máscara de inundación mediante técnicas de composición de imagen. Los efectos implementados incluyen:

- **Reflexión especular:** Se genera una versión reflejada verticalmente de la parte superior de la imagen (cielo, edificios) que se superpone sobre la zona inundada con un factor de mezcla dependiente del ángulo de visión, simulando la reflexión de Fresnel.

- **Color y transparencia del agua:** Se aplica una tintación azul-verdosa con transparencia decreciente en función de la profundidad. En zonas poco

profundas (menos de 30 cm), los objetos sumergidos son parcialmente visibles; en zonas profundas, el agua se vuelve opaca.

- **Ondulaciones superficiales:** Se aplica una perturbación senoidal sobre la superficie del agua mediante un mapa de normales procedural que simula pequeñas olas y rizaduras, añadiendo realismo a la superficie plana.

- **Línea de orilla:** En la interfaz agua-terreno se añade un efecto de orilla con espuma sutil y oscurecimiento del terreno inmediatamente adyacente, simulando la humedad del suelo en la zona de transición.

- **Objetos sumergidos:** Los elementos parcialmente sumergidos (bancos, papeleras, coches, vegetación baja) se renderizan con distorsión de refracción en la parte sumergida y una línea de flotación visible.

13.7. Gestión de errores y casos límite

El sistema implementa una gestión robusta de errores y casos límite que pueden surgir durante el procesamiento:

- **Imágenes sin costa visible:** Si el VLM no detecta línea de costa ni masa de agua en la imagen, se informa al usuario de que la fotografía no parece ser de una zona costera y se le invita a subir otra imagen.

- **Geolocalización interior:** Si las coordenadas EXIF corresponden a una ubicación a más de 50 km de la costa, se advierte al usuario y se le ofrece corregir la ubicación manualmente.

- **Ausencia de boya cercana:** Si no existe boya REDMAR en un radio de 100 km, se utiliza la estación más cercana disponible indicando la distancia, o se recurre a datos de altimetría satelital regional.

- **Imágenes de baja calidad:** Imágenes con resolución inferior a 640x480 píxeles o con excesivo ruido se rechazan con una explicación constructiva.

- **Escenas nocturnas o con poca luz:** Las imágenes con iluminación insuficiente se procesan con ajustes de brillo/contraste previos; si la calidad sigue siendo insuficiente, se sugiere al usuario utilizar una foto diurna.

13.8. Infraestructura de despliegue

La herramienta se despliega utilizando *Docker Compose* con la siguiente arquitectura de contenedores:

Contenedor	Servicio	Imagen base	Recursos
frontend	Vue.js SPA (nginx)	nginx:alpine	256 MB RAM, 0.5 CPU
backend	FastAPI + Uvicorn	python:3.11-slim	4 GB RAM, 2 CPU
vlm-worker	Procesamiento VLM	python:3.11 + CUDA	16 GB RAM, GPU (opc.)
redis	Cola de tareas	redis:7-alpine	512 MB RAM, 0.25 CPU
traefik	Reverse proxy + TLS	traefik:v2.10	256 MB RAM, 0.25 CPU

***Tabla 8**. Arquitectura de contenedores Docker de la herramienta.*

El contenedor *vlm-worker* se comunica con el *backend* a través de una cola Redis, permitiendo el procesamiento asíncrono de las imágenes. Esta arquitectura permite escalar horizontalmente los *workers* VLM según la demanda, y mantener la responsividad del *backend* incluso bajo carga elevada. *Traefik* actúa como reverse proxy con terminación TLS automática mediante Let's Encrypt, y gestiona el enrutamiento entre *frontend* y *backend*.

13.9. Tests y aseguramiento de calidad

Se implementa una estrategia de *testing* en múltiples niveles:

- **Tests unitarios (*pytest*):** Cobertura superior al 85% del código *backend*. Se prueban especialmente los cálculos de distancia geodésica a boyas, el *parsing* de datos REDMAR, los algoritmos de cálculo de tendencias y mareas, y la generación de máscaras de inundación.
- **Tests de integración:** Verificación *end-to-end* del pipeline completo con un conjunto de 20 imágenes de referencia de diferentes tipos de costa española (playa arenosa, acantilado, puerto, marisma, zona urbana costera). Se compara el resultado con visualizaciones de referencia validadas por expertos.
- **Tests de rendimiento:** *Benchmarks* de tiempo de procesamiento bajo diferentes cargas. Objetivo: 95% de las solicitudes procesadas en menos de 30 segundos.
- **Tests de accesibilidad:** Auditoría WCAG 2.1 nivel AA con herramientas automáticas (axe-core, Lighthouse) y verificación manual con lectores de pantalla.

13.10. Versión con Google Street View (uso interno ECODES)

Adicionalmente a la versión pública basada en fotografías del usuario, se ha desarrollado una **versión complementaria con integración de *Google Street View*** destinada exclusivamente al uso interno de ECODES. Esta versión permite realizar experimentos de concienciación en **cualquier zona costera del mundo** sin necesidad de desplazarse físicamente al lugar ni depender de que el usuario disponga de fotografías propias.

La versión Street View sustituye la subida de fotografía por un selector de ubicación en mapa interactivo. Una vez seleccionado un punto costero, el sistema captura automáticamente la imagen panorámica de *Google Street View* más cercana, la procesa a través del mismo pipeline de datos (elevación, REDMAR, proyecciones NASA) y genera la simulación de inundación con el VLM. Esto permite al equipo de ECODES preparar materiales de concienciación para cualquier localidad costera previamente a la celebración de talleres, generar bibliotecas de imágenes "antes/después" para uso en presentaciones, informes y redes sociales, realizar análisis comparativos entre diferentes zonas costeras españolas y europeas, y experimentar con el sistema en regiones donde la cobertura de datos NASA e IPCC lo permita.

Esta versión no está publicada en la web pública por razones de licenciamiento de la API de *Google Street View* (cuyo uso está restringido a aplicaciones no comerciales internas) y porque la estrategia de concienciación prioriza la experiencia personalizada del usuario con sus propias fotografías. Sin embargo, constituye un activo de gran valor para la preparación y diseño de campañas de comunicación climática.

13.11. Evolución del producto — Historial de versiones

El desarrollo de la herramienta ha seguido un proceso iterativo documentado en el sistema de control de versiones:

- **v1.0 — Prototipo *Streamlit*:** Primera versión funcional basada en *Streamlit* (~700 líneas en app.py), con interfaz de escritorio sin optimización móvil. El sistema era capaz de tomar una imagen, obtener la altitud del terreno, consultar las estaciones REDMAR y llamar al VLM con un *prompt* básico.

- **Iteraciones de datos:** Mejoras progresivas en la calidad de los datos: gráfico de niveles correcto, mejora de la precisión del JSON de proyecciones NASA (añadiendo más puntos regionales), y ampliación de la red REDMAR de 12 a 30 estaciones.

- **Demo Isla de Buda:** Hito clave de validación con un caso real: la Isla de Buda (Delta del Ebro), zona especialmente vulnerable. Este test confirmó que el flujo completo foto → GPS → elevación → proyección → VLM funcionaba de extremo a extremo con resultados visualmente convincentes.

- **v1.0 Web pública:** Abandono de *Streamlit* y construcción de la arquitectura moderna: Vue 3 + Vite con tema "Ocean Dark", FastAPI con *endpoint* /api/process, y despliegue manual en VM.

- **Dockerización:** Containerización completa con backend/Dockerfile (Python 3.11-slim), frontend/Dockerfile multistage (Node 20 → nginx:alpine), docker-compose.yml con health checks, y configuración nginx-docker.conf para comunicación inter-contenedor.

- **v2.00 — Demo para concurso:** Versión presentada en competición pública, con ajustes de UI, mejoras de UX móvil y refinamiento del *prompt* del VLM.

- **v2.01–2.03 — Mejoras de prompt y HTTPS:** Refinamiento del *prompt* con instrucciones más precisas sobre daños acumulados (corrosión, sal, grietas), diferenciación entre zonas SAFE y FLOODED, soporte HTTPS con certificado Let's Encrypt, y cabeceras de seguridad (HSTS, X-Frame-Options).

- **v2.05 — Versión actual (zona NO_RISK):** Introducción de la lógica de zona segura: si la elevación supera en más de 5 metros el nivel máximo futuro proyectado, no se llama al VLM, evitando imágenes absurdas y reduciendo consumo de API.

13.12. Consideraciones de seguridad y privacidad

Se implementan medidas específicas de seguridad y privacidad en todas las capas del sistema:

- **Gestión de secretos:** Las claves de API (*Google Elevation*, VLM) se gestionan exclusivamente vía variables de entorno (.env), nunca se incluyen en el repositorio (.gitignore), y se provee .env.example como documentación de las variables requeridas.

- **Límites y protecciones:** Nginx limita el tamaño de imagen subida a 20 MB (client_max_body_size). El *backend* valida que el archivo sea una imagen procesable por Pillow. Los errores de seguridad del VLM (content policy) se capturan y registran en gemini_debug.log sin exponer detalles al cliente.

- **Gestión de *timeouts*:** Se configuran *timeouts* en cascada: Gunicorn a 120 s (proceso completo), Nginx proxy_read_timeout a 120 s (espera de respuesta), Nginx proxy_connect_timeout a 10 s (conexión inicial), y la llamada al VLM puede tardar entre 60 y 90 s para la generación de la imagen fotorrealista.

- **Endpoint público:** El endpoint /api/process no requiere autenticación, ya que la aplicación está diseñada como servicio público de concienciación. En despliegues con mayor carga se añadiría *rate limiting* a nivel de Nginx.

13.13. Diseño detallado de la experiencia de usuario (UX)

El diseño de la experiencia de usuario se fundamenta en principios de diseño centrado en el usuario (UCD), adaptados al contexto específico de una herramienta de concienciación climática. Se ha trabajado en colaboración con el equipo de comunicación de ECODES para asegurar que el tono, la estética y el flujo de interacción sean coherentes con los principios de comunicación climática eficaz.

Pantalla de inicio

La pantalla de inicio presenta un mensaje claro y motivador: “¿Cómo se verá tu lugar favorito de la costa en 50 años?”. Se evita el lenguaje alarmista, sustituyéndolo por curiosidad y agencia personal. Un breve texto introductorio (3–4 líneas) explica que la herramienta utiliza datos reales de boyas españolas y proyecciones científicas del IPCC. Se incluye un botón prominente “Subir foto” y, opcionalmente, un carrusel de ejemplos de resultados (imágenes antes/después de localizaciones icónicas) para que el usuario comprenda lo que va a obtener antes de interactuar.

Proceso de carga y confirmación

Tras subir la imagen, el sistema muestra una previsualización con la ubicación detectada en un minimapa. Si las coordenadas EXIF están disponibles, se muestran automáticamente con un pin en el mapa y el nombre de la localidad (geocodificación inversa). El usuario puede confirmar la ubicación o ajustarla manualmente arrastrando el pin. Si no hay EXIF, se presenta un mapa interactivo a pantalla completa para que el usuario localice el punto. En ambos casos, se muestra la distancia a la boya REDMAR más cercana y su nombre, reforzando la transparencia sobre las fuentes de datos.

Pantalla de procesamiento educativo

La pantalla de procesamiento se diseña como una experiencia educativa en sí misma. Mientras se ejecuta el pipeline (objetivo: menos de 30 segundos), el usuario ve una serie de pasos animados, cada uno acompañado de una cápsula informativa breve. Por ejemplo: durante la búsqueda de la boya, se muestra un dato curioso sobre la red REDMAR; durante la obtención de datos históricos, se presenta la tendencia local con un micrográfico; durante el cálculo de la predicción, se explica brevemente los escenarios del IPCC. Este diseño transforma el tiempo de espera en tiempo de

aprendizaje, mejorando tanto la percepción de velocidad como el efecto educativo de la herramienta.

Pantalla de resultados

El resultado se presenta como una experiencia inmersiva de comparación. Se implementa un slider interactivo horizontal que permite al usuario deslizar entre la imagen original (izquierda) y la imagen con la simulación de inundación (derecha). Este tipo de comparativa *"before/after"* es el formato visual más eficaz para comunicar transformaciones del paisaje, según los estudios de Sheppard (2012).

