

AZTI

MEMBER OF
BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE

www.azti.es

Revista de
Investigación Marina
[31.2]

UHINAK 2026

Ficoba, Irun
Urriak 8-9 • 8-9 Octubre
8-9 Octobre • October 8-9

Klima Aldaketa eta Itsasertzari buruzko Mugaz gaindiko VII. Biltzarra. Laburpen zabalak

VII Congreso transfronterizo sobre Cambio Climático y Litoral. Resúmenes extendidos

VII Congrès transfrontalier sur le Changement Climatique et Littoral. Abstract étendus

VII Cross border conference on Climate Change and the Coast. Extended abstracts

UHINAK 2026. Ficoba, Irun. Urriak 8-9. 8-9 Octubre. 8-9 Octobre. October 8-9. Klima Aldaketa eta Itsasertzari buruzko Mugaz gaindiko VII. Biltzarra. Laburpen zabalak. VII Congreso transfronterizo sobre Cambio Climático y Litoral. Resúmenes extendidos. VII Congrès transfrontalier sur le Changement Climatique et Littoral. Abstract étendus. VII Cross border conference on Climate Change and the Coast. Extended abstracts. Revista de Investigación Marina, AZTI, 31(2): 216-332.

La serie *'Revista de Investigación Marina'*, editada por la Unidad de Investigación Marina de AZTI, cuenta con el siguiente Comité Editorial:

Editor: Javier Franco

Adjuntos al Editor: Edorta Aranguena e Irantzu Zubiaur

Comité Editorial: Haritz Arrizabalaga
Oihane C. Basurko
Ángel Borja
Guillem Chust
Almudena Fontán
Ibon Galparsoro
Arantza Murillas

La '*Revista de Investigación Marina'* de AZTI edita y publica investigaciones y datos originales resultado de la Unidad de Investigación Marina de AZTI. Las propuestas de publicación deben ser enviadas al siguiente correo electrónico jafranco@azti.es. Un comité de selección revisará las propuestas y sugerirá los cambios pertinentes antes de su aceptación definitiva.

Edición: 1.ª Octubre 2026
© AZTI
ISSN: 1988-818X
Unidad de Investigación Marina
Internet: www.azti.es
Edita: Unidad de Investigación Marina de AZTI
Herrera Kaia, Portualdea z/g
20110 Pasaia
Foto portada: Embarcaderos y estuario del Oka en Murueta (Urdaibai, Bizkaia). © AZTI

© AZTI 2026. **Distribución gratuita en formato PDF a través de la web: www.azti.es/RIM**

UHINAK
Klima Aldaketa eta Itsasertzari buruzko mugaz gaindiko VII. Biltzarra

2026ko Urriak 8-9
FICOBA, IRUN

Hitzaurrea

Uda honetan, bero-boladak bata bestearen atzetik etorri dira, eta tenperatura-erregistroetan maximoak izan dira, bai atmosferan bai ozeanoan. Eta hori ez da gure itsaso eta kostaldeetan bakarrik gertatzen ari. Copernicusen datuen arabera, lurrazaleko airearen hileko batez besteko tenperatura globalak marka berria ezarri zuen abuztuan, industriaurreko aldiko mailak baino 1,65 °C gorago kokatu baitzen[1]. Eta abuztuaren 22an, poloetatik kanpoko ozeanoetako (60° H-tik 60° I-ra) itsas azaleko eguneko tenperatura globalak 1979an erregistroak hasi zirenetik inoiz neurtutako mailarik altuena izan zuen[2].

Gorakada hori klima-aldaketaren eta El Niño fenomenoaren arteko konbinazioaren ondorio da; fenomeno horretan, ohi baino gehiago berotzen dira Ozeano Bare ekuatorialaren erdialdeko eta ekialdeko azaleko urak. Hala ere, berotze hori hamarkadetan pilatutako beroketari gehitzen zaio, eta galdera berez sortzen da:

Klima-aldaketa bizkortzen ari al da?

Urriaren 8an eta 9an egingo den Uhinaken zazpigarren edizio honetan, Antonio Turiel doktoreak, Ikerketa Zientifikoen Kontseilu Gorenekoak (CSIC), gai horri helduko dio inaugurazio-hitzaldian, azkenaldian hainbat klima-aldagaitan, bereziki ozeanoarekin lotutakoetan, behatutako joerak aztertuz. Zehazki, Turielek itsas azaleko tenperaturari buruzko satelite-datuak izango ditu hizpide; datu horiek erakusten dute 2014ko bigarren erdian aldaketa bortitz bat gertatu zela, 2015-2016ko El Niño ezohiko fenomenoaren hasiera hutsarekin bat eginez. Gainditu al dugu jada klima-sistema globalaren inflexio-puntu edo itzulerarik gabeko puntu bat (tipping point)? Aurreko edizioan, Europako klimarentzat garrantzi handia duen inflexio-puntu jakin baten inguruko eztabaidarekin hasi genuen kongresua: Atlantikoko Iraultze Zirkulazio Meridionalaren (AMOC) adar atlantikoaren moteltzearekin. Turielek, halaber, 2014az geroztik ozeano-zirkulazio globalean zer aldaketa identifika daitezkeen eta aldaketa horiek korronte ozeaniko horren balizko moteltzearekin nola lotzen diren erakutsiko digu.

Planeta-mailako muga horiei aurrea hartzeko, beharrezkoa da kostaldean klima-aldaketak izan ditzakeen ondorioak ebaluatzeko tresna berritzaileak izatea. Horretaz arituko da Melisa Menéndez doktorea, Kantabriako Unibertsitateko Ingurumen Hidraulikako Institutukoa (IHCantabria). Klima-aldaketaren ondorioz itsas klima nola aldatzen ari den azalduko du, olatuen, itsas mailaren, haizearen eta muturreko fenomenoen datuak aztertuta, eta gaur egungo kostaldeko arriskuak nahiz datozen hamarkadetan gerta daitezkeen aldaketak aurkeztuko ditu. Haren esku-hartzeak erakutsiko digu kostaldeko inpaktuen jatorrian askotariko itsas dinamiken arteko elkarreragin konplexua dagoela, hala nola marea astronomikoaren aldaketena edo olatuen baldintzena.

Erronka handi horiek izango dira Uhinaken edizio honetako hitzaldi askoren testuingurua. Aurten, gainera, saioen programan egitura berri bat txertatuko dugu, bi mahai-ingururekin: bata klima-aldaketara egokitzeko kostaldea dagoeneko eraldatzen ari diren proiektuei eskainia, eta bestea etorkizuneko kostalderako estrategia eta gobernantza-eredu berrien belaunaldiari buruz hausnartzeko. Horrez gain, 40 ahozko komunikazio eta 25 poster izango ditugu, lau saiotan banatuta. Saio horietan honako gai hauek landuko dira: klima-aldaketaren erronkak, kostaldeko muturreko fenomenoetara egokitzeko neurriak, itsas biodibertsitatea lehengoratzeak klima-aldaketa arintzeko eta klima-aldaketarekiko erresilientzia handitzeko duen zeregina, karbono urdina, gobernantzako berrikuntza, kudeaketa-tresnak eta komunikazioa.

Eta hitzaurre hau amaitu aurretik, klima-aldaketaren aurkitzaileetako baten lana aitortu nahi dut, haren ekarpena behin eta berriz baztertu izan baita: Eunice Newton Foote (1819-1888). Zientzialari estatubatuar hark 1856an aurkitu zuen karbono dioxidoak (CO_2) beroa atxikitzen duela, eta gas horren maila handiagoek Lurra berotuko zutela proposatu zuen. Hiru urte aurreratu zitzaion John Tyndall fisikari irlandarrari; hark, 1859an, esperimentalki frogatu zuen CO_2ak eta ur-lurrunak, besteak beste, berotegi-efektua eragiten dutela.

Guillem Chust i Peters
AZTIko Itsas Ekosistemetako Aldaketa Globalaren arduraduna

[1] https://climate.copernicus.eu/august-was-joint-warmest-month-ever-recorded-globally-temperatures-once-again-exceeding-15degc

[2] https://climate.copernicus.eu/copernicus-daily-global-sea-surface-temperature-breaks-2024-record

UHINAK
VII Congreso transfronterizo sobre Cambio Climático y Litoral

8-9 octubre de 2026
FICOBA, IRUN

Introducción

Este verano hemos asistido a una sucesión de olas de calor y máximos en los registros de temperatura, tanto atmosférica como oceánica, y ello no ocurre solo en nuestros mares y costas. La temperatura media mensual global del aire en superficie alcanzó un nuevo récord este agosto al situarse 1,65 °C por encima de los niveles del periodo preindustrial, según datos de Copernicus[1]. Y este 22 de agosto, la temperatura diaria global de la superficie del mar en los océanos no polares (de 60°S a 60°N) alcanzó su nivel más alto registrado desde 1979, fecha de inicio de los registros[2]. Este repunte se debe a la combinación del cambio climático con el fenómeno de El Niño, un calentamiento inusual de las aguas superficiales en el centro y el este del océano Pacífico ecuatorial. Sin embargo, ello suma calor a décadas de calentamiento, y la pregunta aflora de forma natural:

¿Está el cambio climático acelerándose?

En esta séptima edición de Uhinak, que tendrá lugar los días 8 y 9 de octubre, la ponencia inaugural del Dr. Antonio Turiel, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), abordará esta cuestión mediante una revisión de las tendencias recientes observadas en diversas variables climáticas, especialmente las oceánicas. En particular, Turiel nos hablará de los datos de satélite de la temperatura de la superficie del mar que muestran un cambio brusco que habría tenido lugar en la segunda mitad de 2014, coincidiendo con el arranque fallido del episodio excepcional de El Niño de 2015-2016. ¿Hemos superado ya un punto de inflexión o de no retorno (tipping point) del sistema climático global? En la pasada edición, arrancamos el congreso con el debate sobre un punto de inflexión particular pero de gran relevancia para el clima de Europa: la ralentización del brazo atlántico de la Corriente Meridional de Retorno (AMOC). Turiel nos mostrará también qué cambios podemos identificar en la circulación oceánica global desde 2014 y cómo están conectados con la posible ralentización de esta corriente oceánica.

Con el fin de anticiparse a estos límites planetarios, es necesario disponer de herramientas innovadoras para evaluar las consecuencias del cambio climático en la costa. De ello nos hablará la Dra. Melisa Menéndez, del Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria), que abordará cómo está cambiando el clima marino debido al cambio climático a partir del análisis de datos de oleaje, nivel del mar, viento y fenómenos extremos, y mostrará los riesgos costeros actuales y los cambios que pueden producirse en las próximas décadas. Su intervención nos ilustrará sobre el origen de los impactos costeros como resultado de una compleja interacción entre dinámicas marinas de muy diferente índole, como las variaciones de la marea astronómica o las condiciones del oleaje.

Estos grandes retos constituyen el contexto en el que se enmarcará gran parte de las ponencias de esta edición de Uhinak. Este año, introducimos además una nueva estructura en el programa de las sesiones que incluirá dos mesas redondas: una dedicada a proyectos que están ya transformando el litoral para adaptarse al cambio climático y otra para reflexionar sobre la nueva generación de estrategias y modelos de gobernanza para la costa del futuro. Contaremos además con 40 comunicaciones orales y 25 posters, estructurados en cuatro sesiones que cubren los retos del cambio climático, las medidas de adaptación a los fenómenos costeros extremos, el papel de la restauración de la biodiversidad marina en la mitigación y resiliencia al cambio climático, el carbono azul, la innovación en la gobernanza, las herramientas de gestión y la comunicación.

Y no quiero terminar este prólogo sin reconocer la labor de una de las descubridoras del cambio climático, cuya contribución se ha ignorado recurrentemente: Eunice Newton Foote (1819-1888), científica estadounidense que en 1856 descubrió que el dióxido de carbono (CO2) atrapa calor y teorizó que mayores niveles de este gas calentarían la Tierra. Se anticipó en tres años al físico irlandés John Tyndall, quien en 1859 demostró experimentalmente cómo gases como el CO2 y el vapor de agua provocan el efecto invernadero.

Guillem Chust i Peters
Responsable de Cambio Global en Ecosistemas Marinos, AZTI

[1] https://climate.copernicus.eu/august-was-joint-warmest-month-ever-recorded-globally-temperatures-once-again-exceeding-15degc

[2] https://climate.copernicus.eu/copernicus-daily-global-sea-surface-temperature-breaks-2024-record

UHINAK
VII Congrès transfrontalier sur le Changement Climatique et Littoral

8-9 Octobre 2026
FICOBA, IRUN

Introduction

Cet été, nous avons connu une succession de vagues de chaleur et de records de température, dans l'atmosphère comme dans l'océan, et ce constat dépasse largement nos mers et nos côtes. Selon les données de Copernicus, la température moyenne mensuelle de l'air à la surface du globe a atteint un nouveau record en août, dépassant de 1,65 °C les niveaux de l'ère préindustrielle[1]. Et le 22 août, la température quotidienne de surface de la mer, mesurée à l'échelle mondiale dans les océans non polaires (de 60° S à 60° N), a atteint son niveau le plus élevé depuis le début des relevés en 1979[2]. Cette hausse résulte des effets conjugués du changement climatique et du phénomène El Niño, un réchauffement inhabituel des eaux de surface dans le centre et l'est du Pacifique équatorial. Elle vient toutefois s'ajouter à des décennies de réchauffement, et une question se pose naturellement :

Le changement climatique est-il en train de s'accélérer ?

Lors de cette septième édition d'Uhinak, qui se tiendra les 8 et 9 octobre, la conférence inaugurale du Dr Antonio Turiel, du Conseil supérieur de la recherche scientifique espagnol (CSIC), abordera cette question à travers une analyse des tendances récentes observées pour différentes variables climatiques, notamment océaniques. Turiel nous présentera en particulier les données satellitaires de température de surface de la mer, qui révèlent un changement brutal survenu, semble-t-il, au second semestre 2014, au moment où s'amorçait, sans se concrétiser, l'épisode exceptionnel El Niño de 2015-2016. Avons-nous déjà franchi un point de bascule ou de non-retour (tipping point) du système climatique mondial ? Lors de la précédente édition, nous avions ouvert le congrès par un débat sur un point de bascule particulier, mais essentiel pour le climat européen : le ralentissement de la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC). Turiel nous montrera également quels changements peuvent être identifiés dans la circulation océanique mondiale depuis 2014 et comment ils sont liés au possible ralentissement de cette circulation.

Pour anticiper le franchissement de ces limites planétaires, il est nécessaire de disposer d'outils innovants permettant d'évaluer les conséquences du changement climatique sur le littoral. C'est ce dont nous parlera la Dre Melisa Menéndez, de l'Institut d'hydraulique environnementale de l'Université de Cantabrie (IHCantabria). À partir de l'analyse de données sur les vagues, le niveau de la mer, le vent et les phénomènes extrêmes, elle expliquera comment le climat marin évolue sous l'effet du changement climatique et présentera les risques côtiers actuels ainsi que les changements susceptibles de survenir au cours des prochaines décennies. Son intervention nous éclairera sur l'origine des impacts sur le littoral, qui résultent d'interactions complexes entre des dynamiques marines de nature très différente, telles que les variations de la marée astronomique ou les conditions de houle.

Ces grands défis constituent la toile de fond d'une grande partie des interventions de cette édition d'Uhinak. Cette année, nous proposons également une nouvelle organisation du programme, qui comprendra deux tables rondes : l'une consacrée aux projets qui transforment déjà le littoral pour l'adapter au changement climatique, l'autre à une réflexion sur la nouvelle génération de stratégies et de modèles de gouvernance pour le littoral de demain. Nous accueillerons également 40 communications orales et 25 posters, répartis en quatre sessions. Celles-ci couvriront les défis du changement climatique, les mesures d'adaptation aux phénomènes côtiers extrêmes, le rôle de la restauration de la biodiversité marine dans l'atténuation du changement climatique et le renforcement de la résilience face à ses effets, le carbone bleu, l'innovation en matière de gouvernance, les outils de gestion et la communication.

Enfin, je ne souhaite pas conclure cet avant-propos sans rendre hommage à l'une des pionnières de la découverte du changement climatique, dont la contribution a trop souvent été ignorée : Eunice Newton Foote (1819-1888). En 1856, cette scientifique américaine a découvert que le dioxyde de carbone (CO_2) retient la chaleur et a émis l'hypothèse qu'une augmentation de sa concentration entraînerait un réchauffement de la Terre. Elle a ainsi devancé de trois ans le physicien irlandais John Tyndall, qui a démontré expérimentalement, en 1859, comment des gaz tels que le CO_2 et la vapeur d'eau produisent l'effet de serre.

Guillem Chust i Peters
Responsable du changement global dans les écosystèmes marins, AZTI

[1] https://climate.copernicus.eu/august-was-joint-warmest-month-ever-recorded-globally-temperatures-once-again-exceeding-15degc

[2] https://climate.copernicus.eu/copernicus-daily-global-sea-surface-temperature-breaks-2024-record

UHINAK
VII Climate change and Littoral cross border Symposium

8-9 October 2026
FICOBA, IRUN

Introduction

This summer, we have witnessed a succession of heatwaves and record-breaking temperatures, both atmospheric and oceanic, and this is not confined to our own seas and coastal areas. The global monthly mean surface air temperature reached a new record this August, standing 1.65°C above pre-industrial levels, according to Copernicus data[1]. And on 22 August, the daily global sea surface temperature across the non-polar oceans (60°S–60°N) reached its highest level since records began in 1979[2]. This rise is due to the combined effects of climate change and El Niño, an unusual warming of surface waters in the central and eastern equatorial Pacific Ocean. Yet it adds further heat to decades of warming, naturally prompting the question:

Is climate change accelerating?

At this seventh edition of Uhinak, to be held on 8 and 9 October, the opening keynote by Dr Antonio Turiel, from the Spanish National Research Council (CSIC), will address this question through a review of recent trends in a range of climate variables, particularly those related to the ocean. Turiel will focus in particular on satellite sea surface temperature data that point to an abrupt shift in the second half of 2014, coinciding with the failed onset of the exceptional 2015–2016 El Niño event. Have we already crossed a tipping point, or point of no return, in the global climate system? At the previous edition, we opened the congress with a debate on one specific tipping point of major significance for Europe's climate: the slowdown of the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). Turiel will also examine the changes that can be identified in global ocean circulation since 2014 and how they may be connected to the possible slowdown of this circulation.

To anticipate these planetary boundaries, we need innovative tools that enable us to assess the consequences of climate change along our coasts. This will be the focus of Dr Melisa Menéndez, from the Environmental Hydraulics Institute at the University of Cantabria (IHCantabria), who will explore how the marine climate is changing as a result of climate change through the analysis of wave, sea-level, wind and extreme-event data. She will also present current coastal risks and the changes that may occur over the coming decades. Her presentation will illustrate how coastal impacts result from a complex interaction between very different marine dynamics, ranging from variations in astronomical tides to wave conditions.

These major challenges provide the context for much of the programme at this year's Uhinak. We are also introducing a new session structure this year, including two round-table discussions: one dedicated to projects that are already transforming the coastline to adapt to climate change, and another exploring the new generation of strategies and governance models for the coast of the future. The programme will also feature 40 oral presentations and 25 posters, organised into four sessions covering the challenges posed by climate change, adaptation measures for extreme coastal events, the role of marine biodiversity restoration in climate change mitigation and resilience, blue carbon, innovation in governance, management tools and communication.

I would not like to conclude this foreword without acknowledging the work of one of the early discoverers of climate change, whose contribution has repeatedly been overlooked: Eunice Newton Foote (1819–1888), an American scientist who discovered in 1856 that carbon dioxide (CO_2) traps heat and theorised that higher concentrations of the gas would warm the Earth. Her work preceded that of the Irish physicist John Tyndall by three years; in 1859, Tyndall experimentally demonstrated how gases such as CO_2 and water vapour produce the greenhouse effect.

Guillem Chust i Peters
Head of Global Change in Marine Ecosystems, AZTI

[1] https://climate.copernicus.eu/august-was-joint-warmest-month-ever-recorded-globally-temperatures-once-again-exceeding-15degc

[2] https://climate.copernicus.eu/copernicus-daily-global-sea-surface-temperature-breaks-2024-record

Batzar teknikoa / Comité técnico / Comité technique / Technical committee

FICOBA
Julien Mader — AZTI
Guillem Chust — AZTI
Adolfo Uriarte — Gobierno Vasco
Malake Muñoz — IHOBE
Carlos Castillo — IHOBE
Nerea Egia — Diputación Foral de Gipuzkoa
Xabier Esteban — Naturklima
Caroline Sarrade — Communauté d'Agglomération Pays Basque
Aurélie Bocquet Escourrou — GIS Littoral Basque
Rafael Sardá— CSIC, ESADE y CEAB
Elisa Sainz de Murieta — Basque Centre for Climate Change (BC3)
Eva Moral — Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del País Vasco
Néstor Urrutxua — Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos del País Vasco
Francisco Heras Hernández — Oficina Española de Cambio Climático (OECC)
Virginia Elvira — ADEGI
José María Grassa — CEDEX
Armand Braz — Eurorregión Nueva Aquitania–Euskadi–Navarra
Ganix Esnaola — Euskal Herriko Unibertsitatea/ Universidad del País Vasco
Elisa Sainz de Murieta — Euskal Herriko Unibertsitatea/ Universidad del País Vasco

Antolaketa batzarra / Comité organizador / Comité organisateur / Organizing committee

Irantzu Zubiaur — AZTI
Meritxel González — AZTI
Mónica Alday — FICOBA
Silvia Turné — FICOBA
Lorena Zabaleta — FICOBA
Uxue Aira — FICOBA

Antolatzaileak / Organizadores / Organisateurs / Organizers

FICOBA
AZTI

Babesleak / Patrocinadores / Sponsors

Diputación Foral de Gipuzkoa – Sostenibilidad
Région Nouvelle-Aquitaine
Communauté d'Agglomération Pays Basque
AIC Litoral Vasco
LIFE Urban Klima 2050
Programa LIFE de la Unión Europea
IHOBE
Gobierno Vasco:
Departamento de Industria, Transición Energética y Sostenibilidad
Departamento de Turismo, Comercio y Consumo

Laguntzaileak / Colaboradores / Collaborateurs / Partners

International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR)
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Media partnerrak / Media partners

Rotación
FuturENVIRO
Europa Azul
Actualidad Marítima y Portuaria

Aurkibidea - Índice - Index - Index

KLIMA ALDAKETAREN ERRONKAK
RETOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
LES DÉFIS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
CHALLENGES OF CLIMATE CHANGE

González A.G., Sierra-Salcedo J.R., Curbelo-Hernández D., Sánchez-Mendoza I., González-Santana D., Santana-Casiano J.M., González-Dávila M.
Del flujo de CO2 atmósfera-océano al almacenamiento de carbono: resolviendo el reservorio de carbono en las Islas Canarias **226**

Ortuzar A., Torre-Pascual E., Sáez de Cámara E.
Increasing Impact of Saharan Intrusions on Air Quality in Atlantic Iberia **229**

Susperrégui N., D'Amico F., de Casamajor M.N., Caill-Milly N., Bru N., Pigot T., Kermorvant C.
Tracking Hydroclimatic Change on the Northern Basque Coast and Its Implications for Mucilage Favourable Conditions **232**

Commault A., Itoïz S., Detchart A., Lagrabe O., Petrau A., Siano R., Briand E., Fernández-Valero A.D., Seoane S., Bocquet-Escourrou A., Sarrade C.
Monitoring harmful algal blooms on the French Atlantic coast: species shift and environmental drivers of Ostreopsis blooms **235**

García I., Córdoba I., Torre N., Longás N., Revuelta M., González A., Okina I., Zabala Z., Rodriguez R., Delgado A.
Análisis de la calidad bacteriológica de la arena de las playas de Ea e Isuntza (Lekeitio) en Bizkaia **239**

Portu J., Rivacoba L., Ibáñez S.
Uso de mallas de sombreado como estrategia de adaptación del viñedo al cambio climático en La Rioja **241**

Vallés P., Loras V., Morales-Hernández M., Roeber V.
Modeling plastic transport using a coupled Lagrangian-Eulerian framework **244**

KLIMA-ALDAKETAREN ARINTZEA ITSASERTZEAN ETA OZEANOAN
MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL Y EL OCÉANO
ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE CÔTIER ET OCÉANIQUE
COASTAL AND OCEAN CLIMATE CHANGE MITIGATION

Castresana J., Caballero A., C. Basurko O., Goikoetxea N., Quincoces I., Gabiña G.
Advancing the decarbonisation of fishing Vessels **248**

Peña L., Sertutxa U., Arana X., Ametzaga-Arregi I.
Evaluación de los Servicios de los Ecosistemas que ofrecen los sistemas dunares dentro de la Red Natura 2000 de Bizkaia **252**

Castaño-Tierno A, Gómez de Segura J.D., Gelpi I.R., Gaztelumendi S.
Implementación del modelo SCHISM en Euskalmet y su aplicación a la simulación de un evento de marea extrema en la bahía de Txingudi **257**

KOSTALDEKO ARRISKUAK ETA MUTURREKO GERTAKARIAK
RIESGOS COSTEROS Y EVENTOS EXTREMOS
RISQUES COTIERS ET EVENEMENTS EXTREMES
COASTAL RISKS AND EXTREME EVENTS

Vergari F., Ingrosso I., Montanaro A., Fruni R., Verga A., Miglietta L., Largo A.
Digital Monitorig of a Nature-Based Costal Dune System for Climate Resilience **261**

Cantergiani C., García I., Garnier R., del Campo A., Delpey M., Cipriani L., Gonçalves C.
Preliminary impact assessment of regional climate adaptation actions: insights from four European coastal regions **264**

Ruiz-Beneitez G., Sainz de Murieta E., Markandya A., Galarraga I.
The socio-economic value of climate services in the Pacific: a cost-effective investment in the face of extreme events **267**

Steiger N., Nieto A., Manso-Narvarte I., Liria P., Solabarrieta L., Castaño A., Egaña J., Gaztelumendi S., Rubio A.
Coastal–offshore thermal variability through consecutive summer glider deployments and mooring data in the Bay of Biscay **270**

Bondehagen A., Kalisch H., Roeber V.
Transient rip currents on uniform beaches: an event-based framework for beach safety assessment **274**

Gaztelumendi S., Egaña J.
Validación y análisis de avisos/alertas/alarmas por riesgo marítimo-costero: impacto en costa en Euskadi **277**

Zurutuza J., Aguinaga A., García-Armenteros J.A., González M., Breton J.A., Elorza M., Momoitio L., Vaquero P.
Instalaciones Multi-técnica como elemento clave de la geodesia moderna: el caso de estudio de PASA y APBI **282**

Aguinaga A., Zurutuza J., García-Armenteros J.A., González M., Liria P., Breton J.A., Elorza M., Momoitio L.
Análisis de tendencias absolutas del nivel del mar en la costa vasca, a partir de observaciones de nivel del mar y GNSS en los puertos de Pasaia y Bilbao **286**

Gaztelumendi S.
Aplicación de técnicas de IA-ML a la modelización del impacto por riesgo marítimo-costero en la costa vasca **289**

López I., Pagán J.
Efectos del cambio climático en el oleaje del sudeste del Golfo de Vizcaya: dirección y magnitud **294**

Pagán J.I., Bañón L., López I.
Entre la presión urbana y la resiliencia natural: vulnerabilidad y exposición del litoral de la Comunidad Valenciana **297**

Liria P., Santiago I., Garnier R., Epelde I., Santos R., Varela C., Abalia A., del Campo A., González M.
Revisión y actualización de los niveles máximos del mar en los estuarios de la Comunidad Autónoma del País Vasco y proyecciones bajo escenarios de cambio climático **300**

Castaño-Tierno A., Gómez de Segura J.D., Gelpi I.R., de Santiago I., Abalia A., Gaztelumendi S.
Implementación y validación del modelo XBeach para la mejora del sistema de alerta por riesgo costero: aplicación a la playa de Zarautz **303**

Ferrer L., Ciliberti S., Sagarminaga Y., Alonso-Valle A., Fontán A., Alonso R., Franco J., García-Valdecasas J.M., Nieto A., Jiménez B., Manso-Narvarte I., Moros M., del Campo A., García-Sotillo M., Solabarrieta L., Rubio A.
Field observations and modelling of the waters of the southeastern Bay of Biscay **306**

Bosi U., Delpey M., Morichon D., Roeber V.
Quadtree mesh technique for shallow water problems in coastal environment **309**

GOBERNANTZA, KUDEAKETA-TRESNAK ETA KOMUNIKAZIOA
GOBERNANZA, HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y COMUNICACIÓN
GOUVERNANCE, OUTILS DE GESTION ET COMMUNICATION
GOVERNANCE, MANAGEMENT TOOLS AND COMMUNICATION

de Ortuzar J.M., de Ortuzar M., Amo M.A.
The roads in Coastal Management and Protection Plans in a climate change scenario: a case study in Biscay **313**

Abalia A., Gaztelumendi S., Auzokoa J., Epelde I., Egaña J., Liria P., del Campo A., González M., de Santiago I., Nieto A., Garnier R.
Desarrollo de herramientas para un sistema de alerta temprana de inundación costera en una bahía confinada: el caso de Pasaia **317**

Castro, R.
(175... años de cambio) en torno a Txingudi **320**

Oyola F., Pestana G., Puga M.A., González J., Ramos R., Santana S.B., Ojeda L., Cabrera A.D., Rendal S., Abreu M.V., Ruíz A.
IDAFE: acción climática e innovación en el sistema educativo **322**

Nogue L., Collin A., Lamontagne N., James D., Gloria H., Lesacher M.
The littoral observatory of the Emerald Coast and Mont-Saint-Michel Bay (North Brittany, France): bridging science and policy through integrated LiDAR, hydrodynamic modeling and virtual reality visualization **325**

Zurutuza J., Aguinaga A., García-Armenteros J.A.
The IGS reference frame transitions: IGb14 vs IGS20 as the latest frame **329**

KLIMA ALDAKETAREN ERRONKAK
RETOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO
LES DÉFIS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
CHALLENGES OF CLIMATE CHANGE

Del flujo de CO2 atmósfera-océano al almacenamiento de carbono: resolviendo el reservorio de carbono en las Islas Canarias

González, A.G., Sierra-Salcedo, J.R., Curbelo-Hernández, D., Sánchez-Mendoza, I., González-Santana, D., Santana-Casiano, J.M., González-Dávila, M.

Palabras clave: CO_2 aire-mar; carbono azul; *Cymodocea nodosa*; sedimentos costeros; Islas Canarias

Introducción

Las zonas costeras insulares constituyen interfaces dinámicas entre el océano abierto, la atmósfera y los ecosistemas bentónicos. En estos ambientes, los gradientes de hidrodinámica, productividad y procesos biogeoquímicos pueden desarrollarse a escalas espaciales reducidas, generando una elevada variabilidad en el ciclo del carbono. Esta complejidad es especialmente relevante en las Islas Canarias, donde las aguas costeras someras, las plataformas insulares estrechas y las praderas de fanerógamas marinas siguen estando escasamente representadas en las evaluaciones regionales del sistema de carbono.

Las aguas costeras pueden actuar como fuente o sumidero de CO_2 atmosférico en función de la variabilidad física y biogeoquímica, transportando CO_2 desde aguas superficiales hasta aguas profundas. Además, los sedimentos asociados a praderas marinas pueden almacenar carbono orgánico durante periodos más largos. Por tanto, distinguir entre intercambio aire-mar de CO_2, transformación lateral del carbono y almacenamiento sedimentario es fundamental para evaluar la contribución de las zonas costeras al presupuesto regional de carbono y a futuras estrategias de mitigación climática.

En este trabajo integramos dos aproximaciones observacionales complementarias: por un lado, medidas de alta resolución de fugacidad de CO_2 en agua superficial (fCO_{2sw}) y flujos aire-mar de CO_2 (FCO_2) en aguas costeras y oceánicas de Canarias; por otro, análisis de carbono orgánico en sedimentos de praderas de *Cymodocea nodosa* y sedimentos arenosos adyacentes. El objetivo es avanzar hacia una visión integrada del ciclo del carbono costero en Canarias, conectando la dinámica contemporánea del CO_2 superficial con el almacenamiento sedimentario de carbono azul.

Materiales y métodos

La dinámica superficial del CO_2 se evaluó mediante un registro de seis años, entre 2019 y 2025, obtenido con barcos de observación voluntaria (VOS) equipados con sistemas autónomos de medida de CO_2, temperatura y salinidad superficial (Curbelo-Hernández et al., 2021, 2025; Sánchez-Mendoza et al., 2026). A partir de estas medidas se calcularon la fCO_{2sw} y el FCO_2 en todo el periodo analizado.

De forma complementaria, se analizaron sedimentos procedentes de praderas de *C. nodosa* y zonas arenosas no vegetadas adyacentes en dos localidades costeras: El Pajar, en Gran Canaria, y Abades, en Tenerife. Se recogieron muestras superficiales de sedimento y testigos sedimentarios de hasta aproximadamente 16 cm de profundidad. El carbono orgánico sedimentario se estimó mediante el método de pérdida por ignición (LOI) (Heiri et al., 2001), y se calcularon las reservas de carbono a partir de la densidad aparente seca, el espesor de las capas sedimentarias y la concentración de carbono orgánico (Howard et al., 2014).

Resultados y discusión

Las observaciones de CO_2 superficial mostraron una marcada variabilidad estacional, interanual y espacial en las aguas costeras y oceánicas de Canarias. La variabilidad estacional de la fCO_{2sw} estuvo controlada principalmente por la temperatura superficial del mar, que explicó aproximadamente el 70 % de la señal estacional. Los cambios en el carbono inorgánico disuelto, dirigidos principalmente por procesos biológicos (producción/remineralización) y procesos físicos de transporte (vertical y lateral), explicaron alrededor del 20% de la variabilidad, compensando parcialmente el efecto térmico mediante procesos biológicos y biogeoquímicos.

A escala interanual, la fCO_{2sw} aumentó entre 2.5 y 5.2 µatm año^{-1}, lo que indica una acumulación progresiva de carbono en las aguas superficiales (Figura 1). En el sector oriental del archipiélago, este incremento se vio además reforzado por el calentamiento superficial. Como consecuencia, FCO_2 mostraron una fuerte heterogeneidad espacial y temporal: varias zonas occidentales actuaron predominantemente como fuentes netas anuales de CO_2, mientras que algunos sectores orientales oscilaron entre condiciones de débil sumidero, equilibrio próximo con la atmósfera y fuente neta. Esta variabilidad confirma que las aguas costeras de Canarias no pueden considerarse una unidad homogénea desde el punto de vista del intercambio de CO_2 (Sánchez-Mendoza et al., 2026).

Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, ULPGC.

E-mail: aridane.gonzalez@ulpgc.es

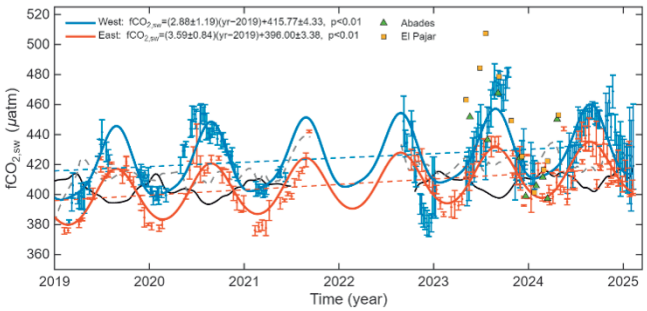


Figura 1. Serie temporal de los promedios semanales de $fCO_{2,sw}$ en las estaciones costeras de las zonas orientales (naranja; datos del VOS Jona Sophie) y occidentales (azul; datos del VOS Fred Olsen) del archipélago. Los datos suavizados de fCO_2 atmosférico se añaden en una línea negra continua para evaluar el status estacional de saturación. Los datos discretos obtenidos en las zonas costeras de Abades y El Pajar se añaden para su consideración.

La extrapolación a sectores costeros someros representativos indicó una fuente neta acumulada de 1.38 ± 0.28 Gg C año^{-1}, equivalente a 5.07 ± 1.02 Gg CO_2 año^{-1}, para el 17.5 % del área costera somera del archipiélago. Aunque esta magnitud es pequeña en comparación con los flujos oceánicos a escala de cuenca, resulta relevante a escala regional porque demuestra que las plataformas insulares someras pueden contribuir de forma medible al presupuesto costero de carbono. No obstante, este resultado no implica que todas las aguas costeras canarias actúen como fuente neta de CO_2, sino que pone de manifiesto la necesidad de ampliar la cobertura espacial para cuantificar de forma robusta el balance completo de carbono en la franja costera del archipiélago.

Además, las tendencias positivas observadas en FCO_2 sugieren un debilitamiento reciente de la capacidad regional de captación de CO_2. Si el aumento de fCO_2,sw continúa superando el crecimiento del CO_2 atmosférico, algunas zonas que actualmente actúan como sumideros débiles o se encuentran cerca del equilibrio podrían evolucionar hacia condiciones de fuente neta en el futuro. Estos resultados refuerzan la necesidad de considerar la variabilidad local, la exposición al viento, la circulación costera y la conectividad costa-océano en las evaluaciones regionales de carbono.

Los resultados sedimentarios confirmaron la importancia de las praderas de *C. nodosa* como hábitats de carbono azul en Canarias. Las reservas de carbono orgánico sedimentario alcanzaron valores de hasta 248.08 Mg C ha^{-1} en el intervalo de profundidad analizado, con stocks promedio estimados de 62.98 t CO_2 ha^{-1} en sedimentos de sebadal y 61.05 t CO_2 ha^{-1} en áreas arenosas adyacentes. El almacenamiento de carbono mostró una contribución equivalente entre ambos hábitats (Figura 2), lo que apunta al transporte lateral, la redistribución hidrodinámica y las condiciones locales de deposición como factores determinantes en la acumulación de carbono orgánico más allá de los límites del sebadal (Samper-Villarreal et al., 2016).

De acuerdo a lo resultados obtenidos, la acumulación sedimentaria del carbono orgánico está controlada por la producción local de la pradera, por factores como la granulometría, la hidrodinámica, la retención de partículas y la conectividad entre hábitats. Por tanto, las evaluaciones de carbono azul que se limiten exclusivamente a la huella generada por las fanerógamas marinas podrían subestimar el papel real de estos ecosistemas dentro del paisaje costero (Duarte & Krause-Jensen, 2017).

Los resultados muestran que el intercambio aire-mar de CO_2 y el almacenamiento sedimentario de carbono proporcionan información distinta pero complementaria. Las medidas de CO_2 superficial permiten determinar si las aguas costeras actúan actualmente como fuente o sumidero atmosférico, mientras que los sedimentos integran procesos de acumulación y retención de carbono a escalas temporales más largas. Esto refuerza la idea de que las reservas marinas son zonas fundamentales para la acción climática en regiones altamente vulnerables como Canarias.

Conclusiones

Las aguas costeras someras y las praderas marinas de Canarias representan componentes diferenciados, pero estrechamente relacionados, del ciclo regional del carbono. Las observaciones de alta resolución muestran que algunos sectores costeros están evolucionando hacia una mayor emisión neta de CO_2, asociada al aumento de la fugacidad de CO_2 en el agua de mar y al calentamiento superficial. Paralelamente, los sedimentos de *Cymodocea nodosa* y las áreas no vegetadas adyacentes

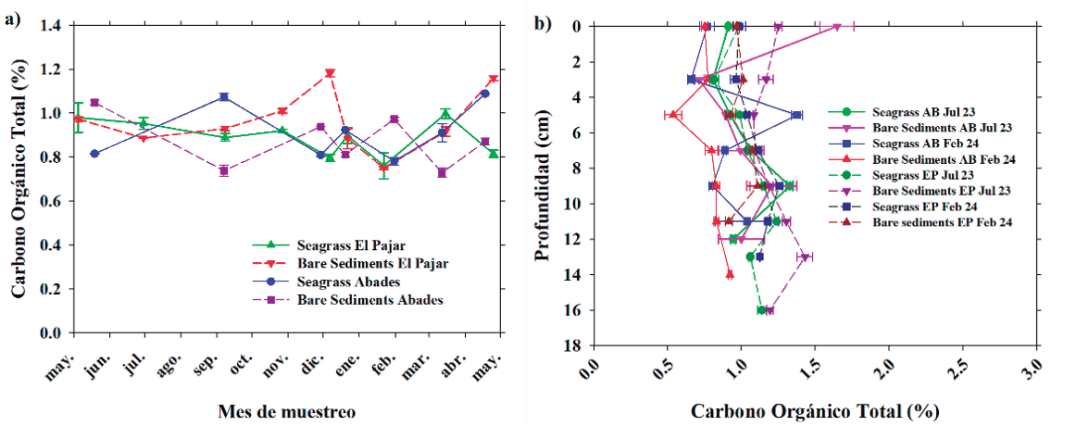


Figura 2. COT en sedimentos de El Pajar y Abades en zonas de sebadal y áreas arenosas no vegetadas. (a) Muestras superficiales anuales. (b) Perfiles sedimentarios en julio 2023 y febrero 2024.

almacenan cantidades relevantes de carbono orgánico, lo que destaca su papel potencial dentro de las estrategias de carbono azul en Canarias.

Estos resultados muestran que el intercambio aire-mar de CO_2 y el almacenamiento sedimentario aportan información distinta y complementaria. Las medidas de CO_2 superficial permiten evaluar el comportamiento actual de las aguas costeras como fuente, sumidero o zona próxima al equilibrio con la atmósfera, mientras que los sedimentos integran procesos de acumulación, transformación y retención de carbono a escalas temporales más largas. Por tanto, el papel climático de las zonas costeras no puede evaluarse a partir de una única métrica, sino mediante una aproximación que considere conjuntamente el intercambio atmosférico, la producción biológica, la exportación lateral y vertical, y el almacenamiento sedimentario.

En este contexto, las praderas de *C. nodosa* y los sedimentos adyacentes deben entenderse como parte de un paisaje costero más amplio. La acumulación de carbono orgánico no depende exclusivamente de la biomasa vegetal ni de la superficie ocupada por la pradera, sino también de procesos como la hidrodinámica local, la granulometría, la retención de partículas y la conectividad entre hábitats. Por ello, las evaluaciones de carbono azul limitadas únicamente a los hábitats vegetados podrían subestimar el papel real de estos sistemas dentro del balance costero de carbono.

Asimismo, la elevada heterogeneidad espacial observada en las aguas costeras canarias pone de manifiesto que las plataformas insulares someras no pueden considerarse sistemas homogéneos ni extrapolarse directamente a partir de las aguas oceánicas adyacentes. La función de cada sector dentro del ciclo regional del carbono depende de la interacción entre condiciones hidrográficas locales, exposición al viento, circulación costera, conectividad costa-océano y procesos biogeoquímicos. Esta complejidad debe incorporarse tanto en los futuros presupuestos regionales de carbono como en la planificación de estrategias de mitigación y adaptación climática.

En conjunto, estos resultados subrayan la necesidad de integrar explícitamente las zonas costeras insulares en las evaluaciones regionales de carbono y de distinguir entre intercambio atmosférico de CO_2, exportación lateral y almacenamiento sedimentario. Esta información es clave para orientar acciones de conservación marina, mejorar la planificación de áreas protegidas y evaluar con mayor rigor las oportunidades vinculadas al carbono azul y a los mercados de carbono en Canarias.

Referencias

Duarte, C. M., & Krause-Jensen, D. (2017). Export from seagrass meadows contributes to marine carbon sequestration. In Frontiers in Marine Science (Vol. 4, Issue JAN). Frontiers Media S. A. https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00013

Heiri, O., Lotter, A. F., & Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. In Journal of Paleolimnology (Vol. 25). https://doi.org/10.1023/A:1008119611481

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (Eds.). (2014). Coastal blue carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses (180 p.). Conservation International; Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO; International Union for Conservation of Nature.

Sánchez-Mendoza, I.Sánchez-Mendoza, I., González-Dávila, M., González-Santana, D., Curbelo-Hernández, D., Estupinán-Santana, D., González, A. G., & Santana-Casiano, J. M. (2026). Modelling seawater p CO and pH in the Canary Islands region based on satellite measurements and machine learning techniques. Ocean Science, 22(1), 609–628. https://doi.org/10.5194/os-22-609-2026

Samper-Villarreal, J., Lovelock, C. E., Saunders, M. I., Roelfsema, C., & Mumby, P. J. (2016). Organic carbon in seagrass sediments is influenced by seagrass canopy complexity, turbidity, wave height, and water depth. Limnology and Oceanography, 61(3), 938–952. https://doi.org/10.1002/lno.10262

Agradecimientos - Esta investigación está financiada por el convenio CARBOCAN (Consejería de Transición Ecológica y Energía, Gobierno de Canarias), por los proyectos PLANCLIMAC2 (1/MAC/2/2.4/0006) e IMPLACOST (1/MAC/2/2.4/0009), en el marco del Programa de Cooperación Territorial Interreg VI Madeira–Azores–Canarias (MAC) 2021–2027, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), y por el proyecto Multi-COast (TED2021-130892B-I00), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la Unión Europea a través del mecanismo "NextGenerationEU"/PRTR. Los estudios también han recibido financiación del Gobierno de Canarias y la Fundación Loro Parque a través del convenio CanBIO (subprograma CanOA). Asimismo, se agradece al Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico la concesión de los permisos necesarios para la realización de este estudio.

Increasing Impact of Saharan Intrusions on Air Quality in Atlantic Iberia

Ortuzar, Asier[1], Torre-Pascual, Eduardo[1] and Sáez de Cámara, Estíbaliz[1]

Keywords: Warm intrusion, heatwave, ozone, climate change

Introduction

Saharan warm intrusions are discrete synoptic-scale events characterized by the northward advection of a hot, exceptionally dry, and often dust-laden air mass originating from Northern Africa. These events significantly alter regional meteorological conditions and are a major driver of summer heatwaves (Sousa et al., 2019). Beyond their direct impact on temperature, Saharan warm intrusions can also degrade air quality by promoting the accumulation and formation of tropospheric ozone (Querol et al., 2016 and Salvador et al., 2022). Tropospheric ozone is a secondary pollutant formed photochemically from precursor emissions, favored by strong solar radiation, high temperatures, and stagnant air. Consequently, the heatwaves associated with Saharan warm intrusions provide an environment that enhances ozone production through accelerated photochemistry and increased atmospheric stability (Coates et al., 2016). Recent analyses indicate that the frequency of Saharan warm intrusions has doubled during the 2020s compared with the previous decade, suggesting that their influence on ozone pollution may become increasingly important. This trend could compromise compliance with the new Directive (EU) 2024/2881 on ambient air quality and cleaner air for Europe across regions of the Iberian Peninsula. This new directive establishes a maximum daily 8-hour mean (MDA8) ozone threshold for human health protection, allowing fewer than 18 exceedances of 120 per year (European Parliament and Council, 2024). Against this background, the aim of this study is to quantify the impact of Saharan warm intrusions on tropospheric ozone concentrations across Atlantic Iberia.

Materials and methods

The main materials used in this study can be divided into two groups: meteorological and air-quality datasets. The meteorological dataset consisted of ERA5 hourly data on pressure levels (Hersbach et al., 2000), available from 1940 to the present, and obtained from the Copernicus Climate Data Store. For the identification of warm intrusions, temperature and geopotential data at the 500, 700, 925, and 1000 hPa pressure levels were downloaded every 12 hours for two spatial domains: the first within the spatial domain bounded by 18–30°N and 9°W–29°E, encompassing the Saharan Desert and following the domain adopted in previous studies, and a second domain 36–44°N and 9.5°W–3.5°E, corresponding to the study area. For the classification, geopotential, potential vorticity, and temperature fields at 1000 hPa, 850 hPa, and 500 hPa were selected at a 3-hourly resolution for intrusion days between 2000 and 2025.

On the other hand, the air-quality data were obtained from the Spanish Ministry for Ecological Transition and Demographic Challenge MITERD (https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire.html, last access: 16 February 2026) and the Portuguese Air-Quality Information System QualAr (https://qualar.apambiente.pt/downloads, last access: 20 April 2026). Hourly ozone concentration time series were downloaded from both the MITERD and QualAr databases, covering the periods 2004–2024 and 2001–2025, respectively. The definition of warm intrusions is based on Sousa et al. (2019) and its subsequent adaptation by Cos et al. (2025):

Equation 1

$$\Delta Z_{500-1000} = Z_{500} - Z_{1000}$$

Equation 2

$$\underline{\theta}_{700-925} = \frac{\theta_{925} + \theta_{700}}{2}$$

where is the geopotential height at pressure level i and is the potential temperature at pressure level i defined as

Equation 3

$$\theta = T\left(\frac{1000}{p}\right)^{\frac{R_d}{C_p}}$$

with and being the specific gas constant and specific heat capacity for dry air, respectively. We use these two specific variables because they most effectively capture the distinctive characteristics of the Saharan air masses originating from the Sahara. Daily thresholds for both variables are calculated by computing the climatology over the Sahara region (18°–30°N and 9°W–20°E) for each 31-day moving window throughout the year. A warm intrusion is identified when both Equation 1 and 2 exceed the previously defined thresholds over at least 5% of the study area (Cos et al., 2025).

We applied Principal Component Analysis (PCA) and unsupervised machine learning clustering techniques to the previously mentioned dataset. This approach allowed us to identify the main synoptic types associated with the Saharan warm intrusions. To investigate this relationship, we selected heatwave days and analyzed their association with Saharan intrusions using the same ERA5 dataset described above. Two datasets were downloaded: one consisting of daily values for the central hours of the day (12:00–16:00) covering June to September during 1971

[1]*Faculty of Engineering Bilbao, University of the Basque Country (EHU), Bilbao, 48013, Spain*
E-mail contact: asier.ortuzar@ehu.eus

and 2000, and another for the period 2001–2025. Rather than adopting the definition from the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), this study follows the definition established by the Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). According to AEMET, a heatwave is defined as an episode of at least three consecutive days in which at least 10% of the reference stations record maximum temperatures above the 95th percentile of their daily maximum temperature series for July and August during the 1971–2000 reference period (AEMET., 2024). Because this definition is restricted to July and August, the analysis was extended to include June and September in order to cover the entire summer season.

Results and discussion

Our preliminary results show a marked increase in the number of days of the Saharan warm intrusions into the Iberian Peninsula (Figure 1a). Especially the 2020s have reached unprecedented records, doubling the number of this phenomenon compared to the previous decade. At the same time, the average duration of this phenomenon has also increased over the course of the studied period (Figure 1b):

A combined analysis of PCA and clustering techniques reveals the main synoptic configurations associated with warm intrusions: (i) a high-pressure system, (ii) a low-pressure system and, (iii) a Heat Low (Figure 2a). In addition, the monthly distribution of warm intrusions according to these clusters has also been performed (Figure 2b). The Heat Low is the most frequent cluster and and the only one observed during summer, reflecting the intense surface heating over the Sahara Desert during this season.

The duration and frequency increases shown in Figure 1 are consistent with the observed warming of the Sahara Desert surface associated with climate change. The main synoptic configuration related to this heating is represented by the Heat Low, which, as mentioned before, accounts for the largest number of intrusion days (Figure 2). By analyzing the days classified simultaneously as heatwaves and warm intrusions, we found that approximately

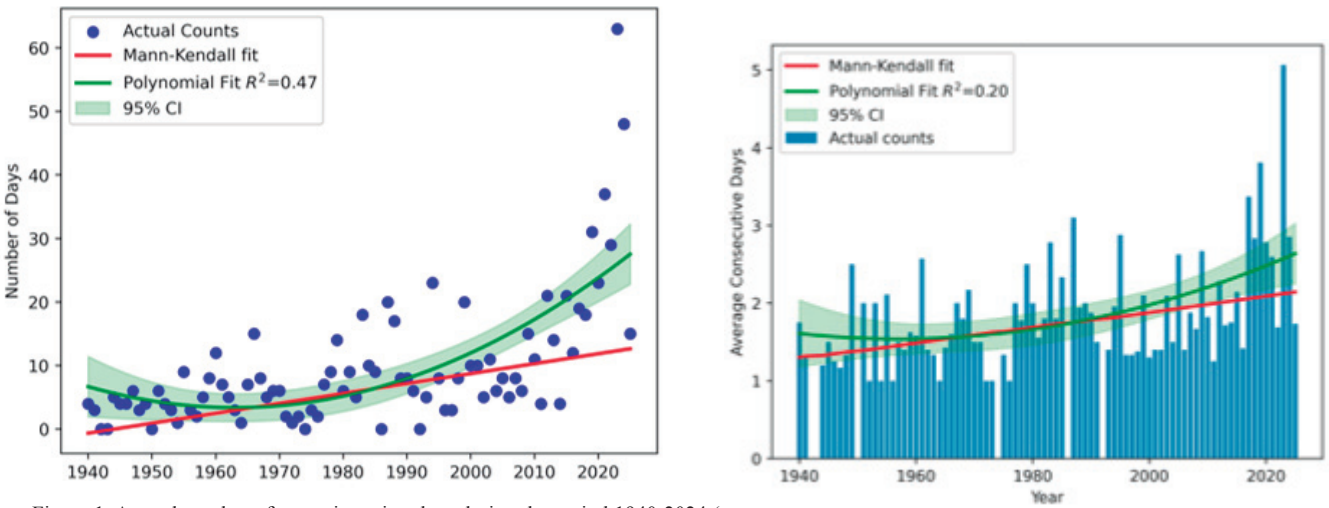


Figure 1. Annual number of warm intrusion days during the period 1940-2024 (a) and mean duration of consecutive warm intrusion events over the same period (b).

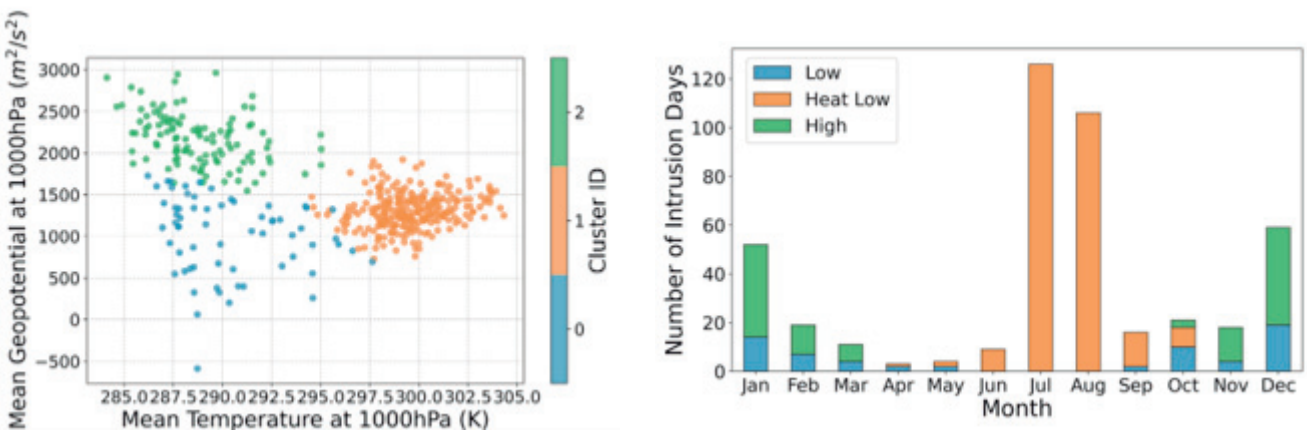


Figure 2. Distribution of warm intrusion days according to average surface temperature and geopotential height (a) and monthly distribution of warm intrusion days (b). Each colour corresponds to a distinct cluster identified by the clustering analysis

11% of heatwave days coincided with Saharan warm intrusions, suggesting that nearly 1 in 9 heatwave days over Iberia is associated with Saharan air masses.

These changes pose an increasing threat to human health by enhancing both the frequency and duration of heatwave events and by promoting episodes of elevated tropospheric ozone concentrations (see Table 1). To evaluate this effect, the Atlantic Iberian region was analyzed, with particular emphasis on its southern areas due to their proximity to the Sahara Desert. All four provinces show a statistically significant difference in daily maximum ozone between warm intrusion and non-intrusion (background) days ($p < 0.001$). Given that the number of intrusion days) is two orders of magnitude smaller than the number of non-intrusion (background) days , the effect size and statistical power were additionally computed. The rank-biserial correlation *r*, which quantifies the magnitude of the difference independently of sample size, indicates a medium effect in Algarve and Cádiz ($r > 0.3$) and a large effect in Alentejo and Huelva ($r > 0.5$), following conventional threshold definitions. Statistical power, defined as the probability of correctly detecting a true effect given the observed sample sizes, exceeds 0.80 in all four provinces, surpassing the conventional adequacy threshold. These results confirm that warm intrusion days are associated with elevated ozone concentrations across all provinces, with a particularly pronounced increase in Alentejo and Huelva.

The mean difference of maximum ozone concentrations varies between stations. It is particularly pronounced in the Alentejo region because of its typically low background ozone concentrations, in contrast to the other regions. In the southernmost regions, background ozone levels are already relatively high; therefore, the additional increase associated with warm intrusions is less pronounced. These values may also be influenced by other factors, such as wildfires, which can also increase ozone concentrations. Nevertheless, a statistically significant relationship has been found. Future work will focus on a more detailed analysis of this relationship to better understand the mechanisms controlling the observed ozone concentrations.

Table 1. Sample size of intrusion days and non-intrusion days, concentration difference between intrusion and non-intrusion days, Rank-biserial correlation and achieved power. symbols indicate statistical significance at the p<0.001 level

Province	η_{WI}	η_{BG}	Δ Mean O_3 ($\mu g/m^3$)	r-value	Power
Algarve***	18	1225	14.5	0.430	0.932
Alentejo ***	13	1475	49.9	0.769	0.999
Cádiz***	23	1279	8.7	0.384	0.936
Huelva***	25	1277	18.6	0.599	1.000

Conclusions

In summary, the past few decades have seen a marked increase in the frequency and persistence of Saharan warm air intrusions across the Iberian Peninsula. Because these events are closely linked to heatwaves and enhanced tropospheric ozone formation and accumulation, the frequency of these compound heat and air pollution events has risen accordingly. This study shows that nearly one in nine heatwave days is associated with a Saharan warm intrusion, highlighting the growing influence of these episodes. A primary driver of this trend is the advection of the Saharan desert air masses, which are becoming progressively warmer as a direct consequence of climate change. Consequently, both regional air quality and heatwave severity are expected to continue worsening, posing an increasing risk to human health and challenging compliance with future air-quality standards. Given the clear upward trend in the occurrence of Saharan warm intrusions, their environmental and societal impacts are also likely to become increasingly important in the coming decades.

References

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), 2024. Olas de calor en España desde 1975. Área de Climatología y Aplicaciones Operativas. https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/detalles/olascalor

Coates, J., Mar, K. A., Ojha, N., and Butler, T. M., 2016. The influence of temperature on ozone production under varying NO_x conditions – a modelling study, Atmos. Chem. Phys., 16, 11601–11615, https://doi.org/10.5194/acp-16-11601-2016

Cos, P., Olmo, M., Campos, D., Marcos-Matamoros, R., Palma, L., Muñoz, Á. G., and Doblas-Reyes, F. J., 2025. Saharan warm-air intrusions in the western Mediterranean: identification, impacts on temperature extremes, and large-scale mechanisms, Weather Clim. Dynam., 6, 609–626, https://doi.org/10.5194/wcd-6-609-2025

European Parliament and Council of the European Union, 2024. Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the Council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union, L 2024/2881. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N, 2023: ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI: 10.24381/cds.bd0915c6 (Accessed on 20-01-2026)

Salvador, P., Pey, J., Pérez, N. *et al.* Increasing atmospheric dust transport towards the western Mediterranean over 1948–2020, 2022. *npj Clim Atmos Sci* **5**, 34.. https://doi.org/10.1038/s41612-022-00256-4

Sousa, P., Barriopedro, D., Ramos, A., García-Herrera, R., Espírito-Santo, F., Trigo, R., 2019. Saharan air intrusions as a relevant mechanism for Iberian heatwaves: The record breaking events of August 2018 and June 2019, Weather and Climate Extremes, Volume 26, 100224, ISSN 2212-0947, https://doi.org/10.1016/j.wace.2019.100224

X. Querol, A. Alastuey, C. Reche, A. Orio, M. Pallares, F. Reina, J.J. Dieguez, E. Mantilla, M. Escudero, L. Alonso, G. Gangoiti, M. Millán, 2016, On the origin of the highest ozone episodes in Spain, Science of The Total Environment,
Volume 572, Pages 379-389, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.193

Tracking Hydroclimatic Change on the Northern Basque Coast and Its Implications for Mucilage Favourable Conditions

Susperrégui N.[1], D'Amico F.[2], de Casamajor M.-N.[3], Caill-Milly N.[3], Bru N.[2], Pigot T.[4], Kermorvant C.[2]

Keywords: Hydroclimatic change; Coastal ecosystem dynamics; Marine mucilage

Introduction

Marine mucilage is a gelatinous organic matrix produced through the aggregation of extracellular polymeric substances released by planktonic communities (Danovaro et al., 2009). In recent decades, mucilage events have been increasingly reported worldwide, particularly in the Mediterranean Sea, where both their frequency and persistence have markedly increased since the late 1980s . These events have been associated with major ecological and socio-economic impacts, including oxygen depletion, alteration of marine habitats (Karadurmuş and Sari, 2022; Savun-hekimoğlu and Gazioğlu, 2021) and disruption of fisheries (Becheri, 1991; Yılmaz et al., 2020) and tourism activities.

Mucilage formation results from complex interactions between biological processes and environmental conditions (Savun-hekimoğlu and Gazioğlu, 2021). Numerous studies have highlighted the influence of hydroclimatic factors—including sea surface temperature, solar radiation, freshwater inputs, water-column stratification, and hydrodynamic conditions—on the production, aggregation, and persistence of marine mucilage (Danovaro et al., 2009; Ricci et al., 2014; Russo et al., 2005). Understanding the long-term evolution of these environmental drivers is therefore essential for assessing how climate change may modify the occurrence of mucilage events. Along the southeastern Bay of Biscay, local fishermen have reported the recurrent occurrence of a viscous substance known as Liga (local name of mucilage) since the late 1970s. Although initially sporadic, the phenomenon has become increasingly persistent since the early 2000s, raising questions about the role of ongoing hydroclimatic changes in the region.

In this study, we investigate the long-term evolution of the principal hydroclimatic variables controlling mucilage formation as identified in the bibliography and we developed a daily Mucilage Hydroclimatic Index (MHI) integrating sunshine duration, maximum air temperature, river discharge and significant wave height using data from the Northern Basque coast as case study.

[1]Comité Interdépartemental des Pêches Maritimes et des Elevages Marins des Pyrénées Atlantiques et des Landes (CIDPMEM 64-40), 12 quai Pascal Elissalt, 64500 Ciboure
[2]Université de Pau et des Pays de l'Adour, Laboratoire de Mathématiques et de leurs Applications de PAU - UMR 5142 CNRS, F-64600, Anglet, France
[3]Ifremer, COAST, F-64600 Anglet, France
[4]Université de Pau et des Pays de l'Adour, UPPA, CNRS, IPREM, - UMR 2542 CNRS, F-64600, Anglet, France
E-mail contact: claire.kermorvant@univ-pau.fr

Materials and methods

Long-term environmental datasets describing the hydroclimatic conditions potentially influencing marine mucilage development were compiled for the French Basque coast. Daily meteorological variables, including sunshine duration (INST) and maximum air temperature (TX), were obtained from the Météo-France station at Biarritz (station ID 64024001), providing daily records from April 1958 to 2025. Daily discharge of the Adour River (Q) was obtained from the French national hydrometric database (HydroPortail, Ministry of Ecology). Reconstructed by summing the daily flows measured at gauging stations located on the main downstream tributaries, it results in a daily series covering the period 1956–2025. Daily significant wave height (H13D) was compiled from two complementary sources. Between November 2009 and July 2025, observations were obtained from the Anglet wave buoy (43°31.93′N, 1°36.9′W. Missing buoy observations were filled using daily significant wave height from the Copernicus Marine Service IBI wave reanalysis extracted at the nearest grid point to the buoy, providing a continuous and spatially consistent wave-height time series over the study period. For the period preceding November 2009, wave conditions were reconstructed from calibrated numerical hindcasts based on the SIMAR wave reanalysis (Puertos del Estado), which were validated against in situ observations by the UPPA Wave–Structure Interactions Team. These complementary datasets were merged into a daily time series spanning the entire study period under the hypotheisis that both gove the same information at least with the same precision.

To synthesize the principal hydroclimatic factors identified in the literature as favourable to marine mucilage development, we developed a daily Mucilage Hydroclimatic Index (MHI). Each variable was incorporated according to its expected influence on mucilage development: sunshine duration and air temperature increase the mucilage, whereas river discharge and wave height decrease it because they reduce water-column stability. Grouping so the environmental parameters in two different sets acting in opposite way and considering in each set that the interaction of environmental parameters is multiplicative, we propose the following formula:

$$MHI = \mathrm{Log}\left(\frac{(\widetilde{INST} + \varepsilon) \times (\widetilde{TX} + \varepsilon)}{(\widetilde{Q} + \varepsilon) \times (\widetilde{H13D} + \varepsilon)}\right)$$

where ε is a small positive constant added to avoid numerical issues associated with zero values, (INST is the daily sunshine duration (minutes), TX is the daily maximum air temperature (°C), Q is the total daily discharge of the Adour River ($m^3\ j^{-1}$), and H13D is the mean of daily significant wave height (m). Variables marked with a tilde (~) were rescaled to the [0, 1] interval using min–max normalization. As mucilage forms in surface waters, stable conditions—characterized by calm seas and sunny

weather—promote the vertical stratification of coastal water masses, the aggregation of mucilage in surface waters, and the emergence of mature forms. Consequently, high MHI values characterize periods combining warm and sunny atmospheric conditions with weak river discharge and low wave energy, corresponding to environmental conditions considered favourable for the initiation and persistence of marine mucilage. This daily index is dimensionless, centered around zero, and bounded by a function of ε.

Temporal variability of each environmental variable and MHI was analysed at annual and seasonal scales. Annual anomalies were calculated relative to the long-term mean, while seasonal anomalies were computed relative to the long-term mean of each season. Temporal trends were assessed using the non-parametric Mann–Kendall test, which is widely used for detecting monotonic trends in hydroclimatic time series. For series exhibiting a significant trend ($p < 0.05$), the magnitude of the trend was estimated using the Theil–Sen slope estimator, a robust non-parametric estimator known for its low sensitivity to outliers (Sen, 1968).

Results and discussion

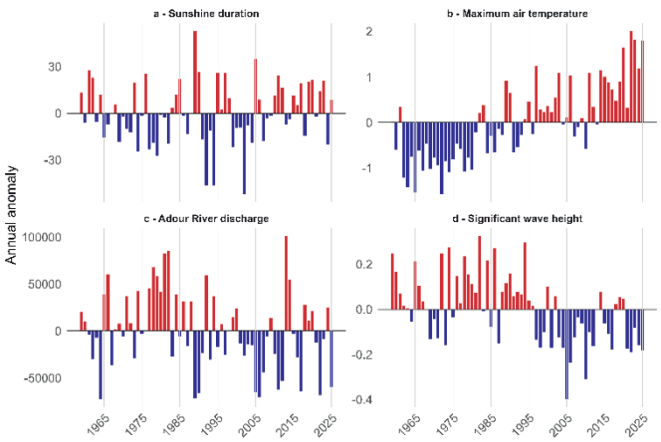


Figure 1: Annual anomalies of the main hydroclimatic variables included in the Mucilage Hydroclimatic Index (MHI). Anomalies were calculated relative to the long-term annual mean for sunshine duration, maximum air temperature, Adour River discharge, and significant wave height.

The four hydroclimatic drivers exhibited contrasting long-term variability (Figure 1) around the overall mean. Maximum air temperature showed a clear shift from predominantly negative anomalies before the 1980s to predominantly positive anomalies in recent decades, consistent with regional atmospheric warming. Sunshine duration displayed substantial interannual variability, with no obvious long-term directional change. In contrast, Adour River discharge exhibited increasingly negative anomalies after the 1980s, indicating a tendency towards lower freshwater inputs. Significant wave height also showed a predominance of negative anomalies during the last two decades, suggesting calmer marine conditions compared with the long-term average. Taken together, these results indicate that several key environmental drivers associated with marine mucilage development have evolved over the study period. Air temperature shows long-term increase, while Adour River discharge and significant wave height display increasingly negative anomalies in recent decades. Sunshine duration exhibits no clear trend but marked interannual variability, suggesting an episodic influence.These contrasting temporal patterns highlight the need for an integrated indicator that combines the multiple hydroclimatic drivers rather than considering each variable independently.

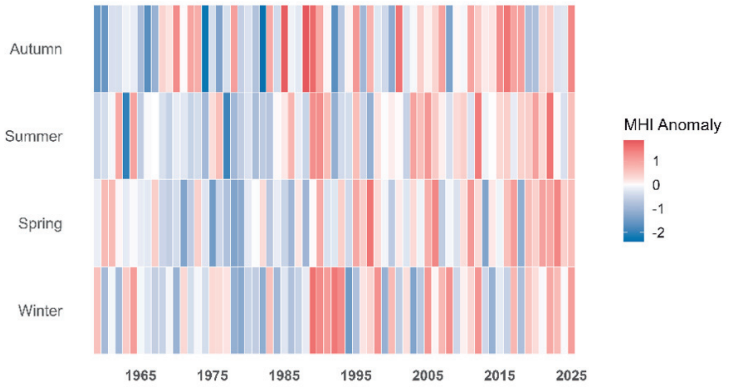


Figure 2 : Heatmap of seasonal anomalies of the annual mean Mucilage Hydroclimatic Index (MHI) between 1958 and 2025. For each season, anomalies were calculated relative to the long-term seasonal mean. Blue colours indicate years with below-average MHI values, whereas red colours indicate above-average hydroclimatic conditions potentially favourable to marine mucilage formation.

The seasonal anomaly heatmap (Figure 2) showed substantial interannual variability across all seasons. Nevertheless, the frequency and persistence of positive anomalies increased from the late 1980s onward, particularly during summer and autumn, whereas negative anomalies dominated much of the earlier record. Spring displayed a similar, although less pronounced, shift towards positive anomalies, while winter remained comparatively variable. These results suggest a progressive transition towards hydroclimatic conditions increasingly favourable to marine mucilage formation over recent decades.

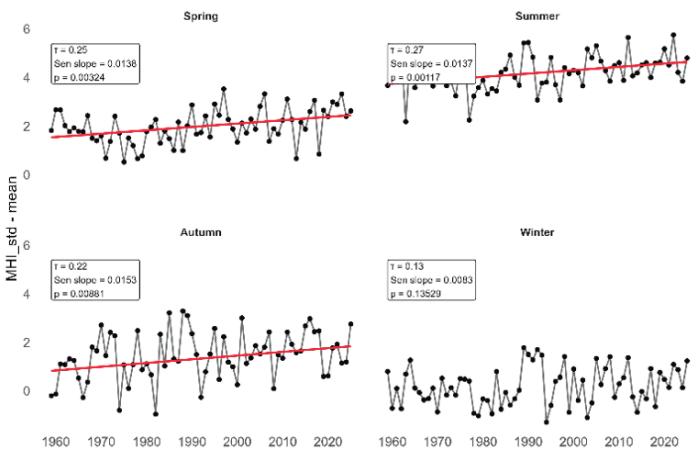


Figure 3. Seasonal time series of the Mucilage Hydroclimatic Index (MHI) from 1958 to 2025. Black dots and lines represent seasonal mean MHI values. Red lines, when they are drawing, indicate significant monotonic trends estimated using the Theil–Sen slope estimator following a significant Mann–Kendall test ($p < 0.05$). Kendall's τ, Sen's slope, and associated p-values are shown in each panel.

Seasonal analyses (Figure 3) revealed contrasting long-term trends in the MHI. A significant positive trend was detected in summer, indicating a significant intensification of hydroclimatic conditions favourable to marine mucilage formation over the study period. A significant positive trend was also detected in spring and autumn. In contrast, winter exhibited weaker positive trends that were not statistically significant ($p > 0.05$). Although substantial interannual variability persisted across all seasons, the significant increases observed during spring and summer suggest that hydroclimatic conditions conducive to marine mucilage formation have become progressively more favourable during the biologically most productive period of the year. This seasonal strengthening may increase both the likelihood and persistence of mucilage events under ongoing climate change.

Conclusions

This study provides the first long-term hydroclimatic assessment of environmental conditions potentially favourable to marine mucilage formation along the Northern Basque coast. By integrating sunshine duration, air temperature, river discharge and wave height into a single Mucilage Hydroclimatic Index (MHI), we show that the hydroclimatic environment has evolved markedly over the last decades. While the individual drivers display contrasting temporal trajectories, their combined effect reveals an increasing occurrence of conditions favourable to mucilage development, particularly during spring, summer and automn. Beyond this cas study, the proposed framework could be readily adapted to other coastal systems affected by mucilage events using locally available hydroclimatic observations.

Although the MHI does not directly predict mucilage occurrence, it provides a simple and reproducible framework for tracking changes in environmental suitability through time. It could be further improved by incorporating low-frequency data on other key factors identified as geochemical (nutrient ratios, exopolymeric substances, and transparent exopolymeric particles) and biological (chlorophyll-a and phytoplankton composition). This index could therefore support future monitoring programmes and contribute to the development of early-warning approaches when combined with biological and oceanographic observations. Future work should evaluate the relationship between the MHI, more classical indexes (Milon et al., 2026), and documented mucilage events in order to assess its predictive potential and refine its applicability under future climate scenarios.

References

Becheri, E., 1991. Rimini and Co — The end of a legend?: Dealing with the algae effect. Tour. Manag. 12, 229–235. https://doi.org/10.1016/0261-5177(91)90007-G

Danovaro, R., Fonda Umani, S., Pusceddu, A., 2009. Climate Change and the Potential Spreading of Marine Mucilage and Microbial Pathogens in the Mediterranean Sea. PLOS ONE 4, e7006. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007006

Karadurmuş, U., Sari, M., 2022. Marine mucilage in the Sea of Marmara and its effects on the marine ecosystem: mass deaths. Turk. J. Zool. 46, 93–102. https://doi.org/doi.org/10.3906/zoo-2108-14

Milon, É., Castège, I., D'Elbée, J., D'Amico, F.J.N., 2026. The role of oceano-climatic conditions in top predator temporal changes: Lessons from a 48-year long-term study in the southern Bay of Biscay. J. Mar. Syst. 256, 104250. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2026.104250

Ricci, F., Penna, N., Capellacci, S., Penna, A., 2014. Potential environmental factors influencing mucilage formation in the northern Adriatic Sea. Chem. Ecol. 30, 364–375. https://doi.org/10.1080/02757540.2013.877004

Russo, A., Maccaferri, S., Djakovac, T., Precali, R., Degobbis, D., Deserti, M., Paschini, E., Lyons, D.M., 2005. Meteorological and oceanographic conditions in the northern Adriatic Sea during the period June 1999–July 2002: Influence on the mucilage phenomenon. Mucilages Adriat. Tyrrhenian Seas 353, 24–38. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.058

Savun-hekimoğlu, B., Gazioğlu, C., 2021. Mucilage Problem in the Semi-Enclosed Seas: Recent Outbreak in the Sea of Marmara. Int. J. Environ. Geoinformatics 8, 402–413. https://doi.org/10.30897/ijegeo.955739

Sen, P.K., 1968. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. J. Am. Stat. Assoc. 63, 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Yılmaz, S., Keleş, G., Zengin, M., 2020. Possible economic effects of musilage on Sea of Marmara fisheries. Int. J. Agric. For. Life Sci. 4, 173–177.

Monitoring harmful algal blooms on the French Atlantic coast: species shift and environmental drivers of *Ostreopsis* blooms

Commault Audrey[1], Itoïz Sarah[1], Detchart Ana[1,6], Lagrabe Oriane[1], Petrau Agnès[1], Siano Raffaele[2], Briand Enora[3], Fernández-Valero Alan Denis[4], Seoane Sergio[4,5], Bocquet-Escourrou Aurélie[6], Sarrade Caroline[6]

Keywords: Ostreopsis spp., harmful algal blooms, microscopy, quantitative PCR, public health

Introduction

Climate change is facilitating the expansion of harmful benthic dinoflagellates into new coastal regions. Along the French Atlantic coast, Ostreopsis cf. ovata remained rare for many years, while only Ostreopsis sp. 9 (formerly Ostreopsis cf. siamensis) had been reported prior to 2018 (Drouet et al., 2022). In 2021, O. cf. ovata was detected for the first time along the French Basque coast, coinciding with several cases of respiratory disorders among beachgoers and coastal workers. Since then, recurrent summer blooms of Ostreopsis spp. have been recorded along the Basque shoreline. Given that O. cf. ovata is a toxin-producing species responsible for numerous human exposure events in the Mediterranean region, these blooms have become a growing public health concern (Paradis et al., 2024). To improve the monitoring of Ostreopsis blooms and support health risk management, a rapid qPCR assay targeting O. cf. ovata and Ostreopsis sp. 9 was developed to complement the standard microscopic method. This study presents the results of a four-year monitoring programme (2022–2025) conducted at five key sites along the French Basque coast. In 2025, a high-frequency survey was carried out at Erromardie Beach (Saint-Jean-de-Luz, France) to compare Ostreopsis abundance in the water column and on macroalgae, which are considered the primary reservoir for bloom development. The objectives were to better understand bloom dynamics, determine species composition, investigate the transition between benthic and planktonic phases, and identify the most effective monitoring strategies for supporting early warning and beach management decisions.

[1]Rivages Pro Tech SUEZ, 64210, Bidart, France
[2]Ifremer, DYNECO, 29280, Plouzané, France
[3]Ifremer, PHYTOX, GENALG, 44000, Nantes, France
[4]Department of Plant Biology and Ecology, University of the Basque Country UPV/EHU, 48940, Leioa, Spain
[5]Research Centre for Experimental Marine Biology and Biotechnology (PiE-UPV/EHU), 48620, Plentzia, Spain
[6]Communauté d'Agglomération Pays Basque (CAPB), 64122 Urrugne, France

E-mail contact:audrey.commault@suez.com

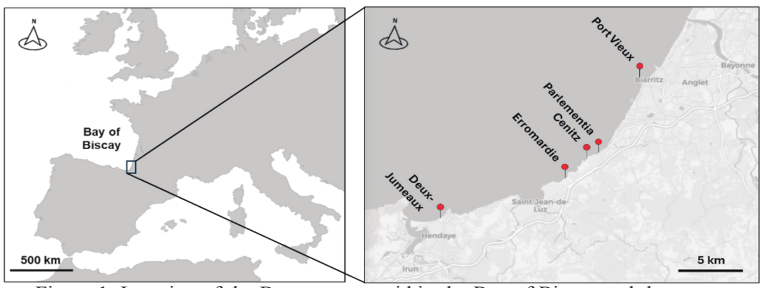


Figure 1. Location of the Basque coast within the Bay of Biscay and the five sampling sites

Materials and methods

The abundance of Ostreopsis spp. was monitored over four consecutive summers (2022–2025) in the bathing waters of five key beaches along the Basque coast (Figure 1). During July 2025, a high-frequency monitoring was conducted at Erromardie Beach using twice-daily sampling at high tide (HT) and low tide (LT). A composite water sample (3 × 500 mL) was collected from the water column at each tidal stage, and three macrophyte samples were collected from the rocky shore at low tide. The samples were analysed by both microscopy (genus-level abundance) and quantitative PCR (qPCR, starting in 2023) targeting Ostreopsis cf. ovata and Ostreopsis sp. 9. In brief, a subsample was preserved with Lugol's iodine solution and analyzed by inverted microscopy following the Utermöhl method described in the NF EN 15204 standard. The remaining sample was filtered through a 3 µm membrane, the cells were lysed by bead-beating and the DNA was extracted using the NucleoSpin Plant II Mini kit (Macherey-Nagel) following the manufacturer's instructions. Species-specific quantitative PCR (qPCR) targeting the ITS-5.8S rDNA region of Ostreopsis sp. 9 and Ostreopsis cf. ovata was performed following the protocol described in Penna et al. (2007); Drouet et al. (2021), and the European patent application EP4458966. Analyses were conducted on a CFX96 Touch System (Bio-Rad) using Platinum® SYBR® Green qPCR SuperMix-UDG (Invitrogen). DNA extracts were analysed alongside negative controls and a species-specific standard curve. Absolute quantification was achieved by interpolation against the standard curve, and results were expressed as cell equivalents per litre of seawater.