Debajo de la comparativa visual, se presenta una ficha técnica desplegable con los siguientes datos: nombre y ubicación de la boya REDMAR utilizada, distancia entre la foto y la boya, tendencia histórica de subida (mm/año), proyección a 50 años (cm, con rango de incertidumbre), marea viva máxima aplicada (cm), subida total simulada (cm), escenario SSP utilizado, y enlaces directos a las fuentes de datos (Puertos del Estado, IPCC AR6 *Projection Tool*).

Los botones de acción incluyen "Descargar imagen" (alta resolución con marca de agua del proyecto), "Compartir" (redes sociales, con texto preformateado), "Probar con otra foto", y "Saber más" (enlace a recursos educativos de ECODES sobre cambio climático). Se incluye un mensaje final positivo: "El futuro aún depende de nuestras decisiones. Conoce las acciones que puedes tomar.", con enlace a la Comunidad #PorElClima de ECODES.

13.14. Pipeline de procesamiento de datos oceanográficos

El acceso y procesamiento de los datos de Puertos del Estado sigue un pipeline estandarizado que garantiza la calidad y trazabilidad de los datos utilizados en cada simulación:

Inventario de estaciones

Se mantiene un inventario local actualizado de las 42 estaciones REDMAR con sus coordenadas geográficas, fecha de inicio de operación, longitud de la serie disponible, tipo de sensor (radar MIROS, acústico, presión), Autoridad Portuaria responsable, y referencias de nivel (cero REDMAR, cero del puerto, relación con el NMMA de Alicante). Este inventario se actualiza trimestralmente a partir de los informes publicados por Puertos del Estado.

Obtención y validación de datos

Para cada solicitud, se descargan las series históricas de nivel del mar de la estación seleccionada. Los datos se someten a un proceso de validación que incluye: detección y eliminación de valores fuera de rango físico (*spikes*), identificación de periodos de fallo del sensor (datos constantes o ausentes), verificación de la coherencia temporal (saltos no explicados), y comparación con estaciones vecinas para detectar anomalías regionales. Los datos validados se almacenan en caché local durante 24 horas para minimizar consultas redundantes.

Cálculo de parámetros derivados

A partir de las series validadas, se calculan los siguientes parámetros derivados mediante algoritmos estandarizados: nivel medio del mar (NMM) mensual y anual, constantes armónicas de las principales componentes mareales (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1), niveles de referencia (PMMA, BMMA, nivel medio de pleamares/bajamares vivas y muertas), carreras de marea (máxima, media, mínima), tendencia lineal y cuadrática del NMM, y extremos históricos (nivel máximo y mínimo observados con sus fechas).

El cálculo de constantes armónicas se realiza mediante análisis armónico de mínimos cuadrados sobre la serie horaria, utilizando las frecuencias de las principales componentes astronimicas. Estas constantes permiten predecir la marea astronómica para cualquier fecha futura, lo que es esencial para calcular la marea viva máxima que se combinará con la subida proyectada.

14. CONCLUSIONES

El presente informe documenta el diseño y desarrollo de una herramienta innovadora que se sitúa en la convergencia de tres campos en rápida evolución: la ciencia del nivel del mar, la inteligencia artificial generativa y la comunicación climática. Las principales conclusiones que se extraen de este trabajo son:

- **La subida del nivel del mar es un hecho científicamente incontrovertible y se está acelerando.** Los datos de altimetría satelital, mareógrafos y modelos climáticos convergen en que el nivel medio global del mar está subiendo a una tasa actual de 4,62 mm/año, la más rápida en al menos 4.000 años. En España, esta tasa se ha duplicado recientemente hasta los 2,8 mm/año.

- **España es especialmente vulnerable.** Con más de 8.000 km de costa, el 40% de la población en zonas costeras, y pérdidas estimadas de 50.000 millones de euros a finales de siglo, la subida del nivel del mar representa un riesgo sistémico para la economía, el turismo, la biodiversidad y la calidad de vida de millones de españoles.

- **La concienciación ciudadana es insuficiente.** A pesar de las evidencias, la brecha entre conocimiento científico y percepción social sigue siendo amplia. Los enfoques tradicionales de comunicación climática (gráficos, mapas genéricos, informes) no logran generar el impacto emocional necesario para catalizar la acción individual y colectiva.

- **La IA generativa abre una ventana de oportunidad para la hiperpersonalización.** Los *Vision-Language Models* permiten, por primera vez, crear visualizaciones realistas de los impactos climáticos sobre fotografías personales de forma automática y escalable, eliminando la distancia psicológica que limita la eficacia de la comunicación climática tradicional.

- **La herramienta desarrollada integra rigor científico y personalización.** Al combinar datos reales de las boyas y mareógrafos de Puertos del Estado con proyecciones del IPCC y la capacidad de comprensión visual de los VLM, la herramienta ofrece simulaciones que son simultáneamente rigurosas científicamente y emocionalmente impactantes.

- **La validación mediante talleres es esencial.** La eficacia de la herramienta como instrumento de concienciación debe demostrarse empíricamente. Los talleres propuestos permitirán medir cuantitativamente el impacto cognitivo, emocional y conductual de la hiperpersonalización climática, generando evidencia publicable y transferible.

- **La colaboración entre centros tecnológicos y organizaciones de concienciación es un modelo replicable.** La alianza entre ITA (capacidad técnica en IA y Big Data) y ECODES (experiencia en comunicación climática y acceso a comunidades) demuestra el potencial de las colaboraciones transdisciplinares para abordar desafíos complejos como la emergencia climática.

En definitiva, este proyecto demuestra que la tecnología más avanzada puede y debe ponerse al servicio de la concienciación climática. La subida del nivel del mar no es un problema abstracto del futuro: es una realidad en curso que afectará a millones de personas en España y en el mundo. Hacer que cada ciudadano pueda ver ese futuro en los lugares que conoce y quiere es, quizá, la forma más poderosa de transformar la comprensión en acción.

14.1. Limitaciones reconocidas

Es importante reconocer las limitaciones actuales del proyecto para contextualizar adecuadamente los resultados y orientar los próximos pasos:

Precisión de la simulación visual: La estimación de topografía a partir de una única imagen 2D es inherentemente imprecisa. El VLM puede estimar alturas relativas, pero no produce modelos digitales de elevación con precisión centimétrica. Las simulaciones deben entenderse como representaciones aproximadas del impacto, no como predicciones exactas de la línea de inundación.

Dependencia de la calidad de la imagen: Fotografías con mala iluminación, perspectivas muy oblicuas o ausencia de elementos de referencia para la escala producirán simulaciones menos precisas.

Incertidumbre de las proyecciones: Las proyecciones a 50 años del nivel del mar tienen rangos de incertidumbre significativos, especialmente por la contribución incierta de las capas de hielo antárticas. La herramienta utiliza el escenario más probable (SSP2-4.5), pero escenarios alternativos podrían producir resultados sustancialmente diferentes.

Factores locales no considerados: La subsidencia local, la dinámica sedimentaria, los efectos de infraestructuras costeras (diques, espigones) y los cambios en los patrones de oleaje no se integran actualmente en la simulación, aunque podrían modificar significativamente el impacto real.

Estas limitaciones no invalidan la utilidad de la herramienta, pero son esenciales para su uso responsable y para orientar su evolución futura. La comunicación transparente de la incertidumbre es, de hecho, un principio fundamental de la comunicación científica responsable.

15. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Alexander N., (2017). Synthesizing long-term sea level rise projections– the MAGICCsealevel model v2.0. Geosci. Model Dev., 10, 2495–2524, 2017 https://doi.org/10.5194/gmd-10-2495-2017

Bahari, N.A.A.B.S., Ahmed, A.N., Chong, K.L., et al. (2023). Predicting sea level rise using artificial intelligence: A review. Archives of Computational Methods in Engineering, 30, 4045–4062. https://doi.org/10.1007/s11831-023-09934-9

Bamber, J.L. et al. (2019). Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (en Inglés) **116** (23): 11195-11200. doi:10.1073/pnas.1817205116.

Bindoff, N.L., et al., (2007) Section 5.5.1: Introductory Remarks en IPCC AR4 WG1, ed., *Chapter 5: Observations: Ocean Climate Change and Sea Level*, ISBN 978-0-521-88009-1

Climate Central (2023). Surging Seas Risk Zone Map. Princeton, NJ: Climate Central. Disponible en: https://sealevel.climatecentral.org/

Cortés Arbués, I., et al. (2024). Economic impact of sea level rise in EU countries and UK. Scientific Reports. Delft University of Technology.

Dangendorf, S., et al. (2024). Updated global sea level budget extending to 2021. Nature Communications. https://doi.org/10.1038/s41467-024-xxxxx

das Chagas Moura, M., Lins, I.D., Veleda, D., et al. (2010). Sea level prediction by support vector machines combined with particle swarm optimization. 10th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference.

ECODES — Fundación Ecología y Desarrollo (2024). Movilización de la acción climática. Disponible en: https://ecodes.org/hacemos/cambio-climatico/movilizacion

ECODES (2006). Campaña “El clima cambia. ¿Y tú?”. Disponible en: https://ecodes.org/noticias/campana-de-sensibilizacion-en-materia-de-cambio-climatico

Elneel, L., et al. (2024). Forecasting global MSL under Antarctic ice melt influence. Climate Dynamics.

Fox-Kemper, B., et al. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. IPCC AR6 WGI, Chapter 9. Cambridge University Press.

Gers, F.A., Schmidhuber, J., & Cummins, F. (1999). Learning to forget: continual prediction with LSTM. 9th International Conference on Artificial Neural Networks, pp. 850–855.

Gobierno de España — MITECO (2021). Informe sobre cambio climático y zonas costeras. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021–2030.

Grandey, B.S., Dauwels, J., Koh, Z.Y., Horton, B.P., & Chew, L.Y. (2024). Fusion of Probabilistic Projections of Sea-Level Rise. Earth's Future, 12(12). https://doi.org/10.1029/2024EF005295

Greenpeace España (2024). Informe Crisis a Toda Costa 2024. Madrid: Greenpeace.

Greenpeace España (2025). Informe Crisis a Toda Costa 2025. Madrid: Greenpeace.

Grinsted, A., et al. (2021). The transient sensitivity of sea level rise. *Ocean Science* (en Inglés) **17** (1): 181-186. doi:10.5194/os-17-181-2021.

Guillou, N., et al. (2021). Machine learning methods applied to sea level predictions in the upper part of a tidal estuary. Continental Shelf Research, 224, 104473.

Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R.J., & Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. Nature Climate Change, 3, 802–806.

Hamlington, B.D., et al. (2024). Rate of sea level rise doubled over 30 years. NASA Sea Level Change Portal.

Holder, J. (2017). The three-degree world: cities that will be drowned by global warming.

IBM (2025). What Are Vision Language Models (VLMs)? IBM Think. Disponible en: https://www.ibm.com/think/topics/vision-language-models

IPCC (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). Cambridge University Press.

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report, Working Group I. Cambridge University Press.

ITA - Instituto Tecnológico de Aragón (2024). AI & SC Smart Lab. Disponible en: https://www.ita.es/en/rdi/digital-technologies/artificial-intelligence-and-cognitive-systems-laboratory/

Kopp, R.E., et al. (2025). Updated global sea level curve for the Holocene. Nature Geoscience.

Kulp, S.A., & Strauss, B.H. (2019). New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. Nature Communications, 10, 4844.

Leiserowitz, A. (2006). Climate change risk perception and policy preferences. Climatic Change, 77, 45–72.

Lewis, T., (2013). Sea level rise overflowing estimates. Science News.

Liberman, N., & Trope, Y. (2008). The Psychology of Transcending the Here and Now. Science, 322(5905), 1201–1205.

Méndez, F.J., et al. (2004). Impactos en la costa española por efecto del cambio climático. MITECO.

Mengel, M., et al. (2016). Future sea level rise constrained by observations and long-term commitment. Proceedings of the National Academy of Sciences (en Inglés) **113** (10): 2597-2602. doi:10.1073/pnas.1500515113.