Results and discussion

Multi-year monitoring revealed recurrent summer blooms of *Ostreopsis* spp. along the Basque coast, typically with two bloom events per season: a first bloom in July and a second between August and September, depending on the site (Figure 2). Bloom occurrence and intensity varied substantially among sites, suggesting a strong influence of local environmental conditions and coastal morphology. Low but persistent abundances were recorded from July to September at all monitored sites, indicating the continuous presence of *Ostreopsis* spp. throughout the summer season. To support risk management, cell concentration thresholds associated with different alert levels were established. Although no regulatory threshold currently exists, concentrations exceeding 100,000 cells L^{-1} generally result in beach closure measures.

Cell abundances estimated by qPCR closely mirrored the temporal trends observed by microscopy, the current reference method for *Ostreopsis* monitoring (Figure 2 & 3). A pronounced shift in species composition was observed between 2023 and 2025. While *Ostreopsis* sp. 9 initially dominated the assemblages, its contribution progressively declined and was replaced by *O.* cf. *ovata*, which became the dominant species at most sites in 2025 (Figure 3). Species-level identification is critical because the toxicity of *Ostreopsis* blooms differs among species, with *O.* cf. *ovata* generally considered of greater concern for human health due to its production of ovatoxins and its higher cytotoxicity compared with *Ostreopsis* sp. 9 (Plessis et al., 2025). Measuring the abundance of *Ostreopsis* cells down to the species level is essential for accurate risk assessment and effective beach management. Consequently, the complementary use of molecular and microscopic approaches provides a robust framework for bloom surveillance and decision making.

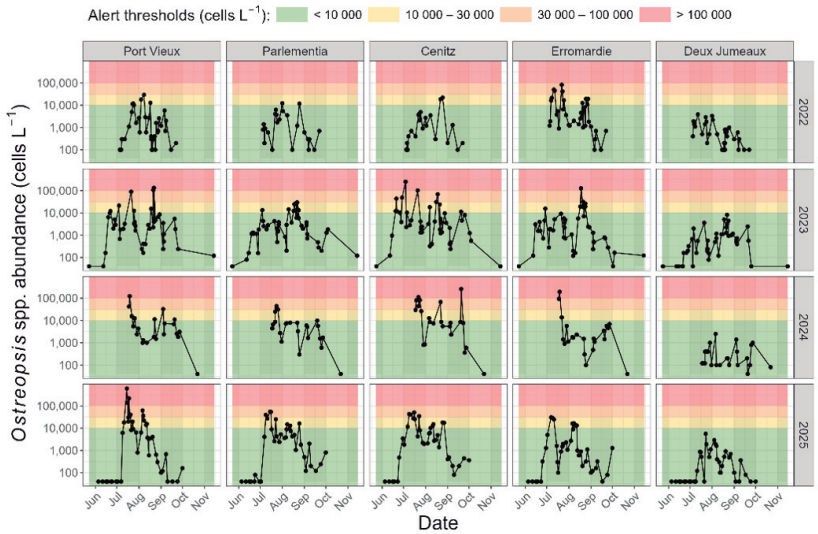


Figure 2. Multi-year monitoring of *Ostreopsis* spp. blooms at five sampling sites along the Basque coast. Cell abundance was determined by microscopy following the Utermöhl method, the current reference method for *Ostreopsis* monitoring. Background colours indicate the different alert thresholds.

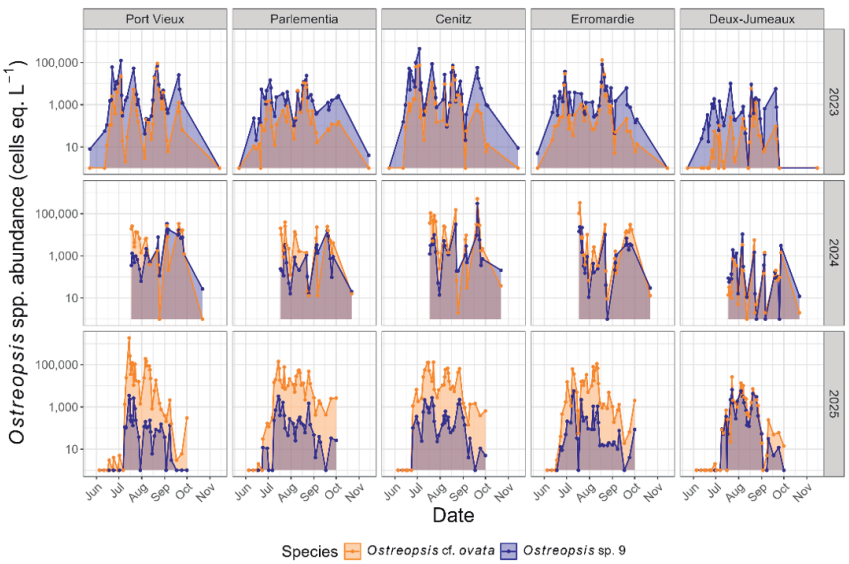


Figure 3. Temporal dynamics of *Ostreopsis* cf. *ovata* (orange) and *Ostreopsis* sp. 9 (blue) at five sampling sites along the Basque coast between 2023 and 2025. Cell abundances were determined by quantitative PCR and are expressed as cell equivalents L^{-1}.

The high-frequency survey conducted in July 2025 provided further insight into *Ostreopsis* bloom dynamics. Cell abundances in the water column varied by up to one order of magnitude within a single day, frequently crossing alert thresholds. While the monitoring conducted two or three times a week by local authorities captures the overall seasonal dynamics of blooms, it may overlook short-term fluctuations that could have implications for public health. The pronounced variability of cell density observed during the survey (Figure 4..A) likely reflects the strong hydrodynamic conditions characteristic of the Atlantic coast. Among the factors examined, tidal stage influenced cell abundance in the water column, with higher concentrations generally recorded at low tide than at high tide (Figure 4.B). When concentrations exceeded 10,000 cells L^{-1}, low-tide abundances were higher than high-tide abundances in 83% of cases (n = 12), suggesting that tidal dynamics modulate cell concentrations. However, given the strong influence of local coastal morphology on hydrodynamic processes, additional multi-year and multi-site observations are required to confirm the generality of this pattern. Moreover, tide should be regarded as a modulating factor rather than a primary driver of bloom development, acting in concert with other environmental and hydrodynamic processes.

In addition to revealing short-term variability in water-column concentrations, the survey highlighted the importance of the benthic compartment in bloom development. Cell densities increased first on macroalgae before rising in the water column (Figure 5), confirming that macroalgal substrates constitute an important reservoir for *Ostreopsis* spp.

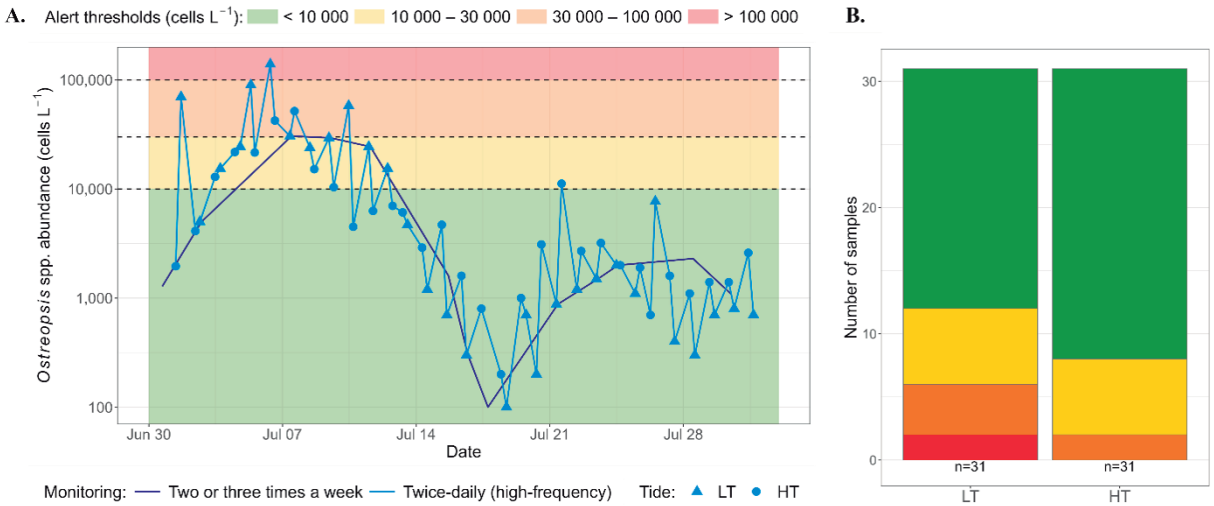


Figure 4. High-frequency monitoring of *Ostreopsis* spp. cell abundance at Erromardie Beach during July 2025. (A) Daily measurements of *Ostreopsis spp.* abundance, highlighting fluctuations that may be missed by monitoring conducted two or three times per week. (B) Distribution cell concentration alert levels at high tide (HT) and low tide (LT). Colours indicate the different alert thresholds.

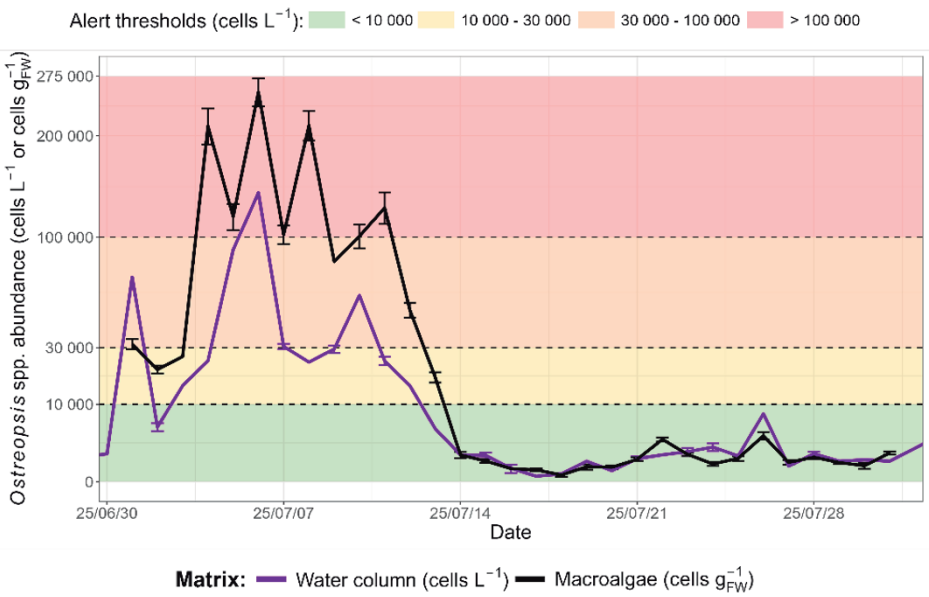


Figure 5. Comparison of *Ostreopsis* spp. cell abundance in the water column and on macroalgae at Erromardie Beach during July 2025. Cell abundances were determined by microscopy and are expressed as cells L^{-1} and cells g^{-1} fresh weight, respectively. Colours indicate the different alert thresholds.

along the Basque coast. These findings highlight the value of combined monitoring of macroalgae and the water column, as the benthic compartment may provide an early indication of local cell accumulation before their transfer to bathing waters. From a risk management perspective, macroalgal monitoring cannot replace water-column monitoring but may improve the anticipation of potentially hazardous exposure events.

Conclusions

Our findings revealed recurrent *Ostreopsis* blooms along the French Basque coast, characterized by fine-scale temporal and spatial variability and a marked shift in species composition between 2022 and 2025. During this period, *Ostreopsis* sp. 9 progressively decreased in abundance, while *Ostreopsis* cf. *ovata* became the dominant species by 2025. The study also demonstrated strong short-term fluctuations in cell abundance and highlighted the key role of macroalgae as a reservoir sustaining bloom development and supplying cells to the water column. These results improve our understanding of *Ostreopsis* ecology on the Atlantic coast and provide valuable information for risk assessment and management. Future work will build on a new monitoring campaign planned for 2026 to further investigate macroalgae-water column coupling and the mechanisms governing cell detachment and transport. The integration of environmental, microscopic, and qPCR datasets will support the development of predictive models and early-warning tools for coastal risk management.

References

Drouet K, Jauzein C, Herviot-Heath D, Hariri S, Laza-Martinez A, Lecadet C, Plus M, Seoane S, Sourisseau M, Lemée R, Siano R. 2021. Current distribution and potential expansion of the harmful benthic dinoflagellate *Ostreopsis* cf. *siamensis* towards the warming waters of the Bay of Biscay, North-East Atlantic. Environ Microbiol 23:4956–4979.

Drouet K, Jauzein C, Gasparini S, Pavaux A-S, Berdalet E, Marro S, Davenet-Sbirrazuoli V, Siano R, Lemée R, Gasparini S, Pavaux A-S, Berdalet E, Marro S, Davenet-Sbirrazuoli V, Siano R, Lemée R. 2022. The benthic toxic dinoflagellate *Ostreopsis* cf. *ovata* in the NW Mediterranean Sea: Relationship between sea surface temperature and bloom phenology. Harmful Algae 112:102184.

Paradis C, Chomerat N, Vaucel J-A, Antajan E, Labes P, Rappoport M, Labadie M, Vaucel J-A, Antajan E, Labes P, Rappoport M, Labadie M. 2024. Impacts on Human Health Potentially Caused by Exposure to an Unprecedented *Ostreopsis* spp Bloom in the Bay of Biscay, French Basque Coast. Wilderness & Environmental Medicine 35:13–21.

Penna A, Bertozzini E, Battocchi C, Galluzzi L, Giacobbe MG, Vila M, Garces E, Lugliè A, Magnani M. 2007. Monitoring of HAB species in the Mediterranean Sea through molecular methods. J Plankton Res 29:19–38.

Plessis L, Lhaute K, Hervé F, Thimann M, Séchet V, Carpentier L, Moutinho AB, Simões T, Amorim A, Henry K, Neves JLB, Gorse L, Paradis M, Bredif S, Hess P, Réveillon D, Hervé F, Thimann M, Séchet V, Carpentier L, Moutinho AB, Simões T, Amorim A, Henry K, Neves JLB, Gorse L, Paradis M, Bredif S, Hess P, Réveillon D. 2025. Ranking the cytotoxic potency of *Ostreopsis* cf. *ovata*, *Ostreopsis* cf. *siamensis* (*O.* sp. 9), and purified ovatoxins in human keratinocytes. Harmful Algae 150:103000.

*Acknowledgement*s - The authors thank all the staff and partners involved in field sampling, laboratory analyses, and data management. The weekly monitoring was funded by the *Communauté d'Agglomération Pays Basque* (CAPB). The high-frequency monitoring was supported by the OSTREOBILA project, cofinanced by the Interreg POCTEFA programme and the European Union (INT-INTERREG POCTEFA23/09).

Análisis de la calidad bacteriológica de la arena de las playas de Ea e Isuntza (Lekeitio) en Bizkaia

García, Iván[1], Córdoba, Irantzu[1], Torre, Nerea[1], Longás, Nagore[2], Revuelta, María[2], González, Amaia[2], Okina, Igor[2], Zabala, Ziortza[2], Rodriguez, Rut[3], Delgado, Alejandra[3]

Palabras clave: Calidad, arena, contaminación, indicadores, microbiología

Introducción

El Departamento de Salud del Gobierno Vasco desarrolla actividades de control y vigilancia de las aguas de baño en zonas litorales de Euskadi [(1)]. En la evaluación de los resultados de las playas de Ea e Isuntza (Bizkaia) se detectan recuentos superiores a los establecidos en la normativa [(2)] para *Escherichia coli* y Enterococos Intestinales (microorganismos indicadores de contaminación fecal) que afectan a la evaluación de la calidad del agua. Las dos playas, ubicadas en casco urbano, presentan variaciones en los resultados de las analíticas en función del momento intermareal y el estado del mar en ausencia de precipitaciones [(3)].

El objetivo del estudio es determinar la presencia de indicadores de contaminación microbiológica de la arena del espacio intermareal y estimar su posible influencia en las determinaciones de la calidad del agua en las playas de Ea e Isuntza (Lekeitio) en Bizkaia.

Materiales y métodos

Se han recogido muestras de arena (100 g) del espacio intermareal en bajamar a unos 5 cm de la superficie, en los meses de julio, agosto y septiembre en 3 puntos de muestreo en la playa de Ea y en 4 puntos en Isuntza y se han determinado, tras realizar un pretratamiento con solución salina para liberar los microorganismos adsorbidos en la arena, *Escherichia coli β- glucoronidasa* + por el método ISO 9308-2:2012 y Enterococos intestinales por el método enterolert-DW®, en el Laboratorio de Salud Pública de Euskadi.

[1] Subdirección de Salud Pública y Adicciones, Delegación Territorial Bizkaia. Departamento de Salud Gobierno Vasco. Bilbao.
[2] Comarca de Salud Pública de Gernika - Lea Artibai. Subdirección de Salud Pública y Adicciones. Delegación Territorial Bizkaia. Departamento de Salud Gobierno Vasco. Gernika.
[3] Laboratorio Salud Publica de Euskadi. Dirección de Salud Pública y Adicciones. Departamento de Salud Gobierno Vasco. Donostia-San Sebastián.

E-mail: ivan-garcia@euskadi.eus



Figura 1.- Playa de Ea (Izquierda) y playa de Isuntza (derecha) Puntos de Muestreo PMA en verde en amarillo los PM de calidad del agua de Baño.

Resultados y discusión

Tabla 1. Resultados muestreo. En rojo las superaciones de los valores establecidos para aguas marítimas en la normativa [(1)] (*Escherichia coli* 500 NMP/100 ml; Enterococos intestinales 185 NMP/100 ml).

Playa	Puntos de muestreo	Fecha muestreo	*Escherichia coli β-glucoronidasa + (NMP / 100 g)*	*Enterococos intestinales (NMP / 100 g)*
EA	PMA1 - BAJO VERTIDO	23/07/2025	<10	120
		7/08/2025	<10	<10
		18/09/2025	313	**379**
	PMA2 – MEDIO	23/07/2025	10	20
		7/08/2025	10	31
		18/09/2025	10	**259**
	PMA3 – ALTO PUERTO	23/07/2025	20	109
		7/08/2025	10	10
		18/09/2025	<10	31
ISUNTZA	PMA1 – IZQUIERDA	23/07/2025	<10	120
		7/08/2025	20	121
		18/09/2025	10	31
	PMA2 – CENTRO	23/07/2025	52	122
		7/08/2025	75	97
		18/09/2025	10	10
	PMA3 – DERECHA	23/07/2025	31	**441**
		7/08/2025	75	20
		18/09/2025	20	31
	PMA4 – RÍA	23/07/2025	404	**581**
		7/08/2025	**4884**	**816**
		18/09/2025	52	10

1.- Los resultados de la mayoría de las muestras analizadas cumplen los con los parámetros de calidad del agua (75%).
2.- En algunas muestras de arena (25%) se detectan presencia de los microorganismos estudiados, por encima de los valores paramétricos de la calidad del agua de mar (principalmente Enterococos).
3.- En un 25% de las muestras de arena, aunque cumplen con los valores de calidad del agua se detectan valores en el rango de clasificación Buena.
4.- Comparados los datos microbiológicos obtenidos con las condiciones meteorológicas que hubo los días previos al muestreo, tomando como referencia las estaciones meteorológicas de Arteaga (Gautegiz-Arteaga) y Oleta (Amoroto) de Euskalmet, se observa que apenas hubo precipitaciones. El día 31 de julio, una semana antes del muestreo de agosto, hay una notificación de incidente de vertido en el sistema de saneamiento de Lekeitio, los datos pluviométricos son de 13 L/m^2 en la estación de Oleta. Una semana más tarde se produce un recuento elevado de bacterias en el PMA4 del dia 7 de agosto en la playa de Isuntza.
5.- El muestreo realizado el 23 de julio en Lekeitio correspondió a una semana marcada por mareas vivas, lo que ocasionó un notable incremento en la altura de las olas y pudo facilitar la remoción de sedimentos del lecho marino. En los puntos de muestreo PMA3 y PMA4 de la playa de Isuntza, ese mismo día, se registró un nivel superior de Enterococos.
6.- Algunos de los resultados elevados detecatados coinciden en el tiempo con incumplimientos en los análisis de calidad del agua (Ea 22/09/2025: Enterococos 389 NMP/100ml; Isuntza 21/07/2025 Enterococos 4884 NMP/100ml; Isuntza 11/08/202 Enterococos 404 NMP/100ml)

Conclusiones

1.- Aproximadamente un 25% de las muestras analizadas muestra recuentos microbiológicos superiores a los límites de calidad del agua, en especial de Enterococos (más resistentes a condiciones ambientales desfavorables, salinidad y radiación solar).
2.- Los recuentos más elevados se detectan en los puntos más cercanos a Puntos de Vertido en Desbordamientos (PVD) o a las rías.
3.- Los recuentos elevados detectados en arena coinciden en el tiempo con incumplimientos en las analíticas de los muestreos del agua de baño
4.- Las conclusiones de este estudio son limitadas. Sería necesario desarrollar estudios complementarios para intentar comprender la dinámica de contaminación en situaciones derivadas del cambio climático que favorecen la supervivencia bacteriana (aumento de temperatura, lluvias intensas, periodos de sequía…)

Referencias

1. Departamento de Salud, Gobierno Vasco. Salud ambiental: playas. Preguntas frecuentes [Internet]. Vitoria-Gasteiz: Gobierno Vasco; 2025 [citado 9 Sep 2026]. Disponible en: https://www.euskadi.eus/preguntas-frecuentes-zonas-bano/web01-a3playas/es/
2. Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. Directiva 2006/7/CE de 15 de febrero de 2006 relativa a la gestión de la calidad de las aguas de baño y por la que se deroga la Directiva 76/160/CEE. Diario Oficial de la Unión Europea. 2006;L64:37-51.
3. URA-Agencia Vasca del Agua, AZTI. Perfiles de las aguas de baño de las cuencas internas del País Vasco [Internet]. Vitoria-Gasteiz: URA; 2023 [citado 9 Sep 2026]. Disponible en: https://uragentzia.euskadi.eus/informacion-sobre-los-perfiles-de-bano-en-las-zonas-oficiales/webura00-contents/es/
4. De Gracia M, Palacios D, Rodríguez N, Trillo P, Aceves M, Alerm L. Control sanitario de la arena en las playas metropolitanas. In: VII Congrés Nacional de Legionel·la i Qualitat Ambiental; 2017 Feb; Barcelona, España. Barcelona: VII Congrés Nacional de Legionel·la i Qualitat Ambiental; 2017.
5. Sabino R, Rodrigues R, Costa I, Carneiro C, Cunha M, Duarte A, et al. Routine screening of harmful microorganisms in beach sands: implications to public health. Sci Total Environ. 2014;472:1062-1069. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.11.091.

Uso de mallas de sombreado como estrategia de adaptación del viñedo al cambio climático en La Rioja

Portu Reinares, Javier[1], Rivacoba Gómez, Luis[1], Ibáñez Pascual, Sergio[1]

Palabras clave: cambio climático, asurado, temperatura del racimo, redes de sombreado, viticultura, POCTEFA

Introducción

La viticultura constituye una de las actividades agrícolas más sensibles al cambio climático, especialmente en regiones mediterráneas donde las condiciones térmicas actuales se aproximan a los límites óptimos para la producción de vinos de calidad. En la DOCa Rioja se ha observado un incremento significativo de las temperaturas durante las últimas décadas, lo que está provocando adelantos fenológicos, alteraciones en la maduración y un aumento de los daños en racimos por quemadura solar.

La quemadura solar es una lesión térmica asociada a temperaturas elevadas en la superficie de las bayas y a una intensa exposición a la radiación solar. Este fenómeno puede originar necrosis de los tejidos, pérdida de rendimiento y deterioro de la calidad de la vendimia (Gambetta et al., 2021).

En este sentido, y aunque el racimo es de por sí sensible a temperaturas elevadas, hay variedades más propensas a sufrir daños por "golpe de sol" o asurado, como es el caso de la variedad Graciano (*Vitis vinifera* L.), variedad autóctona de la DOCa Rioja, de gran interés en un contexto del cambio climático por preservar la acidez y carga fenólica, mejor que otras variedades de uva, ante estas nuevas condiciones metereológicas cambiantes (Ramos & de Toda, 2021).

La bibliografía muestra claramente los efectos sobre la producción debidos a los daños por asurado, con pérdidas de producción que pueden ir desde leves, entre el 5 y el 15% (Greer et al., 2006), a muy importantes, con hasta el 40% de los racimos con daños por quemaduras (Calderón-Orellana et al., 2018). En general, los síntomas de daños por sol no han sido especialmente frecuentes en la mayor parte de las zonas vitícolas de Europa. Sin embargo, la frecuencia de este tipo de incidencias es cada vez mayor, tal como indican estudios llevados a cabo en Alemania o en Francia (Gambetta et al., 2021).

Entre las posibles estrategias de adaptación, a medio o largo plazo, se podría plantear la necesidad de reconsiderar la conducción y manejo de la vegetación en el viñedo, así como la orientación de las hileras respecto a la incidencia solar. A corto plazo, destaca el interés por la instalación de redes de sombreado que permiten reducir directamente la radiación incidente sobre los racimos, atenuando la temperatura en su superficie y disminuyendo, como consecuencia, los daños por sol (Crouchett-Rojas et al., 2025; Oliveira et al., 2014).

Los objetivos de este trabajo fueron: i) cuantificar la reducción de temperatura del racimo conseguida mediante diferentes configuraciones de redes de sombreo; ii) evaluar su efecto sobre la incidencia de quemadura solar; iii) determinar las consecuencias sobre la producción y la composición de mostos y vinos; y iv) verificar si los efectos observados estaban relacionados con modificaciones en el estado hídrico de la vid.

Materiales y métodos

El ensayo se desarrolló durante cinco campañas consecutivas (2021-2025) en un viñedo comercial plantado en 2016 en Cenicero (La Rioja, España) con la variedad Graciano injertada sobre el patrón SO4. El viñedo se estableció con una densidad de plantación de 3.900 cepas/ha (2,60 x 1,20 m) mediante un sistema de conducción doble cordón Royat. La parcela disponía de riego de apoyo por goteo.

Cada campaña se comparó un tratamiento control sin sombreo con entre dos y tres configuraciones de redes de sombreo instaladas en la zona de racimos en el estado fenológico de tamaño guisante. La malla utilizada está fabricada en polietileno de alta densidad, con una altura de un metro y aporta protección contra la radiación ultravioleta. En general, se colocó en la cara oeste de la espaldera tras el cuajado de la vid, protegiendo la zona de racimos expuesta al sol vespertino. Se evaluaron diferentes porcentajes de sombreado (25-70%), color de malla (blanco y negro) y la instalación en una o ambas de caras del viñedo. Las distintas configuraciones empleadas en cada año de estudio se pueden observar en la ***Tabla 1***. El diseño experimental fue completamente aleatorizado, con tres repeticiones de 30 cepas cada una por tratamiento.

La temperatura de los racimos se determinó mediante cámara termográfica (Testo 885) en tres momentos fenológicos: envero, maduración y prevendimia; y en dos momentos del día: a las 12:30h, sin incidencia solar en la cara oeste, y a las 17:30h, con incidencia solar directa sobre dicha cara. Paralelamente, se evaluó el estado hídrico de cada repetición mediante la medida del potencial hídrico de tallo (Ψtallo) determinado a través del método de la cámara de presión (Scholander et al., 1965) en los mismos tres momentos anteriormente descritos y sobre tres hojas por tratamiento y repetición. Además, se determinó la composición isotópica del carbono (δ13C) en mosto como indicador adicional del estado hídrico de la planta.

En vendimia, se evaluó la incidencia de quemadura solar, los

[1]Instituto de Ciencias de la Vid y del Vino (Gobierno de La Rioja, CSIC, Universidad de La Rioja)
Finca La Grajera, Ctra. Burgos km 6. 26071 Logroño (La Rioja; España)
E-mail: javier.portu@icvv.es

componentes del rendimiento y la composición físico-química de mostos y vinos.

Tabla 1. Ensayos con malla de sombreo realizados entre 2021 y 2025 en Cenicero (La Rioja, España)

Año	Tratamientos de malla
2021	Malla blanca al 50 % (M50) y al 70 % (M70) de factor de sombra.
2022	Malla blanca al 50 % (M50) y al 70 % (M70) de factor de sombra.
2023	Malla blanca al 25 % (M25) y al 50 % (M50) de factor de sombra.
2024	Malla blanca (MB) y malla negra (MN) con un 50% de factor de sombra.
2025	Malla blanca (MB) y malla negra (MN) con un 50% de factor de sombra. Malla negra con un 50 % de factor de sombra por ambos lados de la fila (DM)

Resultados y discusión

A lo largo de los cinco años, la temperatura media del racimo en el testigo sin malla osciló entre 27,0 °C (2023) y 32,3 °C (2022), con lecturas puntuales que llegaron a 41,3 °C. Todos y cada uno de los tratamientos de malla, sin excepción, redujeron de forma estadísticamente significativa la temperatura del racimo frente al testigo medido en el mismo momento ($p < 0,01$). La magnitud del enfriamiento osciló entre 1,66 °C (malla al 25 %, 2023) y 3,69 °C (malla blanca, 2025), con una media conjunta de 2,46 °C para las diez mallas evaluadas (***Figura 1***).

Es especialmente destacable el hecho de que, en cada año de ensayo, no se detectaron diferencias significativas en el enfriamiento producido entre los distintos tipos de malla. No hubo diferencias ni entre factores de sombra del 25 % al 70 %, ni entre malla blanca y negra, ni entre la instalación de la malla por la cara oeste o ambas caras. Esto sugiere que, dentro del rango de materiales ensayados, lo que determina la disminución de la temperatura es sobre todo la presencia de una malla que intercepte la radiación solar directa, más que diferencias técnicas de color o porcentaje de sombra.

Por otra parte, la incidencia de daños por sol en el tratamiento control mostró una elevada variabilidad entre campañas, alcanzando valores comprendidos entre el 9,3% y el 53,3% de los racimos (***Figura 2***). Las redes de sombreo disminuyeron esta incidencia entre un 53% y un 99% respecto al control, independientemente de la configuración utilizada.

En cuanto a los parámetros productivos, las redes de sombreado no redujeron el rendimiento en ninguna campaña. Por el contrario, en 2022, año con la mayor presión de quemadura solar, todos los tratamientos con sombreo aumentaron significativamente la producción entre un 21% y un 40% respecto al control. Este incremento estuvo asociado principalmente a un mayor peso medio de los racimos debido a una menor deshidratación de las bayas afectadas por insolación.

La madurez tecnológica del mosto apenas se vio alterada. En general, el contenido en azúcares, el pH y la acidez total no presentaron diferencias significativas en la mayoría de campañas. Sin embargo, las concentraciones de antocianos y polifenoles totales disminuyeron bajo sombreo en los años con mayores contrastes entre tratamientos, particularmente en 2022 y 2025. La reducción fue especialmente acusada en la configuración de doble malla evaluada en 2025, lo que sugiere una respuesta dependiente de la intensidad del sombreo. Estos resultados concuerdan con el efecto modulador de la radiación sobre la síntesis y acumulación de compuestos fenólicos descrito previamente en la vid (Spayd et

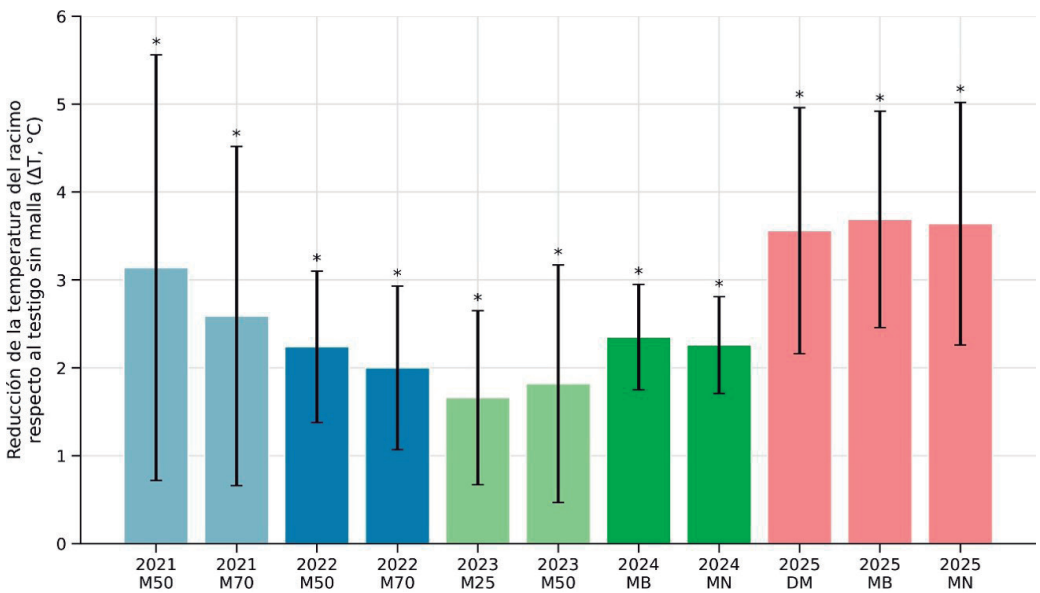


Figura 1. Reducción de la temperatura media del racimo mediante diferentes configuraciones de mallas de sombreo entre los años 2021 y 2025 en un viñedo de Graciano (Cenicero, La Rioja). *Estadísticamente significativo ($p < 0,05$)

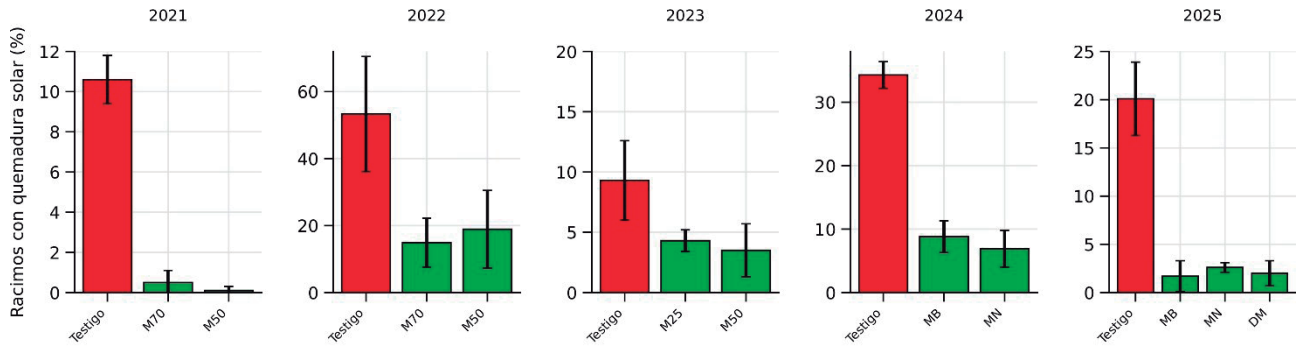


Figura 2. Porcentaje de racimos con síntomas de daños por sol en los distintos tratamientos evaluados entre 2021 y 2025 en un viñedo de Graciano (Cenicero, La Rioja).

al., 2002).

Los indicadores de estado hídrico (Ψtallo y δ13C) no mostraron diferencias significativas entre tratamientos. Estos resultados indican que la protección observada frente a la quemadura solar se debió fundamentalmente a un efecto directo de reducción de la radiación incidente sobre los racimos y no a modificaciones en las relaciones hídricas de la planta.

Conclusiones

La instalación de mallas de sombreo constituyeron una herramienta eficaz para mitigar los efectos del estrés térmico asociados al cambio climático en la variedad Graciano en Cenicero (La Rioja, España). A lo largo de cinco campañas consecutivas (2021–2025) y bajo distintas configuraciones de sombreo, la temperatura superficial de los racimos se redujo de forma consistente entre 1,7 y 3,7 °C respecto al testigo sin malla. La magnitud de este enfriamiento mostró una estrecha relación con la disminución de la incidencia de quemadura solar, alcanzándose reducciones en el número de racimos dañados entre el 53 % y el 99 % según la campaña y el tratamiento evaluado. Asimismo, el sombreado no redujo en ningún caso la producción. De hecho, en la campaña con mayores daños por sol, se incrementó significativamente el rendimiento entre un 21 % y un 40 %.

La aplicación de las mallas tuvo un efecto limitado sobre la madurez tecnológica de la uva, sin modificaciones relevantes en la acumulación de azúcares, el pH ni la acidez total del mosto. Sin embargo, se observó una reducción moderada en la concentración de antocianos y polifenoles totales en mostos y vinos bajo las condiciones de mayor sombreamiento, especialmente en la configuración de doble malla. Este comportamiento concuerda con el papel determinante de la radiación incidente y la temperatura en la regulación de la biosíntesis y acumulación de compuestos fenólicos en la baya .

La ausencia de diferencias significativas entre tratamientos en el potencial hídrico de tallo (Ψtallo) y la composición isotópica del carbono en mosto ($\delta^{13}C$) indica que los efectos observados derivan fundamentalmente de la modificación del microclima de los racimos mediante sombreo radiativo directo, y no de alteraciones en el estado hídrico o en las relaciones agua-planta.

En conjunto, los resultados respaldan la eficacia del uso de mallas de sombreo en la zona de racimos como una estrategia agronómica de adaptación al cambio climático para mitigar los efectos de los episodios extremos de calor cada vez más frecuentes en Rioja y en otras regionales vitícolas de la región transfronteriza POCTEFA.

Referencias

Calderón-Orellana, A., Serra Stepke, I. and Puentes, P. 2018. Golpe de sol en uva para vino en el valle de Itata: más de lo esperado. Boletín Vinos del Sur 2:3-4.

Crouchett-Rojas, R., Araya-Alman, M., Verdugo-Vásquez, N., Fourment, M. and Gutiérrez-Gamboa, G. 2025. Shading Nets: A Current Viticultural Strategy to Mitigate the Negative Impacts of Global Warming on Grape and Wine Quality. Australian Journal of Grape and Wine Research 2025:9729885.

Gambetta, J.M., Holzapfel, B.P., Stoll, M. and Friedel, M. 2021. Sunburn in Grapes: A Review. Frontiers in Plant Science 11:604691.

Greer, D.H., Rogiers, S.Y. and Steel, C.C. 2006. Susceptibility of Chardonnay grapes to sunburn. Vitis 45:147-148.

Oliveira, M., Teles, J., Barbosa, P., Olazabal, F. and Queiroz, J. 2014. Shading of the fruit zone to reduce grape yield and quality losses caused by sunburn. OENO One 48:179-187.

Ramos, M.C. and de Toda, F.M. 2021. Interannual and spatial variability of grape composition in the Rioja DOCa show better resilience of cv. Graciano than cv. Tempranillo under a warming scenario. OENO One 55:85-100.

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D. and Hemmingsen, E.A. 1965. Sap Pressure in Vascular Plants. Science 148:339-346.

Spayd, S. E., Tarara, J. M., Mee, D. L. and Ferguson, J. C. 2002. Separation of Sunlight and Temperature Effects on the Composition of *Vitis vinifera* cv. Merlot Berries. American Journal of Enology and Viticulture 53:171-182.

Reconocimientos – Los autores agradecen a Bodegas La Rioja Alta, por la cesión de la parcela para los ensayos, así como al personal técnico y operarios del Servicio de Investigación Agraria del Gobierno de La Rioja.

Trabajo enmarcado en el proyecto VITISAD2, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg VI-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2021-2027).

Modeling plastic transport using a coupled Lagrangian-Eulerian framework

Vallés, Pablo[1,2], Loras, Víctor[2], Morales-Hernández, Mario[1] and Roeber, Volker[2]

Keywords: Lagrangian particle tracking, Coastal hydrodynamics, Wave-driven currents, Boussinesq model, Floating debris

Introduction

Plastic pollution in aquatic environments, particularly in coastal and oceanic systems, represents a major environmental challenge due to its impact on ecosystems and human activities (Haegerbaeumer et al., 2019; Jang et al., 2014; Li et al., 2023). The high concentration of this pollutant in these environments requires the development of plans and tools to reduce its presence and predict its temporal and spatial evolution. Numerical modeling has emerged as a valuable tool to analyze transport pathways, deposition patterns, and potential mitigation strategies. Several formulations are available to model pollutant transport, with the Advection-Diffusion Equation (ADE) and the Lagrangian Particle Tracking (LPT) models being the most widely used approaches in this context (Wickramarachchi et al., 2025). While ADE models provide a good balance between efficiency and accuracy, the LPT models offer the possibility of incorporating individual particle processes and modeling micro-, meso-, and macroplastics within the same framework. Within LPT models, different formulations can be used to represent plastic transport, ranging from dynamic approaches that account for drag and inertia effects to kinematic approaches based mainly on advection and turbulent dispersion. The latter are frequently used to model plastic transport due to their simplicity and accuracy for forecasting.

However, accurately representing plastic transport requires not only robust particle dynamics but also a reliable description of the underlying hydrodynamics, as advection driven by waves and currents plays a dominant role. Three-dimensional (3D) hydrodynamic models are commonly used in the context of pollutant transport, although their computational cost can become prohibitive for large-scale scenarios. For this reason, depth-averaged models are often used to reduce complexity and, consequently, computational effort while maintaining a reasonable balance between accuracy and efficiency. However, vertical flow velocity can play a key role in pollutant transport. Consequently, two-dimensional (2D) Non-Hydrostatic Pressure (NHP) models, 2D Boussisnesq models, and vertical velocity approximations can be used to account for vertical transport effects.

The present work investigates the influence of hydrodynamic conditions on plastic transport in coastal environments. The flow field is resolved using a Eulerian, depth-integrated 2D Boussinesq model, while plastic transport is simulated using a Lagrangian kinematic approach. The LPT model incorporates key physical processes, enabling a more realistic representation of floating debris dynamics. The coupled Eulerian-Lagrangian framework is implemented within the BOSZ model (Roeber and Cheung, 2012), which is designed to simulate wave-driven flows in coastal and surf-zone regions.

Methods

The dispersive Boussinesq-type equations proposed in Nwogu (1993) are solved numerically in BOSZ, and they can be written in conservative vector form as:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F(U)}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G(U)}}{\partial y} + \mathbf{P(U)} + \mathbf{S(U)} = 0 \qquad (1)$$

where **U** is the conservative variables vector, **F(U)** and **G(U)** are the flux vectors in the - and -directions, respectively, **P(U)** is the depth-integrated hydrostatic pressure gradient vector, and **S(U)** is the source term vector, which includes the effects of bed slope and friction and the dispersion terms. These vectors are defined as follows:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} H \\ P \\ Q \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F(U)} = \begin{pmatrix} Hu \\ Hu^2 \\ Huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G(U)} = \begin{pmatrix} Hv \\ Huv \\ Hv^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P(U)} = \begin{pmatrix} 0 \\ gH\dfrac{\partial \eta}{\partial x} \\ gH\dfrac{\partial \eta}{\partial y} \end{pmatrix} \qquad (2)$$

being:

$$P = H\left(u + \frac{z_\alpha^2}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + z_\alpha \frac{\partial^2 (hu)}{\partial x^2}\right), \quad Q = H\left(u + \frac{z_\alpha^2}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + z_\alpha \frac{\partial^2 (hv)}{\partial y^2}\right) \qquad (3)$$

where is the still water depth, assumed to be stationary, η is the elevation of the free surface, $H = h + \eta$ is the total water depth, and $\mathbf{u} = (u, v, w)$ is the horizontal flow velocity vector at z_α. Note that the vertical component of the flow velocity, w, is not presented in Equation (2), but it can be obtained from the conservative variables as described by Nwogu (1993). The vertical reference level z_α is the vertical position within the still water column at which the velocity is evaluated. Finally, the

[1] *I3A, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (Spain)*
[2] *Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S-UPPA, SIAME, Anglet (France)*
E-mail contact: pvalles@unizar.es

source term vector **S(U)** is defined as:

$$\mathbf{S(U)} = \begin{pmatrix} \psi_c \\ u\psi_c - \frac{\partial H}{\partial t} + H\left(\frac{\partial \psi_u^n}{\partial t}\right) - gH\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{n^2\sqrt{u^2+v^2}}{H^{1/3}}(Hu) \\ v\psi_c - \frac{\partial H}{\partial t}\psi_v^n + H\left(\frac{\partial \psi_v^n}{\partial t}\right) - gH\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{n^2\sqrt{u^2+v^2}}{H^{1/3}}(Hv) \end{pmatrix} \quad (4)$$

where Ψ_c is the dispersive contribution to the mass conservation equation, while Ψ^n_u and Ψ^n_v represent the normal-derivative dispersive contributions to the momentum conservation equations in the - and -directions, respectively. For further details on the governing equations and numerical solution, see Roeber and Cheung (2012) and Mihami and Roeber (2026).

The system of equations that defines the LPT model for plastic transport is defined as follows:

$$\mathbf{r}_p(t) = \mathbf{r}_{p,0} + \mathbf{r}_{\mathbf{adv}}(t) + \mathbf{r}_{\mathbf{disp}}(t) + \mathbf{r}_{\mathbf{pl}}(t) \quad (5)$$

where $\mathbf{r}_p(t)=(x_p(t), y_p(t), z_p(t)$ is the cartesian position vector for particle p at time t, $\mathbf{r}_{p,0}=(x_{p,0}, y_{p,0}, z_{p,0})$ is the initial position for particle p, $\mathbf{r}_{adv}(t)=(x_{adv}(t), y_{adv}(t), z_{adv}(t))$ is the displacement caused by advection at time t for particle p, **r**disp (t)=(x_disp (t),y_disp (t),z_disp (t)) is the displacement caused by turbulent dispersion that is modeled using a random-walk model at time t for particle p, and **r**pl (t)=($x_{pl}(t), y_{pl}(t), z_{pl}(t)$) is the displacement caused by plastic-specific processes, such as degradation, settling, or biofouling, at time t for particle p. For further details on the LPT equations, see Vallés et al. (2026).

A realistic coastal case is simulated as a demonstration of model applicability and grid-resolution sensitivity. Since no observed drifter data are used in this test case, the results are interpreted qualitatively, focusing on the ability of the LPT model to reveal transport pathways, retention zones, and resolution-dependent recirculation patterns, a useful information for plastic-transport forecasting. The studied domain is the area of dimensions km where the Biarritz's Grande Plage and Anglet beaches are located, a part of the Basque Coast located in France, between the cities of Biarritz and Anglet (see Figure 1a). A temporal evolution of the water surface elevation with a resolution of 0.05 h is imposed at the left wall as the upstream boundary condition, while the initial condition is a water surface elevation of 0 m. The total computed time is 30 min, and particles are released in the wet cells following a normal distribution. The LPT model is simulated using the full 3D flow field in BOSZ as described before, providing a substantially more realism than just using the 2D flow vectors. Three different resolutions for this domain are presented to verify the influence of mesh resolution in particle transport: a resolution of 10 m (cells), a resolution of 5 m (cells), and a resolution of 2.5 m (cells). For a better comparison between the different grid resolutions, turbulent dispersion and plastic-specific processes are not added in the Lagrangian transport.

Results

The particle pathways at the end of the simulation are shown in Figure 1, including the traveled distance for each particle. The particle pathways reveal circulation cells and retention zones around the coastal structures, while the finer grids capture

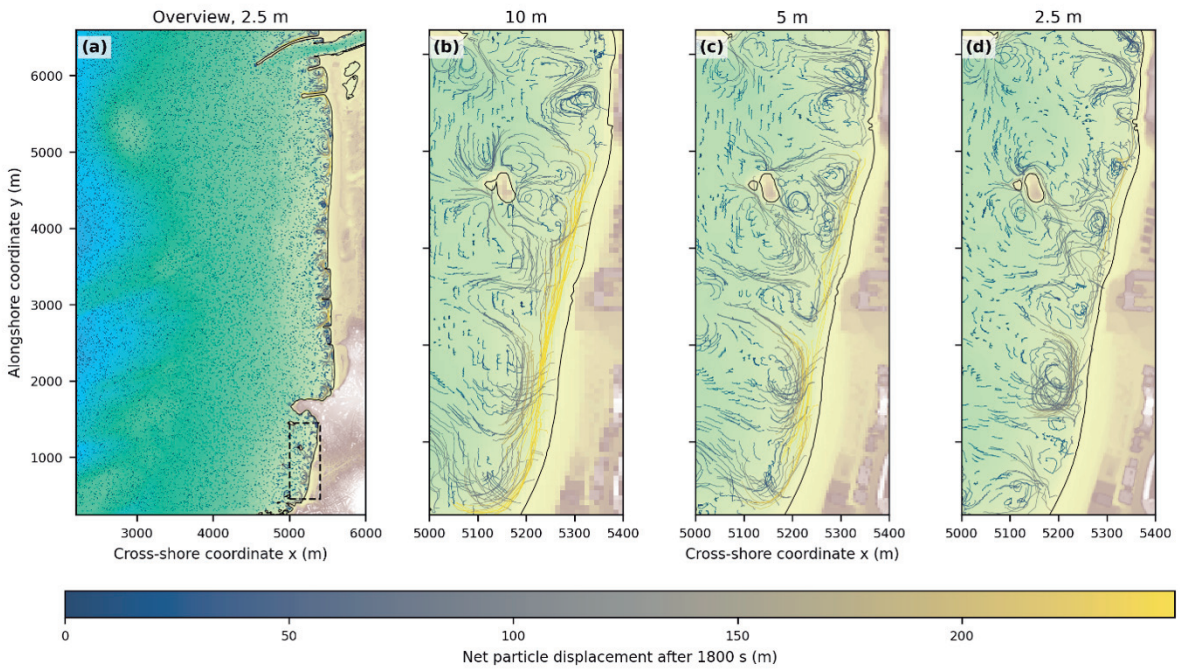


Figure 1. Particle pathways for the three grid resolutions, with an overview of the coastal domain (a) and detailed views of the nearshore region (b-d), colored by net particle displacement.

more detailed circulation patterns. These results highlight the ability of Lagrangian transport, used here as passive tracer, to provide additional insight into the flow beyond that obtained from the Eulerian hydrodynamic fields.

To quantify the transport of the particles in the presence of recirculation patterns, the transport efficiency metric for the particle p, , is defined as , where is the net displacement between the initial and final positions, and is the total travel distance. Therefore, when , there is nearly straight, directional transport, while when , there is substantial movement but little net displacement, indicating oscillation, recirculation, or particle trapping. At the end of the simulation, the mean TEM is 0.283 for the 10 m resolution, 0.229 for the 5 m resolution, and 0.213 for the 2.5 m resolution. The decreasing TEM with finer resolution indicates that finer grids resolve more recirculating particle motion relative to net transport. This behavior is also shown in Figure 2, where a histogram of the transport efficiency at the end of the simulation for the three different resolutions is shown. As shown in this figure, most particles have transport efficiencies lower than 0.2 for the 2.5 m resolution, whereas the transport efficiency distribution for the 10 m resolution is very different, with a relevant number of particles in the range between 0.2 and 0.4.

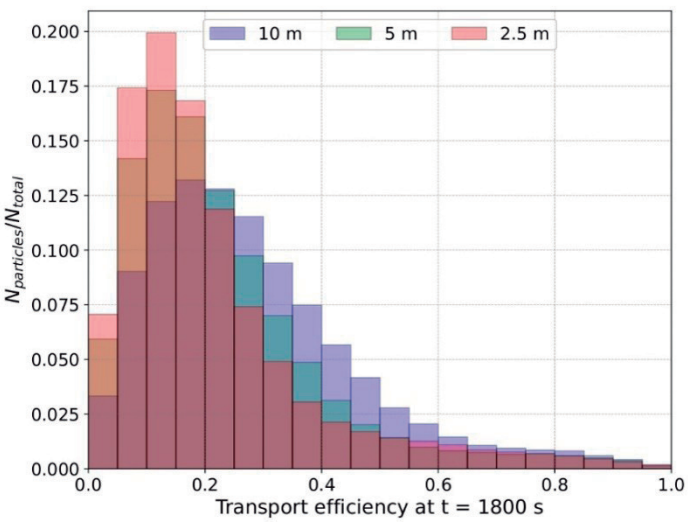


Figure 2. Histogram of the transport efficiency at the end of the simulation for the three different resolutions.

Conclusions

This work demonstrates the applicability of the coupled Eulerian-Lagrangian framework implemented within BOSZ for analyzing plastic transport in coastal environments. The realistic coastal case shows that the LPT model can identify particle pathways, recirculation patterns, and retention zones around coastal structures. The results also highlight the influence of hydrodynamic grid resolution on particle transport, with finer grids resolving more detailed recirculation patterns and decreasing the mean transport efficiency from 0.283 at 10 m to 0.213 at 2.5 m. The transport efficiency distributions also show a greater proportion of particles with low efficiency at finer resolutions, indicating stronger recirculating or trapped particle motion relative to net transport. These results demonstrate that grid resolution can significantly affect the representation of local transport processes and should therefore be carefully considered in Lagrangian plastic transport simulations. Future work will focus on comparison with field observations and the analysis of the implemented plastic transport processes.

References

Haegerbaeumer, A., Mueller, M.-T., Fueser, H. and Traunspurger, W. 2019. Impacts of micro- and nano-sized plastic particles on benthic invertebrates: A literature review and gap analysis. *Frontiers in Environmental Science* 7:17. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00017

Jang, Y.-C., Lee, J.-H., Hong, S.-W., Lee, J.-M., Shim, W.-J. and Song, Y.-K. 2014. Sources of plastic marine debris on beaches of Korea: More from the ocean than the land. *Ocean Science Journal* 49:151–162. https://doi.org/10.1007/s12601-014-0015-8

Li, Y., Tao, L., Wang, Q., Wang, F., Li, G. and Song, M. 2023. Potential health impact of microplastics: A review of environmental distribution, human exposure, and toxic effects. *Environment & Health* 1(4):249–257. https://doi.org/10.1021/envhealth.3c00052

Mihami, F.-Z. and Roeber, V. 2026. Exploring a conservative staggered scheme for Boussinesq-type equations: Insights into numerical diffusion, dispersion, and wave-breaking. *Coastal Engineering* 204:104880. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104880

Nwogu, O. 1993. Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 119(6):618–638. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1993)119:6(618)

Roeber, V. and Cheung, K.F. 2012. Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments. *Coastal Engineering* 70:1–20. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.06.001

Vallés, P., Morales-Hernández, M. and Roeber, V. 2026. Modeling Plastic Transport in Aquatic Environments: the Ebro River case. *Jornada De Jóvenes Investigadores Del I3A 14*. https://doi.org/10.26754/jji-i3a.202613399

Wickramarachchi, C., Niven, R.K. and Kramer, M. 2025. Numerical plastic transport modelling in fluvial systems: Review and formulation of boundary conditions. *Water Research* 273:122947. https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122947

Acknowledgements - This research was supported by the Universidad de Zaragoza (grants PI-PRD/2022-03 and JIUZ2023-IA-04), the Université de Pau et des Pays de l'Adour (grant PI-PRD/2022-03), the Erasmus+ Programme (grant KA103 IBERUSC 2021-1-ES01-KA130-HED-000004265), the project PID2022-137334NB-I00 funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and the ERDF/EU, and the Government of Aragón (grant T32_23R, Fluid Dynamics Technologies).

KLIMA-ALDAKETAREN ARINTZEA ITSASERTZEAN ETA OZEANOAN

MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL LITORAL Y EL OCÉANO

ATTÉNUATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE CÔTIER ET OCÉANIQUE

COASTAL AND OCEAN CLIMATE CHANGE MITIGATION

Advancing the Decarbonisation of Fishing Vessels

Castresana, Joseba[1], Caballero, Ainhoa[2], C. Basurko, Oihane[2], Goikoetxea, Nerea[1], Quincoces, Iñaki[1], Gabiña, Gorka[1]

Keywords: Energy transition, energy monitoring, fisheries decarbonisation, fuel consumption, decision support systems.

Introduction

The European Climate Law establishes the legislative framework for achieving climate neutrality in Europe by 2050 [1], including an interim target of reducing greenhouse gas emissions by 55% by 2030 compared with 1990 levels. Consequently, the decarbonisation of all sectors, including fisheries, is expected to become increasingly important in the coming years. Several energy transition measures are already being implemented in the maritime domain, such as FuelEU Maritime [2] and the inclusion of maritime transport in the EU Emissions Trading System [3]. While the shipping industry is already moving towards alternative fuels, with only 50.5% of vessels on order in 2024 designed for conventional fuels [4], the fishing sector remains at an earlier stage. This is mainly due to the limited development of regulatory frameworks that can support the deployment of decarbonisation solutions, rather than a lack of technological alternatives. This study presents selected projects contributing to fisheries decarbonisation. There is no "one fits all" solution for the decarbonisation of all fishing vessels and each solution needs to be tailored to each vessel [5]. This contribution compiles solutions that have been specifically designed for different fleet types, highlighting energy monitoring as the first step for the energy transition.

Materials and methods

Non-intrusive energy monitoring for small-scale fishing vessels. SEAGLOW

Nowadays, there is still a lack of operational and energy consumption related data in small-scale fisheries. The level of onboard monitoring often varies across fleet segments, with larger vessels typically collecting a broader range of operational data, while small-scale fishing vessels are often limited to vessel tracking data. Indeed, the installation of fuel consumption monitoring devices is sometimes difficult because of space limitations and high investment cost.

In SEAGLOW, different decarbonisation technologies will be tested, such as the hybridisation of three small-scale fishing vessels or innovative coating technologies. But before the installation of such technologies, to understand the operational and energy consumption profile of the vessels, non- intrusive monitoring systems were installed onboard, which are another technology tested in the project. These devices register different operational and energy related parameters (e.g. vessel speed, engine speed, fuel consumption) along different fishing trips. Once the baseline energy consumption is set, potential energy savings will later be calculated between the new propulsion systems and the conventional ones. Figure 1 shows an overview of the installations carried out in the fishing vessels.



Figure 1. Pictures of the monitoring systems installed onboard the vessels

Before installing long term decarbonisation solutions (e.g. LNG dual fuel engines, electrification etc.) energy monitoring can lead to considerable fuel consumption reductions by optimizing specific operatives, based on the registered data. In the case of ENERCOM, three large scale fisheries were thoroughly monitored. Fuel flow, exhaust gas temperatures, engine speed, intake air pressure, vessel trim, vessel pitch and many additional parameters were monitored in three vessels: a 24 m trawler, a 75 m longliner and a 22 m purse seiner. Power generation by auxiliary engines was also measured. After a year of operation of the vessels, the fuel consumption was related with all the measured parameters to identify which of them could have a greater impact on it, and by analysing feasible changes in these parameters, specific operational changes were proposed for each vessel, to reduce the fuel consumption per trip.

Changes in the fishing gear can also lead to fuel consumption reduction. Indeed, the most energy intensive fisheries such as trawling present higher room for the fuel consumption reduction with this kind of measures. In this context, semi-pelagic trawling allows to minimize the contact of the gear with the seabed by replacing the conventional bottom doors with semi-pelagic doors.

In this project, 31 fishing sets were carried out in a 29 m trawler, 15 with semi-pelagic doors and 16 with bottom doors. Fuel consumption, gear related variables (cable length, distance between doors etc.) and catch composition and size

1 AZTI, Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA) - Txatxarramendi ugartea 0-48395, Sukarrieta
2 AZTI, Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA) - Herrera Kaia, Portualdea z/g, 20110 Pasaia
E-mail contact: jcastresana@azti.es

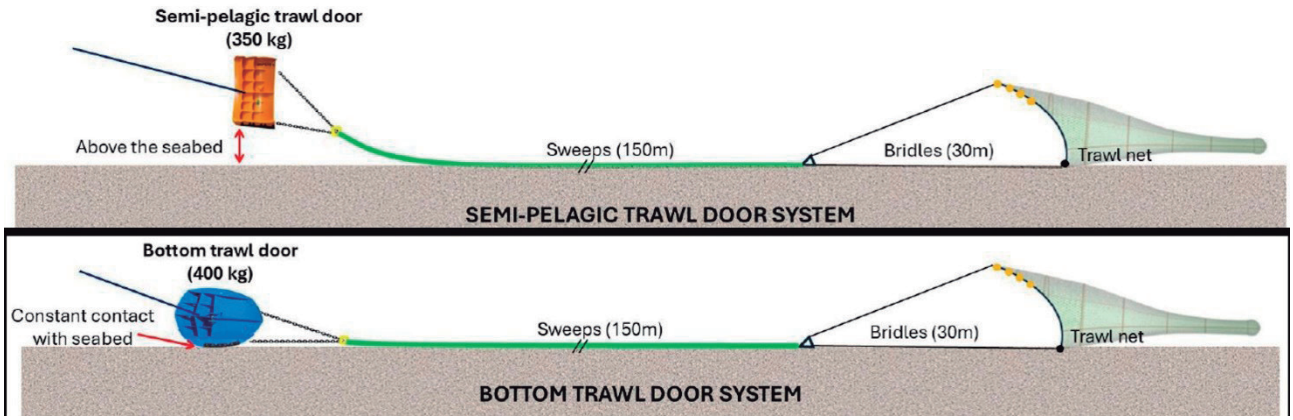


Figure 2. Schematic representation of demersal trawl with semi-pelagic doors (top) and bottom doors (bottom).

were measured among other parameters. Vessel orientation was also registered in each set, to analyse possible effects of the vessel orientation of the sea conditions in the fuel consumption. Figure 2 shows a schematic overview of the sea tests carried out.

Higher monitoring degrees can still optimize even more the energy consumption profile of the vessel. As an example, in the framework of SUSTUNTECH project, more than 60 engine related parameters were registered, along with Copernicus data, ship motion data, propeller related data and other environmental related parameters. Then, solutions such as route optimization algorithms were presented to reduce the fuel consumption of the purse seiners of the project.

Similarly, in the framework of two of the solutions of the INFINIFISH project (InfiniLog and InfiniCatch Jano), multiple energy and operational related parameters will be monitored in large scale fishing vessels, along with oceanographic variables and catch related data. Based on the collected information, decision support systems will be developed, enabling the operational optimisation of the vessel and reducing the fuel consumption and emissions while maintaining or improving catch efficiency.

Results and discussion

The installation of the non-intrusive monitoring systems was carried out in three small-scale fishing vessels below 12 m located in Estonia, Denmark and Norway. After more than one year of operation, 236 fishing trips were recorded, providing baseline fuel consumption and CO□ emissions against which the impacts of hybridisation and new coating technologies can be assessed.

The installation of non-intrusive monitoring systems proved to be a valuable tool to determine whether hybrid propulsion might fit the small-scale vessels of the project. For instance, given the lower volumetric density of batteries in comparation to diesel, if the litres consumed per fishing trip were remarkably high, the implementation of batteries might need too much space, which is limited in small-scale fishing vessels. Energy monitoring systems are thus useful to first understand the relation between fuel consumption and operational parameters, which can even change for a same vessel when using different fishing gears (Table 1), and then to analyse the feasibility of further decarbonisation solutions. Finally, even if presenting different distances and fuels consumed among vessels and trips, all the 236 fishing trips followed an increasing linear relation between the fuel consumption and distance navigated per trip (Figure 3), with high regression coefficients (R2=0.97). This allows to approximate the fuel consumption of these, or other similar small-scale vessels just needing the distance navigated per trip as input.

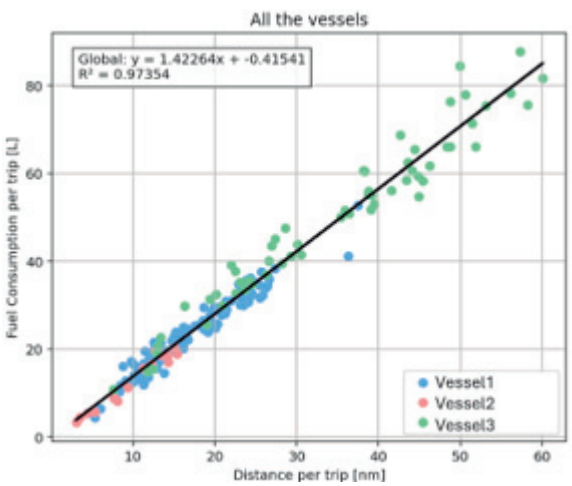


Figure 3. Fuel cons. vs Distance navigated/ trip (no. trips=236)

Table 1. Mean duration, distance and fuel consumed /(no.trips=236)

	Vessel1		*Vessel2*	*Vessel3*
	Gear A	**Gear B**		
Duration [h]	4.58 ± 1.47	4.10 ± 1.26	3.82 ± 1.31	10.43 ± 3.74
Distance [nm]	17.20 ± 5.81	12.22 ± 2.46	9.96 ± 4.06	34.17 ± 13.78
Fuel Cons. [L]	23.54 ± 8.06	18.33 ± 4.71	12.74 ± 5.82	49.25 ± 19.12
Eq.CO_2 emissions [kg]	64.15	49.95	34.72	134.2

After analysing the effect of different measured parameters in the fuel consumption of a trip, the operational changes targeted different corrections to reduce the fuel consumption inside feasible ranges not to alter the conventional fishing operation of the vessels (Table 2). Thus, energy monitoring allowed first to accomplish operational changes with fuel consumption reductions up to 10.32 % per trip. Moreover, this registered data can then be used to identify the most appropriate long term decarbonisation solutions for each vessel.

Table 2. Fuel consumption reduction and time increment for different operational changes

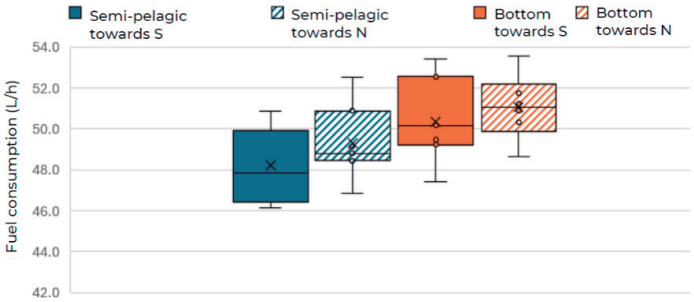
	Operational change	**Fuel use reduction [%]**	**Time increment [%]**
Longliner	$V_{Route} \leq 7.5$ knots	2.75	14.1
	$V_{Setting} \leq 7.5$ knots	6.91	4.39
Trawler	$V_{Route} \leq 7.5$ knots	0.94	1.3
	$RPM_{Trawling} \leq 1350$ rpm	4.05	-
	$List_{Trawling}$ in [-2, 2]°	0.79	-
Purse Seiner	$V_{Route} \leq 8$ knots	10.32	4.67

The usage of semi-pelagic trawl doors reduced the fuel consumption of the trawler by decreasing the drag force of the doors with the seabed. Moreover, the impact on the seabed is also reduced, since it was observed, by door sensor display observation, that the doors contacted the seabed approximately less than 1% of the time. Figure 4 shows the results obtained from the fuel consumption comparative.

The fuel consumption when trawling was reduced by 3.55%. New tests in commercial trawlers (48 m and 62 m) are being conducted, and according to preliminary results, reductions up to 9% were reached, which are in line with other research studies testing similar configurations [6].

Decision support systems will aid the decision making of the crew by trying to minimize the fuel use maintaining the catch efficiency. For that, the monitoring systems have already been installed in commercial fishing vessels and fuel use data is being recorded during the 2026 albacore tuna fishing season with fuel flowmeters, inclinometers, auxiliary power sensors and other measurement systems.

Once different trips are recorded, this information will be used to define the energy consumption pattern of the vessel and to calculate fuel use of potential different trips, trying to maximize energy efficiency and integrating other algorithms such as potential catch zone calculation or the estimation of prices based on historical data. The decision support models will be updated as more data is being recorded with the installed monitoring systems, enhancing its predictability during the project.



$$Reduction\ in\ fuel\ consumption\ [\%] = \frac{\overline{C_{bottom}} - \overline{C_{semipel.}}}{\overline{C_{bottom}}} * 100 = 3{,}55\%$$

Figure 4. Fuel consumption with semi-pelagic and bottom trawl doors

Conclusions

There are several pathways to reduce the fuel consumption in fishing vessels, with a wide range of technological solutions available. However, the first step is to measure the operative and energy consumption patterns of the vessels. This serves for multiple purposes: i) to carry out operational changes that might optimize the energy consumption of the vessel; ii) to take informed decisions on which decarbonisation solution might fit best each vessel, based on monitored operational and energy consumption data; iii) to set the baseline energy consumption pattern and later evaluate potential energy savings of certain technologies after their installation.

Aside from operational and fishing gear related changes, decision support will play an important role in upcoming years. Based on all the gathered data, helping the crew on the decision making will allow to minimize the fuel intensity of the vessels, which is interesting both in economic and environmental terms. In this framework, the algorithms developed in the framework of INFINIFISH project will push the transition of fishing vessels towards a more sustainable operation.

References

[1] European-Commission. (2021). REGULATION (EU) 2021/1119 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('European Climate Law') https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021R1119

[2] European-Commission, REGULATION (EU) 2023/1805 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with

EEA relevance) (2023).
[3] European-Commission. (2023). REGULATION (EU) 2023/957 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 10 May 2023. Amending Regulation (EU) 2015/757 in order to provide for the inclusion of maritime transport activities in the EU Emissions Trading System and for the monitoring, reporting and verification of emissions of additional greenhouse gases and emissions from additional ship types. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0957&qid=1720710006381
[4] DNV. (2024). Strategies for meeting upcoming decarbonization targets. https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/strategies-for-meeting-upcoming-decarbonization-targets/
[5] O. C Basurko, M. Aranda, A. Caballero, M. Andres, J. Murua, G. Gabiña, Workshop on the European Green Deal − Challenges and opportunities for EU fisheries and aquaculture: Part I: Decarbonisation & circular economy aspects for fisheries, (2023).
[6] E. Grimaldo, R. Pedersen, M. Sistiaga, Energy consumption of three different trawl configurations used in the Barents Sea demersal trawl fishery, Fisheries Research, 165 (2015) 71-73.

*Acknowledgement*s - The authors want to thank all the projects and partners mentioned in the present contribution.

Evaluación de los Servicios de los Ecosistemas que ofrecen los sistemas dunares dentro de la Red Natura 2000 de Bizkaia

Peña, Lorena[1]; Sertutxa, Unai[1]; Arana, Xabier[2]; Ametzaga-Arregi, Ibone[1]

Palabras clave: Amenaza; Culturales; Multifuncionalidad; Regulación; Restauración

Introducción

Los ecosistemas costeros, a pesar de proveer de relevantes servicios de los ecosistemas (SE) para el bienestar de la sociedad (Harris y Defeo, 2022), han sido muy transformados y reducidos en todo el mundo debido al incremento de la presión humana sobre el litoral (Bennett et al. 2016). Generalmente, tienen una historia de explotación y mala gestión, ya que se ha priorizado su uso recreativo y turístico frente al de protección, por lo que han sufrido una fuerte degradación (Taylor et al., 2015). Esto se ha debido principalmente a que sus SE no son suficientemente considerados en la planificación de estos espacios (Nehren et al., 2016), y que no siempre son bien comprendidos por las personas usuarias (Elko et al., 2016). De hecho, las dunas y las marismas son uno de los ecosistemas costeros más amenazados del planeta (Saintilan et al., 2023).

En Euskadi, los sistemas dunares son uno de los hábitats más frágiles de la costa vasca, ya que el asentamiento de los núcleos urbanos y las áreas de esparcimiento en esas zonas, ha terminado por eliminar prácticamente cualquier vestigio de este tipo de ecosistema. Estos ecosistemas actúan como barreras naturales ofreciendo protección frente a los eventos climáticos extremos (Hindsley and Yoskowitz 2020), lo que adquiere mayor relevancia si se tiene en cuenta los efectos derivados del cambio climático. Según el proyecto Kostaegoki, en Euskadi se estiman ascensos del nivel medio del mar de 26 cm para el año 2050, lo que incrementaría en un 12% la superficie en riesgo de inundación costera con afección a unas 15.008 personas, y la pérdida de un 18% de superficie de playa (Ihobe, 2026). Por ello, en los últimos años, se han llevado a cabo diferentes proyectos de regeneración de los sistemas dunares dentro de la Red Natura 2000 (RN2000).

El objetivo de este estudio es realizar una evaluación de 9 servicios de regulación y 4 culturales que proporcionan 3 sistemas dunares de Bizkaia que se encuentran dentro de la RN2000 y compararlos entre sí, para analizar como la restauración influye en la provisión de SE y, por tanto, en la multifuncionalidad del ecosistema. Además, se han identificado y evaluado las amenazas que sufren estos ecosistemas para realizar recomendaciones que mejore la provisión de los SE.

[1] *Departamento de Biología Vegetal y Ecología. Universidad del País Vasco (UPV/EHU). P.O. Box 644, 48080 Bilbao.*
[2] *Departamento de Medio Natural y Agricultura. Servicio de Patrimonio Natural. Diputación Foral de Bizkaia*
E-mail: lorena.pena@ehu.eus

Materiales y métodos

Los sistemas dunares seleccionados son los situados en playa de La Arena (ES2130003: Ría del Barbadún), cuya restauración comenzó en el año 2008; los de la playa de Laga (ES2130007: Zonas litorales y Marismas de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai), cuya restauración comenzó en el año 2000; y la Duna de Astondo-Gorliz (ES2130004), una duna fósil parcialmente colonizada por plantaciones de pino (Figura 1).

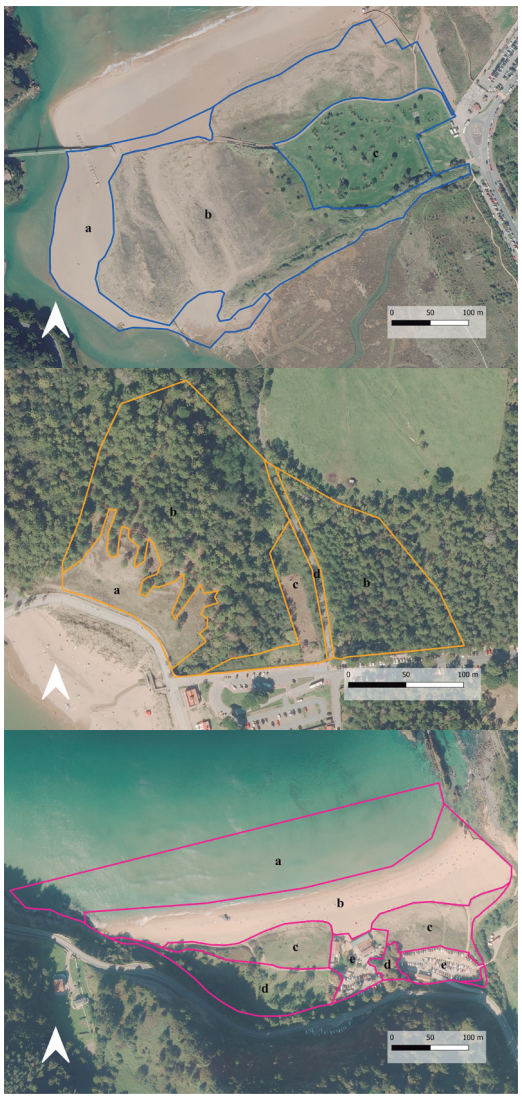


Figura 1. Playa de La Arena (a: playa; b: dunas; c: prado con arbolado); Dunas de Astondo (a: duna; b: plantación de pino; c: arbustos y prados; d: carretera); y Playa de Laga (a: zona de rompiente; b: playa; c y d: dunas; e: zona artificializada).

En primer lugar, se identificaron las principales amenazas que sufren estos ecosistemas, las cuales se correspondieron con la presencia de especies exóticas invasoras, el uso del área como zona de recreo (pisoteo), la contaminación atmosférica y acústica, la urbanización del entorno y la subida del naivel del mar por efecto del cambio climático. Posteriormente, se evaluaron los SE y las amenazas por medio del cálculo de indicadores (Tablas 1 y 2, respectivamente). Una vez calculado el indicador, la evaluación del SE clasificó en 3 rangos (Alto, Medio, Bajo) basados en bibliografía (Roca et al., 2008; García-Lozano et al., 2020). Finalmente, se calculó el índice de multifuncionalidad para cada sistema, sumando el valor de cada SE ponderado por su mayor valor de relevancia, el cual fue normalizado de 0-1.

Tabla 1. Indicadores, método de cálculo, fuente y evaluación de los SE de los que se disponía información.

Tipo de SE	SE	Indicadores	Cálculo	Fuente	Evaluación
Regulación	Mantenimiento del hábitat	Riqueza de especies vegetales típicas ponderada por la categoría de amenaza de cada especie (R)	R=(Extinta * 2) + (En peligro de extinción * 1,75) + (Vulnerable * 1,5)+ (Rara * 1,25) + (No amenazada * 1)	Campos et al., 2025, 2024 y 2022	3: Riqueza ≥ 40 especies 2: 40 > Riqueza ≥ 35 especies 1: Riqueza < 35 especies
	Regulación del clima: almacenamiento de carbono (C)	Contenido de C orgánico almacenado en los primeros 30 cm del suelo (tC/ha)	Capa de contenido de C orgánico en los primeros 30 cm de los suelos minerales (MgC/ha)	Geoeuskadi.eus	3: C ≥ 85 y NDVI ≥ 0,35 2: C≥ 85 y NDVI ≥0,30 1: Otros
		NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada)	Imágenes satélite Sentinel para el año 2024 a una resolución de 10 m	Google Earth Engine	
	Regulación del clima local	Cobertura de especies vegetales (%)	*Visu*	Campos et al., 2025, 2022 Muestreos	3: Cobertura ≥ 50% 2: 50% >Cobertura ≥25% 1: Cobertura < 25%
	Regulación de la calidad del agua	Calidad del agua de baño	Programa de control sanitario de las zonas de baño para 2025	Open Data Euskadi	3: Excelente y/o Estado ecológico Bueno 2: Buena y/o Estado ecológico Moderado 1: Suficiente o Mala y/o Estado ecológico Deficiente
		Calidad del agua de los ríos	Red de seguimiento del estado biológico de los ríos para 2025	Agencia Vasca del Agua (URA)	
	Control de la erosión y pérdida de arena	CWM (Community Weighted Mean) para cada forma de vida ponderado por la cobertura total de plantas (%)	CWM = ∑ % cobertura de cada especie de esa forma de vida CWM ponderado= CWM * % total	FloraVeg.EU	3: CWM Fanerófitas >0% o CWM Caméfitas >15% 2: ∑ CWM Hem, Geo, Pte>50% 1: Otros
	Regulación del ciclo de nutrientes	CWM realización de simbiosis	CWM = ∑ % cobertura de especie que realizan simbiosis	FloraVeg.EU	3: CWM simbiosis >10% o CWM nutrientes >4 2: CWM simbiosis >5% o CWM nutrientes >2 1: Otros
		CWM indicador de nutrientes	CWM = ∑ valor indicador * % cobertura de cada especie		
	Mantenimiento de la calidad del suelo	Contenido de MO en suelo (%)	Método de calcinación	Muestreos propios	3: MO ≥2.5% y pH >9 2: 2,5 >MO ≥1% y pH >9 1: Otros
		pH	Ph-metro		
	Protección de la costa	Porcentaje que ocupan todos los sistemas dunares en el arenal costero (%)	% = (Longitud del sistema dunar / Longitud total del arenal) * 100	Ortofoto del 2025 (García-Lozano et al., 2020)	3: % >75% y Altura >3m y CWM altura >0,40 m 2: % >50% o Altura >3m 0 CWM altura > 0,30 m 1: Otros
		Altura de la duna (m)	Hipsómetro	Muestreos propios	
		CWM altura de la especie (m)	CWM = ∑ altura * % cobertura de cada especie	FloraVeg.EU	
	Polinización y dispersión de semillas	Riqueza de especies vegetales autóctonas con flor	Número de especies vegetales con flor	FloraVeg.EU	3: Riqueza flor ≥ 35 especies y riqueza dispersión ≥ 5 2: 35 ≥ Riqueza flor ≥ 25 especies y riqueza dispersión <5 1: Otros
		Riqueza de tipos de dispersión	Número de tipos de dispersión		
Culturales	Recreo/ turismo	Capacidad de carga recreativa (CCR) (m^2/persona usuaria)	CCR = Superficie de playa por persona usuaria (m^2/ persona usuaria)	Roca et al., 2008	3: CCR ≥ 10 m^2/ usuario 2: 10> CCR ≥ 3 m^2/ usuario 1: Otros
	Conocimiento científico/tradicional	Número de publicaciones		Web of Science	3: Nº publicaciones ≥10 2: 10 > Nº publicaciones >5 1: Otros
	Educación ambiental	Existencia de programas de educación o voluntariado ambiental (limpieza de playas)		Flor-Blanco y Flor, 2016	3: Si existen programas ≥1 1: No existen programas <1
	Valores estéticos y paisajísticos	Naturalidad del paisaje	Guidos Toolbox	Bruzón et al., 2023	3: Naturalidad ≥ 65 2: 65 > Naturalidad ≥ 55 1: Otros

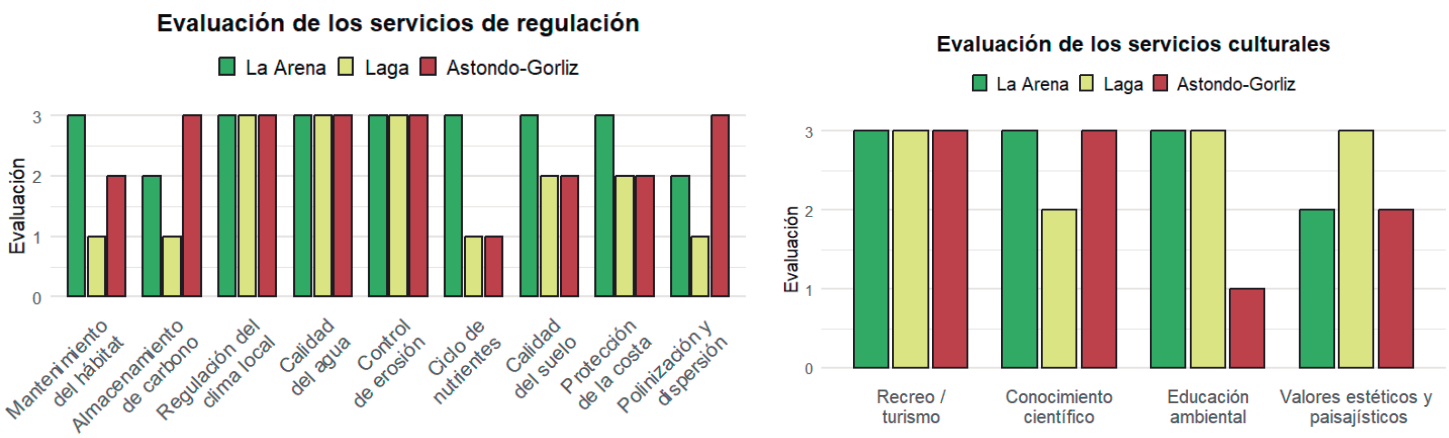
Resultados y discusión

Los resultados indican que el sistema dunar de la playa de la Arena es el que mayor provisión de SE realiza, ya que posee un valor alto en el 77% de los SE y un valor medio en la regulación del clima, polinización y valores estéticos (Gráfica 1), así como un índice de multifuncionalidad de 0.81 (Gráfica 2). Este sistema no son dunas estabilizadas y se encuentra todavía en desarrollo, además de encontrarse en un entorno muy artificializado. Astondo-Gorliz mostró un valor alto en el 54% de los SE, un valor medio en el 39% y un valor bajo en el servicio de educación ambiental (Gráfica 1), ya que al encontrase vallado para su conservación se impide el acceso para realizar programas de sensibilización. Además, mostró un índice de multifuncionalidad de 0.76 (Gráfica 2). Aunque, es el sistema dunar más desarrollado de los tres, ya que es una duna estabilizada, ocupa una superficie pequeña. En el caso de Laga, este sistema mostro un valor alto en el 46% de los SE, un valor medio en el 31% y un valor bajo en el 23%, concretamente en el servicio de mantenimiento del hábitat, regulación del clima y polinización (Gráfica 1), así como un índice de multifuncionalidad de 0.69 (Gráfica 2). Este sistema dunar se encuentra en muchas zonas en un estado temprano con vegetación herbácea pionera, donde la riqueza de especies (24 especies típicas de dunas) es más reducida que en los estadios más desarrollados, así como el número de especies de abejas polinizadoras (18 especies).