Moser, S.C. (2010). Communicating climate change: history, challenges, process and future directions. WIREs Climate Change, 1(1), 31–53.

NASA (2020). Sentinel-6 Michael Freilich satellite returns first sea level measurements. NASA Sea Level Change Portal.

NASA (2025). NASA Analysis Shows Unexpected Amount of Sea Level Rise in 2024. sealevel.nasa.gov.

NASA (2025). Track Sea-Level Changes Anywhere with NASA's New SEA Tool. sealevel.nasa.gov.

NASA Earthdata (2025). ARSET — Sea Level Change Tools for Planning and Decision Support. https://www.earthdata.nasa.gov/learn/trainings/sea-level-change-tools-planning-decision-support

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2011). Synopsis. *Climate Stabilization Targets: Emissions, Concentrations, and Impacts over Decades to Millennia*. Washington, DC: The National Academies Press. p.5. ISBN 978-0-309-15176-4. doi:10.17226/12877. Box SYN-1: Sustained warming could lead to severe impacts.

Nicholson-Cole, S.A. (2005). Representing climate change futures: a critique on the use of images for visual communication. Computers, Environment and Urban Systems, 29(3), 255–273.

Nieves, V., et al. (2021). Predicting regional coastal sea level changes with machine learning. Scientific Reports, 11, 7650. https://doi.org/10.1038/s41598-021-87460-z

NVIDIA (2025). What are Vision-Language Models? NVIDIA Glossary. Disponible en: https://www.nvidia.com/en-us/glossary/vision-language-models/

O'Neill, S., & Nicholson-Cole, S. (2009). "Fear won't do it": Promoting positive engagement with climate change through visual and iconic representations. Science Communication, 30(3), 355–379.

Puertos del Estado (2024). REDMAR: Red de Mareógrafos. Conjunto de datos INT_3. Disponible en: https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT_3.pdf

Puertos del Estado (2024). Servicios de Oceanografía. Disponible en: https://www.puertos.es/en/services/oceanography

Rahmstorf, S., et al. (2012). Comparing climate projections to observations up to 2011. Environmental Research Letters, 7(4), 044035.

Rignot, E., et al., (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **116** (4): 1095-1103. doi:10.1073/pnas.1812883116.

Roeser, S. (2012). Risk communication, public engagement, and climate change. Public Understanding of Science, 21(4), 468–482.

Scannell, L., & Gifford, R. (2013). Personally Relevant Climate Change: The Role of Place Attachment and Local Versus Global Message Framing. Environment and Behavior, 45(1), 60–85.

Sea level to increase risk of deadly tsunamis. *UPI* . (2018).

Sea Level Rise. National Geographic. (2017).

Sea level rise poses a major threat to coastal ecosystems and the biota they support. *birdlife.org*. Birdlife International. 2015.

Sheppard, S.R.J. (2012). Visualizing Climate Change: A Guide to Visual Communication of Climate Change. Routledge.

Thomsen, Dana C.; Smith, Timothy F.; Keys, Noni (2012). «Adaptation or Manipulation? Unpacking Climate Change Response Strategies». *Ecology and Society* (en Inglés) **17** (3). doi:10.5751/es-04953-170320.

Törnqvist, T.E., et al. (2025). Evaluating IPCC Projections of Global Sea-Level Change From the Pre-Satellite Era. Earth's Future, 13. https://doi.org/10.1029/2025EF006533

Vargas, M., et al. (2023). Aceleración del ritmo de subida del nivel del mar en la península ibérica, Canarias y Baleares. Geosciences, IEO-CSIC / IMEDEA.

Vermeer, M., & Rahmstorf, S. (2009). Global sea level linked to global temperature. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(51), 21527–21532.

WCRP Global Sea Level Budget Group (2018). Global sea-level budget 1993–present. *Earth System Science Data* (en Inglés) **10** (3): 1551-1590. doi:10.5194/essd-10-1551-2018.

Weber, E.U. (2006). Experience-Based and Description-Based Perceptions of Long-Term Risk. Climatic Change, 77, 103–120.

World Economic Forum (2025). Global Risks Report 2025. Geneva: WEF.

Zitouni, M.S., Elneel, L., Albakri, N.A., et al. (2025). Forecasting sea level rise using enhanced deep learning models. Frontiers in Environmental Science. https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1552834

CIS — Centro de Investigaciones Sociológicas (2023). Barómetro de percepción social del cambio climático. Estudio nº 3416. Madrid.

Jenni, K., & Loewenstein, G. (1997). Explaining the Identifiable Victim Effect. Journal of Risk and Uncertainty, 14(3), 235–257.

Kasperson, R.E., et al. (1988). The Social Amplification of Risk: A Conceptual Framework. Risk Analysis, 8(2), 177–187.

Pearce, W., et al. (2019). Visual cross-platform analysis: digital methods to research social media images. Information, Communication & Society, 23(2), 161–180.

Sánchez-Arcilla, A., et al. (2016). Climatic and anthropogenic factors affecting the evolution of the Ebro Delta. Ocean & Coastal Management, 141, 53–68.

Slovic, P. (1987). Perception of Risk. Science, 236(4799), 280–285.

Small, D.A., Loewenstein, G., & Slovic, P. (2007). Sympathy and callousness: The impact of deliberative thought on donations to identifiable and statistical victims. Organizational Behavior and Human Decision Processes, 102(2), 143–153.

Gobierno de España (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021–2030. MITECO. Madrid.

Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética. BOE núm. 121, de 21 de mayo de 2021.

ENIA — Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (2020). Gobierno de España. Madrid.

Aragón EDIH (2022). Centro de Innovación Digital de Aragón. Disponible en: https://www.aragonedih.com/

Banco Mundial (2021). Groundswell Part 2: Acting on Internal Climate Migration. Washington, DC.

Puertos del Estado (2025). Sistema SAMOA: Sistema de Apoyo Meteorológico y Oceanográfico. Disponible en: https://www.puertos.es/

Fundaciones por el Clima (2024). Pacto por la emergencia climática y la justicia social. Disponible en: https://fundacionesporelclima.org/

AEMET. (2024). El cambio climático antropogénico amplificó la virulencia y extensión de las lluvias extremas en la DANA. Agencia Estatal de Meteorología.

Blanch, X. et al. (2025). AI Image-based method for a robust automatic real-time water level monitoring. ISPRS.

FEGA. (2023). Guía resumen de la práctica de fotografía georreferenciada. Fondo Español de Garantía Agraria.

Google ARCore. (2023). Usa las anclas geoespaciales para posicionar contenido real en Unity. Google for Developers.

Google Research. (2024). Introducing Groundsource: Turning news reports into data with Gemini. Google AI Blog.

Pulido, M. et al. (2026). Un nuevo sistema avanzado con IA anticipa sequías con hasta seis meses de antelación. Earth Systems and Environment.

Salinas López, I. (2024). Estimación de la distancia cámara-sujeto en fotografías faciales mediante técnicas de aprendizaje profundo. TFG Universidad de Granada.

Yuan, J., Chen, J., Peng, D. (2025). PolyU2025 SLA: A global 0.25°x0.25° monthly sea level anomaly dataset determined from satellite altimetry. Earth System Science Data.