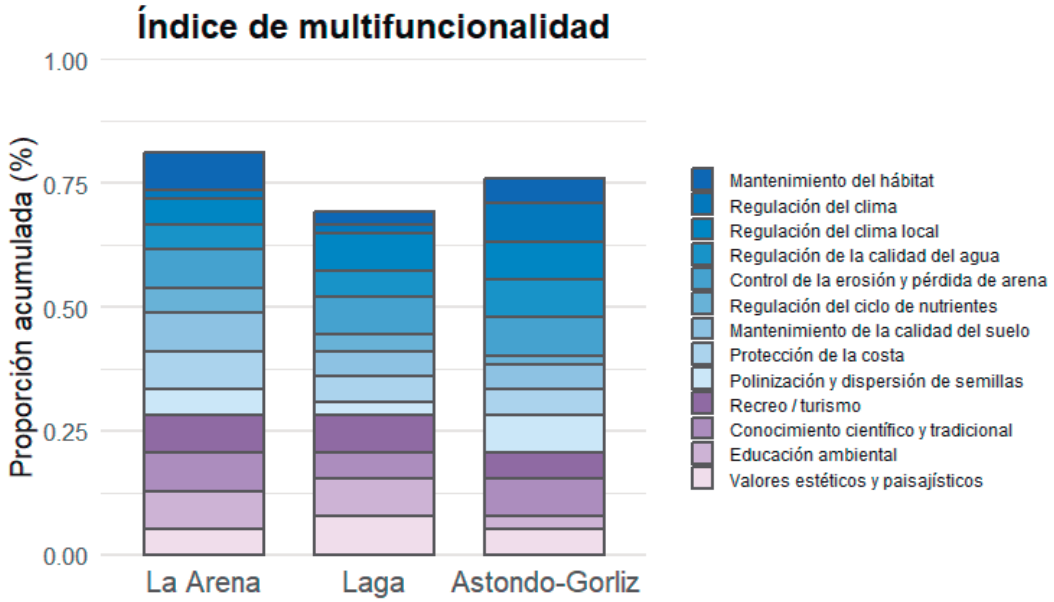
En relación con las amenazas, se observa que el sistema dunar de la playa de la Arena, es el que mayor número de especies exóticas invasoras de plantas, entre las que destacan *Oenothera x fallax, Stenotaphrum secundatum, Erigeon sumatrensis, Erigeon floribundus y Erigeon canadensis* (Liendo et al. 2021) y el que mayor urbanización en su entorno posee (23%). Sin embargo, Astondo-Gorliz es el que mayor contaminación atmosférica y acústica posee y el que va a ser más afectado por la subida del nivel del mar. Aunque menos del 50% de los usuarios llegan a este arenal costero en coche, por las carreteras de su entorno circulan al día unos 12.067 vehículos, los cuales emiten diariamente 6.224 kg de CO_2 a la atmósfera. Además, se prevé una pérdida de superficie por subida del nivel del mar y erosión para el año 2050 del 16%. Por último, Laga es el que mayor número de personas usuarias por metro cuadrado acoge en la época de verano, con un total de 5 personas por cada 100 m^2, aunque hay que decir que existe una amplia variación a lo largo del periodo de estudio debido al clima, el cual es un factor clave en la tasa de frecuentación de los arenales costeros (Serrano et al., 2018). Algunos estudios han indicado

Tabla 2. Indicadores y fuente de datos seleccionados para la evaluación de las amenazas.

Amenazas	**Indicadores**	**Fuente**	**La Arena**	Laga	Astondo
Presencia de especies exóticas invasoras	Riqueza de especies vegetales exóticas invasoras	Campos et al., 2025, 2024	11	10	6
Uso del área como zona de recreo (pisoteo)	Número medio de personas usuarias al día que asisten a la playa en los meses de verano (de junio a septiembre para el periodo 2019-2025) por superficie de playa (personas usuarias /100 m^2)	Opendata.bizkaia.eus Ortofoto 2025	3,81	4,53	3,40
Contaminación atmosférica	Intensidad Media Diaria (IMD) (Vehículos/día) en las carreteras del entorno * Longitud de cada carretera (km) * 0,167 kg CO_2 que emite un turismo/km)	Evolución del tráfico 2024 (DFB, 2025) Huella de carbono (Ihobe)	4.216	4.005	6.224
Contaminación acústica	Intensidad Media Diaria (IMD) (Vehículos/día) en las carreteras del entorno	Evolución del tráfico 2024 (DFB, 2025)	8.774	1.898	12.067
Urbanización del entorno	Porcentaje de artificializado que hay en un buffer de 250 m	Inventario Forestal 2024 Mapa carreteras y tren	23	5	16
Cambio climático: subida del nivel del mar	Porcentaje de superficie de playa perdida en el escenario RCP 8.5 para 2050 (+26 cm)	Ihobe, 2026	16	11	23



Gráfica 1. Evaluación de los servicios de regulación y culturales para los tres arenales costeros.



Gráfica 2. Contribución de los valores normalizados de cada SE al índice de multifuncionalidad en cada arenal costero.

que cuanto mayor es el número de visitantes, más disminuye la calidad de la playa, porque tanto los aspectos sociales como los medioambientales se ven sometidos a una fuerte presión (Ariza et al., 2008; Huamantico et al., 2016).

Conclusiones

En conclusión, la restauración de los sistemas dunares es una prioridad para aumentar la multifuncionalidad del territorio y ayudar a cumplir con los objetivos marcados desde Europa en el marco de la Ley de Restauración de la Naturaleza, Por tanto, se recomienda aumentar la superficie de restauración y conservación de estos ecosistemas, mantener la naturalidad del espacio mediante la eliminación de especies exóticas y de infraestructuras viarias, así como sustituir el uso de maquinaría en la limpieza de playas por limpieza manual, no solo en invierno sino también en verano, dejando zonas con materia orgánica sin limpiar. Además, se propone habilitar pasarelas elevadas y cierre de los espacios a proteger para impedir el pisoteo de esos ecosistemas, así como la colocación de paneles informativos sobre los SE que proveen esos ecosistemas para sensibilizar a las personas usuarias.

Referencias

Ariza. E., Sardá, R., Jiménez, J., Mora, J., Ávila, C., 2008. Beyond the performance Assessment measurements for beach management: Application to Spanish Mediterranean beaches. Coastal Management, 36(1): 47-66. https://doi.org/10.1080/08920750701682023

Bennett, N.J., Blythe, J., Tyler, S., Ban, N.C. 2016. Communities and change in the anthropocene: understanding social-ecological vulnerability and planning adaptations to multiple interacting exposures. Regional Environmental Change 16: 907–926.

Bruzón, A.G., Arrogante-Funes, P., Santos-Martín, F., 2023. Modelling and testing forest ecosystems condition account. Journal of Environmental Management, 345: 118676.

Campos, J.A., García-Mijangos, I., Biurrun, I., Liendo, D., García-Magro, D. 2025. Cambio global en ambientes costeros 2024: ZEC Ría del Barbadun y seguimiento de Chamaesyce peplis. Informe inédito elaborado para la Diputación Foral de Bizkaia. 122 pp.

Campos, J.A., García-Mijangos, I., Biurrun, I., Liendo, D., García-Magro, D. 2024. Cartografía, seguimiento y evaluación de hábitats y flora amenazada en la ZEC Dunas de Astondo y en las marismas de las ZEC Río Lea y ZEC Río Artibai. 125 pp.

Campos, J.A., García-Mijangos, I., Biurrun, I., Loidi, J., Liendo, D., García-Magro, D. 2022. Cartografía, seguimiento y evaluación de hábitats y flora amenazada de la ZEC Zonas litorales y marismas de Urdaibai. Informe inédito elaborado para la Diputación Foral de Bizkaia. 94 pp.

DFB (Diputación Foral de Bizkaia), 2025. Evolución del tráfico en las carreteras de Bizkaia 2024. https://www.bizkaia.eus/es/historico-y-evolucion-del-trafico

Elko, N., K. Brodie, H. Stockdon, K. Nordstrom, C. Houser, K. McKenna, L. Moore, J. Rosati, P. Ruggiero, R. Thuman, I. Walker, 2016. Dune management challenges on developed coasts. Shore Beach, 84 (1): 15-28.

Flor-Blanco, G., Flor, G., 2016. Management of dune fields on the costas of Asturias, Cantabria and the Basque Country (Cantabrian Sea, NW Iberian Peninsula). En: Roig-Munar (Ed.), Restoration and management of dune systems case studies (pp. 35-70).

García-Lozano, C., Pintó, J., Roig-Munar, F. X., 2020. Set of indices to assess dune development and dune restoration potential in beach-dune systems on Mediterranean developed coasts. Journal of Environmental Management, 259, 109754. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109754

Harris, L. R., Defeo, O., 2022. Sandy shore ecosystem services, ecological infrastructure, and bundles: New insights and perspectives. Ecosystem Services, 57, 101477. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101477

Hindsleya, P., Yoskowitzb, D., 2020. Global change—Local values: Assessing trade-offs for coastal ecosystem services in the face of sea level rise. Global Environmental Change, 61: 102039. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102039

Huamantico, M. A., N. V. Revollo,C. A. Delrieux, M. C. Piccolo,

andG. M. E. Perillo. 2016. Beach carrying capacity assessment through image processing tools for coastal management. Ocean & Coastal Management, 130: 138-147. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.06.010

Ihobe, 2026. KOSTAEGOKI. Vulnerabilidad, riesgo y adaptación de la costa del País Vasco frente al cambio climático. I. Análisis de vulnerabilidad y riesgo. 108 pp.

Liendo, D., García-Mijangos, I., Biurrun, I., Campos, J. A., 2021. Annual weedy species of Erigeron in the northern Iberian Peninsula. Mediterranean Botany, 42: e67649. https://doi.org/10.5209/mbot.67649

Nehren, U., Thai, H., Marfai, M., Raedig, C., Alfonso, S., Sartohadi, J., Castro, C., 2016. Ecosystem services of coastal dune systems for hazard mitigation: case studies from Vietnam, Indonesia, and Chile. En: F. Renaud, K. Sudmeier-Rieux, M. Estrella, U. Nehren (Eds.), Ecosystem-Based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice, vol. 42, Springer, pp. 401-433, https://doi.org/10.1007/978-3-319-43633-3_18

Roca. E., Villares, M., 2008. Public Perceptions for Evaluating Beach Quality in Urban and Semi-natural Environments. Ocean & Coastal Management, 51: 314-329. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2007.09.001

Saintilan, N., Horton, B., Törnqvist, T. E., Ashe, E. L., Khan, N. S., Schuerch, M., Perry, C., Kopp, R. E., Garner, G. G., Murray, N., Rogers, K., Albert, S., Kelleway, J., Shaw, T. A., Woodroffe, C. D., Lovelock, C. E., Goddard, M. M., Hutley, L. B., Kovalenko, K., Feher, L., Guntenspergen, G., 2023. Widespread retreat of coastal habitat is likely at warming levels above 1.5 °C. Nature 621: 112–119. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06448-z

Serrano, G. D., Jurado Rota, J., Pérez Albert, M. Y., Bonfill Cerveró, C., 2018. The Beach Crowding Index: A Tool for Assessing Social Carrying Capacity of Vulnerable Beaches. The Professional Geographer, 70(3): 412–422. https://doi.org/10.1080/00330124.2017.1416300

Taylor, E. B., Gibeaut, J. C., Yoskowitz, D. W., Starek, M. J., 2015. Assessment and monetary valuation of the storm protection function of beaches and foredunes on the Texas coast. Journal of Coastal Research, 31(5), 1205-1216. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00133.1

Reconocimientos – Los autores agradecen a la Diputación Foral de Bizkaia por su apoyo financiero para llevar a cabo este proyecto.

Implementación del modelo SCHISM en Euskalmet y su aplicación a la simulación de un evento de marea extrema en la bahía de Txingudi

Castaño-Tierno A.[1], Gómez de Segura J.D.[1], Gelpi I.R.[1], Gaztelumendi S.[1]

Palabras clave: SCHISM, modelización hidrodinámica, marea extrema, nivel del mar, mallas no estructuradas, Txingudi, Bidasoa

Introducción

La Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet) mantiene operativos diferentes sistemas y herramientas de pronóstico océano-meteorológico para dar soporte a la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Gobierno Vasco (Gaztelumendi et al., 2009). Estos sistemas se orientan, entre otros aspectos, a la caracterización del nivel del mar y del impacto del oleaje en la costa, y constituyen una pieza fundamental de los procesos de acción temprana frente al riesgo marítimo-costero en la Comunidad Autónoma del País Vasco (Gaztelumendi et al., 2016; Gaztelumendi et al., 2024).

La necesidad de mejorar la caracterización hidrodinámica de los sistemas de predicción y análisis del nivel del mar en la costa vasca ha motivado la incorporación de herramientas numéricas avanzadas dentro de la infraestructura operativa de Euskalmet. En este contexto, se ha llevado a cabo la implementación del modelo SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model), un modelo hidrodinámico de código abierto de última generación capaz de representar de forma eficiente regiones de geometría compleja mediante mallas no estructuradas (Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2023). Su flexibilidad y su capacidad para resolver procesos multiescalares lo convierten en una herramienta particularmente adecuada para zonas estuarinas, fluvio-marinas y áreas de interfaz con fuerte variabilidad espacial y temporal. Los trabajos aquí descritos se enmarcan en las actividades de Euskalmet dentro del proyecto europeo Regions4Climate (R4C).

La costa vasca del sudeste del golfo de Vizcaya se caracteriza por un régimen mesomareal y por una sucesión de pequeños estuarios de fuerte impronta antrópica (Borja et al., 2004). Entre ellos, la bahía de Txingudi, en la desembocadura del río Bidasoa, constituye uno de los sistemas estuarinos más singulares del litoral vasco, tanto por su valor ambiental como por su exposición a la interacción entre la dinámica mareal y los aportes fluviales (Bald et al., 2005). Estas características hacen de Txingudi un caso de estudio idóneo para evaluar las prestaciones de un modelo hidrodinámico de alta resolución como SCHISM. En esta contribución se presenta la primera aplicación cuasi-operativa de dicha implementación, centrada en la simulación de un episodio de marea extrema (27 y 28 de enero de 2025) que combinó mareas vivas y bajas presiones atmosféricas, y su verificación frente a observaciones mareográficas.

[1]Euskalmet - Agencia Vasca de Meteorología, Portal de Foronda, 41, 01010 Vitoria-Gasteiz, Basque Country
E-mail: a-castanotierno@euskalmet.eus

Materiales y métodos

SCHISM es un sistema de modelización hidrodinámica de código abierto y soporte comunitario, derivado del modelo SELFE (Zhang y Baptista, 2008) e integrado sobre mallas no estructuradas. El modelo emplea un esquema semi-implícito de elementos finitos de Galerkin para la componente horizontal y un esquema de volúmenes finitos para la vertical, lo que le permite representar de forma eficiente dominios de geometría compleja y procesos multiescalares (Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2023). La implementación local de Euskalmet utiliza la versión 5.9.0 del modelo. En este trabajo se ha empleado una configuración bidimensional barotrópica, sin considerar los aportes fluviales, orientada a la simulación de condiciones de marea extrema.

La configuración principal emplea una malla triangular de aproximadamente 517.000 nodos, con resoluciones de hasta 1 m en la línea de costa y especial detalle en la bahía de Txingudi y en la desembocadura del río Bidasoa (Figura 1). La malla se ha generado con el software SMS (Aquaveo, 2017), complementado con scripts propios de refinado basados en la librería PySCHISM (Calzada et al., 2023). La línea de costa procede de datos LIDAR de 5 m de resolución, mientras que la batimetría combina los datos de EMODnet (EMODnet Bathymetry Consortium, 2020) con las isóbatas de 1 m de resolución del Gobierno Vasco para las zonas costeras (Eusko Jaurlaritza, 2009). El forzamiento mareal se obtiene del modelo global FES (Lyard et al., 2021), imponiendo ocho constituyentes armónicas en la frontera abierta, que forma un arco alrededor de la costa vasca. El forzamiento atmosférico procede del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2023) y del modelo GFS (NCEP, 2015). La fricción de fondo se ha cartografiado mediante valores del número de Manning entre 0,015 y 0,025, y se ha fijado una profundidad mínima de inundación de 0,01 m para el tratamiento de las zonas intermareales.

Una ejecución en paralelo con 32 núcleos requiere en torno a 20 minutos por día simulado, lo que permite obtener una predicción a 3 días en aproximadamente una hora, incluido el postproceso. Este se realiza mediante scripts en Fortran y Python que agregan las salidas del modelo y extraen series temporales en las posiciones de los mareógrafos.

La validación se ha llevado a cabo en dos fases. En primer lugar, se han ejecutado casos de prueba estándar (test de aguas en reposo y propagación de una onda de marea en un canal) para comprobar la convergencia numérica, la ausencia de velocidades espurias y el correcto tratamiento de la inundación y secado de la línea de costa (Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2023). Posteriormente, la verificación se ha realizado calculando el RMSE y el sesgo del nivel del mar total y del residuo meteorológico para un episodio de mareas vivas coincidente con una situación meteorológicamente

activa (27–28 de enero de 2025), comparando los resultados con los datos de los mareógrafos de Pasaia y Bilbao, así como con la boya de Donostia y las mediciones mareográficas llevadas a cabo en la bahía de Txingudi dentro del proyecto R4C.

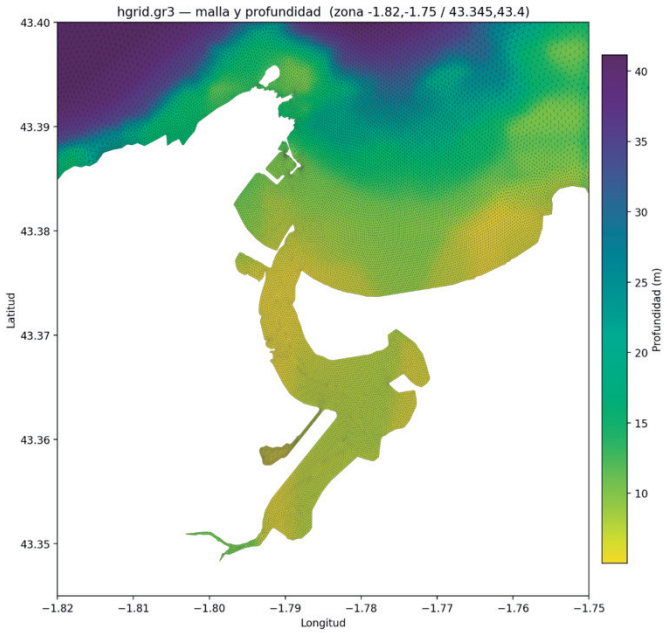


Figura 1. Malla y batimetría del área de Txingudi.

Resultados y discusión

Sobre trabajos previos destinados a evaluar la estabilidad del modelo (Castaño-Tierno et al. 2024) se han realizado diversas simulaciones en el dominio costero vasco, de las que se presenta aquí el caso de enero de 2025. La simulación se inicia el día 24 y se extiende durante cinco días, cubriendo el único episodio con aviso naranja por impacto costero de los años 2025 y 2026. El modelo requiere entre uno y dos días de spin-up para alcanzar resultados aceptables y comienza a degradarse a partir del quinto día, lo que define una ventana útil de simulación de tres a cuatro días. Para los días centrales del episodio (27 y 28 de enero), caracterizados por la combinación de mareas vivas y bajas presiones atmosféricas, el modelo reproduce tanto la fase y la magnitud de las pleamares como el residuo meteorológico positivo asociado a la baja presión, con las mayores discrepancias limitadas a los niveles de pico (Figura 2). El RMSE del nivel del mar durante el periodo simulado es de 6,1 cm en Pasaia y de 8,2 cm en Bilbao.

Los resultados se han contrastado favorablemente con el mareógrafo de Pasaia (Figura 2), pero la simulación realizada no contempla efectos locales como la descarga del río Bidasoa, que puede modular los niveles y las corrientes en el interior del estuario. Futuras simulaciones tendrán en cuenta estos efectos, permitiendo hacer uso pleno de los datos recogidos en la campaña de medición asociada a R4C. La Figura 3 muestra el campo de nivel del mar simulado en la bahía en distintos instantes del 27 de enero, e ilustra la capacidad de la malla no estructurada para resolver los

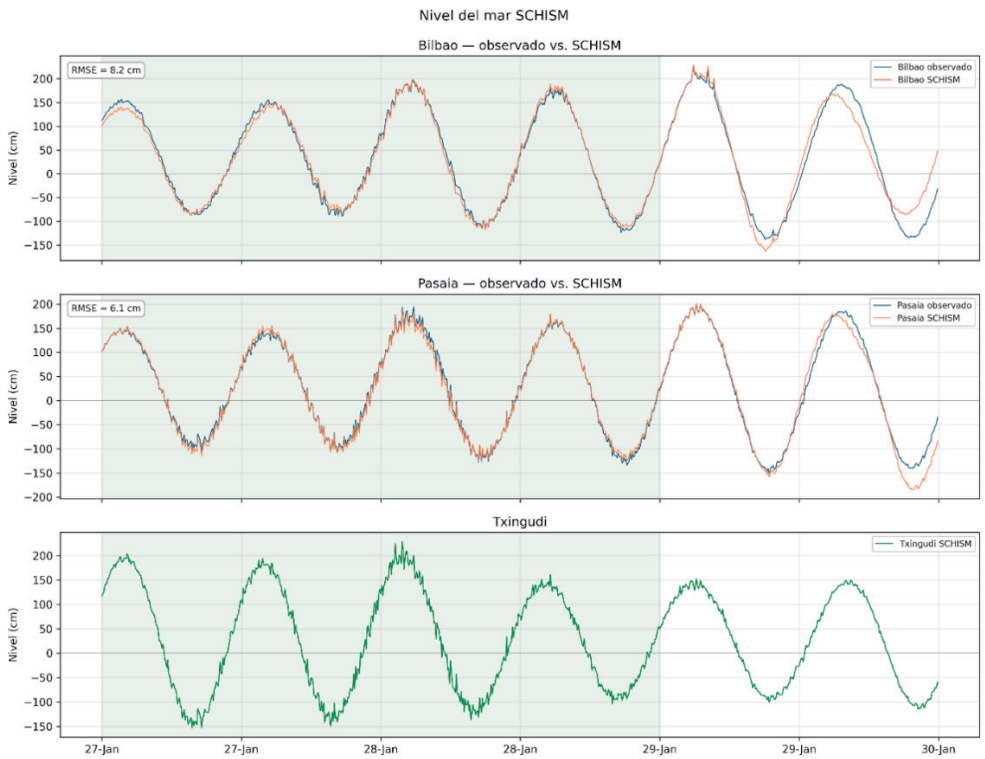


Figura 2. Evolución del nivel del mar observado y simulado entre el 27 y el 29 de enero de 2025 en Bilbao, Pasaia y Txingudi. El sombreado indica los días centrales del episodio.

canales estrechos y las llanuras intermareales del sistema. Estos resultados confirman la utilidad del modelo tanto para el análisis científico como para aplicaciones operativas, complementando la información proporcionada por los sistemas de alerta costera actualmente operativos en Euskalmet (Gaztelumendi et al., 2016; Gaztelumendi et al., 2024).

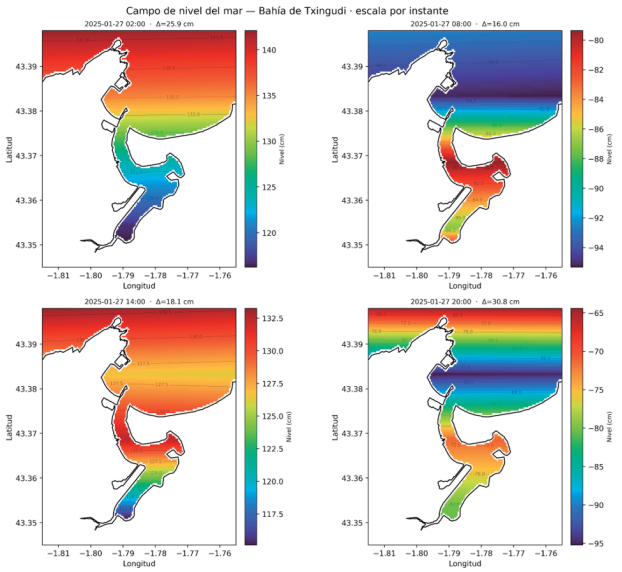


Figura 3: Campo de nivel del mar simulado en la bahía de Txingudi en cuatro instantes del 27 de enero de 2025.

Conclusiones

Se ha implementado el modelo hidrodinámico SCHISM dentro de la infraestructura operativa de Euskalmet, dando continuidad a los avances descritos en trabajos previos (Castaño-Tierno et al., 2024), y se ha aplicado, como primer resultado cuasi-operativo, a la simulación de un episodio de marea extrema en la bahía de Txingudi y la desembocadura del río Bidasoa. El uso de mallas no estructuradas de alta resolución —hasta 1 m en la línea de costa— ha permitido representar la compleja geometría del estuario, y la validación frente a los mareógrafos de Pasaia y Bilbao confirma que la configuración reproduce adecuadamente la marea astronómica y el residuo meteorológico en situaciones de alto impacto. El coste computacional, en torno a 20 minutos por día simulado con 32 núcleos, resulta compatible con los requisitos de una cadena de alerta temprana.

No obstante, la configuración actual es bidimensional y barotrópica y no incluye los aportes fluviales, por lo que los procesos asociados a la descarga del Bidasoa y a los gradientes de densidad no están aún representados. Entre las líneas de trabajo futuras destacan la incorporación del caudal fluvial y de una formulación baroclina, el acoplamiento con modelos de oleaje y el despliegue de instrumentación local para extender la validación al interior de la bahía. Estos desarrollos consolidarán SCHISM como herramienta de apoyo a la evaluación del riesgo costero y a la alerta temprana en Euskalmet, en línea con los objetivos del proyecto europeo Regions4Climate y de la adaptación al cambio climático en el litoral vasco.

Referencias

Aquaveo, LLC (2017). SMS User Manual (v12.1). Aquaveo, Provo, Utah.

Bald, J., Borja, A., Muxika, I., Franco, J., Valencia, V. (2005). Assessing reference conditions and physico-chemical status according to the European Water Framework Directive: A case study from the Basque Country (Northern Spain). Marine Pollution Bulletin, 50 (12), 1508-1522.

Borja, A., Valencia, V., Franco, J., Uriarte, A. (2004). The Basque Country. En: Borja, A. y Collins, M. (Eds.), Oceanography and Marine Environment of the Basque Country. Elsevier Oceanography Series, 70. Elsevier, Amsterdam.

Calzada, J.R., Cui, L., Zhang, Y.J. (2023). schism-dev/pyschism: v0.1.5. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7623122

Castaño-Tierno, A., Gómez de Segura, J.D., Gelpi, I.R., Gaztelumendi, S. (2024). Avances en la predicción de residuos y rebases en Euskalmet. Proceedings VI Congreso transfronterizo sobre cambio climático y litoral UHINAK. Irun, Spain. 23-24 octubre 2024.

EMODnet Bathymetry Consortium (2020). EMODnet Digital Bathymetry (DTM). EMODnet Bathymetry. https://doi.org/10.12770/bb6a87dd-e579-4036-abe1-e649cea9881a

Eusko Jaurlaritza / Gobierno Vasco (2009). Batimetrías marinas del País Vasco. Año 2009 - Isóbatas 1 m. Open Data Euskadi. https://opendata.euskadi.eus/catalogo/-/batimetrias-marinas-pais-vasco-ano-2009/

Gaztelumendi, S., González, M., Egaña, J., Rubio, A., Gelpi, I.R., Fontán, A., Otxoa de Alda, K., Ferrer, L., Alchaarani, N., Mader, J., Uriarte, Ad. (2009). Implementation of an operational oceanometeorological system for the Basque Country. Thalassas, 26 (2), 151-167.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., González, M., Aranda, J.A., Anitua, P. (2016). The new Euskalmet coastal-maritime warning system. Advances in Science and Research, 13, 91-96. https://doi.org/10.5194/asr-13-91-2016

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Gelpi, I.R., Gómez de Segura, J.D., Aranda, J.A. (2024). El sistema de acción temprana frente al riesgo marítimo-costero en Euskalmet. Revista de Investigación Marina (RIM), 30 (1), 52-55.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47

Lyard, F.H., Allain, D.J., Cancet, M., Carrère, L., Picot, N. (2021). FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. Ocean Science, 17, 615-649. https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021

NCEP/NWS/NOAA/U.S. Department of Commerce (2015). NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive. Research Data Archive, NCAR. https://doi.org/10.5065/D65D8PWK (acceso: junio de 2026).

Zhang, Y., Baptista, A.M. (2008). SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. Ocean Modelling, 21 (3-4), 71-96.

Zhang, Y.J., Ye, F., Stanev, E.V., Grashorn, S. (2016). Seamless cross-scale modeling with SCHISM. Ocean Modelling, 102, 64-81.

Zhang, Y.J., Fernandez-Montblanc, T., Pringle, W., Yu, H.-C., Cui, L., Moghimi, S. (2023). Global seamless tidal simulation using a 3D unstructured-grid model (SCHISM v5.10.0). Geoscientific Model Development, 16, 2565-2581. https://doi.org/10.5194/gmd-16-2565-2023.

Agradecimientos - Los autores expresan su agradecimiento a todas las instituciones que financian la red instrumental y los servicios operativos en la Comunidad Autónoma de Euskadi, en particular a la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Departamento de Seguridad del Gobierno Vasco. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto Regions4Climate (R4C) del programa Horizon Europe de la Unión Europe.

KOSTALDEKO ARRISKUAK ETA MUTURREKO GERTAKARIAK
RIESGOS COSTEROS Y EVENTOS EXTREMOS
RISQUES COTIERS ET EVENEMENTS EXTREMES
COASTAL RISKS AND EXTREME EVENTS

Digital Monitoring of a Nature-Based Costal Dune System for Climate Resilience

Federica Vergari[1], Ilaria Ingrosso[1], Andrea Montanaro[1], Riccardo Fruni[1], Arianna Verga[1], Lucia Miglietta[1] and Alessandro Largo[1].

Keywords: coastal dunes; Nature-Based Solutions; coconut-fibre bionet; distributed fibre optic sensing; structural monitoring; erosion and storm impacts

The Regions4Climate (R4C) Project Case Study in Tuscany

Introduction

Coastal areas are increasingly exposed to shoreline retreat, storm-induced erosion, coastal flooding, and other climate-related hazards, as a result of the combined effects of sea-level rise, extreme weather events, and growing anthropogenic pressure on littoral systems. These processes affect coastal ecosystems, infrastructure and economic activities, making climate adaptation in coastal environments an urgent challenge. [1] Historically, coastal protection strategies have been largely based on so-called "grey" interventions [2], however, they require high construction and maintenance costs, they reduce geomorphological adaptability, and they have significant ecological impacts. [3] Over the last decade, a broader transition towards more adaptive and resilient approaches has emerged. [4] In this context, Nature-Based Solutions (NbS) are promising strategies for coastal resilience, in order to reduce hazard exposure, while simultaneously delivering environmental, economic and social co-benefits.

Recent reviews suggest that coastal adaptation should be viewed as a continuum and an integration of approaches, ranging from engineered solutions to hybrid and fully nature-based solutions. [5]

In coastal settings, NbS include ecosystem-based interventions capable of attenuating wave energy, promoting sediment retention, reducing erosion, and enhancing ecological value[6], playing a crucial role as natural barriers against storm impacts and marine flooding, especially when integrated within restoration and reinforcement interventions. At the same time, the wider implementation of coastal NbS still faces important barriers, including limited long-term monitoring data, insufficient quantitative evidence of structural and protective performance, and the lack of standardized methods for assessing their effectiveness under real environmental and construction conditions. [7] This gap is particularly relevant from an engineering perspective, because the transition to measurable and trackable resilient infrastructure requires monitoring tools able to capture the mechanical response of these systems over space and time. [8] Distributed fibre optic sensing is especially promising in this regard, as it enables continuous strain measurements over long distances with limited intrusiveness and can therefore support the structural monitoring of deformable, bio-based coastal protection systems. [9]

Within this framework, the present study investigates the development and application of a sensorized coconut-fibre bionet conceived as an instrumented layer for coastal dune monitoring. The work focuses on a NbS implemented in Gulf of Follonica (Tuscany, Italy), under the EU-funded R4C project (Grant Agreement ID: 101093873). The aim of the paper is to demonstrate the potential of the NbS digitalisation, examining the role of fibre-opting in allowing the mechanical monitoring of specific NbS (i.e., coastal dunes) that enchance its durability and resilience.

Materials and methods

The methodology combines material characterization, sensing system design, laboratory-scale validation and an in-situ installation at a coastal demo site. The sensorized bionet is conceived as a monitoring layer integrated into the dune restoration works, with fibres arranged along the main structural directions and multiple instrumented zones providing spatial coverage and redundancy.

The bio-based reinforcement layer adopted in this study consists of a coconut-fibre bionet, selected for its compatibility with coastal restoration applications and its widespread use in erosion-control interventions. The bionet is composed of natural coir ropes woven into an open-mesh configuration, which allows mechanical interaction with the surrounding sand while preserving flexibility and ease of placement on irregular dune surfaces. This material was chosen because it combines biodegradability, rough surface texture, and sufficient mechanical integrity for temporary or medium-term stabilization functions in Nature-Based Solutions. Within the proposed monitoring concept, the bionet does not act only as a reinforcement or anti-erosion element, but also as the physical support for embedding the sensing network, thus enabling the transformation of a passive ecological material into an instrumented layer capable of capturing the structural response of the dune system.

The project application requires strain sensing over extended lengths, since the mechanical response of the dune reinforcement system is distributed over multiple areas rather than concentrated at a limited number of discrete points. In this context, optical fibre sensors represent a particularly suitable and innovative solution, as they combine reduced invasiveness, geometric flexibility, and the capability to be integrated into lightweight bio-based supports without significantly altering their mechanical behaviour. Among the available fibre optic approaches, distributed sensing was selected because it enables continuous measurements along the

[1]*Rina Consulting, Via Cecchi 6, Genova, Italy*
E-mail contact: federica.vergari@rina.org

entire sensing line, making it possible to capture spatially variable strain patterns over the instrumented bionet. This characteristic is especially relevant for coastal Nature-Based Solutions, where the structural response may vary significantly depending on local geometry, sand loading conditions, and installation-induced stress concentrations. Distributed optical fibre sensing is based on the analysis of the backscattered light generated along the fibre when an optical signal propagates through it. Local variations in strain and temperature modify the optical response of the fibre, allowing the reconstruction of continuous profiles along its length and providing a much more representative description of the structural behaviour than point-based measurements alone.

For the specific application investigated in this work, the selected optical fibre had to satisfy several functional and operational requirements. These included adequate strain sensitivity, small diameter to facilitate integration within the coconut-fibre bionet, sufficient mechanical flexibility to conform to the natural substrate, and suitable robustness for outdoor use during handling, installation, and subsequent exposure to environmental conditions. The final choice therefore had to balance sensing performance with durability and practical applicability in real coastal field conditions. Based on these requirements, the fibre adopted in this study was the DSS 1f 09mm, with 0.9 mm diameter and provided by Fibrasens, identified as the most suitable solution for embedding within the instrumented bionet and for supporting distributed strain monitoring throughout the experimental campaign.

The overall monitoring strategy was designed to provide real-time, distributed measurements of strain within the dune body, in order to assess the mechanical performance and longterm stability of the restored dune belt under realistic environmental forcing. To achieve this objective, the development of the monitoring system was divided into three main steps:

Phase 1: laboratory mechanical characterization and calibration of coconutfiber bionet coupled with DFOS.

Phase 2: largescale laboratory validation under controlled dynamic loading conditions.

Phase 3: fullscale demosite installation and functional verification at the Sterpaia coastal park.

Results and discussion

During Phase 1, a comprehensive laboratory testing activity was conducted, focused on the mechanical characterization of fiber optic sensors integrated in the bionet systems. The experimental campaign aimed to validate the mechanical properties of geotextile coupled with distributed strain sensing fiber optic sensors (FOS) under controlled laboratory conditions. The stress-strain curves (as reported in Figure 1 a)) demonstrated that the Young's moduli values in the range of 46.3 to 97.5 kPa, resulting in significant variability in measured mechanical properties and strain transmission characteristics, because of the heterogenneous and non-isotropic nature of coconut fibres. During the tensile tests each FO sensor attached to the specimens was connected to an OBR LUNA 4600 interrogation system, capable of acquiring in real time the strain distribution (in microstrain) along the fiber, as reported in Figure 1 b). The measurements were performed in parallel with the application of the mechanical load cycles, allowing the optical fiber response to be observed as the force applied to the bionet increased. For each specimen, the microstrain as a function of load for three representative points along the optical fiber (Figure 1 c)). These points were extracted from the OBR microstrainversuslength profiles and are located within the bonded zone, i.e. the active sensing region between the adhesion points of the fiber to the coconut rope. Since the two acquisition systems operate independently, the measurement timestamps were used to correctly align the data and associate each fiber strain profile with the corresponding applied force value. This procedure made it possible to identify and correct any temporal offsets, ensuring precise correspondence between the actual load and the fiber response. Furthermore, to accurately calibrate the optical fiber microstrain response against the real deformation measured mechanically, a calibration coefficient was determined of 0.43 ±0.09, demonstrating high sensitivity and flexibility in strain evaluation.

Following the successful completion of Phase 1, Phase 2 focused on validating the integrated sensorized bionet system under dynamic loading conditions that more closely simulate realworld field deployment scenarios. The objectives of this phase were to assess the performance of the distributed fiber optic strain sensing system when subjected to impact and evaluate the influence of fiber installation geometry (warp vs. weft orientation) on sensor coverage and sensitivity. The experimental setup consisted of a tractor-mounted bucket partially loaded with gravel to simulate soil material encountered in slope erosion or landslide scenarios. Each sensorized bionet sample was mounted on the outer edge of the bucket and secured using ropes, maintained under initial tension to simulate field installation conditions (Figure 2 a) and b)).

Three fibre installation geometries were tested on the prepared

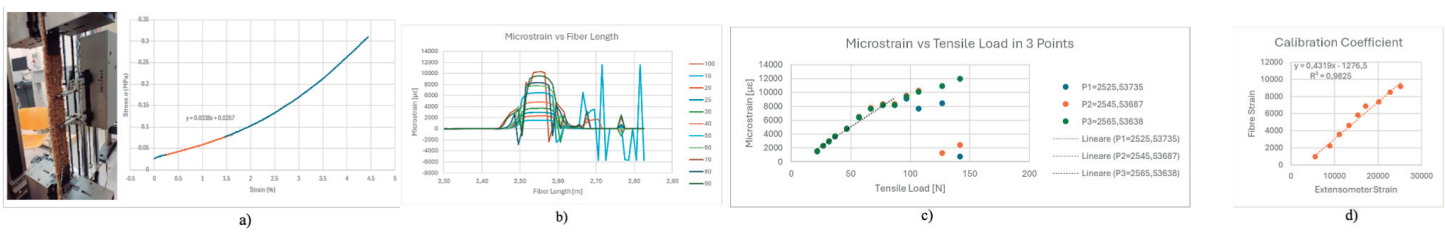


Figure 1. a) Stress-strain curve of a specimen with fibre optic sensor integrated in the bionet systems; b) Microstrain vs lenght of the fibre specimen during the mechanical loading; c) microstrain vs lenght for three representative points along the optical fibre. d) Calibration coefficient.

specimens. The first two consisted of single-direction layouts, with fibres aligned either along the warp direction or along the weft direction of the bionet, while the third configuration combined both directions in a dual-direction warp-weft layout. The three geometries were compared to evaluate how fibre routing affects load transfer and strain distribution within the sensorized bionet. The results, shown in Figure 2 c), indicated that the dual-direction configuration provided the most complete spatial coverage of the strain field, with measurable response on all installed sensor lines. For this reason, the combined warp-weft layout was selected as the final geometry for the bionet to be installed at the Piombino site.

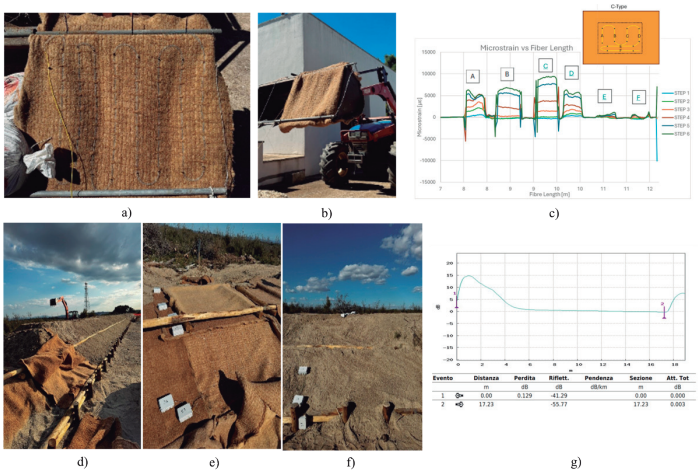


Figure 2. a) Photo of sensorized bionet sample mounted on the outer edge of the bucket during the test; b) Photo of a stepwise during the test; c) Strain response of specimen with dual weft-wrap layout; d) Dune reconstruction in Piombino (IT); e) installation of instrumented bionet; f) sand final coverage of dune; g) example of fibre OTDR measurement after the installation, verifying the fibre integrity.

Phase 3 focused on the full-scale field deployment of the sensorized bionet at the Piombino coastal dune site. The installation was carried out starting from the sensorized layout previously developed in laboratory and validated in Phase 2, adopting the combined warp-weft configuration identified as the most effective for distributed strain monitoring. The bionet was installed along the designed dune profile following a controlled reconstruction sequence, with a basal separation layer (Figure 2d)), the sensorized bionet (Figure 2e)), sand placement and a final protective non-sensorized layer used to complete the dune structure (Figure 2f)), while the fibre connectors were protected in juction boxes.

Preliminary optical checks performed immediately after installation were carried out using the Optical Time Domain Reflectometer VIAVI SmartOTDR, to verify fibre continuity and identify any installation-induced damage. The OTDR measurements confirmed the integrity and functionality of the installed sensing network, with the initial traces indicating continuous operation of the fibres and consistency with the expected installation layout, as illustrated by the representative sensor response reported in Figure 2 g). These results provided the baseline condition for subsequent field monitoring of dune morphodynamics and stability.

Conclusions

This study demonstrates the feasibility of integrating distributed fibre optic sensing within a coconut-fibre bionet for coastal dune monitoring. Laboratory and field results confirmed the effectiveness of the proposed approach, while the phase-by-phase development highlighted the importance of fibre layout in achieving robust strain coverage. The selected warp–weft configuration provided the most complete sensing response and was successfully deployed at the Piombino site, where preliminary OTDR checks confirmed fibre integrity after installation. Overall, the proposed system represents a promising tool for the structural monitoring of NbS for coastal protection measures, showing how trasforming NbS into smart infrastructure improves their long-term resilience.

References

[1] Masria, A., Iskander, M., & Negm, A. 2015. Coastal protection measures, case study (Mediterranean zone, Egypt). Journal of Coastal Conservation, 19(3):281–294. http://www.jstor.org/stable/24760820.

[2] Le Xuan, T., Tran Ba, H., Quoc Thanh, V., Wright, D. P., Hasan Tanim, A., & Tran Anh, D. 2022. Evaluation of coastal protection strategies and proposing multiple lines of defense under climate change in the Mekong Delta for sustainable shoreline protection. Ocean & Coastal Management, 228: 106301. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106301.

[3] Gittman, R. K., & Scyphers, S. B. 2017. The cost of coastal protection: A comparison of shore stabilization approaches. Shore & Beach, 85(4): 19–24.

[4] Schoonees, T., Gijón Mancheño, A., Scheres, B. et al. 2019. Hard Structures for Coastal Protection, Towards Greener Designs. Estuaries and Coasts 42, 1709–1729. https://doi.org/10.1007/s12237-019-00551-z.

[5] Narayan S, Beck MW, Reguero BG, Losada IJ, van Wesenbeeck B, et al. (2016) The Effectiveness, Costs and Coastal Protection Benefits of Natural and Nature-Based Defences. PLOS ONE 11(5): e0154735. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154735.

[6] Borsje, B. W., van Wesenbeeck, B. K., Dekker, F., Paalvast, P., Bouma, T. J., van Katwijk, M. M., & de Vries, M. B. 2011. How ecological engineering can serve in coastal protection. Ecological Engineering, 37(2): 113–122. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.027.-

[7] Ahmed, T., Creedon, L., & Gharbia, S. S. (2023). Low-Cost Sensors for Monitoring Coastal Climate Hazards: A Systematic Review and Meta-Analysis. Sensors, 23(3), 1717. https://doi.org/10.3390/s23031717.

[8] Rova, S., Pastres, R., Zucchetta, M., & Pranovi, F. 2018. Ecosystem services' mapping in data-poor coastal areas: Which are the monitoring priorities? Ocean & Coastal Management, 153:168–175. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.11.021

[9] Cemiloglu, A., Jin, C., Fei, T., Nanehkaran, Y. A. A., Raoof, A., Sweijen, T., & Derakhshani, R. 2025. Fiber-optic technologies for real-time monitoring of coastal landslides: A review of their role in early warning systems. Frontiers in Earth Science, 13. https://doi.org/10.3389/feart.2025.1570413.

Preliminary impact assessment of regional climate adaptation actions: insights from four European coastal regions

Cantergiani, Carolina[1], García, Igone[1], Garnier, Roland[2], del Campo, Andrea[2], Delpey, Matthias [3], Cipriani, Luigi[4], Gonçalves, Catarina[5]

Keywords: climate resilience, climate adaptation, coastal resilience, Nature-based Solutions, monitoring & evaluation, impact assessment

Introduction

European coastal regions are increasingly exposed to climate-related risks such as sea-level rise, flooding, erosion, and extreme events, requiring adaptive responses that are both locally grounded and scalable. Within the EU-funded *Regions4Climate (R4C)* project, twelve regions are implementing demonstrators (hereafter, demo) aimed at strengthening climate resilience through Nature-based Solutions (NbS), digital tools, governance innovation, and stakeholder engagement. This abstract presents **preliminary impact assessment results from four coastal regions** – Azores, the Basque Country, South Aquitaine, and Tuscany – based on a harmonised monitoring and evaluation (M&E) framework.

The assessment is grounded on a set of **Key Performance Indicators (KPIs)** measuring effectiveness, progress, and early impacts of demos during the period Sep2024–Feb2026. Indicators are linked to societal challenges (e.g. participatory governance, social cohesion, climate resilience) and climate risk components (hazard, exposure, vulnerability, response). Regional teams carried out qualitative self-assessments, classifying KPI performance as *low*, *medium*, or *high* impact, reflecting current implementation stages.

Results highlight **diverse yet convergent adaptation pathways**, since they vary in terms of maturity and focus. The **Basque Country region** shows the most advanced progress – as frontrunner region – with high impacts mainly in governance innovation and ecological monitoring, while **South Aquitaine** and **Tuscany regions** report predominantly medium impacts in coastal management and NbS developments, respectively, with potential for growth as their systems and interventions mature. Meanwhile, the **Azores region** is focusing on the foundational stages of adaptation, reporting high early impact in climate literacy and participatory governance.

Across all four regions, **KPIs related to response capacity and governance** are the most frequently associated with medium and high impacts, while hazard and exposure-related indicators remain more challenging to influence at local scale. These findings underline the importance of early investment in governance, stakeholder engagement, and institutional learning as precursors to long-term risk reduction.

This preliminary assessment demonstrates the value of a **common yet flexible M&E framework** for comparing regional climate adaptation actions, identifying early successes, and supporting replication and upscaling. The results provide actionable evidence for decision-makers and contribute to ongoing discussions on coastal risk management, NbS effectiveness, and climate governance.

Materials and methods

The Monitoring and Evaluation (M&E) framework of the R4C project is designed to support decision-making and strengthen climate resilience by providing evidence-based assessments of the regional demonstrators. This framework is the basis for the monitoring activities, aims to offer the fundament to the regions to provide evidence about the impact of their demonstrators. It has as a reference the guide "*Evaluating the Impact of NbS – A handbook for practitioners*" for analysing the impacts at implementation level, and also considers other tasks developed in the project at regional level, which led to a complementation of the set of KPIs selected. This includes Just Transition roadmaps, Climate Vulnerability and Risk Assessment, Climate Resilience Maturity Assessment, and Regional Innovation Roadmaps.

Operationally, the framework utilizes a pre- and post-implementation (ex-ante/ex-post) design to assess changes over time, focusing primarily on effectiveness—specifically climate adaptation, risk reduction, and societal co-benefits—given the project's temporal and resource constraints. To ensure comparability across diverse regions, the project utilizes state-of-the-art KPIs categorized by progress,

effectiveness, and innovation, allowing for regional flexibility in metric selection while maintaining a consistent evaluative structure. The definition of these KPIs followed a hybrid approach, combining top-down scientific literature reviews with iterative

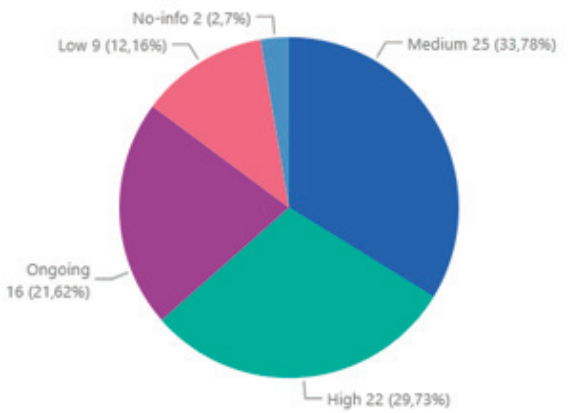
[1]TECNALIA Research & Innovation, Parque Científico y Tecnológico de Gipuzkoa, Mikeletegi Pasealekua, 2 - E-20009 Donostia, Gipuzkoa, Spain
[2]AZTI, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Herrera Kaia. Portualdea, 20110 Pasaia, Gipuzkoa, Spain
[3]Center Rivages Pro Tech, SUEZ Eau France, Technopôle Izarbel - 2 allée Théodore Monod 64210 Bidart, Nouvelle Aquitaine, France
[4]Region of Tuscany, Directorate Soil Defense and Civil Protection, Via di Novoli, 26 – 50127, Firenze, Italy
[5]Fundo Regional da Ciência e Tecnologia, Largo da Matriz, 45-52 - 9500-094 Ponta Delgada, Azores, Portugal

E-mail contact: carolina.cantergiani@tecnalia.com

regional workshops and stakeholder consultations to ensure feasibility and contextual relevance.

For choosing the KPIs, the regions have been provided with a preselected list of 47 indicators, according to a first analysis on potential options with respect with the challenges and demos previously established. With the intention of being able to consider co-benefits resultant from the implementation of the demos, complementary indicators were added to also cover those aspects. The four regions analysed in this article form a group (Challenge Suite 1, or CS1) focused on "faster adaptation", and which main pillars of development are restoration and protection of coastal areas, aiming to increase regional resilience to climate change.

Figure 1 shows the overall distribution of the 74 KPIs selected by the regions, and their preliminary quantitative assessment. Although most of the evaluated KPIs were indicated as having a medium impact (34%), almost the same number of KPIs were linked to a high impact (30%), while only 12% were classified with low impact, which can still be updated and increased for the final assessment. For all the KPIs, almost 22% are still ongoing and could not be evaluated at this stage. Results from only 2 indicators were not yet reported.



REG_Desc	High	Low	Medium	No-info	Ongoing	Total
Tuscany	1	1	5	2		9
South Aquitaine	4	4	16			24
Basque Country	14	4	4		1	23
Azores	3				15	18
Total	**22**	**9**	**25**	**2**	**16**	**74**

Figure 1. Distribution of the 74 selected KPIs by region and preliminary impact level

Results and discussion

In R4C, the effectiveness of the demos focuses primarily on assessing their potential impact in terms of regional resilience to climate change. Effectiveness relates to how the demos impact society. For evaluating that, different regions selected their KPIs according to their own context, needs and feasibility for measuring them. Although individually selected, given the process were guided and led by Tecnalia, the indicators coincide in many cases.

Analysing the type of indicators selected and excluding those chosen only once by any of the four regions, the diagram of Figure 2 shows that "climate change adaptation and resilience" was mostly chosen to be measured (selected 14 times). It is followed by "stakeholder engagement and participation" and "trust in decision-making procedure" (selected 8 and 6 times, respectively). These indicators being related to climate change and stakeholder-related specific actions are explained by the scope of the project, and especially by the common goals established for the four analysed regions, which restoration and protection of coastal areas are key goals, and stakeholder engagement is a key process proposed in the project. Figure 2 also shows the topic of the following most selected KPIs are aligned with these two main objectives, e.g., trust in decision making, areas exposed to risk, stakeholder satisfaction.

Since the overall goal of the actions in R4C is increasing the climate resilience at regional level, and that the results of the action at local scale can be upscaled and replicated to contribute to that, the capacity for promoting a real transformation is key. In this sense, considering the four components of risk (6th IPCC Report) – hazards (HA), exposure (EX), vulnerability (VU) and response (RE) – some are easier to change than others. However, given the local scale of the interventions linked to regional demos, they may not contribute significantly to changing the risk components in general, but the approach taken may still be interesting to build a strong narrative about the importance of replication and upscaling focused on minimising risks at a regional scale.

For the four regions analysed, the selected KPIs are more related to response capacity (69 out of the 74, i.e., more than 50%), represented in Figure 3. It also outstands that most of those indicators, for this preliminary assessment, are evaluated by the regions as generating high (18) and medium (15) levels of impact. In addition to that, there are still 16 KPIs evenly

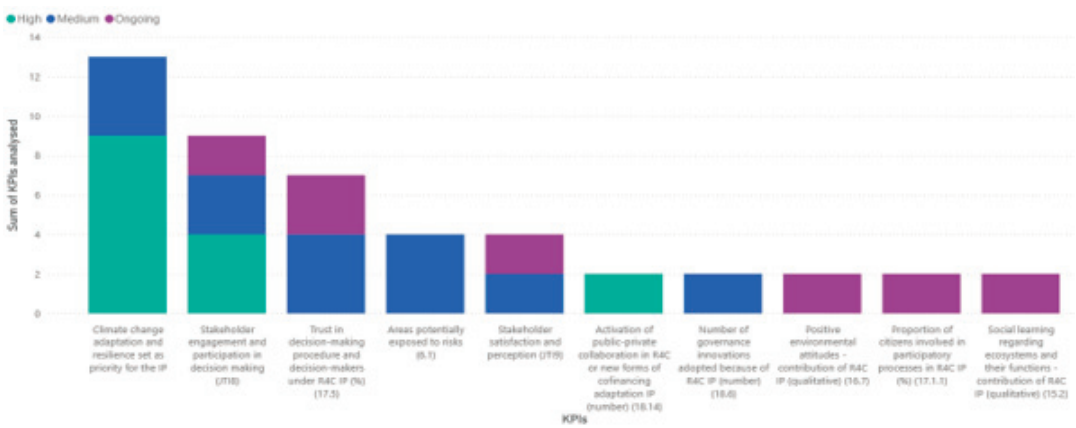


Figure 2. Mostly selected KPIs (those selected only once by any region is excluded from the diagram)

distributed within 'vulnerability' and "exposure", which also present a good margin of action to enhance impact and thus improve resilience.

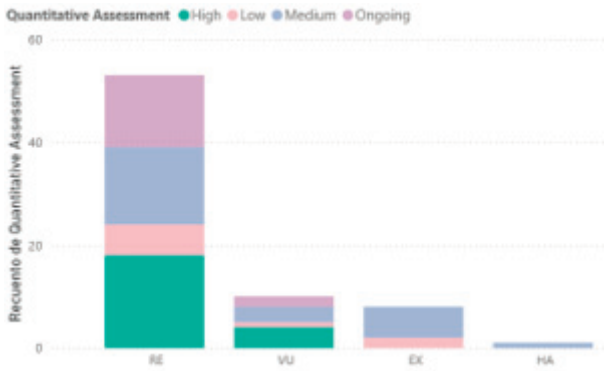


Figure 3. KPIs distributed by risk component

In the **Azores region**, actions focus on digitalisation of decision-making, climate literacy, and stakeholder engagement. While most KPIs are still ongoing, early results show high impact in prioritising climate adaptation and strengthening participatory governance, underlining the role of social and institutional capacities in early adaptation stages.

The **Basque Country region** demonstrates the most advanced outcomes, with all KPIs assessed and a high proportion already generating high impacts. Notable results include improvements in estuarine ecological monitoring, governance innovation, and stakeholder trust, reflecting a strong integration of adaptation into regional policy frameworks.

In the **South Aquitaine region**, a large portfolio of coastal monitoring, forecasting, and decision-support demos shows predominantly medium impacts at this intermediate stage. These results indicate robust progress in adaptive coastal management and governance, with strong potential for future upscaling as systems mature.

In the **Tuscany region**, NbS focused on dune restoration and social engagement are yielding mostly medium impacts, with clear room for improvement as physical interventions and community involvement advance.

While the framework is aligned with scientific best practices, certain limitations were noted, including the exclusion of complex dimensions such as behavioral change and return-of-investment due to methodological challenges and the timing of M&E plan development. Despite these constraints – which will be reported as project lessons learnt, the framework enables the identification of regional commonalities and barriers to the demos deployment. The resulting insights, integrated into project deliverables, serve to assess climate resilience impacts and provide a strategic basis for the upscaling and replication of these innovations at both regional and EU levels.

Conclusions

In conclusion, this preliminary impact assessment offers an initial overview that helps us better understand, monitor, and evaluate the impacts of the demonstrators in R4C. The progress observed in the success of the proposed solutions already provides constructive evidence of some key enablers and barriers encountered by the regions. This, in turn, creates an opportunity to focus efforts on improving specific aspects where challenges persist.

While the specific impacts identified are important, the broader perspective on regional climate resilience must not be overlooked. This wider impact could be further strengthened by replicating and scaling up the solutions that have already demonstrated a significant and positive effect.

Following this preliminary evaluation, the final impact assessment, to be completed by the end of the project (planned for December of 2027), will provide updated and more comprehensive information. Then, evidence may be collected and shared regarding the identified commonalities among regions in terms of impacts, as well as considering scalability and generation of impacts beyond R4C. With all indicators fully assessed, it will allow for a more refined, accurate, and realistic analysis of the regions' progress toward climate resilience.

References

Cantergiani, C.; García, I.; Eguiguren, J.L. (2026). Regions4Climate Project: D.5.8. Preliminary Impact Assessment.

European Commission: Directorate-General for Research and Innovation, *Evaluating the impact of nature-based solutions – A handbook for practitioners*, Publications Office of the European Union, 2021, https://data.europa.eu/doi/10.2777/244577.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report.* Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Zorita, S. and Cantergiani, C. (2026). Monitoring Journey Guide for Regions. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.19682657.

*Acknowledgement*s - The authors thank the regional cluster members for their active participation on providing inputs for this preliminary impact assessment, as well as the project coordinator and reviewers for the valuable inputs received.

The socio-economic value of climate services in the Pacific: a cost-effective investment in the face of extreme events

Ruiz-Beneitez, Gontzal[1], Sainz de Murieta, Elisa[2,3], Markandya, Anil[3], Galarraga, Ibon[1,3]

Keywords: climate services, socio-economic benefit, cost-benefit analysis, Pacific SIDS, Fiji, Samoa

Introduction

The Pacific Small Island Developing States (SIDS), including Samoa, are among the most climate-vulnerable regions on Earth. Their small land area, geographic isolation, and high dependence on climate-sensitive sectors such as agriculture and energy, make them particularly exposed to escalating climate impacts. Key hazards include sea-level rise projected to reach 0.85–0.87 m by the end of the century, stronger tropical cyclones (categories 4 and 5), extreme rainfall, inland flooding, and coastal inundation threatening critical infrastructure and communities.

Evidence from recent disasters illustrates the high cost of inaction. In 2012, TC Evan resulted in a total economic impact of USD 168.4 million in Samoa, with USD 22.8 million in agricultural losses alone (Government of Samoa, 2013). These figures underscore the urgent need to invest in climate services (such as early warning systems, forecasting tools, and hazard monitoring, among other technologies and protocols) to support adaptation and minimize future losses. This highlights the importance of Disaster Risk Reduction (DRR) among Pacific SIDS. This is because it covers different areas, so investment in this area can reduce the impact of climate change on the whole economy.

This assessment provides empirical evidence on the socio-economic benefits of strengthened climate services in Samoa. It responds to a critical knowledge gap: while climate services are widely acknowledged as cost-effective, rigorous quantitative evaluations tailored to small island contexts remain scarce.

Climate services encompass a spectrum of tools, such as alarm systems that detect hazards as they unfold, warning systems that anticipate imminent risks, and forecasting systems that provide longer-term projections to support planning and investment decisions, among others. Together, these services enable governments, communities, and the private sector to prepare and respond effectively, thereby minimising losses, protecting livelihoods, and reducing fatalities across climate-sensitive sectors.

Materials and methods

The evaluation followed an eight-step framework combining a Cost-Benefit Analysis (CBA) with the Benefit-Transfer method (See Figure 1). The Benefit-Transfer was applied to extrapolate available empirical evidence from comparable contexts to Samoa, adjusting for local socioeconomic and climate conditions. Benefits were quantified across three key sectors: (1) Agriculture; (2) Energy; and, (3) Disaster Risk Reduction (which includes different sectors, such as Health). For each sector, avoided losses and efficiency gains attributable to improved climate services were estimated based on historical damage data, sectoral statistics, and service effectiveness parameters drawn from the international literature.



Figure 1. 8-step Methodology of the study, including CBA and Benefit-Transfer

[1] Metroeconomica, Avda. Zugazarte 8, piso 3 (módulos 5 y 6) 48930 - Areeta, Bizkaia (España), Bizkaia, Spain.
[2] EHU, Sarriena auzoa z/g · 48940 - Leioa (Basque Country, Spain), Bizkaia, Spain.
[3] BC3, Sede Building 1, 1st floor, Scientific Campus of the University of the Basque Country 48940 Leioa (Spain), Bizkaia
E-mail contact: gontzal.ruiz@metroeconomica.com

Future costs and benefits were projected to 2050 under the "Middle of the Road" (SSP2) scenario, incorporating projected Gross Domestic Product (GDP) growth and sector-specific value-added trends. The CBA was conducted using a 5% discount rate, consistent with practice in developing-country assessments, and a sensitivity analysis was performed across alternative discount rates to test robustness.

Within each sector, specific benefit streams were identified and quantified. For agriculture, these include avoided crop losses, avoided damage to agricultural equipment and inputs, reduced cultivation costs, optimised irrigation, labour hour savings, and avoided livestock losses. For energy, benefits arise from prevention of power interruptions, improved hydropower production, and avoided damage to power line infrastructure. For DRR, benefits stem from avoided damages to the built environment, manufacturing, and tourism from tropical cyclones and floods, as well as mortality reductions attributable to early warning systems. Several potentially important co-benefits (including gains in food security, ecosystem services, and mental health) could not be monetised due to data limitations, meaning that all estimates presented should be considered conservative.

To obtain these results, a comprehensive review of the existing literature on the monetary valuation of climate services was conducted. The review covered international evidence, with a particular focus on the Pacific region, and aimed to identify the information required to apply a benefit-transfer methodology to the case study. Benefit transfer involves using estimates obtained from previous studies to assess the economic value of a good or service (in this case, climate services) in a different geographical or socioeconomic context. A total of 45 documents were identified and analysed as part of the literature review.

The reviewed documents provided information on the benefits generated by climate services across different sectors. These estimates were adjusted to reflect the specific characteristics of Samoa to reflect the specific, considering: (1) the exchange rate between the Samoan tālā and the US dollar; and (2) inflation, to express all monetary estimates in a common and updated base year.

Table 1. Annual benefits of climate services in Samoa (in 2025 million USD)

Benefit	Annual amount (in 2025 USD million)
Agriculture	
Avoided crop losses	0.21
Avoided damage to agricultural equipment	0.33
Avoided agricultural input losses	0.03
Reduced cost of cultivation	2.52
Irrigation optimization	0.58
Reduction of labour hours	2.42
Avoided livestock death	0.02
Avoided damage to livestock infrastructure and equipment	0.06
Total annual benefits in agriculture sector	6.17
Energy	
Prevention of power interruptions	0.1
Improved hydropower energy productions	0.09-0.86
Total annual benefits in the energy sector	0.19-0.96
Disaster Risk Reduction	
Avoided damages of TC and floods on manufacturing, tourism and the built environment	7.1
Avoided mortality from EWS	0.3
Total annual benefits in DRR sector	**7.4**

Results and discussion

The results of the study confirm that climate services represent a highly cost-effective investment in Samoa. Annual benefits were estimated at USD 13.77 million in 2025, also dominated by agricultural gains (USD 6.17 million, including USD 2.52 million in reduced cultivation costs and USD 2.42 million in labour hour savings) and DRR (7.4 million, with avoided cyclone and flood damages of USD 7.1 million and mortality reductions of USD 0.3 million).

The CBA results (Table 2) demonstrate strong economic returns across the 2025–2050 horizon. Every dollar invested in climate services generates USD 18.18 in Samoa, well above the 1.5 threshold considered robust evidence of value for money in adaptation (European Environment Agency, 2023). Net Present Values is positive under all discount rates and SSP scenarios tested, confirming the robustness of the investment case.

Table 2. Cost-Benefit Analysis results for Samoa (2025–2050, 5% discount rate, USD million)

Country / Region	PV Benefits	PV Costs	NPV	BCR
Samoa	236.93	13.03	223.90	**18.18**

The sensitivity analysis confirms the robustness of these findings. Even under alternative discount rates, BCRs remain well above the value-for-money threshold across all geographies.

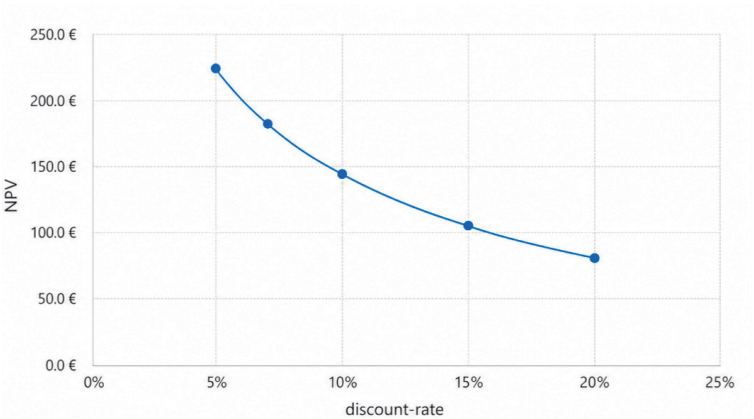


Figure 2. Sensitivity analysis

Conclusions

This study provides the first comprehensive, evidence-based quantification of the socio-economic benefits of climate services for Pacific SIDS, focusing on Samoa. The findings confirm that climate services are a strategic, cost-effective investment delivering measurable economic and social returns, even under conservative assumptions and limited data availability. Projected net benefits remain positive and widen over time as climate risks intensify toward 2050, regardless of the discount rate applied.

Policymakers are urged to integrate climate services into long-term national budgets and adaptation strategies, strengthen regional cooperation , and invest in data systems and inclusive communication channels to ensure that no community is left behind. This assessment also identifies priority areas for further research: expanding post-disaster damage assessments beyond tropical cyclones, improving empirical data on service effectiveness and user uptake, and monetising currently unquantified co-benefits such as food security and ecosystem services.

Several limitations should be acknowledged. Country-specific damage data are incomplete or unavailable for some hazards and sectors, requiring the use of benefit-transfer approximations from comparable regions. The analysis assumes static levels of service effectiveness over time, without accounting for potential improvements in forecast quality or institutional capacity. Future climate conditions carry inherent uncertainty, and barriers related to communication (including trust on climate services, used language, and digital connectivity barriers) may reduce realised benefits compared to estimated potential. Notwithstanding these constraints, the consistency of results across scenarios, discount rates, and geographies provides strong confidence in the core finding: investing in climate services in Pacific SIDS is economically sound, socially valuable, and increasingly urgent.

References

European Environment Agency . (2023, April 25). Assessing costs and benefits of climate change adaptation. Retrieved from https://www.eea.europa.eu/publications/assesing-the-costs-and-benefits-of

Government of Samoa. (2013). *Samoa: Post-disaster Needs Assessment Cyclone Evan 2012*. Obtenido de https://www.mnre.gov.ws/wp-content/uploads/2024/04/SAMOA_PDNA_Cyclone_Evan_2012.pdf

OCHA (2020). Fiji: Tropical Cylone Harold Humanitarian Snapshot. Available at: https://reliefweb.int/report/fiji/fiji-tropical-cyclone-harold-humanitarian-snapshot-14-april-2020?utm

WMO. 2015. Valuing Weather and Climate: Economic Assessment of Meteorological and Hydrological Services. Geneva. World Meteorological Organization.

Coastal–offshore thermal variability through consecutive summer glider deployments and mooring data in the Bay of Biscay

Steiger, Nadine[1], Nieto, Asier[1], Manso-Narvarte, Ivan[1], Liria, Pedro[1], Solabarrieta, Lohitzune[1], Castaño, Antonio[2], Egaña, Joseba[2], Gaztelumendi, Santiago[2], Rubio, Anna[1]

Keywords: Underwater autonomous vehicles, gliders, operational oceanography, Bay of Biscay, Sea Surface Temperature, Heat waves

Introduction

Understanding the seasonal evolution of the thermal structure in the southeastern Bay of Biscay is essential for improving coastal forecasting capabilities, assessing marine heatwave dynamics, and supporting ecosystem-based management. Marine heatwaves, defined as periods of anomalously high sea surface temperature lasting from days to months, have increased worldwide in frequency, duration, and intensity as a consequence of ocean warming (Oliver et al., 2018; Frölicher et al., 2018). Similar trends have been identified in the Bay of Biscay and the wider Iberia–Biscay–Ireland region, where marine heatwaves are increasingly affecting both surface and subsurface waters (Castrillo Acuña et al., 2024). Resolving the spatio-temporal variability of coastal warming, particularly during summer stratification, is therefore critical for improving early-warning systems and understanding ecosystem responses.

In the Basque Country, these objectives are addressed through the collaboration between Euskalmet, the Basque Meteorology Agency operating under the Emergency and Meteorology Directorate (DAEM) of the Basque Government, and AZTI. Together, they operate EuskOOS (https://info.euskoos.eus/en/), the coastal operational oceanography system that combines real-time observations and forecasting tools monitor oceanmeteorological conditions and enhance maritime safety and coastal management. In 2024, AZTI and Euskalmet launched a strategy to enhance the monitoring of summer coastal warming through the incorporation of Pasaia Ocean Autonomy (POA, https://www.azti.es/en/services/pasaia-ocean-autonomy-poa-management-and-development-of-applications-using-autonomous-marine-vehicles/), into EuskOOS. POA integrates SeaExplorer gliders and other autonomous marine platforms, enabling flexible, multidisciplinary observations beyond the capabilities of fixed stations and ship-based surveys. Since 2024, an annual summer glider mission has been conducted near the Donostia buoy to complement its observations, providing high-resolution vertical profiles and a broader spatial context for interpreting coastal thermal variability.

[1]AZTI Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Herrera Kaia. Portualdea Z/g, 20110 Pasaia, Gipuzkoa, Spain
[2]Euskalmet - Agencia Vasca de Meteorología, Portal de Foronda, 41, 01010 Vitoria-Gasteiz, Álava, Spain
E-mail contact: nsteiger@azti.es

Materials and methods

The glider missions in 2024 and 2025 were designed to provide high-resolution, continuous measurements of physical and biogeochemical (BGC) variables throughout the entire water column, with some profiles reaching depths of up to 1000 m. Each mission covered approximately 400–500 km of transects between coastal and open-ocean waters, capturing three-dimensional sub-mesoscale variability that is not resolved by standard monitoring networks and is typically limited to surface observations in satellite products. The glider was equipped with a CTD sensor (temperature, conductivity, depth), a fluorometer (chlorophyll-a, backscatter, and colored dissolved organic matter (CDOM)), as well as dissolved oxygen and nitrate sensors, enabling a comprehensive assessment of coastal ocean conditions. The campaigns took place in the southeastern Bay of Biscay, within the area covered by the EuskOOS observatory.

In this work, we also use data from the EuksOOS Donostia buoy, which is moored approximately 12 nautical miles north of Donostia, at a depth of 600 m (Figure 1). Since 2007, it has been taking measurements of sea surface temperature (SST), and temperature and salinity at 10, 20, 30, 50, 75, 100 and 200m depth, in addition to pressure at 200m. To ensure that the buoy remains continuously operational at its mooring location, a replacement operation is carried out approximately every six months. This allows maintenance tasks and, when necessary, sensor calibration and checks to be performed onshore. To date, two SEAWATCH WAVESCAN buoys from FUGRO OCEANOR—WS67 and WS169—have been used to maintain the data time series at this location.

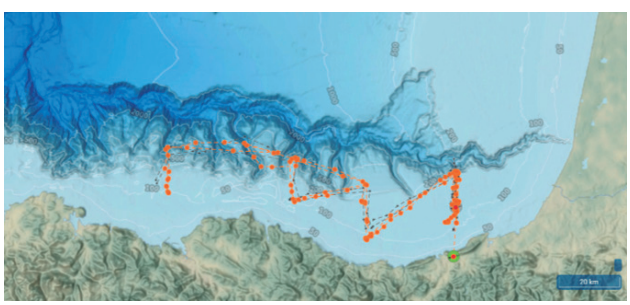


Figure 1: Bathymetry map of the southeastern Bay of Biscay and the trajectories of the glider campaign in 2024 (orange) and in 2025 (black).

In 2024, the glider campaign took place from 17 July to 2 August. During this period, the glider passed twice in close proximity to the mooring position of the Donostia buoy. However, the buoy was out of service until 30 July due to maintenance and replacement operations, which prevented direct comparison between glider and buoy observations. Despite this limitation, the glider data proved essential for filling observational gaps during the buoy's downtime (Figure 1). In 2025, the glider campaign was conducted from 31 July to 10 August, during which the glider again performed two transects near the Donostia buoy which was operational during the whole period.

We additionally use satellite-derived SST data from the Copernicus Marine Service. The product used is the Level 3 (L3) multi-platform SST dataset for the Iberian–Biscay–Irish (IBI) Seas, which combines observations from infrared and microwave satellite sensors. The data are quality-controlled and mapped onto a regular grid, providing composite SST fields suitable for regional analyses. We average the satellite-derived SST for the westward outbound glider path (17-24 July 2024 and 20 July-4 August 2025) and the eastward return path (24 July-2 August 2024 and 4-13 August 2025).

Results and discussion

The Donostia buoy provides a long-term time series of temperature and salinity north of Donostia, enabling the monitoring of interannual, seasonal, and short-term variability in the ocean state in the southeastern Bay of Biscay. Focusing on 2024 and 2025 temperatures, the years of the glider campaigns, the buoy data indicate well-mixed conditions in the upper 100 m of the water column until approximately April, when summer stratification begins to develop (Figure 2a,b). Maximum SST was reached in early to mid-August in both years, shortly after the glider campaigns. In 2025, a secondary SST peak occurred in early July. Overall, maximum SST in 2025 exceeded that of 2024 by approximately 1 °C. Following the August SST peak, temperatures gradually decreased at the surface, while subsurface temperatures (below ~20 m) continued to increase until vertical mixing homogenized the water column.