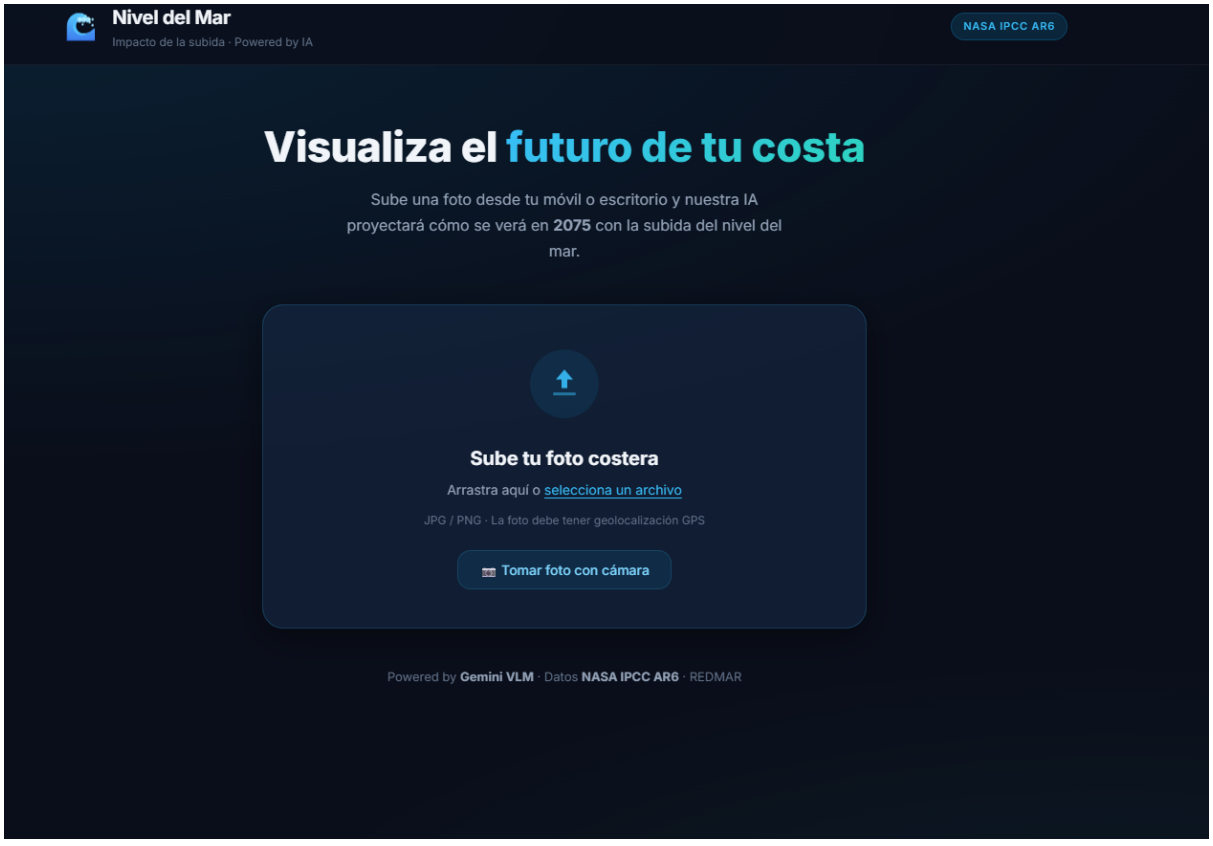
16. ANEXO A. GLOSARIO DE TÉRMINOS

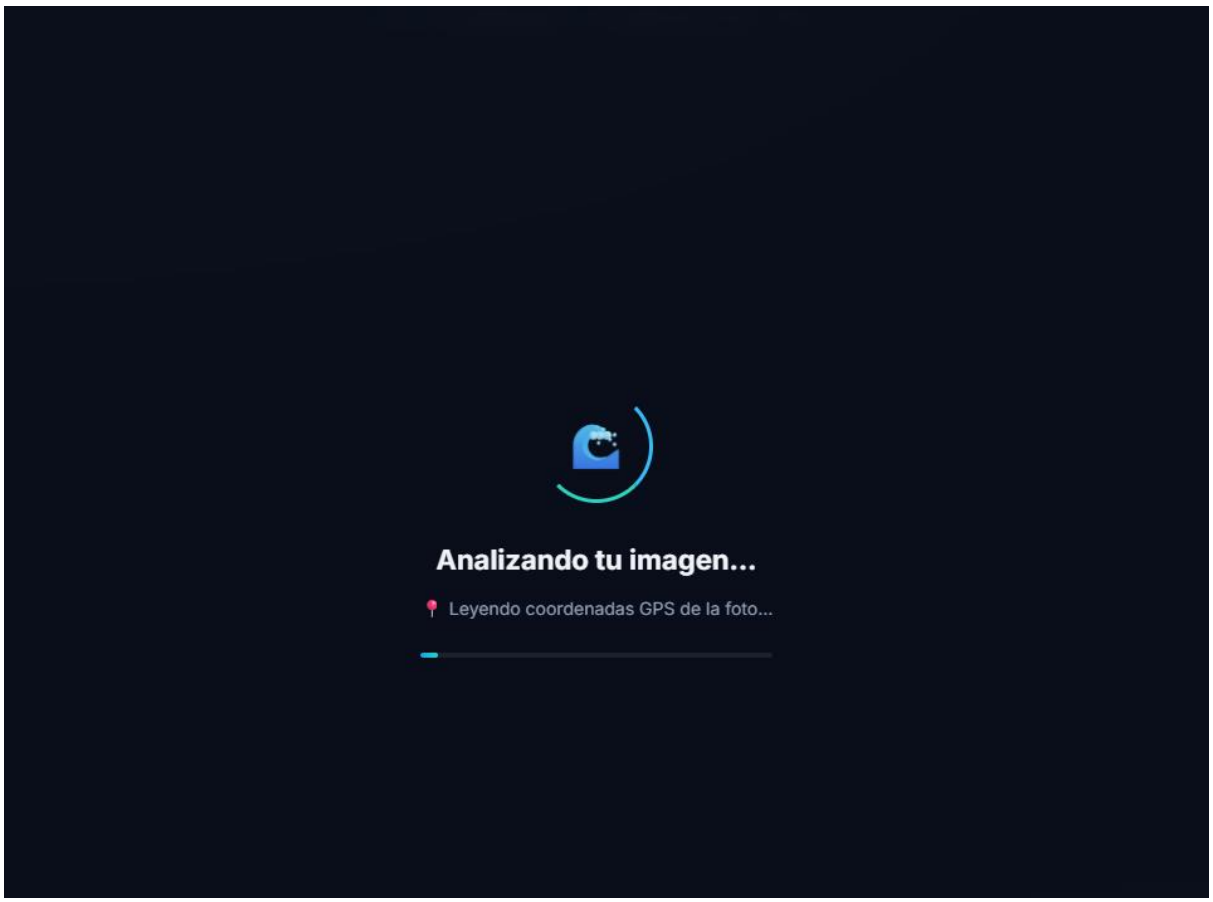
Término	Definición
AEMET	Agencia Estatal de Meteorología de España
AR6	Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2021–2023)
ASGI	Asynchronous Server Gateway Interface; estándar Python para servidores web asíncronos
BMA	Bayesian Model Average; técnica estadística de combinación de modelos
BMMA	Bajamar mínima astronómica
CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
DEM	Modelo Digital de Elevación
ECMWF	Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio
EXIF	Exchangeable Image File Format; metadatos de imágenes digitales
FCNN	Fully Connected Neural Network; red neuronal totalmente conectada
GLOSS	Global Sea Level Observing System
GMSL	Global Mean Sea Level; nivel medio global del mar
GRACE-FO	Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (misión satelital NASA)
HAMSOM	Hamburg Shelf Ocean Model; modelo de circulación marina
IEO-CSIC	Instituto Español de Oceanografía (CSIC)
IGN	Instituto Geográfico Nacional de España
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LSTM	Long Short-Term Memory; tipo de red neuronal recurrente
ML	Machine Learning; aprendizaje automático
NIVMAR	Sistema de predicción del nivel del mar de Puertos del Estado
PMMA	Pleamar máxima astronómica

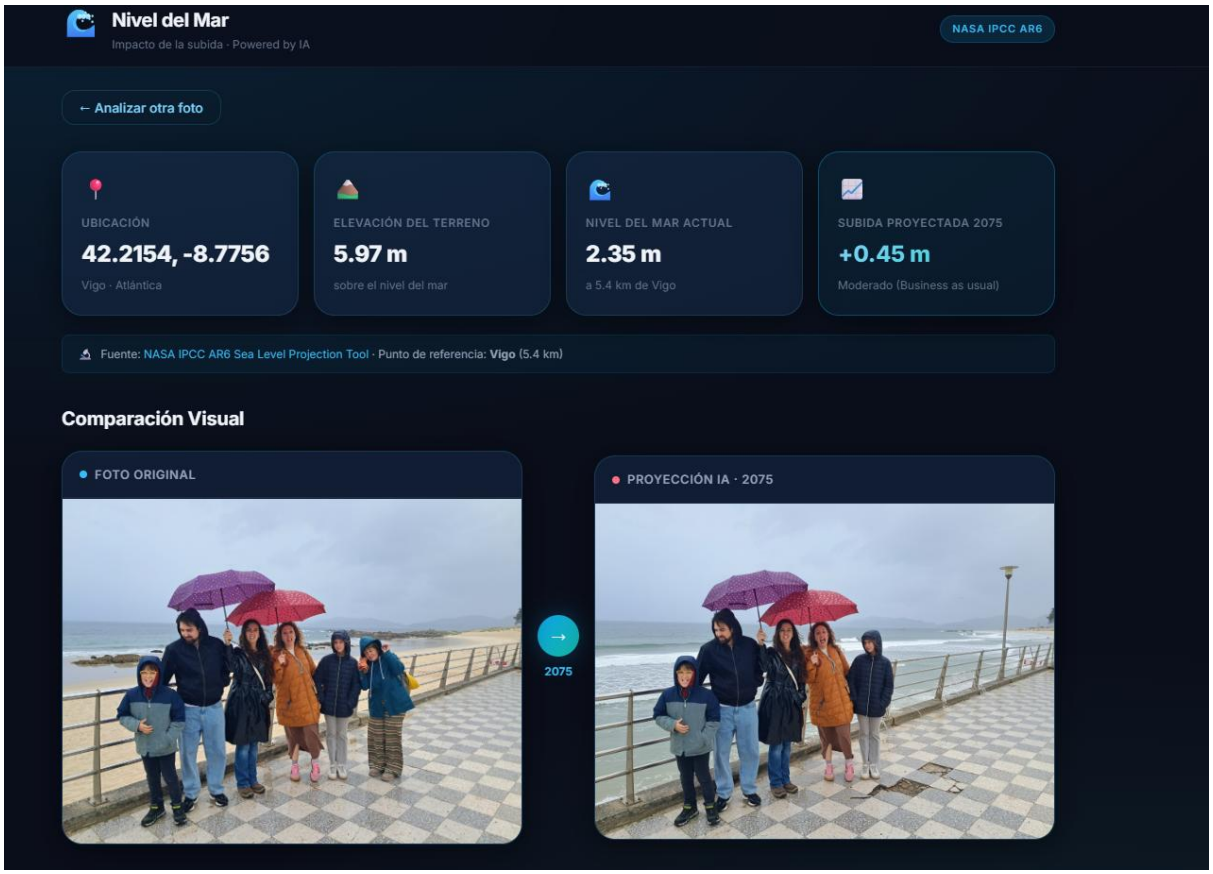
PSMSL	Permanent Service for Mean Sea Level
REDMAR	Red de Mareógrafos de Puertos del Estado
SSP	Shared Socioeconomic Pathways; escenarios socioeconómicos del IPCC
VLM	Vision-Language Model; modelo de visión-lenguaje
ViT	Vision Transformer; transformador visual

***Tabla 9**. Glosario de términos y acrónimos utilizados en el informe.*

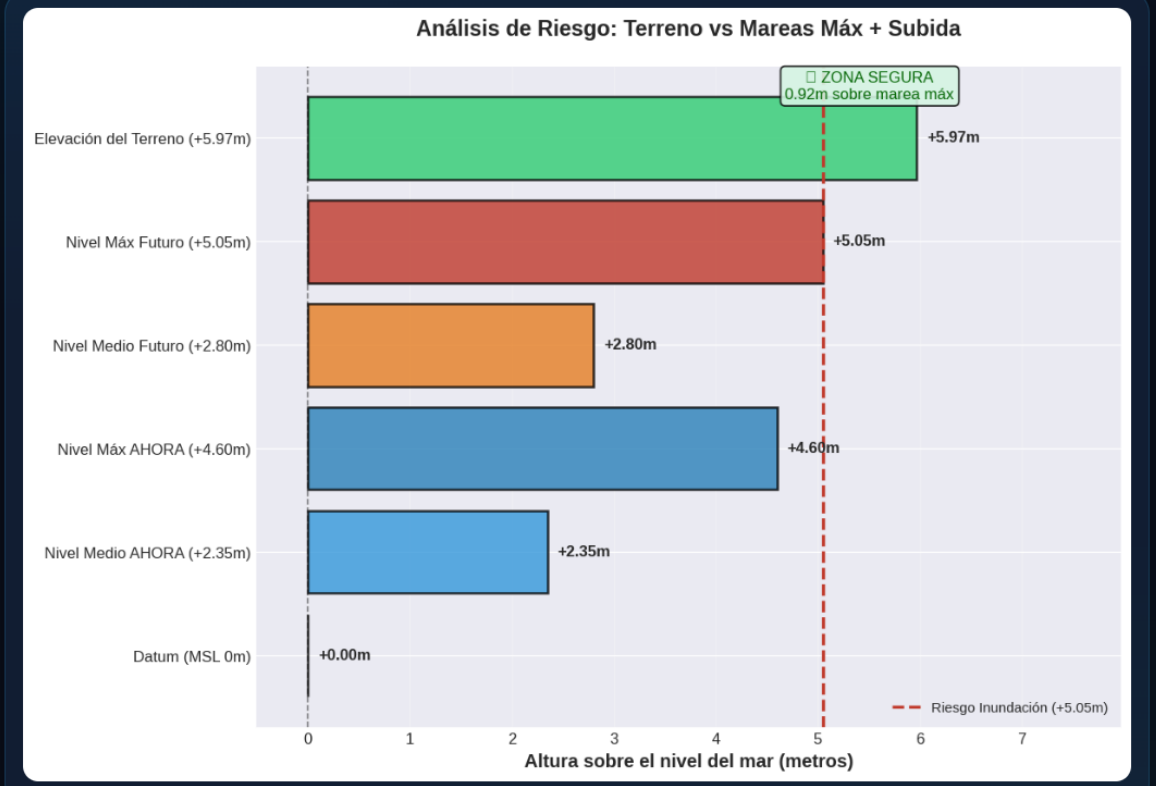
17. ANEXO B. HERRAMIENTA VLMAR PARA USUARIOS




Analizando tu imagen...
Leyendo coordenadas GPS de la foto...

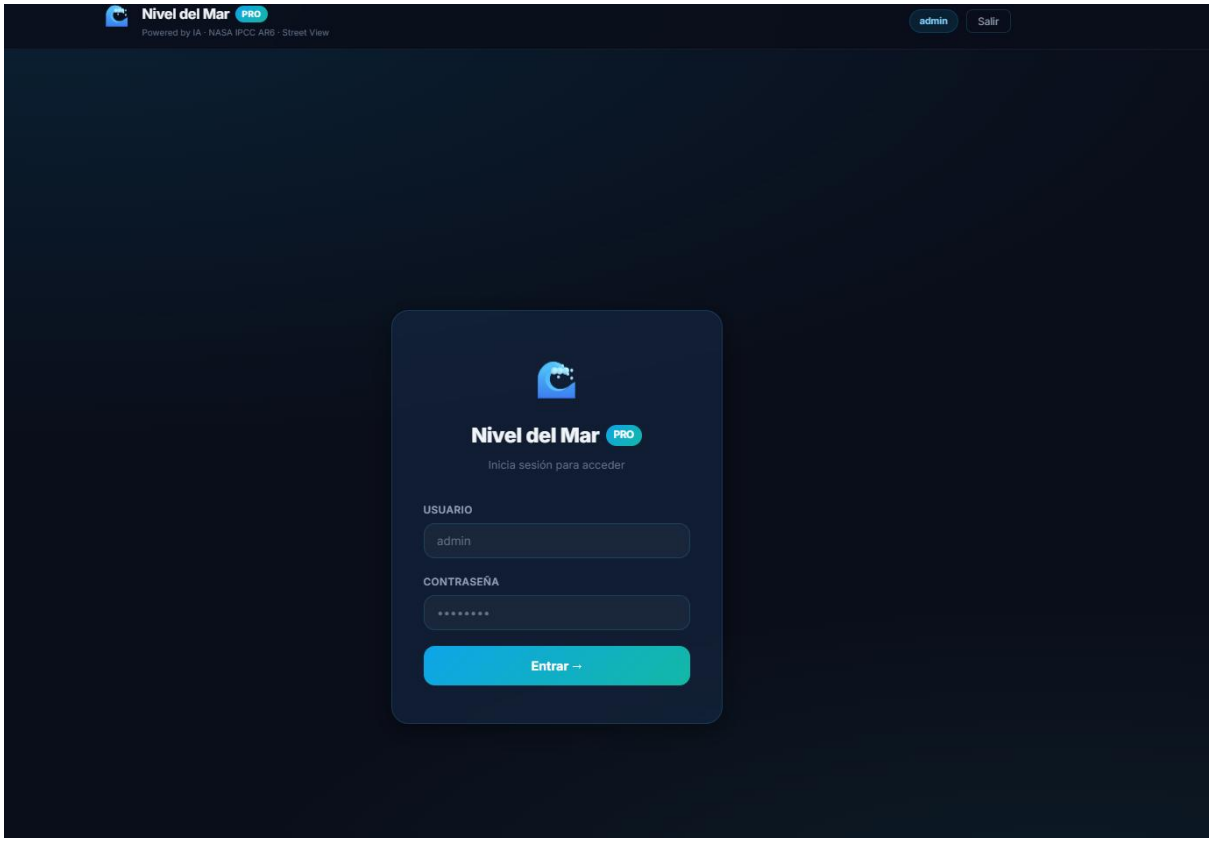

Nivel del Mar
Impacto de la subida · Powered by IA
NASA IPCC AR6
← Analizar otra foto
UBICACIÓN
42.2154, -8.7756
Vigo · Atlántica
ELEVACIÓN DEL TERRENO
5.97 m
sobre el nivel del mar
NIVEL DEL MAR ACTUAL
2.35 m
a 5.4 km de Vigo
SUBIDA PROYECTADA 2075
+0.45 m
Moderado (Business as usual)
Fuente: NASA IPCC AR6 Sea Level Projection Tool · Punto de referencia: Vigo (5.4 km)
Comparación Visual
FOTO ORIGINAL
2075
PROYECCIÓN IA · 2075

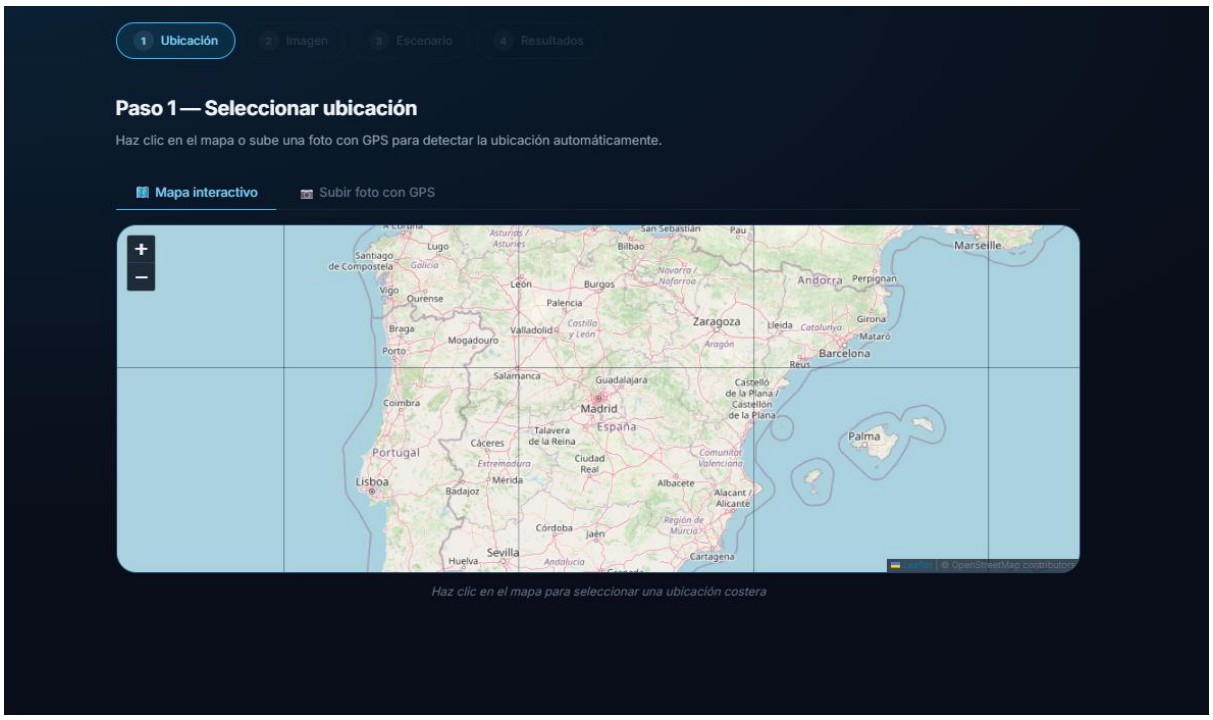
Análisis de Riesgo: Terreno vs Nivel del Mar

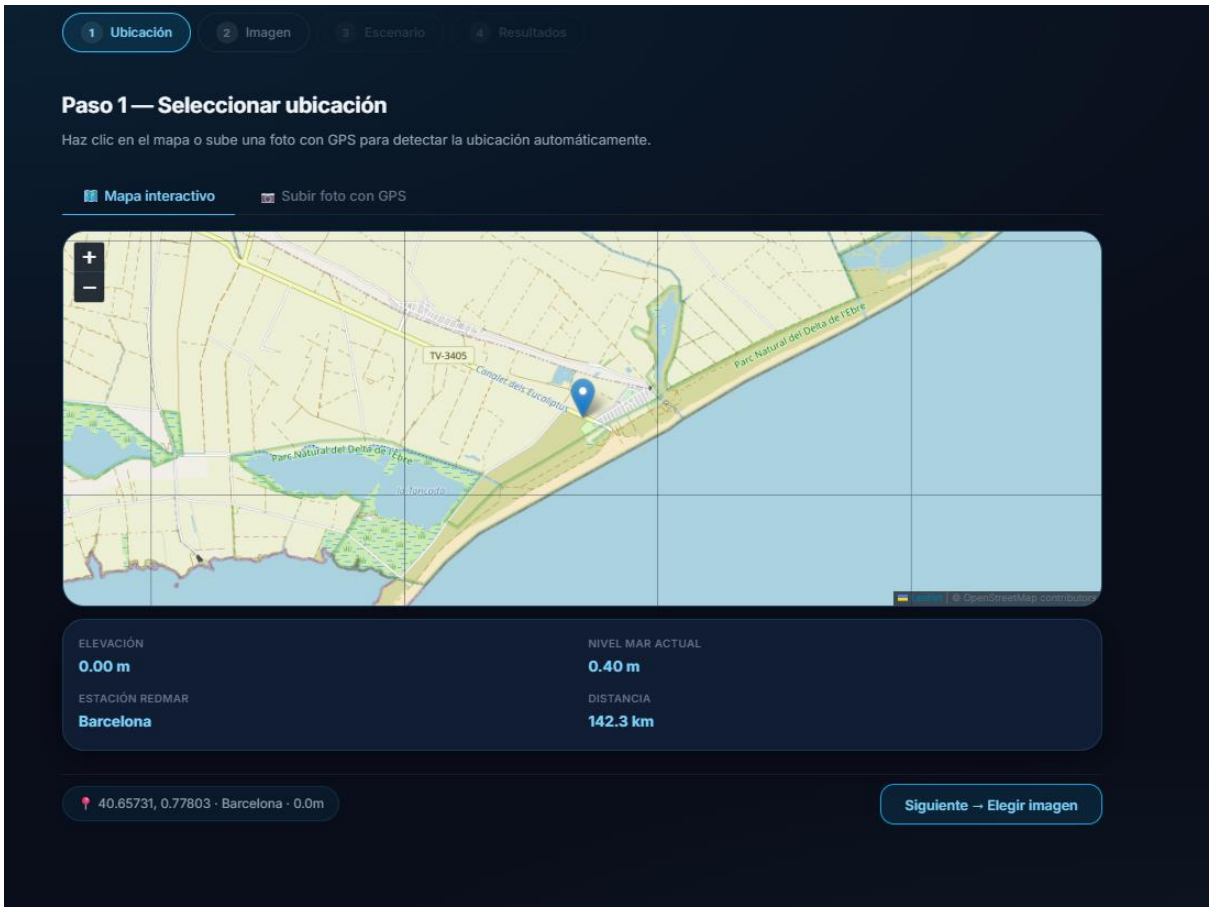


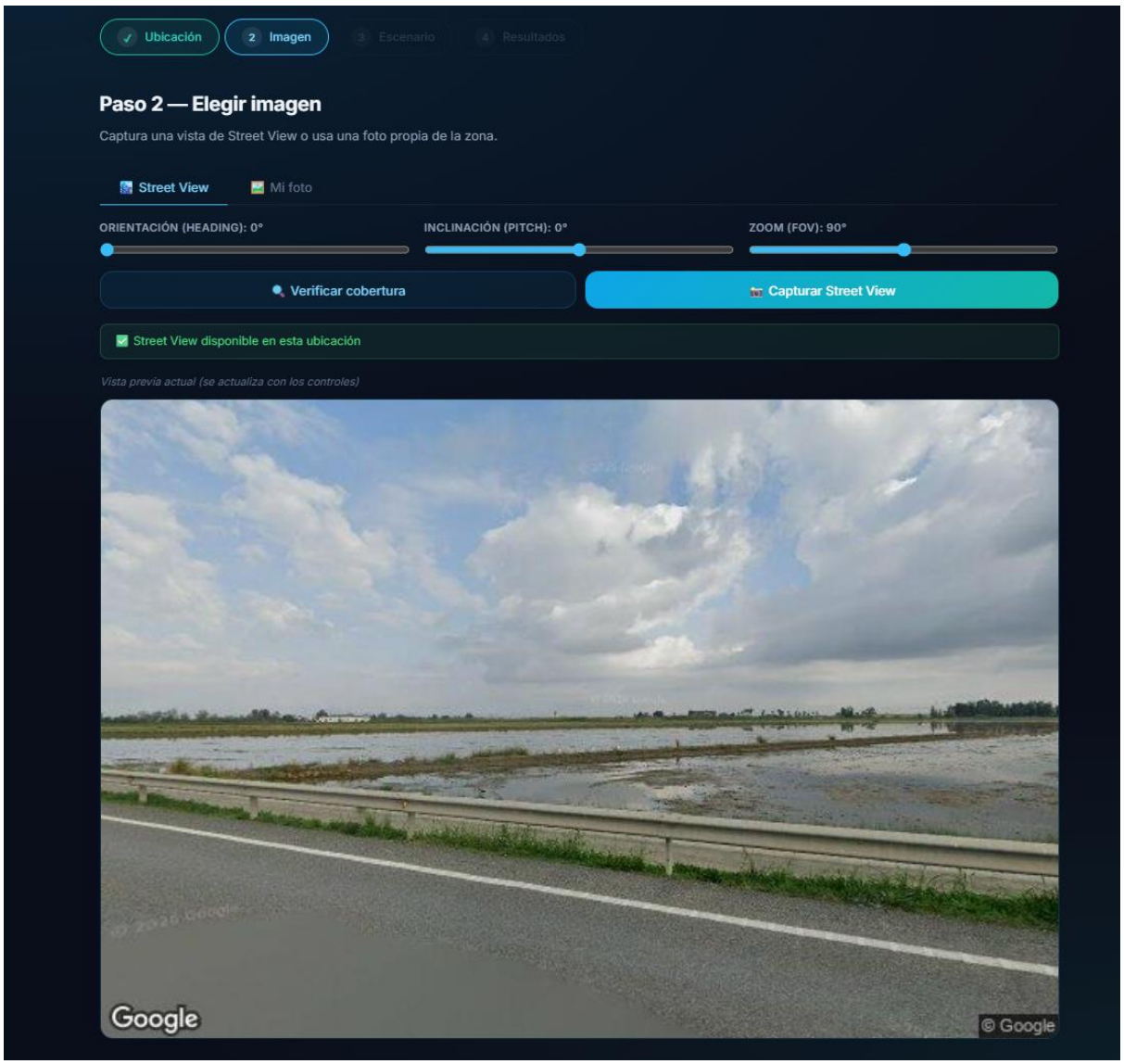
⚠ Nivel máximo histórico en **Vigo**: **4.60 m** (mareas vivas). Con la subida proyectada el máximo alcanzaría **5.05 m**.