Both glider campaigns in 2024 and 2025 coincided with periods of increasing SST observed in both the glider and buoy records (Figure 2c,d). In 2024, the glider detected a marked rise in SST beginning on 29 July, with the buoy recording a maximum

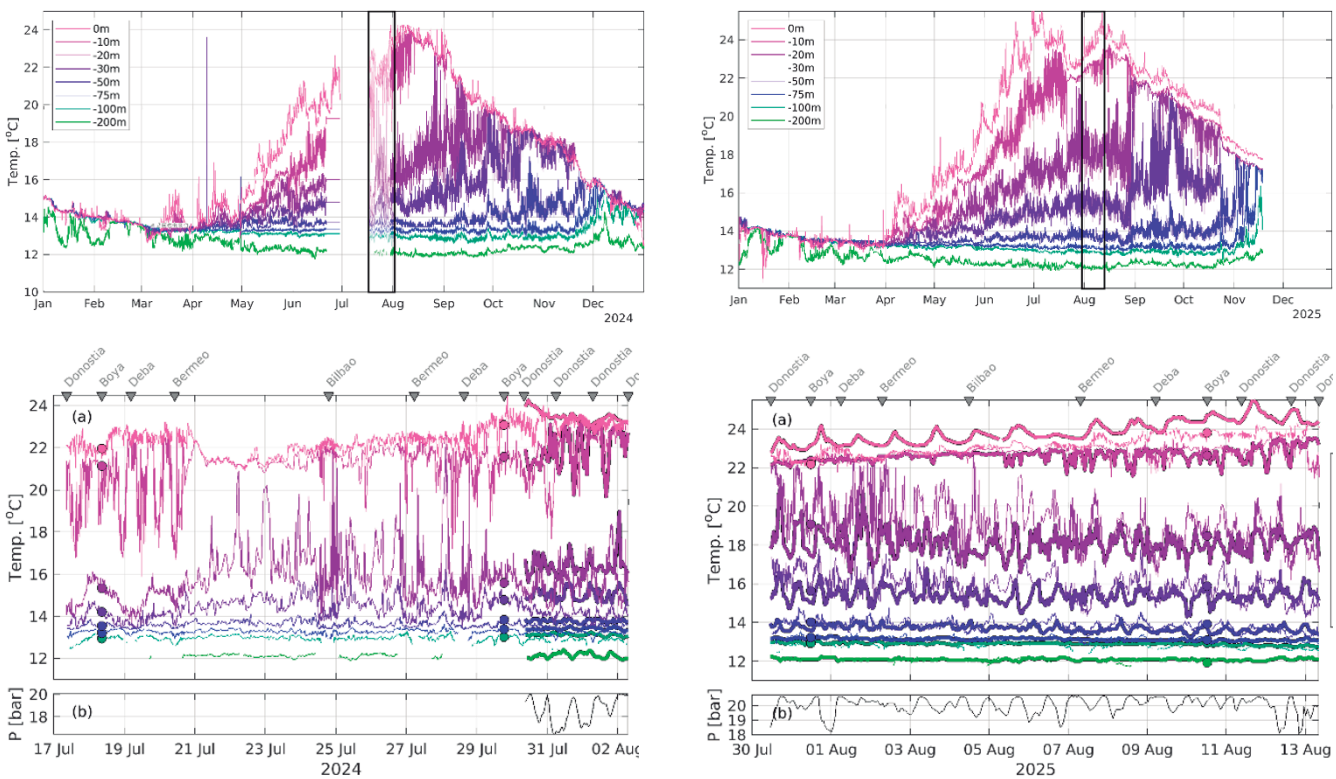


Figure 2. Temperature time series from buoy Donostia at surface (0), 10, 20, 30, 50, 75, 100 and 200m depth during the full year in (a) 2024 and (b) 2025. Black boxes in (a, b) mark the period of the glider campaign and missing buoy data during 2024 are complemented by the glider measurements at the corresponding depths in pale colours. (c) and (d) show the zoom into the glider campaign of 2024 and 2025, respectively, with the buoy data in thick lines and the glider data in thin lines. Times when the glider passed closest to the buoy are marked with filled circles and the location names when the glider passed closest to the coast are indicated by the grey labels. (e, f) show the pressure measured at the lowermost sensor of the buoy.

SST of 24.3 °C on 30 July. This warming event coincided with a regional heat episode affecting the Basque Country, characterized by persistently high atmospheric temperatures. In 2025, a similar warming pattern was observed, with both platforms recording a steady increase in SST throughout the campaign. The buoy reached a maximum SST of 25.5 °C on 11 August.

Temperature measurements from the glider and buoy show good agreement during two close encounters in 2025 (Figure 2d). Even when sampling adjacent areas, small-scale variability and strong vertical gradients exceeded the spatial separation between the platforms. It should be noted that buoy sensor depths can vary by up to 2.5 m at 200 m depth due to drag effects (Figure 2e,f), introducing additional uncertainty in temperature measurements, particularly within the thermocline where vertical gradients are strongest. Furthermore, glider-derived SST represents an average over the upper 5 m, as measurements closer to the surface are often incomplete. A direct comparison between glider and buoy data is not possible for 2024 due to gaps in the buoy record; however, this highlights the importance of the glider observations in covering periods of missing buoy data.

In addition to temporal variability, the glider provides spatial insight into temperature patterns. SST maps from both campaigns reveal substantially higher temperatures during the eastward return transects compared to the outbound paths, with the highest SST observed in the eastern and southeastern parts of the region (Figure 3). Satellite-derived SST indicates cooler surface waters along the coast westward from Bermeo, possibly associated with upwelling of colder subsurface waters. While glider-derived SST generally agrees with satellite observations, it offers higher spatial resolution and fills gaps during periods of cloud cover. Beyond the surface, the glider also provides continuous measurements throughout the water column, together with additional biogeochemical variables related to ecosystem functioning. Although these variables are not analysed in the present work, they offer valuable complementary information to assess the potential impacts of anomalously high temperatures on marine ecosystems and represent an important line of future research.

Conclusions

This study highlights the benefits of integrating autonomous platforms with established moored infrastructures to enhance coastal monitoring in the southeastern Bay of Biscay. The combined use of gliders, the Donostia buoy, and satellite-derived SST provides a consistent picture of both temporal variability and spatial heterogeneity in ocean temperature. The observations reveal clear interannual differences, with higher SST in 2025 compared to 2024, and document extreme surface heating in line with reported heat waves. Glider data and satellite SST further resolve strong spatial gradients, including warmer conditions in the eastern region. The good agreement between glider and buoy measurements confirms the reliability of the observations and highlights the added value of mobile platforms in capturing small-scale variability and filling data gaps.

The future strategy is to continue these summer-time surveys to sustain and expand this integrated observing approach. This will be essential to better characterize temperature variability and extreme events in both surface and subsurface layers, contribute to ongoing efforts to improve forecasting capabilities, refine early-warning indicators for extreme events, and support adaptive coastal management in response to persistent climate pressures. Future studies should further investigate, with particular attention to atmosphere–ocean exchanges, the links between terrestrial and marine heatwaves and also the coupling between physical processes and biogeochemical responses, to help assess how extreme warming events affect oxygen dynamics, nutrient availability, primary productivity, and broader ecosystem functioning.

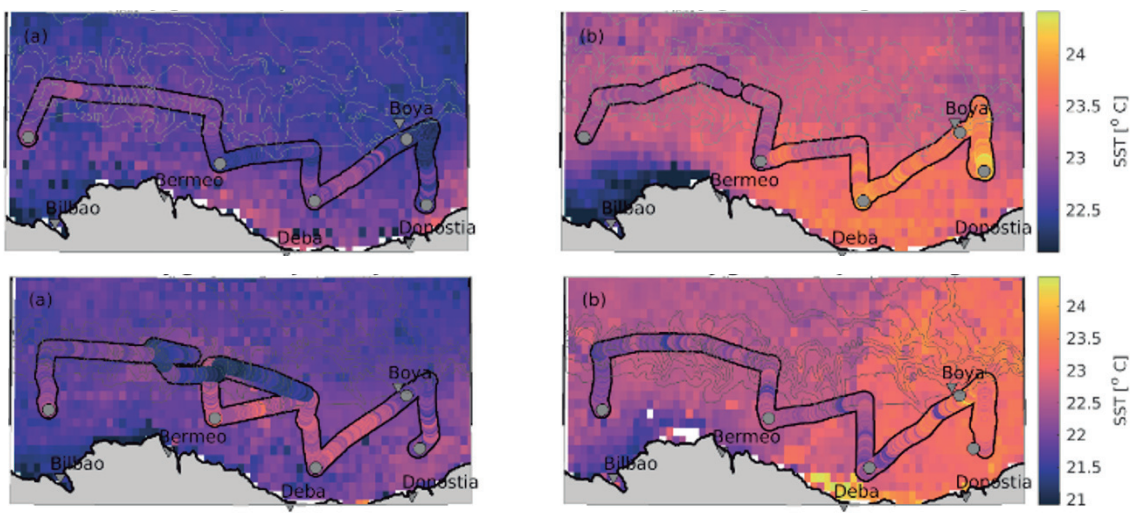


Figure 3: Sea surface temperature (SST along the glider's trajectory on westward outbound path (a, c) and on the eastward return path (b, d) for the campaign in 2024 (a, b) and 2025 (c, d) overlaid by satellite-derived SST from L3 product averaged over the corresponding time periods.

References

Oliver, E. C. J., Donat, M. G., Burrows, M. T., Moore, P. J., Smale, D. A., Alexander, L. V., Benthuysen, J. A., Feng, M., Sen Gupta, A., Hobday, A. J., Holbrook, N. J., Perkins-Kirkpatrick, S. E., Scannell, H. A., Straub, S. C., & Wernberg, T. 2018. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. Nature Communications, 9, 1324. https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9

Frölicher, T. L., Fischer, E. M., & Gruber, N. 2018. Marine heatwaves under global warming. Nature, 560, 360–364. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9

Castrillo-Acuña, L., Alonso-Valle, A., & de Pascual-Collar, Á. 2024. Characterization of marine heat waves in the Iberia–Biscay–Ireland (IBI) region in 2022. Copernicus Ocean State Report (OSR). https://doi.org/10.5194/sp-4-osr8-17-2024

*Acknowledgement*s - The authors thank the Basque Government's Directorate of Emergency Attention and Meteorology (DAEM) for its long-standing support of marine observing and forecasting activities in the Basque Country through the funding of the EusKOOS observing and operational oceanography system and EOM project. This work has been parrtially supported by the project #ebegi: Towards a supersite for multidisciplinary observations and science in the south-eastern Bay of Biscay, funded by the Directorate of Agriculture, Fisheries and Food Policy of the Department of Economic Development, Sustainability and Environment of the Basque Government and by the Gipuzkoa Provincial Council—Department of Economic Promotion and Strategic Projects.

Transient rip currents on uniform beaches: an event-based framework for beach safety assessment

Bondehagen, Andreas[2], Kalisch, Henrik[2] and Roeber, Volker[1]

Keywords (max. 6): transient rip currents, phase-resolving model, Boussinesq-type equations, automated detection, event tracking, beach safety

Introduction

Rip currents are narrow flows directed offshore that connect the surf zone with deeper water. They matter for two reasons. They are a hazard on exposed beaches, and they provide pathways for cross-shore exchange of water, sediment, nutrients, and other tracers (MacMahan et al., 2006; Castelle et al., 2016). Some rips are fixed by channels, bars, headlands, or coastal structures. Transient rips do not. They can form on beaches that are uniform alongshore, shift location, migrate, merge, split, and disappear within minutes. Because they are intermittent, direct observation is difficult, and averaging currents over time can hide the events themselves.

In directionally spread wave fields, different sections of a crest can break at different places and times. Gradients in breaking dissipation near crest ends inject vertical vorticity into the surf zone (Clark et al., 2012) and the resulting eddy field can then organize into brief offshore jets. Phase-resolving numerical models reproduce this process. A large simulation, however, still produces thousands of instantaneous flow fields rather than a catalog of individual rips. The practical challenge is to identify each rip in the evolving flow field and follow it through time.

Here we present an automated workflow for detecting and tracking individual transient rips in phase-resolving simulations. The detector first finds locations where the wave-averaged current is directed strongly offshore and where the surrounding flow has the transverse vorticity structure expected for a rip jet. From these locations, it follows the local streamlines to delineate the full rip region. Detections in successive snapshots are then connected according to their spatial overlap, allowing the same rip to be followed as it moves, grows, splits, merges, and disappears. Particular emphasis is placed on the transverse vorticity structure of the jet and on reconstructing the complete history of each event. The aim is to quantify transient rips as individual events. This provides the information needed to examine how they depend on wave conditions and, in a later step, to assess their relevance to beach safety. We demonstrate the framework using 160 BOSZ simulations that cover a broad range of wave and beach conditions.

[1]Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S-UPPA, SIAME, 64600 Anglet, France
[2]University of Bergen, PO Box 7800, 5020 Bergen, Norway
E-mail contact: volker.roeber@univ-pau.fr

Materials and methods

Numerical experiment. Simulations were performed with the phase-resolving Boussinesq Ocean & Surf Zone model (BOSZ), originally developed by Roeber et al. (2010) and Roeber and Cheung (2012), with subsequent developments described by Mihami and Roeber (2026). The bathymetry consists of a planar beach that is uniform alongshore, connected to an offshore region of constant depth. There are no channels, bars, or other alongshore depth variations that could steer or anchor the rip currents. The ensemble spans significant wave height H_S from 0.5 to 1.5 m, peak period T_p from 5 to 13 s, directional spread σ_θ from 2.5° to 50°, and beach slope from 1:10 to 1:80. A space-filling subset of 160 combinations was selected from the full factorial design. Each simulation was run for 9000 s. After a 1800 s spin-up, the following 2 h were analyzed, with surface elevation and velocity fields saved every 0.5 s.

Wave averaging and structural seeding. Instantaneous velocities are dominated by wave orbital motion. The detector therefore averages the reconstructed surface currents over the preceding $2T_p$. From the averaged cross-shore and alongshore currents U and V, we compute the vertical vorticity $\omega = V_x - U_\gamma$ and its horizontal gradient. Candidate seed cells must contain both sufficiently strong offshore flow and a strong, coherently oriented vorticity gradient. In the present application, the offshore velocity threshold is 0.2 m s^{-1}. The structural criterion matters because a broad offshore return flow may pass a velocity threshold without being a rip. By contrast, a rip jet is flanked by oppositely rotating shear layers that create a characteristic transverse vorticity gradient (Johnson and Pattiaratchi, 2006) as shown in Figure 1.

Streamline growth and geometric filtering. The seed criteria are deliberately strict. They identify only locations where the rip signature is unambiguous, typically near the jet neck and head. To recover the full structure, streamlines are integrated forward and backward through the averaged velocity field. Seed regions connected by a common streamline are joined. This creates a coherent 2D rip region rather than a detection at a single transect. Regions are retained only if they exceed 20 m in length and 50 m^2 in area and extend into the surf zone. For each retained region, the algorithm records area, length, width, orientation, centroid, mean and maximum velocities, and related geometric properties.

Temporal tracking. Spatial detections are linked by their overlap between consecutive output times. Each detected region becomes a node in a directed graph, and overlap creates edges. The graph distinguishes births, deaths, direct continuations, splits, and merges. Two cleaning passes then remove common tracking artifacts. Short detection dropouts are reconnected, while temporary merge and split pairs caused by neighboring

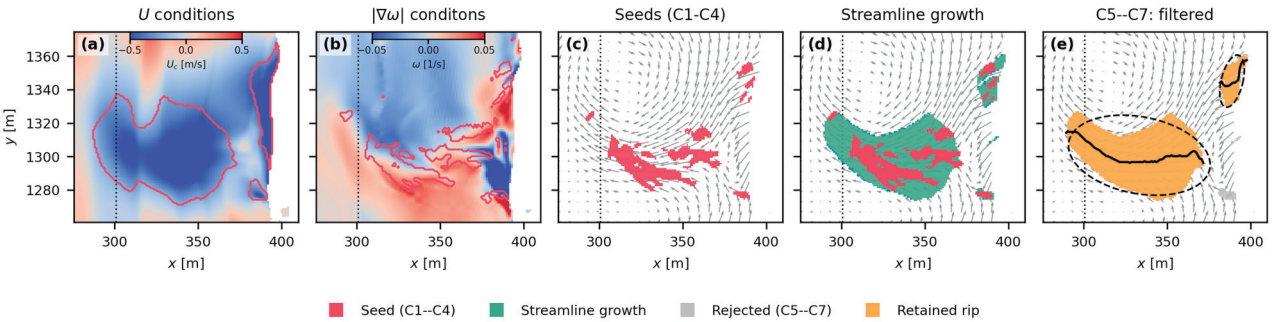


Figure 1. How is a rip detected? Spatial detection of a transient rip current at one time step. The velocity field is first averaged over waves. Offshore velocity and vorticity gradient criteria identify seed cells, streamline growth connects the unambiguous parts of the jet, and geometric filters retain the final rip region.

rips briefly touching are untangled. Lineages that persist for at least 120 s are retained. When several regions belong to one lineage at the same time, their properties are aggregated into a single event state. The final output is one time series of geometry and velocity for each tracked rip (see Figure 2).

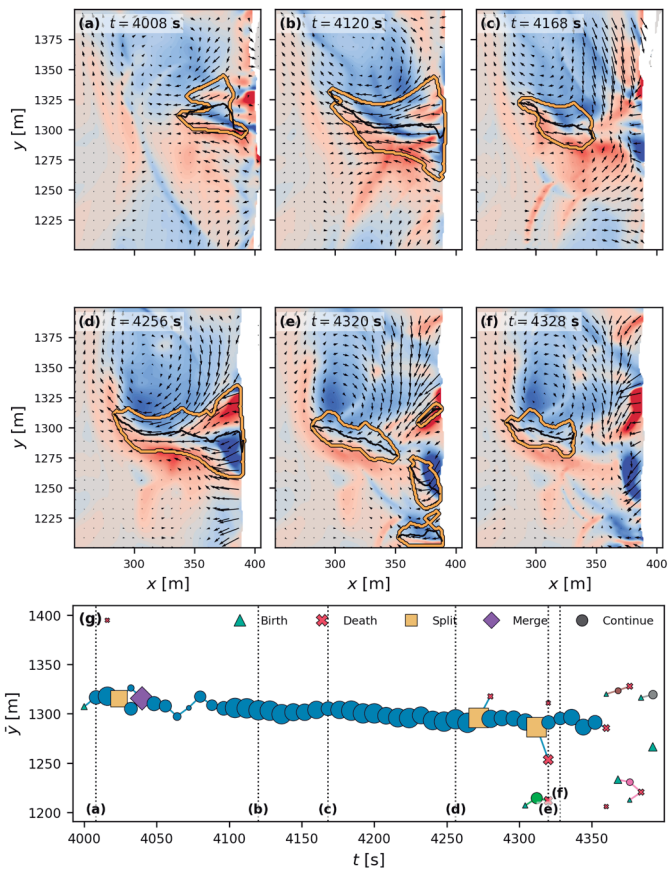


Figure 2. How is the same rip followed through time? Lifecycle and graph tracking of one transient rip current. Successive snapshots show the evolving flow after wave averaging and the detected region. The lineage graph then links detections through time and records changes in event connectivity.

Event properties and population statistics. The tracker preserves a time series for every event. The detector computes a broad set of geometric and kinematic quantities, including area, centerline length, width, orientation, centroid, mean flow, maximum flow, and alongshore migration. For the present population analysis, we retain three simple properties that can be compared consistently across more than 8000 events: **lifetime, mean horizontal area occupied by the rip, and mean offshore velocity**. Occurrence and event count are evaluated for each simulation, while the physical properties are evaluated for each event. Keeping these levels separate is important. The same bulk exchange or mean circulation could arise from many short events, a few long events, large but slow rips, or smaller fast jets. Such distinctions cannot be recovered reliably from a single mean flow field and are therefore central to an assessment based on individual events.

Results and discussion

The framework retained 8023 rip events from the 160 simulations. Individual runs produced between 0 and 163 events during the 2 h analysis window, and 17 simulations produced none. This event catalog separates three questions that are otherwise mixed in statistics of the mean flow: do transient rips occur, how often do new events form, and what size, duration, and offshore velocity do they attain?

Occurrence was governed primarily by wave height and beach slope, with a secondary dependence on peak period at the shortest periods. Larger H_s and gentler slopes favor rip formation. Both widen the region over which waves break on a planar beach, pointing to surf zone width as the dominant geometric control. Within the investigated range, directional spread did not determine the transition between conditions with and without rips once some directional variability was already present. Event rate followed a related, but not identical, pattern. It increased strongly with wave height and gentler slopes, decreased with peak period, and showed only a weak overall response to directional spread. These marginal trends in rip formation rate are summarized in Figure 3.

The properties of the events that formed were not controlled

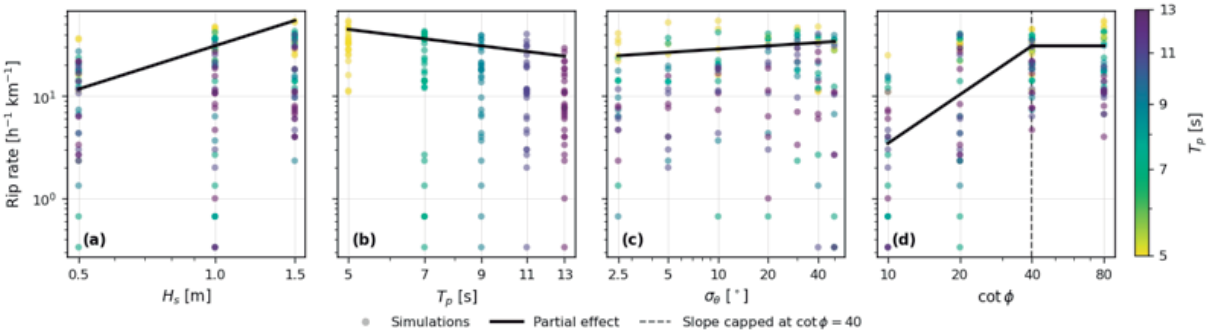


Figure 3. What can we learn from all detected and tracked rips? Marginal dependence of detected rip rate on significant wave height, peak period, directional spread, and beach slope. Individual simulations are shown together with the fitted partial effect trends.

by one common parameter combination. Larger waves and gentler slopes produced substantially larger rip footprints, and waves with longer periods also increased area. Offshore velocity behaved differently. It increased with wave height and period and responded to directional spread, while beach slope had little independent effect. Duration showed its clearest dependence on environmental parameters in the upper tail of the event population rather than for the typical event. Consequently, the conditions that maximize rip size are not the same as those that maximize rip speed.

This shows why transient rips should be described using several properties of individual events: conditions producing large or frequent rips are not necessarily those producing the fastest offshore jets. Directional spread is therefore better interpreted here as a modifier of the event population than as a simple control on whether rips occur. Once the wave field is sufficiently short-crested to seed alongshore variability, changing σ_θ affects how strongly wave height and slope appear in event properties rather than creating a universal monotonic increase in rip occurrence. This also shows the value of an event catalog. Quantities describing the wave forcing and quantities describing the rip population do not have to respond in the same way.

The detector should be interpreted as an objective definition of an event rather than a direct measurement of every visually apparent rip. Fixed thresholds for velocity, vorticity gradient magnitude, length, area, surf zone position, and the 120 s persistence requirement influence the absolute event count and remove part of the weak and brief event population. In addition, the numerical experiments use an idealized planar, nonerodible beach and zero bottom friction. These choices isolate freely evolving transient rips, but they make absolute rates and lifetimes upper bounds relative to a rough natural beach. Relative comparisons across the controlled ensemble are more robust because the same detection rules are applied to every case. The present analysis therefore characterizes the physical properties of transient rip events rather than defining operational hazard levels or beach safety risk. Those would additionally require information on exposure and vulnerability.

Conclusions

The main contribution of this study is a scalable workflow that converts large phase-resolving model datasets into statistics for individual transient rip events. Combining offshore velocity with a transverse vorticity gradient improves discrimination between narrow rip jets and broad offshore return flows. Streamline growth reconstructs the spatial footprint of the jet. Tracking with a directed graph then follows the same event as it migrates, fragments, merges, or briefly drops below the detection criteria.

Applied to 160 BOSZ simulations, the method produced a catalog of more than 8000 tracked events. The resulting population shows that rip occurrence, formation rate, duration, area, and offshore velocity respond differently to incident waves and beach slope. A single mean current or bulk environmental index is therefore not enough to characterize transient rips. Their intermittent nature requires a method that distinguishes occurrence, frequency, persistence, spatial extent, and flow intensity for individual events. These descriptors provide a physical basis for later beach safety or hazard assessments. The present study does not define an operational hazard classification or warning system.

References

Castelle, B., Scott, T., Brander, R. and McCarroll, R. 2016. Rip current types, circulation and hazard. Earth-Science Reviews 163:1–21.

Clark, D. B., Elgar, S. and Raubenheimer, B. 2012. Vorticity generation by short-crested wave breaking. Geophysical Research Letters 39(24).

Johnson, D. and Pattiaratchi, C. 2006. Boussinesq modelling of transient rip currents. Coastal Engineering 53(5–6):419–439.

Liu, Y., Dong, C., Li, X. and Yang, F. 2026. A systematic framework for automated rip current detection from numerically modeled flow data. Limnology and Oceanography: Methods 24(4):e70022.

MacMahan, J. H., Thornton, E. B. and Reniers, A. J. 2006. Rip current review. Coastal Engineering 53(2–3):191–208.

Mihami, F.-Z. and Roeber, V. 2026. Exploring a conservative staggered scheme for Boussinesq-type equations: Insights into numerical diffusion, dispersion, and wave-breaking. *Coastal Engineering* 204, 104880. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104880

Roeber, V., Cheung, K. F. and Kobayashi, M. H. 2010. Shock-capturing Boussinesq-type model for nearshore wave processes. Coastal Engineering 57(4):407–423.

Roeber, V. and Cheung, K. F. 2012. Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments. Coastal Engineering 70:1–20.

Validación y análisis de avisos/alertas/alarmas por riesgo marítimo-costero: impacto en costa en Euskadi

Gaztelumendi, Santiago[1], **Egaña, Joseba**[1]

Palabras clave: Validación, avisos, riesgo costero, impacto

Introducción

El País Vasco se enfrenta regularmente a eventos océano-meteorológicos de riesgo en su ámbito marítimo-costero (e.g., Liria et al 2014, Gaztelumendi et al., 2018; Egaña et al., 2020). Estos fenómenos comprometen la integridad de personas y bienes, provocando desde afecciones en la actividad cotidiana hasta severos daños materiales y personales (Gaztelumendi et al., 2020). En este contexto, el Gobierno Vasco mantiene un sistema específico de vigilancia y predicción océano-meteorológica orientado a tres tipologías de riesgo (GV, 2025; Gaztelumendi et al., 2016): (1) el derivado de las galernas en la franja costera, (2) el asociado al estado de la mar para la navegación y (3) el provocado por los rebases y el oleaje en la fachada litoral. La gestión operativa de estas amenazas exige sistemas de alerta temprana (SAT) eficientes que integren la predicción meteorológica, la ayuda a la toma de decisiones y una comunicación pública eficaz (Gaztelumendi et al., 2024, 2016).

Para que estos SAT resulten eficaces en el marco de la protección civil, la emisión de avisos institucionales debe guardar una correlación directa con las consecuencias reales esperadas sobre el territorio (Gaztelumendi et al., 2020). Tradicionalmente, la verificación de estos esquemas se ha centrado en evaluar el error numérico de los modelos predictivos frente a peligros físicos observados mediante boyas o reanálisis (e.g., Jolliffe y Stephenson, 2012). Sin embargo, este enfoque convencional basado exclusivamente en la superación estricta de umbrales algebraicos rígidos genera una desconexión estructural entre la amenaza física y el impacto real en tierra. Esta rigidez metodológica induce a elevadas tasas de falsas alarmas (sobrealerta) o escenarios de omisión (subalerta), lo que degrada la credibilidad institucional y compromete la eficiencia logística de los servicios de emergencia.

El sistema oficial de avisos, alertas y alarmas del Gobierno Vasco redefine este paradigma al contemplar los umbrales de adversidad física únicamente como niveles de referencia orientativos (GV, 2025; Gaztelumendi et al., 2016). La transición hacia la determinación final del nivel de impacto operativo (Amarillo, Naranja o Rojo) no es automática; se fundamenta críticamente en el juicio experto y el análisis sinóptico-dinámico del personal de la Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet) y la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM). Este equipo técnico integra la vulnerabilidad del territorio y la exposición para resolver los escenarios de incertidumbre donde el peligro físico no se traduce directamente en un nivel de riesgo unívoco. El objetivo principal de este trabajo es demostrar la superioridad estadística de la integración del juicio experto frente a las aproximaciones puramente automatizadas en la costa vasca. Para ello, se propone una metodología de validación orientada a impacto que sustituye la verificación física convencional por la contrastación directa de los avisos/alertas/alarmas emitidas por Euskalmet/DAEM contra la siniestralidad real registrada en el litoral vasco por el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) (Gaztelumendi 2020).

Materiales y métodos

Se estructura una serie temporal diaria (2000–2024) para el litoral del País Vasco que acopla precursores físicos, como indices de rebase (I, Imax) o altura de ola significante (Hs), con registros de siniestralidad por causa “Embate de mar” del Consorcio de Compensación de Seguros (CCS), que codifican el número de partes y las cuantías abonadas (Gaztelumendi et al 2022, 2020). El conjunto de datos del CCS consta de 1.592 partes y más de 41 millones de euros en pérdidas correspondientes a 93 jornadas con siniestros en la costa vasca. Debido a discontinuidades en las series observacionales meteorológicas, y a procesos de depuración de los 8.050 días potencialmente disponibles, se excluyen 1.082 días de los cuales 20 son jornadas de siniestros con 105 partes y 2,2 millones de euros.

Tras la depuración, la muestra se segmenta en dos marcos muestrales independientes, con un corte temporal que se establece con la entrada operativa del actual sistema de riesgo maritimo costero: impacto en costa, es decir: (a) una muestra completa longitudinal de 4.662 días (2000-2014), y (b) una submuestra de 3.317 días (2015–2026). Estas muestras presentan un desequilibrio extremo de clases, con una clase de días sin daños del 98,1% para el primer periodo (90 días con siniestros) y del 99,3% para el segundo (22 días con siniestros). Este último periodo de acuerdo a los avisos/alertas/alarmas emitidos por Euskalmet/DAEM contiene 212 días amarillos, 20 Naranjas y 1 Rojo abarcando el 7% de los días.

Las variables continuas se discretizan en cuatro niveles de riesgo (Verde, Amarillo, Naranja, Rojo) mediante umbrales algebraicos fijos: I (5,8 / 6,5 / 7,3), Imax (6,5 / 7,0 / 8,0) y

[1]*Euskalmet - Agencia Vasca de Meteorología, Portal de Foronda, 41, 01010 Vitoria-Gasteiz, Álava, Spain*
E-mail contact: s-gaztelumendi@euskalmet.eus

Hs (3,5 / 5,0 / 7,0), permitiendo evaluar y contrastar cinco aproximaciones predictivas (1) Juicio Experto, (2) Umbrales Imax, (3) Umbrales I, (4) Umbrales combinados I / Imax y (5) Umbrales Hs. La variable respuesta es la ocurrencia de impacto real binario (hay siniestro no/si {0,1}).

Para evaluar la capacidad predictiva y el ajuste probabilístico global sobre la muestra común de 3.317 días, se parametrizan Modelos Lineales Generalizados (GLM) de la familia binomial con función de enlace logit, operando mediante codificación dummy. El ajuste general se evalúa mediante la Desviación Explicada (D2) y el Criterio de Información de Akaike (AIC) (ver tabla 1).

Dada la abrumadora presencia de ceros basales, los cuatro niveles se someten a una reducción binaria operativa (Verde = No Alerta; Amarillo/Naranja/Rojo = Alerta Activa) para construir tablas de contingencia tradicionales de 2x2. A partir de estas, se extraen parámetros operativos enfocados estrictamente en la clase minoritaria (ver Tabla 2): el Área Bajo la Curva de Precisión-Recuerdo (AUPRC), la Probabilidad de Detección (POD) y el Ratio de Falsa Alarma (FAR) (e.g. Jolliffe y Stephenson, 2012). Métricas enfocadas en la clase minoritaria e inmunes al desequilibrio de clases.

Para evitar la pérdida de información derivada de la reducción binaria y evaluar la estructura real de la escala de riesgo sin colapsarla, se diseñó una matriz horizontal de contingencia estructural (ver Tabla 3). Esta calcula de forma directa para cada uno de los cuatro niveles (colores) la Tasa de Éxito Operativo, expresada mediante el binomio [Días con Siniestro / Días Totales en Nivel], seguida de su prevalencia condicional porcentual.

Se incorpora una validación y análisis estructural inter-periodos (periodo 2001–2014 frente a periodo 2015–2026) detallada en la Tabla 4. En primer lugar, se aplican contrastes no paramétricos de Wilcoxon-Mann-Whitney sobre las distribuciones continuas para evaluar si la severidad física del mar ha variado entre épocas. En segundo lugar, se construye una matriz de siniestralidad agregando magnitudes absolutas (partes, municipios y costes brutos) y tasas de intensidad diarias por jornada de daño efectivo. En tercer lugar, para aislar la variabilidad climática de los eventos extremos, se analiza la siniestralidad de forma sectorial calculando el cruce de frecuencias de las jornadas de siniestralidad activa (presencia/ausencia binaria de daño por día). Este método permite extraer la reducción relativa real en la probabilidad diaria de sufrir días con partes abonados entre periodos, evaluando las tipologías de daños presentes en los datos del CCS.

Por último se presentan diferentes análisis de casos para ilustrar el valor de la decisión de experto en diferentes situaciones operativas.

La depuración y tratamiento de datos, la modelización estadística y el análisis de los resultados se han realizado mediante scripts desarrollados en el entorno R (R Core Team, 2026).

Resultados y discusión

Los resultados cuantitativos de la aplicación de los Modelos Lineales Generalizados (GLM) (ver Tabla 1) confirman la superioridad estadística de la integración del juicio experto. Este enfoque demuestra la mayor capacidad explicativa sobre la ocurrencia del daño, capturando el 46,52% de la desviación explicada (D2 = 0,47\)) y registrando el mejor índice de parsimonia con el AIC mínimo del estudio (149,49). Este rendimiento supera notablemente a los umbrales automatizados por índices (Imax: D2 = 0,41, AIC = 164,6; I: D2 = 0,37, AIC = 175,6) y a la aproximación convencional basada exclusivamente en el oleaje (Hs: D2 = 0,32, AIC = 188,2).

Tabla 1. Coeficientes de validación y bondad de ajuste global GLM (N = 3.317 días)

Sistema Evaluado	Desviación Explicada (D2)	AIC del Modelo
(1) Juicio Experto (Humano)	0,46	149,5
(2) Umbrales Imax (Auto)	0,41	164,6
(3) Umbrales I (Auto)	0,37	175,6
(4) Índice I + Imax (Auto)	0,36	176,5
(5) Umbrales Hs (Auto)	0,32	188,2

El desglose de las métricas de validación operativas (ver tabla 2) que requiere unificar los niveles Amarillo, Naranja y Rojo en un bloque binario, desvela el comportamiento de los sistemas en el entorno real de toma de decisiones. El criterio automático convencional basado en Hs ratifica su inviabilidad para protección civil debido a un severo problema de sobrealerta, arrojando una tasa crítica de falsas alarmas (FAR = 0,97) derivada de emitir 686 avisos estériles. Por su parte, los índices automatizados de rebase (I, Imax, I+Imax) inducen

Tabla 2. Tablas de contingencia binaria y parámetros operativos (N = 22 días de impacto)

Sistema Evaluado	Aciertos (A)	Falsas Alarmas (B)	Omisiones (C)	POD (más alto mejor)	FAR (más bajo mejor)	Coeficiente AUPRC
(1) Juicio Experto (Humano)	20	213	2	0,91	0,91	**0,33**
(2) Umbrales Imax (Auto)	17	81	5	0,77	0,83	0,28
(3) Umbrales I (Auto)	18	193	4	0,82	0,91	0,25
(4) Índice I + Imax (Auto)	18	193	4	0,82	0,91	0,25
(5) Umbrales Hs (Auto)	19	686	3	0,86	0,97	0,13

ligeramente a la subalerta, incurriendo en 4 o 5 omisiones de impactos reales. El juicio experto optimiza el binomio protección-eficiencia, alcanzando la mayor tasa de captura del estudio (POD = 0,91, con solo 2 omisiones) y mitigando el ruido de falsos positivos inasumible del Hs. El área bajo la curva de Precisión-Recuerdo (AUPRC) es de 0,33 para el juicio experto frente al 0,28-0,24 basado en rebases automáticos y el crítico 0,13 de la Hs. Una prueba más de la inutilidad de Hs como sistema operativo y de la superioridad del juicio experto.

En la tabla 3 se presenta la matriz de prevalencia condicional, la cual permite analizar la progresión real de la escala de avisos sin colapsarlaa. Se calcula cruzando cada nivel de color emitido por los cinco sistemas frente a los días con impacto real, obteniendo la tasa de éxito directo (Días con siniestro / *días totales del c*olor). Los resultados de esta matriz demuestran que el juicio experto calibra el riesgo de forma exponencial y limpia: el nivel verde marca la calma basal (0,06%), el amarillo sube al 4,7%, el naranja muestra alta fidelidad (45,0% de éxito, con 9 aciertos de 20 avisos frente al 23,8% del algoritmo Imax) y el rojo logra precisión absoluta (100%). Este escalado evidencia las deficiencias estructurales del sistema basado en Hs, el cual activó el nivel Rojo en 62 ocasiones, de las cuales 50 fueron falsas alarmas, reduciendo la credibilidad del aviso máximo a un exiguo 19,35%. Asimismo, la matriz revela la subalerta de los algoritmos automáticos en el nivel Verde, donde ocultan entre 4 y 5 siniestros debido a la rigidez de sus umbrales fijos; un escenario de riesgo que el juicio experto reduce a la mitad (2 omisiones) al gestionar con flexibilidad la incertidumbre en los umbrales de transición.

La comparación inter-periodos (ver Tabla 4) aporta evidencias de la mitigación del impacto en el periodo 2015-2024. Los contrastes de Wilcoxon confirman que la severidad física del mar no ha disminuido en este segundo periodo respecto al precedente (de hecho la mediana de Imax ascendió de 5,02 a 5,12, con ($p < 0,0001$), pero la traslación del peligro en jornadas de daño efectivo decrece drásticamente. Por ejemplo en dias con nivel naranja de Imax en la era pre-2015, el 79,1% derivaban en algún impacto, registrando una densidad de 13,6 partes/día, una dispersión espacial de 3,3 municipios/día y un coste de 282.426 €/día de impacto. En el periodo 2015–2024, bajo idéntico forzamiento físico, la siniestralidad en jornadas se desploma al 23,8%, reduciendo las tasas a 2,6 partes/día y 1,60 municipios/día, con un coste económico marginal.

En contraste, en el nivel rojo el índice de siniestralidad se mantiene en el 100,00% en ambos periodos. Aunque la tasa de siniestralidad en jornadas dentro del nivel amarillo automático se redujo a la mitad (del 27,6% al 13,3%), este escalón sigue acumulando 65 jornadas de falsas alarmas frente a solo 10 impactos reales en la era operativa. Este comportamiento refleja que los eventos de menor impacto no responden de manera directa a forzamientos físicos masivos y unívocos, sino a contextos multifactoriales altamente variables. Por tanto, el principal desafío analítico no radica en refinar la predicción de la energía bruta del mar, sino en resolver la complejidad

Tabla 3. Matriz horizontal de contingencia y tasa de éxito operativo por color de aviso (N = 3.317 días). Los valores dentro de cada color representan el binomio [Días con siniestro / Días totales en cada nivel] seguido de la (tasa de éxito operativo %).

Sistema Evaluado	**VERDE**	**AMARILLO**	**NARANJA**	**ROJO**
(1) Juicio Experto (Humano)	2 / 3.084 **(0,06%)**	10 / 212 **(4,72%)**	9 / 20 **(45,00%)**	1 / 1 **(100,00%)**
(2) Umbrales Imax (Auto)	5 / 3.219 **(0,16%)**	10 / 75 **(13,33%)**	5 / 21 **(23,81%)**	2 / 2 **(100,00%)**
(3) Umbrales I (Auto)	4 / 3.106 **(0,13%)**	12 / 163 **(7,36%)**	4 / 39 **(10,26%)**	2 / 9 **(22,22%)**
(4) Índice I + Imax (Auto)	4 / 3.106 **(0,13%)**	12 / 163 **(7,36%)**	4 / 39 **(10,26%)**	2 / 9 **(22,22%)**
(5) Umbrales Hs (Auto)	3 / 2.612 **(0,11%)**	2 / 435 **(0,46%)**	5 / 208 **(2,40%)**	12 / 62 **(19,35%)**

Tabla 4. Matriz de Siniestralidad, Magnitudes Absolutas y Tasas Diarias por Niveles de Imax.

Umbral de Nivel Físico (Imax)	**Periodo Histórico**	**Días Totales**	**Días con Siniestro**	**Siniestralidad Jornadas (%)**	**Partes Totales (#)**	**Municipios Afectados (Suma)**	**Coste Total (€)**	**Tasa Partes / Día Siniestro**	**Tasa Municipios / Día Siniestro**	**Tasa Euros / Día Siniestro (€/día)**
VERDE *(6.5)*	Pre-2015 **Post 2015**	4.543 **3.219**	20 **5**	0,44% **0,16%**	47 5	28 **5**	2.750.376 **15.918**	2,35 **1,00**	1,40 **1,00**	137.518 **3.183**
AMARILLO (6.5-*7.0)*	Pre-2015 **Post 2015**	87 **75**	24 **10**	27,59% **13,33%**	77 18	29 **16**	2.336.955 **80.115**	3,21 **1,80**	1,21 **1,00**	97.373 **8.011**
NARANJA *(7.0-8.0)*	Pre-2015 **Post 2015**	29 **21**	23 5	79,31% **23,81%**	313 13	76 **8**	6.495.802 **47.193**	13,61 **2,60**	3,30 **1,60**	282.426 **9.438**
ROJO *(> 8.0)*	Pre-2015 **Post 2015**	3 **2**	3 **2**	100,00% 100,00%	981 137	48 **19**	27.016.131 **2.571.970**	327,00 **68,50**	16,00 **9,50**	9.005.377 **1.285.985**

intrínseca de los escenarios con impactos de baja intensidad.