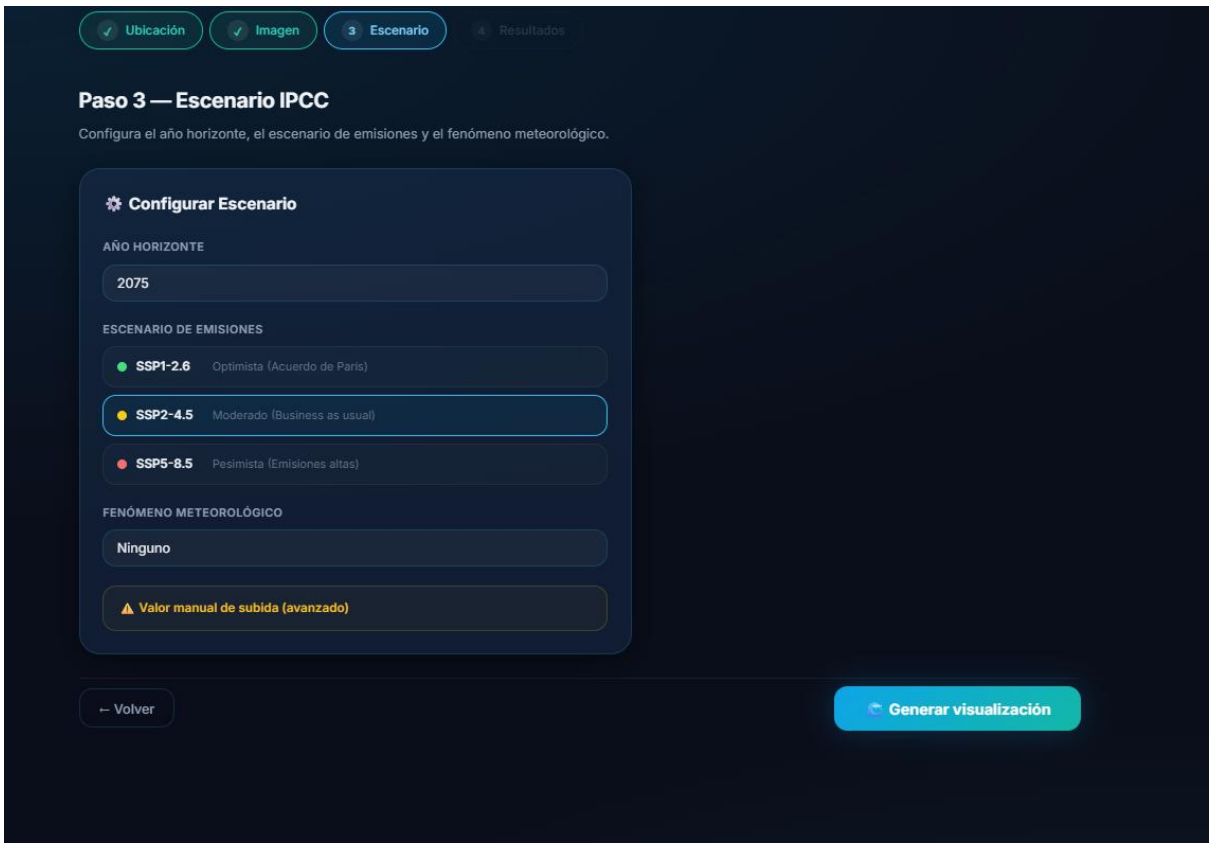
18. ANEXO C. HERRAMIENTA VLMAR-PRO PARA SIMULACIÓN A GRAN ESCALA DE ENCLAVES COSTEROS

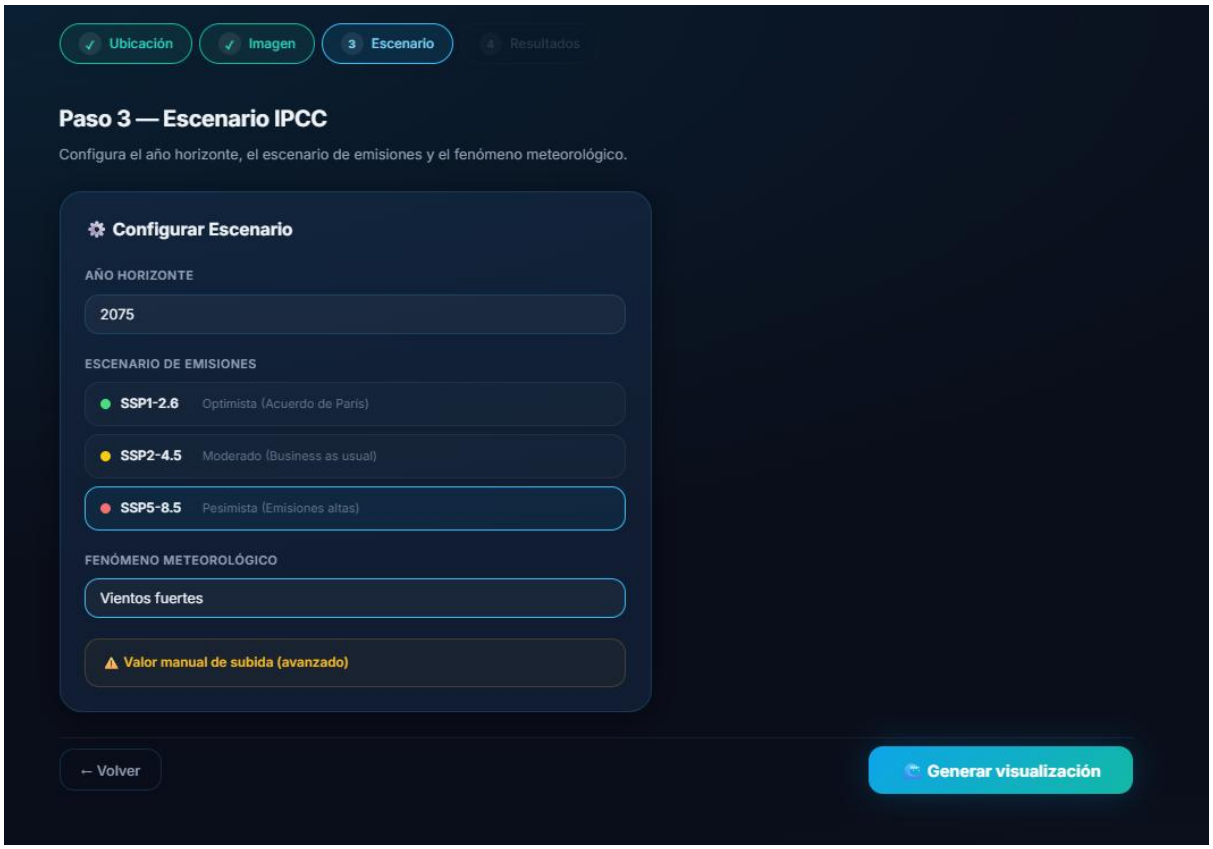


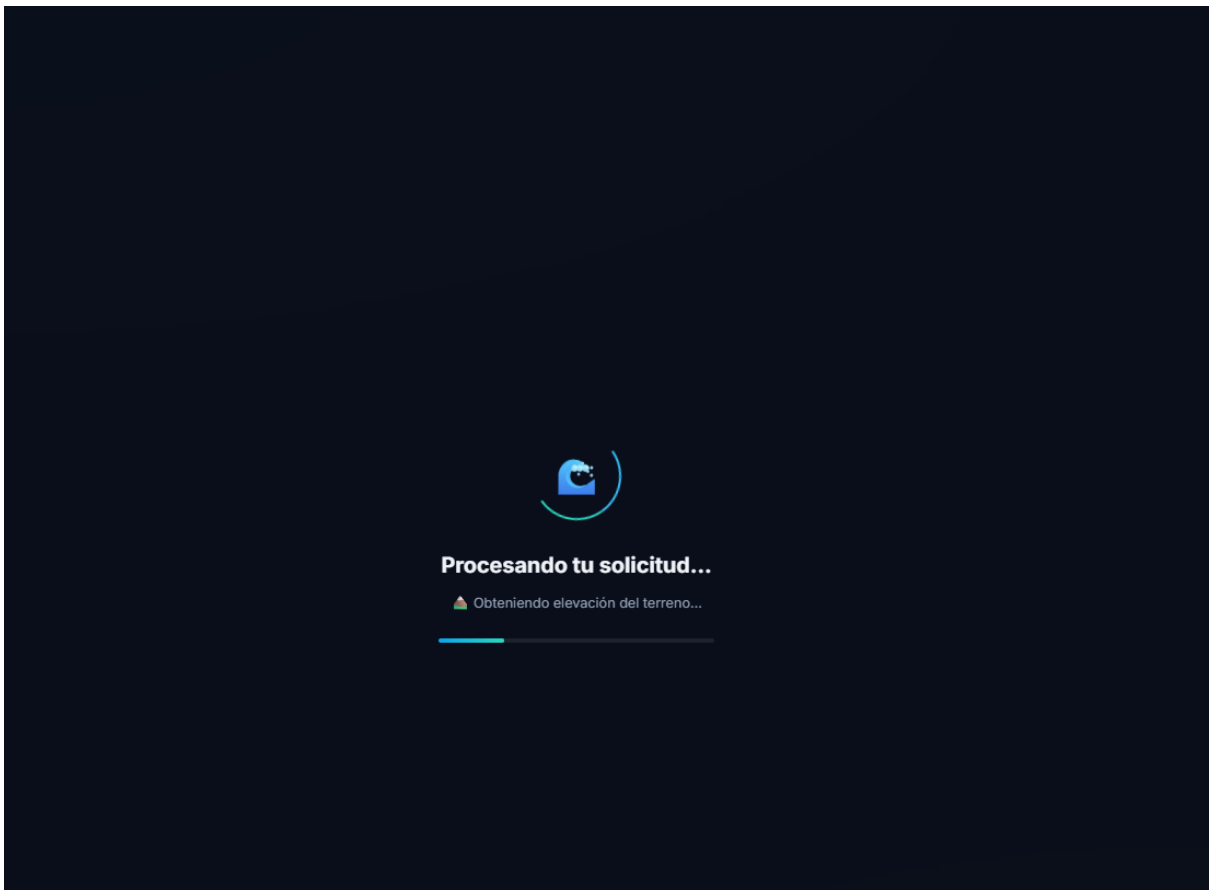

1 Ubicación
2 Imagen
3 Escenario
4 Resultados
Paso 1 — Seleccionar ubicación
Haz clic en el mapa o sube una foto con GPS para detectar la ubicación automáticamente.
Mapa interactivo
Subir foto con GPS
Haz clic en el mapa para seleccionar una ubicación costera

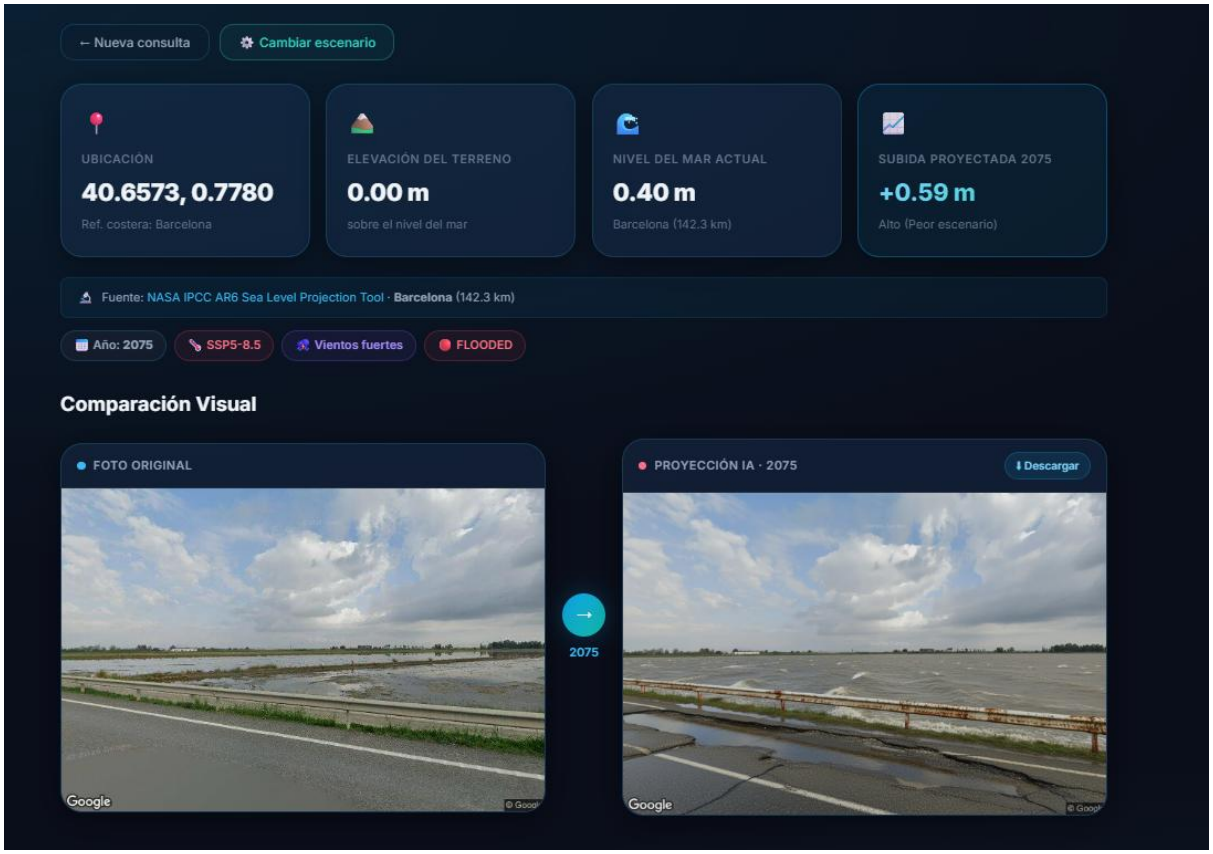

1 Ubicación
2 Imagen
3 Escenario
4 Resultados
Paso 1 — Seleccionar ubicación
Haz clic en el mapa o sube una foto con GPS para detectar la ubicación automáticamente.
Mapa interactivo
Subir foto con GPS
TV-3405
Parc Natural del Delta de l'Ebre
ELEVACIÓN
0.00 m
NIVEL MAR ACTUAL
0.40 m
ESTACIÓN REDMAR
Barcelona
DISTANCIA
142.3 km
40.65731, 0.77803 · Barcelona · 0.0m
Siguiente → Elegir imagen


Ubicación
2 Imagen
3 Escenario
4 Resultados
Paso 2 — Elegir imagen
Captura una vista de Street View o usa una foto propia de la zona.
Street View
Mi foto
ORIENTACIÓN (HEADING): 0°
INCLINACIÓN (PITCH): 0°
ZOOM (FOV): 90°
Verificar cobertura
Capturar Street View
Street View disponible en esta ubicación
Vista previa actual (se actualiza con los controles)
Google
© Google

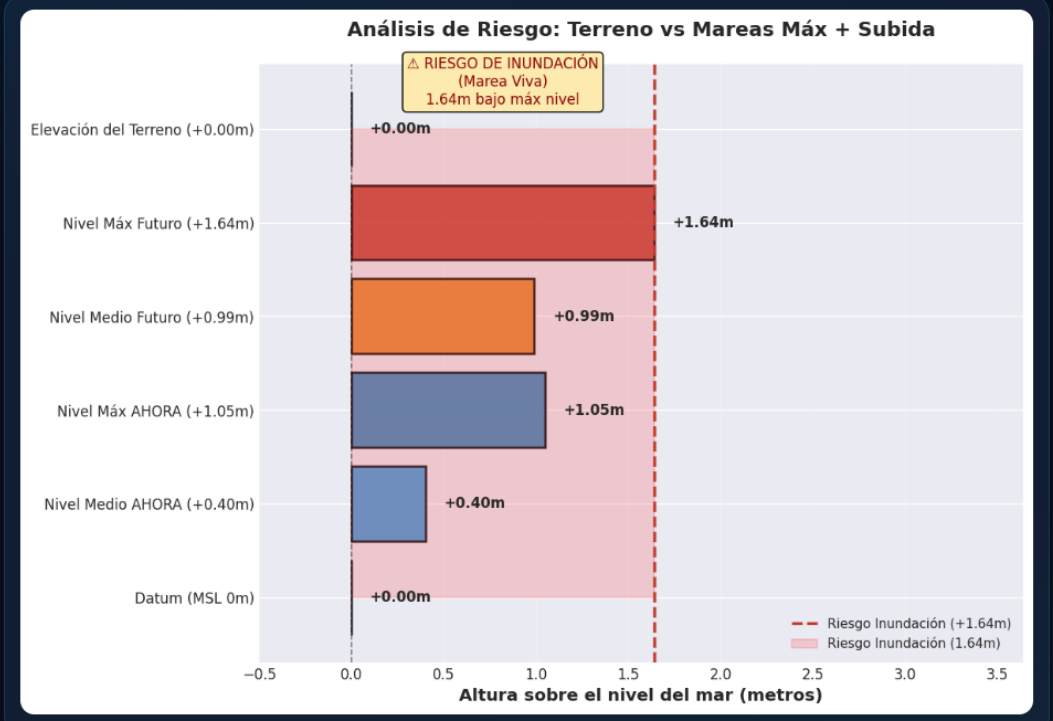

Ubicación
Imagen
3 Escenario
4 Resultados
Paso 3 — Escenario IPCC
Configura el año horizonte, el escenario de emisiones y el fenómeno meteorológico.
Configurar Escenario
AÑO HORIZONTE
2075
ESCENARIO DE EMISIONES
SSP1-2.6 Optimista (Acuerdo de París)
SSP2-4.5 Moderado (Business as usual)
SSP5-8.5 Pesimista (Emisiones altas)
FENÓMENO METEOROLÓGICO
Ninguno
Valor manual de subida (avanzado)
← Volver
Generar visualización


Ubicación
Imagen
3 Escenario
4 Resultados
Paso 3 — Escenario IPCC
Configura el año horizonte, el escenario de emisiones y el fenómeno meteorológico.
Configurar Escenario
AÑO HORIZONTE
2075
ESCENARIO DE EMISIONES
SSP1-2.6 Optimista (Acuerdo de París)
SSP2-4.5 Moderado (Business as usual)
SSP5-8.5 Pesimista (Emisiones altas)
FENÓMENO METEOROLÓGICO
Vientos fuertes
Valor manual de subida (avanzado)
← Volver
Generar visualización


Procesando tu solicitud...
Obteniendo elevación del terreno...


← Nueva consulta
Cambiar escenario
UBICACIÓN
40.6573, 0.7780
Ref. costera: Barcelona
ELEVACIÓN DEL TERRENO
0.00 m
sobre el nivel del mar
NIVEL DEL MAR ACTUAL
0.40 m
Barcelona (142.3 km)
SUBIDA PROYECTADA 2075
+0.59 m
Alto (Peor escenario)
Fuente: NASA IPCC AR6 Sea Level Projection Tool · Barcelona (142.3 km)
Año: 2075
SSP5-8.5
Vientos fuertes
FLOODED
Comparación Visual
FOTO ORIGINAL
PROYECCIÓN IA · 2075
Descargar
2075
Google
Google

Análisis de Riesgo: Terreno vs Nivel del Mar



⚠ Nivel máximo histórico en **Barcelona**: **1.05 m** (mareas vivas). Con la subida proyectada el máximo alcanzaría **1.64 m**.

19. ANEXO D. CASOS DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE ESCENARIOS COSTEROS ESPAÑOLES

Este anexo presenta un análisis detallado de un escenario costero representativo del litoral español, ilustrando la variabilidad de condiciones y la adaptación necesaria de la herramienta a diferentes tipologías de costa.

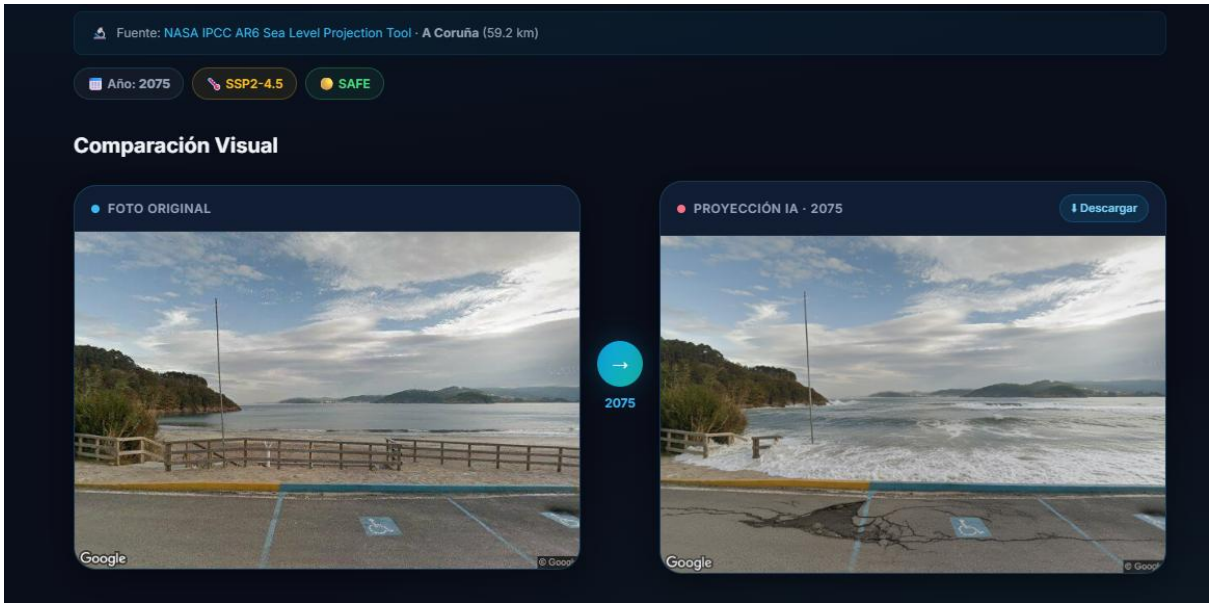
19.1.B.1. Caso 1: Costa de Lugo

Tipología: Playa urbana de arena fina con paseo marítimo y edificaciones a escasos metros de la línea de costa.

Proyección a 2100 años (SSP2-4.5): Subida estimada de 70 cm.

Teniendo en cuenta las mareas vivas se identifica un alto riesgo de inundación de la playa y parte del paseo.

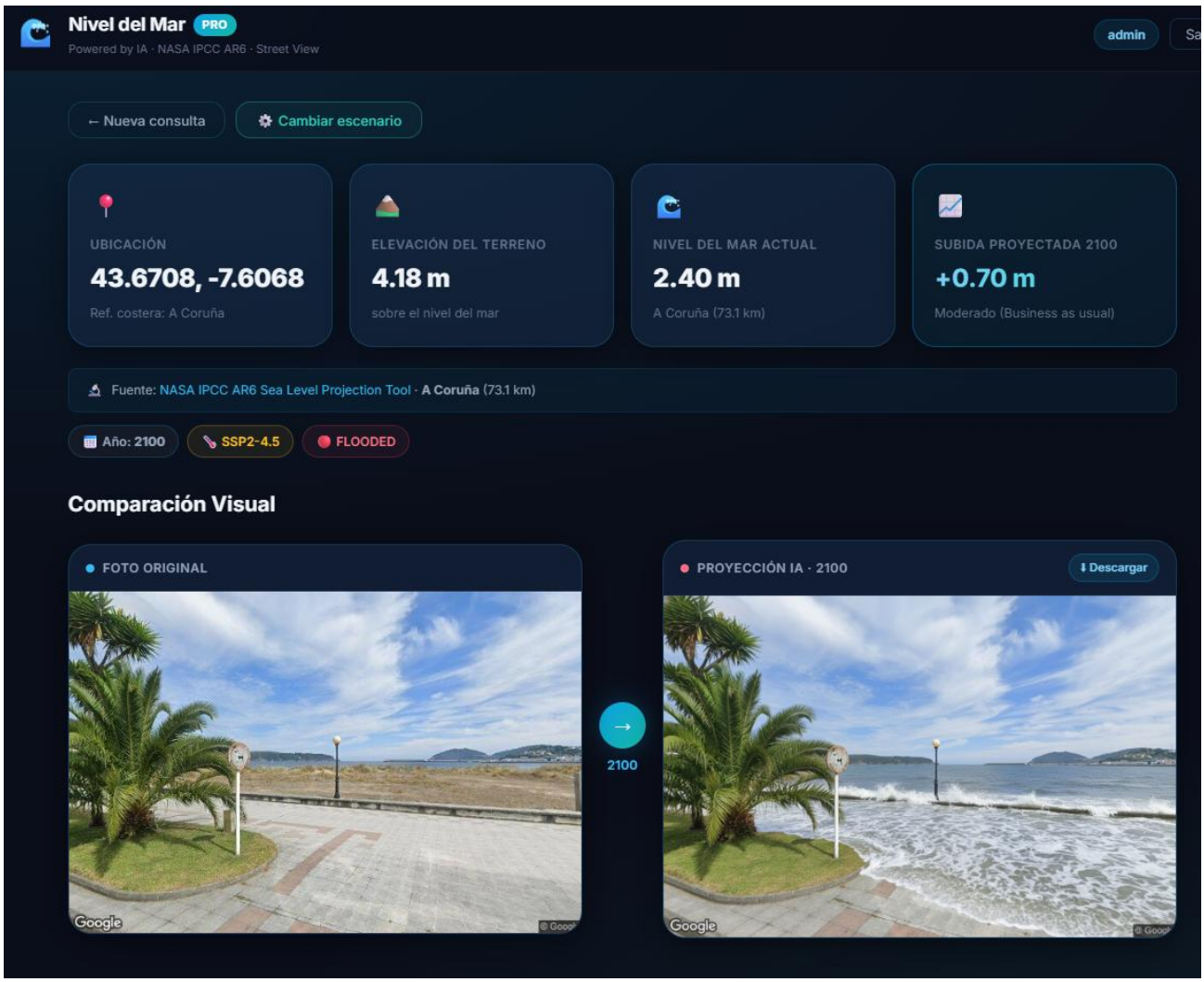
La figura ilustra un caso de uso real de la herramienta VLMAR-PRO sobre un enclave del litoral gallego: una zona costera de Viveiro, en la provincia de Lugo, situada en las coordenadas 43,7132 N, -7,8542 O.



La interfaz muestra de forma simultánea las cuatro métricas que articulan cada simulación: la ubicación georreferenciada, la elevación real del terreno, el nivel medio del mar actual en la estación mareográfica de referencia (A Coruña, REDMAR, a 59,2 km del punto de captura) y la subida proyectada para el año 2075 según los datos grillados del IPCC AR6 bajo el escenario SSP2-4.5 (+0,44 m, etiquetado como "Moderado — Business as usual"). El sistema clasifica el enclave como SAFE en el horizonte temporal seleccionado, una calificación que no minimiza el riesgo sino que lo contextualiza frente a otras zonas más críticas de la cornisa cantábrica gallega.

El núcleo comunicativo de la herramienta reside, sin embargo, en la comparación visual inferior. A la izquierda, la fotografía original procedente de *Street View* muestra el paseo costero tal y como cualquier vecino o visitante de Viveiro lo reconocería hoy: una marea baja apacible, la ría en calma, las islas al fondo y el aparcamiento perfectamente seco. A la derecha, la proyección generada por el modelo de visión y lenguaje recompone exactamente la misma escena trasladada al año 2075: el agua avanza visiblemente sobre la plataforma intermareal, el oleaje se intensifica, las defensas costeras quedan parcialmente sumergidas y la línea de costa se desplaza hacia el observador, alcanzando las inmediaciones del paseo. La superposición no es arbitraria: el VLM ha respetado la geometría de la imagen original, las referencias arquitectónicas y la topografía circundante, modificando únicamente los elementos consistentes con un nivel del mar 44 cm más alto, según marca la proyección científica.

Este tipo de visualización ejemplifica con claridad la propuesta de valor de la herramienta. Frente a un mapa de inundación tradicional —abstracto, codificado por colores, difícil de relacionar con la experiencia vivida— la comparación fotorrealista del lugar concreto que la persona conoce activa lo que la literatura denomina *identifiable victim effect*: el riesgo deja de ser estadístico y se vuelve reconocible, situado y emocionalmente significativo. Casos como el de Viveiro, donde la subida proyectada todavía se clasifica como moderada, resultan especialmente reveladores: demuestran que incluso en escenarios calificados como "seguros", el impacto visible sobre el paisaje cotidiano es lo suficientemente notable como para movilizar la percepción del riesgo.



La segunda figura ilustra un caso de uso complementario, una localización del litoral de la Mariña Lucense (43,6708 N, -7,6068 O), situada a 73,1 km de la estación mareográfica de referencia de A Coruña. Las cuatro métricas que estructuran la consulta dibujan un escenario sensiblemente más comprometido: una elevación del terreno de apenas 4,18 m sobre el nivel del mar, un nivel medio actual de 2,40 m y, sobre todo, una proyección de subida de +0,70 m para el horizonte 2100 bajo el escenario SSP2-4.5 ("Moderado — Business as usual"). La combinación de baja cota topográfica, exposición directa al Cantábrico y horizonte temporal extendido lleva al sistema a calificar el enclave como FLOODED al menos en situaciones de mareas altas o vivas, una clasificación que activa el código de color rojo y advierte de que, en el escenario considerado, la inundación recurrente de la zona deja de ser un evento extraordinario para convertirse en una condición estructural.

El contraste con la fotografía original es donde la herramienta despliega su mayor potencia comunicativa. A la izquierda, una imagen reconocible de *Street View* muestra un paseo marítimo plenamente urbanizado: pavimento de losetas, mobiliario urbano, farolas, palmeras maduras y, al fondo, una playa de arena con las islas costeras perfilándose en el horizonte. Es la postal típica de una jornada apacible de la costa lucense, un escenario familiar para residentes y visitantes. A la derecha, el modelo de visión y lenguaje reconstruye exactamente esa misma escena trasladada al año 2100: la playa ha desaparecido por completo, las olas rompen ya sobre el propio pavimento

del paseo, las palmeras emergen de un mar que ocupa el espacio antes destinado al tránsito peatonal, y la línea de costa se ha desplazado hasta invadir el corazón mismo del espacio urbano. La generación respeta nuevamente la geometría original, las referencias arquitectónicas y la perspectiva del observador, modificando únicamente los elementos consistentes con una elevación del nivel del mar 70 cm superior a la actual.

20. ANEXO E. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DETALLADAS

20.1.E.1. Requisitos del sistema

Componente	Requisito mínimo	Requisito recomendado
CPU servidor	4 núcleos x86_64	8 núcleos x86_64
RAM servidor	16 GB	32 GB
GPU (opcional, para VLM local)	NVIDIA RTX 3060 (12 GB VRAM)	NVIDIA A100 (40 GB VRAM)
Almacenamiento	100 GB SSD	500 GB NVMe SSD
Ancho de banda	100 Mbps	1 Gbps
Sistema operativo	Ubuntu 22.04 LTS	Ubuntu 24.04 LTS
Docker	v24.0+	v25.0+
Python	3.11	3.12
Node.js	18 LTS	20 LTS

Tabla 10. *Requisitos del sistema para despliegue de la herramienta.*

20.2.E.2. Formato de datos REDMAR

Los datos descargados de REDMAR siguen un formato estandarizado con las siguientes características: las series se proporcionan en hora UTC (hora solar), las alturas de nivel del mar se expresan en centímetros referidos al cero REDMAR (generalmente coincidente con el cero del puerto), y los datos se organizan en

columnas de fecha (AAAA MM DD HH) y nivel del mar (cm). Para las series horarias, se proporciona un dato por hora calculado como la media del periodo correspondiente. Las series 5-minutales se derivan de las series brutas con muestreo cada 0,5 segundos. Los parámetros de agitación (altura significante y periodo medio) se proporcionan cada 20 minutos en metros.

20.3.E.3. Algoritmo de búsqueda de boya más cercana

La búsqueda de la boya REDMAR más cercana a las coordenadas del usuario se implementa mediante el cálculo de la distancia geodésica de Vincenty sobre el elipsoide WGS84. Se utiliza un índice espacial KD-Tree precalculado con las coordenadas de las 42 estaciones REDMAR, lo que permite una búsqueda en O(log n). Para la selección, se priorizan estaciones con series históricas superiores a 10 años, ya que las tendencias calculadas con series más cortas presentan mayor incertidumbre. Si la estación más cercana tiene una serie inferior a 5 años, se selecciona la siguiente más cercana con serie suficiente, informando al usuario de la distancia.

20.4.E.4. Prompt del VLM (generate_flood_prompt)

El prompt es dinámico y se construye con los parámetros reales obtenidos del pipeline: sea_level_rise_m (magnitud de la subida en metros), latitud y longitud (contexto geográfico), target_year (2075) y elevation_data (altitud del terreno y niveles actuales/futuros). La estructura del *prompt* sigue un patrón específico validado iterativamente:

Rol del modelo: “Eres un editor de imágenes científico especializado en visualización climática. Edita la imagen adjunta para mostrar el mismo lugar en el año {target_year}, con el nivel del mar {sea_level_rise_m}m más alto que el actual.”

Instrucciones de composición: Mantén exactamente la misma composición y ángulo de cámara. NO añadas edificios, puentes, carreteras ni infraestructuras que no existan en la foto original.

Instrucciones de agua según zona SAFE: Agua visible en zonas bajas, el observador sigue sobre el nivel del agua. Énfasis en zonas bajas anegadas cercanas.

Instrucciones de agua según zona FLOODED: Toda la escena sumergida hasta {future_max_sea_m}m sobre el nivel del mar.

Detalles de daño acumulado: Pavimento agrietado, manchas de sal, óxido, corrosión, fachadas deterioradas. Superficie marina rugosa: olas, espuma, escorrentía superficial.

Fenómenos opcionales: Se puede incluir cielo nublado o mar agitado para reforzar el impacto visual.

La evolución del prompt (versión 2.01) introdujo instrucciones más precisas sobre daños acumulados y una diferenciación más clara entre zonas SAFE y FLOODED, mejorando significativamente el realismo de las imágenes generadas. La integración está diseñada para ser adaptable a cualquier VLM que soporte entrada imagen+texto y salida imagen (Google Gemini, GPT-4o, Claude, Llama multimodal u otros).

20.5.E.6. API REST: Endpoint principal

La API REST del *backend* expone un único *endpoint* principal, diseñado para simplicidad máxima:

Endpoint	Método	Parámetros	Respuesta
/api/process	POST (multipart/form-data)	file (imagen), latitude (float, opc.), longitude (float, opc.)	JSON completo con métricas + imágenes base64
/docs	GET	—	Documentación OpenAPI auto-generada

Tabla 11. *Endpoint de la API REST.*

La respuesta JSON del endpoint /api/process incluye: latitude, longitude, elevation_m, sea_level_mean_m, sea_level_max_m, sea_level_rise_m, future_mean_sea_m, future_max_sea_m, risk_zone (NO_RISK/SAFE/FLOODED), nearest_station, station_distance_km, projection_reference, nearest_projection_point, chart_image (base64 PNG del gráfico matplotlib), generated_image (base64 JPEG de la imagen VLM) y original_filename.

Con el apoyo de:

GRACIAS

Contacto

www.ecodes.org

+34 976 29 82 82

Plaza San Bruno, 9, 1º Oficinas, 50001 Zaragoza.