También analizamos la siniestralidad de forma sectorial considerando jornadas de siniestralidad activa (presencia/ausencia binaria de daño por día y sector). Los resultados del cruce de frecuencias, normalizados frente a las jornadas totales de cada periodo, muestran una reducción del 90,19% en la probabilidad diaria de registrar días con partes en automóviles (cayendo de 43 a solo 3 días en la era operativa) y descensos generalizados en los sectores residencial (-66,54%), industrial (-81,26%), oficinas (-85,95%) y obras civiles (-84,38%). Por el contrario, el sector comercial exhibe una menor amortiguación, con una reducción del 23,70% (de 35 a 19 días).

Estos resultados globales y sectoriales podrían apuntar a que el periodo 2015-2024 el sistema de avisos/alertas/alarmas ha actuado como un factor de mitigación del impacto, particularmente en la banda amarillo-anaranjada, ya que en situación roja con forzamientos físicos importante una proporción importante del daño es inevitable. En cualquier caso, debemos ser muy críticos al analizar la aparente mitigación entre ambos periodos, ya que hay que considerar multitud de aspectos que podrían matizar esa conclusión (a) el sesgo por limitación muestral lo que limita drasticamente la utilidad de estadísticos descriptivos o promedios y puede distorsionar las tendencias, (b) la naturaleza de la variable respuesta, la cual no mide el impacto biofísico real sino exclusivamente el valor económico compensado por el CCS sobre bienes asegurados, (c) la vulnerabilidad de las métricas diarias a imprecisiones temporales en la asignación de las fechas de los siniestros; (d) el efecto de las probables variaciones en las políticas operativas del CCS a lo largo del registro (cambios de cobertura, aplicación de franquicias o criterios de peritación); y (e) el efecto del catastrófico del año histórico 2014, el cual motivó inversiones institucionales multimillonarias en obras civiles de refuerzo estructural que incrementaron la resiliencia de la fachada litoral. Por tanto, es altamente probable que una fracción significativa de la reducción del daño en el segundo periodo responda a esta reconfiguración del territorio y a factores metodológicos, y no únicamente a las acciones preventivas derivadas del SAT actual.

Respecto a los estudios de caso, se seleccionaron tres jornadas como ejemplos ilustrativos de diferentes escenarios: (1) el 9 de febrero de 2016, (2) el 29 de octubre de 2020 y (3) el 17 de octubre de 2020. El primero Ilustra cómo los escenarios de riesgo severo con precursores físicos unívocos son identificados de forma inequívoca por cualquier. El segundo demuestra que el rol del juicio experto es indispensable en escenarios meteorológicos complejos donde los criterios rígidos pueden inducir a error. El tercero evidencia la sensibilidad del juicio experto para actuar proactivamente ante riesgos marginales donde los índices automatizados quedan por debajo de sus umbrales de activación.

Conclusiones

Presentamos una metodología de análisis y validación que se aleja de la verificación estadística convencional basada en el peligro para centrarse en la validación orientada a impacto, definida mediante la siniestralidad registrada por el Consorcio de Compensación de Seguros en la costa vasca.

Los datos confirman la imposibilidad de mantener sistemas basados en la altura de ola como factor exclusivo debido a un problema crítico de sobrealerta con un 97% de falsos positivos globales y un 93% de falsos positivos en el tramo naranja-rojo. Esta saturación por falsos positivos hunde la credibilidad y destruye la confianza pública por lo que resulta imperativo transicionar hacia esquemas predictivos basados en índices de rebase supervisados mediante el juicio experto

Los resultados demuestran la superioridad estadística de la clasificación que integra el criterio humano frente a las aproximaciones puramente automatizadas. El juicio experto del personal de Euskalmet y la DAEM no constituye un factor subjetivo prescindible, sino un componente analítico crucial. Su intervención permite evaluar con precisión el impacto potencial mediante la integración de variables espacio-temporales complejas asociadas tanto al peligro físico como a la exposición y la vulnerabilidad del territorio. En escenarios de incertidumbre o transición, donde los modelos físicos automatizados inducen a errores de subalerta o sobrealerta, la experiencia experta optimiza la fiabilidad del sistema y maximiza la eficiencia en el despliegue logístico de recursos por parte de los gestores locales de emergencias.

La aparente sobreactuación o bajo éxito operativo en el nivel amarillo del juicio experto (13% de aciertos) no es tal, si tenemos en cuenta que la “verdad terreno” considerada deriva del abono de reclamaciones al CCS. Estos datos no reflejan todas las incidencias posibles y particularmente las incidencias menores. El sistema institucional tiene la obligación de avisar en estos rangos bajos para prevenir e impedir potenciales incidentes cotidianos menores.

El análisis inter-periodos y sectorial aporta evidencias empíricas de que la operatividad del SAT vasco ha contribuido a amortiguar las jornadas de daño efectivo en la costa. Destaca especialmente la reducción del 90% en la probabilidad diaria de registrar siniestros en automóviles, lo que valida la eficacia de la acción temprana y la comunicación preventiva para proteger activos móviles expuestos. Aunque se reconoce de forma crítica que otros muchos factores concurrentes han podido contribuir al descenso de la siniestralidad a partir de 2015.

Entre las principales limitaciones de este estudio destacamos: (1) la metodología condicionada por un desequilibrio extremo de clases, (2) la incertidumbre espacial derivada de emplear parámetros físicos únicos que simplifican la variabilidad de la amenaza a lo largo del litoral vasco, (3) el desfase analítico de evaluar los precursores físicos a posteriori, lo que no refleja el contexto operativo real durante los eventos, y (4) el sesgo de subrerepresentación del impacto real en los datos del CCS

junto con las posibles inexactitudes en su imputación temporal exacta. El trabajo futuro se orientará a integrar registros de intervenciones de emergencia, llamadas al 112, incidencias de bomberos, crónicas de prensa y costes de reparación municipales y a disponer de conjuntos de datos de precursores físicos más representativos.

Agradecimientos

Nuestro más profundo agradecimiento a todas las instituciones que financian redes instrumentales y ponen a disposición de la comunidad datos usables de calidad, en particular a la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Departamento de Seguridad del Gobierno Vasco. Asimismo, nuestro sincero agradecimiento al Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) por facilitar los registros históricos de siniestralidad. Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo y cofinanciación de la Dirección de Patrimonio Natural y Adaptación al Cambio Climático (Viceconsejería de Medio Ambiente) y a la DAEM (Viceconsejería de Protección Civil) del Gobierno Vasco.

Referencias

Egaña, J., Gaztelumendi, S., (2020). Caracterización océano-meteorológica de eventos adversos por riesgo marítimo-costero: impacto en costa en la CAV. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1, p32-34). https://www.azti.es/rim/wp-content/uploads/2020/11/RIM_27_1.pdf

Gaztelumendi, S., Egaña, J., R. Gelpi, I., Gómez de Segura, J. D., Aranda, J. A. (2024). El sistema de acción temprana frente al riesgo marítimo-costero en Euskalmet. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2024, 30(1), p52-55).

Gaztelumendi, S., Liria, P., Egaña, J., del Campo, A., Gómez de Segura, J.D., González, M., Aranda, J.A. (2022b). La red océano-meteorológica del País Vasco como soporte a actividades operativas de Euskalmet. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2022, 28(2), p28-31). https://www.azti.es/wp-content/uploads/2026/01/RIM_28_2_baja-1.pdf

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Gelpi, I., Aranda, J. A. (2020). Los avisos/alertas/alarmas por riesgo marítimo-costero en la CAV. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1, p62-65).

Gaztelumendi, S. (2020). Caracterización de daños por embate de mar en las costas de Bizkaia y Gipuzkoa. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1, p35-38). https://www.azti.es/rim/wp-content/uploads/2020/11/RIM_27_1.pdf

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., and Aranda, J. A. (2018) Description of a coastal impact event in Basque Country: the 9 February 2016 case, Adv. Sci. Res., 15, 137–143, https://doi.org/10.5194/asr-15-137-2018.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., Gonzalez, M., Aranda, J. A., and Anitua, P. (2016a) The new Euskalmet coastal–maritime warning system, Adv. Sci. Res., 13, 91–96, https://doi.org/10.5194/asr-13-91-2016 .

Gaztelumendi, S., Orbe, I., Salazar, O., Lopez, A., Aranda, J. A., and Anitua, P. (2016b). Delivery and communication of severe weather events in Basque Country: the Euskalmet case, Adv. Sci. Res., 13, 87–90, https://doi.org/10.5194/asr-13-87-2016.

GV (2025). Protocolo de predicción, vigilancia y actuación ante fenómenos meteorológicos adversos. Procedimiento DAEM. PE-005 V-14. Departamento de seguridad. https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/proto_meteo/es_proto/PE-005-Avisos-de-Meteorologia-Adversa-V14-es.pdf

Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B. (Eds.). (2012). Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science (2nd Edition). John Wiley & Sons, Ltd. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/978111996000

Liria, P., Epelde, I., Gaztelumendi, S., Egaña, J., Gelpi, I. R., Carreño, S., Gonzalez, M., and Aranda, J. (2014). Los temporales de enero, febrero y marzo de 2014 dentro del contexto del clima marino de la costa vasca, Efectos sobre las infraestructuras costeras y las playas, XVI Congreso y Exposición ECOPLAYAS, Bilbao, 2014.

R Core Team (2026). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

Instalaciones Multi-técnica como elemento clave de la geodesia moderna: el caso de estudio de PASA y APBI.

Zurutuza, Joaquín[1], Aguinaga, Aitor[1], García-Armenteros, Juan Antonio[1], González Manuel[2], Breton, Josu Andoni[3], Elorza, Mikelo[4], Momoitio, Letasu [5] and Vaquero, Pedro[6]

Palabras clave: Marco de referencia Global, Geodesia, GNSS/ Gravedad, Nivel del mar.

Introducción

La geodesia moderna ha evolucionado desde la utilización de técnicas de observación independientes hacia infraestructuras donde diferentes tecnologías trabajan de forma integrada con un objetivo común. Estas instalaciones, que pueden definirse como *Multi-technique Facilities*, constituyen actualmente uno de los pilares fundamentales para la definición y mantenimiento de los sistemas de referencia terrestres y para la observación de numerosos procesos geodinámicos. Su objetivo no consiste únicamente en reunir diferentes instrumentos en una misma localización, sino en establecer relaciones precisas entre técnicas que observan magnitudes físicas de diferente naturaleza pero complementarias.

Por ejemplo, a escala global, la propia definición de los marcos de referencia terrestres (ITRF) exige vincular técnicas de geodesia espacial de naturaleza muy distinta para fijar de forma coherente la orientación, la escala y el geocentro del sistema: *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), *Satellite Laser Ranging* (SLR), *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) y *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS). Ninguna de ellas, por sí sola, resulta suficiente: VLBI aporta la orientación y la escala más rigurosa; SLR ancla el geocentro con precisión milimétrica; GNSS proporciona la densidad y continuidad temporal que ninguna de las otras dos puede ofrecer; y DORIS complementa a todas las anteriores. La fortaleza del ITRF no reside en una técnica concreta, sino en la integración coherente de todas ellas.

A escala regional o local, este mismo concepto resulta igualmente imprescindible en la monitorización geodésica del nivel del mar. Un mareógrafo mide únicamente la variación del nivel del mar respecto a la estructura sobre la que está instalado; por tanto, la información obtenida es exclusivamente relativa. Si la infraestructura experimenta subsidencia o levantamiento, el mareógrafo no puede distinguir si la variación observada corresponde a un cambio real del océano o al movimiento vertical de la corteza terrestre. De igual forma, una estación GNSS proporciona información sobre el movimiento del terreno, pero no mide directamente el nivel del mar. La resolución del problema únicamente puede alcanzarse mediante la combinación de diferentes técnicas geodésicas que permitan caracterizar simultáneamente el comportamiento del océano y de la infraestructura donde se realizan las observaciones.

Los Territorios Históricos de Gipuzkoa y Bizkaia han desarrollado, a lo largo de las dos últimas décadas, una infraestructura geodésica de referencia que cubre las componentes altimétrica y planimétrica. Los puertos de Pasaia y Bilbao constituyen los principales puntos de integración de esta infraestructura geodésica. En ellos convergen las estaciones GNSS, la red de nivelación y las observaciones gravimétricas, todas ellas vinculadas a un mismo sistema de referencia (Red Española de Nivelación de Alta Precisión, REDNAP), junto con los mareógrafos y, en Gipuzkoa, la *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* (PSInSAR).Esta integración permite obtener observaciones consistentes, validar resultados mediante técnicas independientes y mantener series temporales de alta calidad destinadas al estudio del nivel del mar y del movimiento vertical de la corteza.

El presente trabajo describe la infraestructura multitécnica actualmente operativa en los puertos de Bilbao y Pasaia. No se trata de explicar cada técnica por su cuenta, sino de ver cómo cada técnica o pieza de esta arquitectura resuelve una limitación concreta de las demás, y de por qué solo su combinación permite avanzar con solidez hacia un objetivo como analizar niveles de mar. Así, se muestra cómo resulta imprescindible la disponibilidad de técnicas geodésicas independientes para estimar parámetros que permanecerían indeterminados utilizando una única técnica de observación, además de permitir la detección de efectos sistemáticos que, de otro modo, pasarían inadvertidos.

Materiales y métodos

La **infraestructura geodésica de Gipuzkoa y Bizkaia** está apoyada en una Red de Nivelación de Alta Precisión, una Red Gravimétrica Fundamental y una red de estaciones GNSS permanentes. En Gipuzkoa, los trabajos de densificación y reobservación de la antigua Red de Nivelación NP comenzaron en 2005; en Bizkaia, en 2017. Ambas se apoyan en la REDNAP08 del Instituto Geográfico Nacional, con el nivel medio del mar en Alicante como referencia altimétrica y una tolerancia inferior a 1,5 mm•√k para los tramos observados. A fecha de hoy, Gipuzkoa

[1] Sociedad de Ciencias Aranzadi, Zorroagagaina 11, 20014 Donostia - San Sebastián
[2] AZTI, Herrera Kaia Portualdea z/g, 20110 Pasaia
[3] Autoridad Portuaria de Bilbao, Oficinas generales, 48980 Santurtzi
[4] Diputación Foral de Gipuzkoa, Plaza de Gipuzkoa 1, 20.004 Donostia
[5] Diputación Foral de Bizkaia, Alameda Rekalde, 18- 4ª, 48009 Bilbao
[6] Instituto Geográfico Nacional, General Ibáñez Íbero,3, 28003 Madrid
E-mail: geodesia@aranzadi.eus

cuenta con aproximadamente 1.100 km de itinerarios nivelados y cerca de 850 puntos de control de alta precisión; Bizkaia, con unos 850 km y cerca de 950 puntos. La Red Gravimétrica Fundamental se reobservó en 2024 tanto en Gipuzkoa (11 estaciones) como en Bizkaia (9 estaciones) con un gravímetro relativo Scintrex CG-6 de 0,1 µGal de resolución. En cuanto a la red de estaciones GNSS permanentes, en Gipuzkoa se inauguró en 2005 con tres estaciones (IGEL, LAZK, ELGE), a las que se sumó PASA y, en 2025, una quinta estación, BIDA. La Red GNSS de Bizkaia, en cambio, fue establecida en 2006 con tres estaciones (BRZR, GERN, SOPU), y más tarde, en 2021, incorporó LEMZ y APBI (propiedad de la Autoridad Portuaria de Bilbao).

Estas **estaciones GNSS permanentes** constituyen el elemento central de la infraestructura. Sus observaciones se procesan diariamente y semanalmente en el marco IGS20, obteniendo series temporales de coordenadas que permiten controlar y estimar velocidades de movimiento horizontal y vertical con precisión milimétrica. En el puerto de Pasaia, la estación PASA (integrada en la red EPN de EUREF desde 2015) se ubica a escasos metros del mareógrafo. En el puerto de Bilbao, la estación APBI, propiedad de la Autoridad Portuaria, tiene también un emplazamiento equivalente. La razón de ser de esta cercanía física no es casual: solo situando el receptor GNSS junto al propio mareógrafo puede asumirse razonablemente que ambos instrumentos comparten el mismo movimiento vertical del terreno, de manera que la velocidad GNSS pueda aplicarse directamente como corrección de la serie mareográfica. Sin esta estación, y sin años de observación continuada que permitan estimar una velocidad estadísticamente robusta, cualquier tendencia obtenida a partir del mareógrafo sería ambigua.

Los **mareógrafos** proporcionan registros continuos del nivel del mar relativo respecto a la infraestructura donde se encuentran instalados. En Pasaia se instaló en 2007 un sensor de presión y en 2021, muy cerca del primero, un sensor radar. En Bilbao existe un sensor radar desde 2010, propiedad de Puertos del Estado. Sin embargo, para que estas observaciones puedan compararse entre distintos puertos resulta imprescindible conocer la estabilidad de toda la instalación y mantener una referencia altimétrica común.

Con este objetivo se realizan campañas periódicas de **nivelación geométrica** mediante un nivel de alta precisión entre las estaciones GNSS, los sensores mareográficos y los clavos de referencia (Tide Gauge Bench Mark, TGBM), enlazando todas las observaciones con la REDNAP y con la Red Europea de Nivelación (EVRF). La nivelación constituye el método más preciso para detectar deformaciones locales de las estructuras y garantizar la estabilidad relativa entre todos los elementos que intervienen en la medida del nivel del mar (Barbadillo et al., 2012).

La infraestructura se complementa mediante **observaciones gravimétricas** absolutas y relativas. La gravedad proporciona el soporte físico necesario para trabajar con alturas geopotenciales y establecer una referencia común entre diferentes estaciones mareográficas. Esta información resulta especialmente relevante cuando se pretenden comparar observaciones obtenidas en distintos puertos o integrarlas dentro de redes nacionales e internacionales.

Como complemento regional se utilizan observaciones obtenidas mediante **PSInSAR** que usa imágenes Sentinel-1 del programa Copérnico de la ESA. La resolución en el terreno es de unos 30 por 30 metros y la precisión es del orden centimétrico para movimientos lentos. Al tener dos órbitas (ascendente y descendente), es posible detectar tanto subsidencias verticales como planimétricas, pero sólo en dirección Este-Oeste. En la dirección Norte-Sur no es posible obtenerla con precisión porque las órbitas tienen inclinación polar muy pequeña. Mientras las estaciones GNSS proporcionan información muy precisa en puntos discretos, la técnica InSAR permite generar modelos continuos de deformación sobre amplias superficies, identificando zonas con subsidencia o levantamiento y proporcionando una validación independiente de las velocidades obtenidas mediante GNSS.

Todas estas técnicas presentan diferentes frecuencias de observación. GNSS y los mareógrafos funcionan de forma continua; la nivelación y la gravimetría se realizan mediante campañas periódicas; e InSAR depende de la disponibilidad de nuevas imágenes satelitales. Esta diversidad temporal constituye una de las principales fortalezas de una instalación multitécnica, ya que combina observaciones continuas con controles periódicos e información espacial de carácter regional.

Aunque cada una de estas técnicas posee características y precisiones diferentes, todas contribuyen a un mismo objetivo. La Figura 1 muestra la distribución de la infraestructura multitécnica existente en los puertos de Bilbao y Pasaia.



Figura 1. Infraestructura Multi-técnica en el puerto de Bilbao (izq.) y en las instalaciones de AZTI, el puerto de Pasaia (der.).

Resultados y discusión

En la monitorización del nivel del mar, el mareógrafo registra únicamente una variación relativa respecto al terreno. La incorporación de observaciones GNSS permite determinar el movimiento vertical de la infraestructura y separar ambas contribuciones, obteniendo estimaciones del nivel absoluto del mar compatibles con los marcos de referencia geocéntricos internacionales. Estas velocidades verticales, por tanto, son indispensables para corregir las tendencias observadas por los mareógrafos y obtener estimaciones absolutas del nivel medio del mar (Santamaría-Gómez et al., 2017). Todas las series temporales están disponibles en la web (Geolab Pasaia, 2022).

En la Figura 2 se pueden observar las velocidades verticales de estaciones GNSS permanentes alrededor de Gipuzkoa y Bizkaia, que han sido calculadas en 2026 por la Comisión Especializada del Sistema Geodésico (Consejo Superior Geográfico, 2026), en la que la Sociedad de Ciencias Aranzadi también ha participado. Este nuevo marco ITRF2020 es más homogéneo, sin discontinuidades por sucesivos cambios de ITRF, ni por cambios en los diferentes estándares de cálculo inherentes a cada ITRF. Los cálculos cumplen todas las recomendaciones de EUREF Permanent GNSS Network (EPN, 2023) y comprenden un periodo de casi 15 años de datos, hasta la época 2026.0. Se puede apreciar que todas las estaciones presentan subsidencia. Entre ellas destacan las estaciones del puerto de Bilbao (APBI) con una mayor subsidencia y una velocidad vertical de **-1.72 mm/año**, y por otro lado la estación del puerto de Pasaia (PASA) con menor subsidencia y una velocidad vertical de **-0.08 mm/año**.

La nivelación geométrica también desempeña un papel importante al verificar que la relación altimétrica entre el mareógrafo, la estación GNSS y los clavos de referencia TGBM permanecen estables a lo largo del tiempo. De esta forma se garantiza que posibles deformaciones estructurales no introduzcan errores en la interpretación de las tendencias observadas. En Pasaia se han observado anualmente (desde 2008 hasta 2026) diferentes clavos de referencia situados alrededor de las instalaciones de AZTI. En estos clavos se observa que apenas existen diferencias de altura. En Bilbao, las nivelaciones geométricas anuales comienzan en 2021, el mismo *día de la instalación de la antena GNSS*. Un periodo de observación *más corto* en el que tampoco se detectan diferencias significativas.

En cuanto a las observaciones PSInSAR, se realizó un estudio inicial con imágenes de toda Gipuzkoa desde 2016 a 2020 y posteriormente de 2020 a 2022. Si analizamos los puntos que hay alrededor de la estación de PASA resulta una velocidad media de -0.05 mm/año, que prácticamente coincide con el valor de su velocidad GNSS. Aunque los valores sean coincidentes, hay que tener en cuenta que la estación GNSS lleva veinte años de datos y los datos InSAR sólo seis. Además, los valores alrededor de la antena GNSS no son muy estables y entre los dos periodos de análisis cambian los dispersores persistentes identificados, por lo que habría que realizar un estudio más exhaustivo para confirmar estos resultados.

Conclusiones

Los puertos de Bilbao y Pasaia constituyen dos ejemplos representativos de instalaciones geodésicas multitécnicas aplicadas a la monitorización del nivel del mar y al mantenimiento de los marcos de referencia.

La integración permanente de observaciones GNSS, mareográficas, nivelación geométrica, gravimetría e InSAR permite mantener un marco de referencia estable, separar el movimiento vertical de la corteza de las variaciones reales del nivel del mar y proporcionar resultados coherentes con los sistemas de referencia nacionales. Son elementos esenciales para mejorar el conocimiento del cambio del nivel del mar y de los

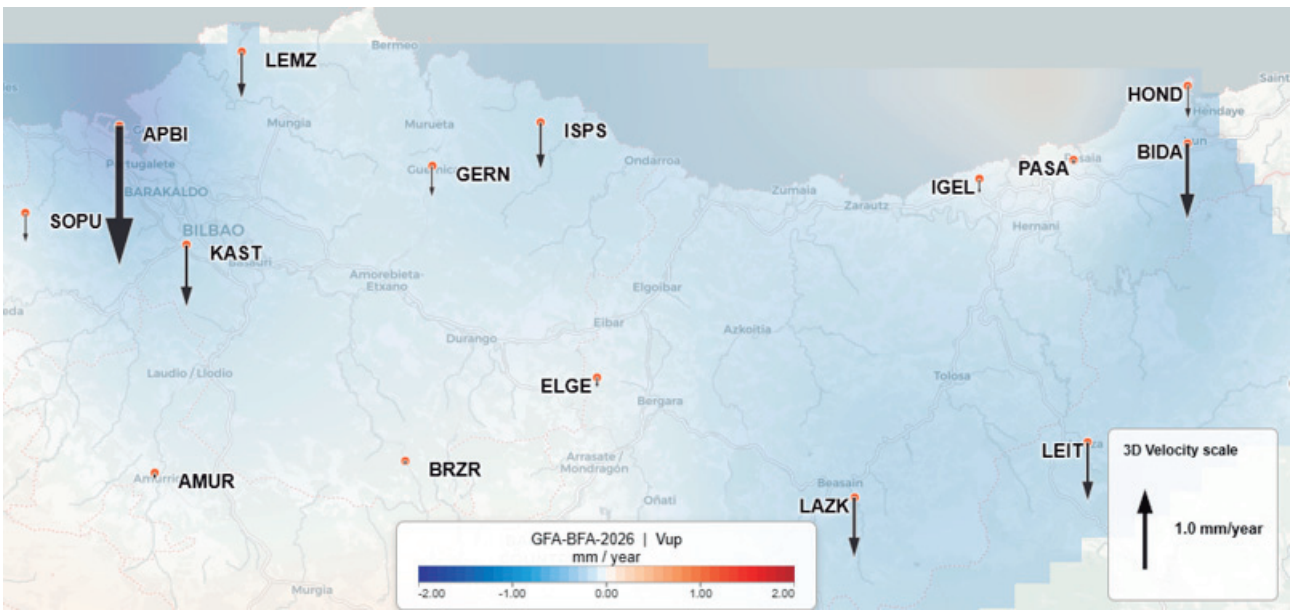


Figura 2. Velocidades verticales de estaciones GNSS permanentes en el marco de referencia IGS20, época 2026.0.

procesos geodinámicos que afectan a la costa cantábrica.

El verdadero valor de una infraestructura multitécnica no reside únicamente en la coexistencia de diferentes instrumentos, sino en la integración de observaciones independientes capaces de estimar parámetros que ninguna técnica puede resolver por sí sola. Esta redundancia aumenta la robustez de las soluciones, facilita la validación entre técnicas y permite detectar errores sistemáticos que permanecerían ocultos si se dispusiera de una única fuente de observación.

Por último, y no menos importante, está la continuidad temporal de las observaciones. Muchas señales geofísicas evolucionan durante décadas y únicamente las series temporales largas permiten distinguir tendencias reales de variaciones periódicas o transitorias. El mantenimiento continuado de las estaciones GNSS permanentes y de los mareógrafos, así como las campañas episódicas de nivelación y gravimetría constituyen, por tanto, un requisito indispensable para garantizar la calidad de las soluciones obtenidas.

Referencias

Barbadillo, A., Sánchez Sobrino, J. A., Cano, M.A. 2012, Status of the Spanish High Precission Levelling Network (REDNAP). 7a Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, San Sebastián.

Santamaría-Gómez, A. et al. 2017. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. Earth and Planetary Science Letters. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.038

Geolab Pasaia – ARANZADI/AZTI/IGN/DFG. Nivel del mar (mareógrafo de Pasaia). https://geolabpasaia.org/nivel-del-mar/ (visitado 01-06-2026)

EPN 2023. Guidelines for EPN Analysis Centres. https://epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf (visitado 01-06-2026).

Consejo Superior Geográfico. Comisión Especializada del Sistema Geodésico 2026, Informe de cálculo de las coordenadas ETRS89 (ETRF2000) de las redes públicas de estaciones permanentes GNSS en España, Madrid.

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). https://psmsl.org/ (visitado 01-06-2026)

Reconocimientos – Los autores agradecen la colaboración de la Diputación Foral de Gipuzkoa, la Diputación Foral de Bizkaia, la Autoridad Portuaria de Bilbao, AZTI y el Instituto Geográfico Nacional, cuyo apoyo institucional e infraestructura son fundamentales para el mantenimiento de estas redes de observación.

Análisis de tendencias absolutas del nivel del mar en la costa vasca, a partir de observaciones de nivel del mar y GNSS en los puertos de Pasaia y Bilbao

Aguinaga, Aitor[1], Zurutuza, Joaquín[1], García-Armenteros, Juan Antonio[1], González, Manuel[2], Liria, Pedro[2], Breton, Josu Andoni[3], Elorza, Mikelo[4], Momoitio, Letasu[5]

Palabras clave: Nivel Medio del Mar, GNSS, Nivelación geométrica, Geodesia, Deformación de la Corteza

Introducción

El seguimiento del nivel del mar en las costas es una herramienta fundamental tanto para la gestión del riesgo costero como para el mantenimiento del datum vertical. Sin embargo, los registros brutos de los mareógrafos reflejan la variación de un nivel relativo respecto al terreno sobre el que está anclado el mareógrafo. Si ese terreno experimenta movimientos verticales, la señal observada puede sobreestimar o subestimar el ascenso real del nivel del mar. La corrección de la velocidad de movimiento vertical del terreno (VLM, *Vertical Land Motion*) a partir de observaciones GNSS (*Global Navigation Satellite System*) continuas permite transformar la tendencia relativa en tendencia absoluta o geocéntrica.

En los puertos de Pasaia y Bilbao se mantiene una infraestructura geodésica multitécnica. En el puerto de Pasaia, además de un mareógrafo de presión y otro de radar (operativos desde 2007 y 2021, respectivamente), existe, a escasos metros, una estación GNSS permanente (PASA), perteneciente a la Red GNSS de Gipuzkoa (integrada en EPN (*EUREF Permanent Network*), EPND (*EUREF Permanent Network Densification*) y EPOS (*European Plate Observation System*)), una estación gravimétrica absoluta y cuatro señales geodésicas de referencia con cotas obtenidas mediante Nivelación de Alta Precisión (NAP). En el puerto de Bilbao, además de un mareógrafo radar (operativo desde 2010), existe igualmente, a escasos metros, una estación GNSS permanente (APBI), perteneciente a la Red GNSS de Bizkaia (integrada en EPND), una estación gravimétrica relativa y cuatro señales geodésicas de referencia con cotas obtenidas mediante técnicas NAP. En ambos casos, los datos RINEX de las estaciones GNSS permanentes se procesan diaria y semanalmente, lo que permite determinar las velocidades planimétricas y verticales del terreno (VLM) con alta precisión en el marco IGS20 (Geolab Pasaia, 2022), además de verificar la estabilidad de las estaciones.

[1] Sociedad de Ciencias Aranzadi, Zorroagagaina 11, 20014 Donostia - San Sebastián
[2] AZTI, Herrera Kaia Portualdea z/g, 20110 Pasaia
[3] Autoridad Portuaria de Bilbao, Oficinas generales, 48980 Santurtzi
[4] Diputación Foral de Gipuzkoa, Plaza de Gipuzkoa 1, 20.004 Donostia
[5] Diputación Foral de Bizkaia, Alameda Rekalde, 18- 4ª, 48009 Bilbao
E-mail: geodesia@aranzadi.eus

Materiales y métodos

El mareógrafo del puerto de Pasaia (φ = 43.32197° N, λ = 1.93142° W) comenzó a registrar datos en 2007 mediante un sensor de presión Paroscientific 8DP070-2, instalado en las instalaciones de AZTI y enlazado al sistema altimétrico de referencia nacional (NMM Alicante, REDNAP08). En 2021 se incorporó un nuevo sensor radar VEGAPULS C21, operando ambos instrumentos en paralelo durante casi un año. Durante este periodo de solapamiento se detectó y corrigió un sesgo sistemático de ~ 5 cm en bajamar y ~15 cm en pleamar, atribuido al uso de la densidad del agua dulce (1.000 g/cm³) en lugar de la del agua del mar Cantábrico (~1.025 g/cm³) para el cálculo de alturas del sensor de presión. Posteriormente, el sensor de presión fue retirado definitivamente en noviembre de 2021 debido a problemas técnicos. La serie analizada cubre el periodo comprendido entre 2007-03-28 y 2025-12-31 (18.75 años), con datos faltantes durante el periodo 2020-2021, también debido a problemas técnicos del sensor de presión.

El mareógrafo del puerto de Bilbao (denominado Bilbao3) es un sensor radar Miros SM094/2/20W instalado en el extremo NW del dique de Santurtzi (φ = 43.3515° N, λ = 3.0451° W) y operativo desde 2010. En 2024, el sensor fue sustituido por un modelo SM140/W/02/20 más reciente, sin afectar a la continuidad de la serie, gracias al correspondiente ajuste de datum. Los datos provienen del banco de datos de Puertos del Estado (red REDMAR) y se han transformado también a REDNAP08. La serie analizada cubre el periodo 2010–2025 (16 años). Aunque no alcanza el ciclo nodal lunar completo (18.61 años), este periodo es suficiente para obtener una estimación robusta de la tendencia del nivel del mar.

En cuanto a la metodología empleada, primero los datos horarios de ambas estaciones se someten a un **control de calidad** que incluye: eliminación de duplicados, detección y gestión de vacíos mediante la herramienta GAPCOU del software SLP64 (Caldwell, P., 2015), y aplicación de un promedio móvil para mitigar el efecto del oleaje (sensores radar). En Pasaia, además se dispone de un sensor de respaldo (AZTI NRV-420), instalado justo al lado y enlazado al radar VEGAPULS, que permite obtener datos en caso de problemas puntuales con el radar principal.

Posteriormente, se realiza el **análisis armónico** de la serie utilizando la librería Python Pytides (PyTides developers), obteniéndose, entre otros con menor amplitud, los constituyentes principales (M2, S2, N2, K2, O1, K1). A partir de estos armónicos se reconstruye la marea astronómica y se calcula el residuo meteorológico.

La serie de nivel medio diario se obtiene aplicando el filtro paso bajo de Bloomfield de 119 h (Bloomfield, P., 1976), el mismo que utiliza el software SLP64. Los **promedios mensuales** se calculan como media aritmética de los valores diarios, descartando los meses con más de 7 días sin nivel diario. La **tendencia relativa** del nivel del mar (RSLC) se estima mediante regresión lineal sobre la serie mensual.

La **tendencia absoluta** del nivel del mar (ASLC) se obtiene sumando la tendencia relativa y la velocidad vertical del terreno, según la expresión: ASLC = RSLC + VLM (Santamaría-Gómez, A. et al., 2017) , donde la VLM se obtiene del procesamiento GNSS de los datos RINEX obtenidos (mínimo 3 años) en el marco de referencia IGS20, siguiendo las guidelines de EUREF, con cálculos diarios y semanales (EUREF Permanent GNSS Network, 2023). Así, se pueden aislar los movimientos de la corteza terrestre de las mediciones brutas del nivel del mar. Dado que hay una subsidencia negativa (VLM < 0) el sensor se desplaza con el terreno y registra mayor nivel relativo, por lo que la corrección reduce la tendencia observada. En la estación PASA se procesan datos GNSS desde 2007, por lo que es coherente con el periodo de observación del mareógrafo. En Bilbao en la estación APBI se procesan datos desde 2021, por lo que el periodo es más corto, pero al tener más de 3 años ya son velocidades robustas.

Para garantizar la estabilidad de las referencias, se realizan campañas periódicas de **nivelación geométrica** con un nivel automático Leica DNA03 aplicando el método del punto medio. En Pasaia se controlan cuatro señales geodésicas en el cantil, los mareógrafos y la antena GNSS de PASA. En Bilbao también se controlan otras cuatro señales cercanas al mareógrafo, la antena GNSS de APBI y el mareógrafo. Los datos confirman la ausencia de movimientos relativos significativos entre el mareógrafo y sus referencias.

Resultados y discusión

Los niveles del mar obtenidos a partir de los datos históricos de los mareógrafos se representan en un diagrama que permite visualizar las diferencias de altura del nivel del mar. En cada puerto existen diferentes **referencias altimétricas** y en este diagrama se representan la cota de cada una de ellas sobre el Nivel Medio del Mar de Alicante, que constituye el sistema altimétrico oficial de España (REDNAP08). La señal geodésica utilizada como referencia en Pasaia, es el *TGBM-A* y la referencia del puerto de Bilbao es el *Mareógrafo 2 New*, ambos observados mediante *técnicas NAP*. Así, en la Figura 1 se expresan todos los ceros relevantes de cada puerto.

La regresión lineal sobre la serie de **promedios mensuales** filtrados (Bloomfield 119 h) proporciona la tendencia relativa del nivel del mar. La RSLC es de +4.77 mm/año en Pasaia para el periodo 2007–2025 y de +6.53 mm/año en Bilbao para el periodo 2010–2025. La diferencia entre ambas (1.76 mm/año) es coherente con la diferencia de VLM entre los dos emplazamientos.

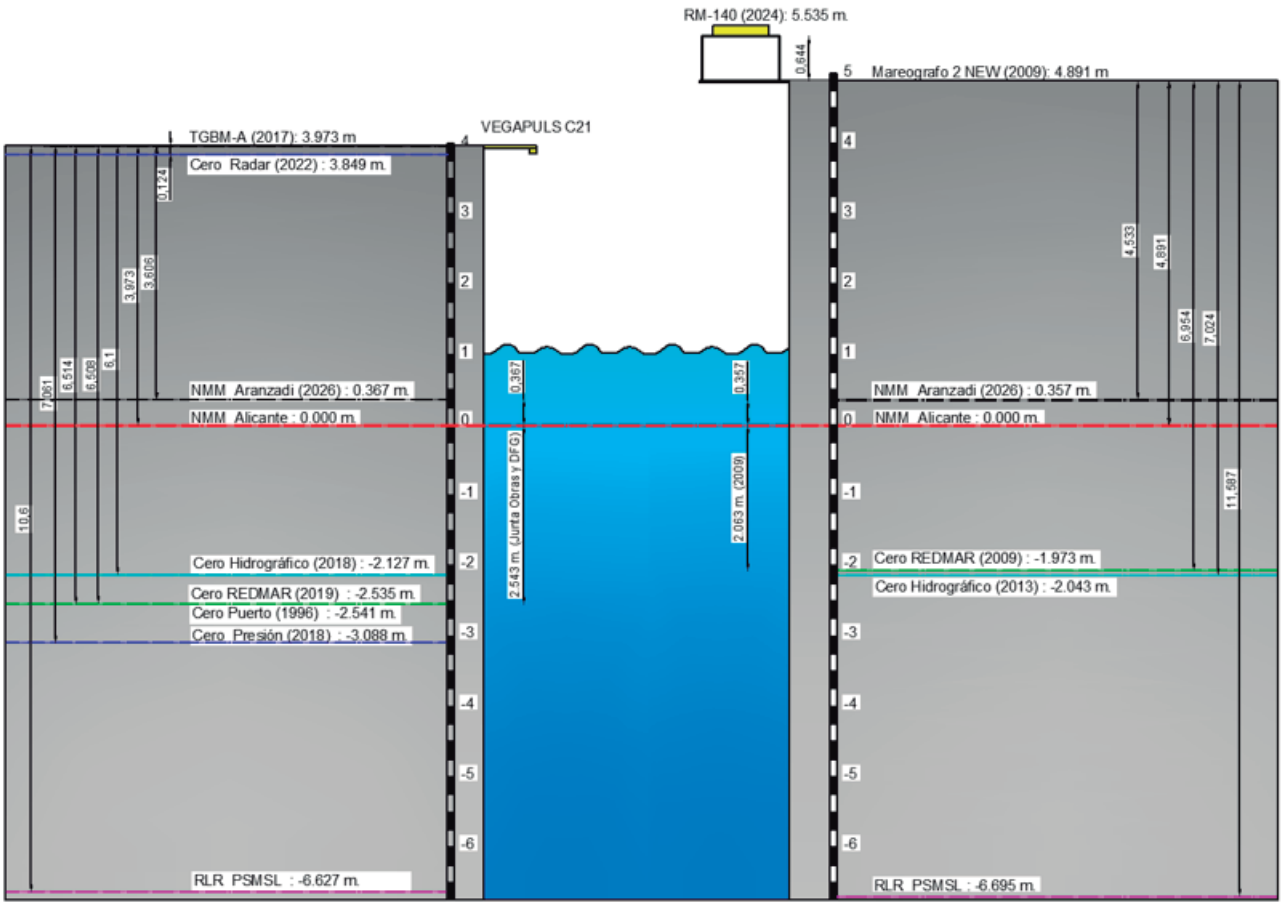


Figura 1. Diagrama de referencias altimétricas en Pasaia (izq.) y en Bilbao (der.).

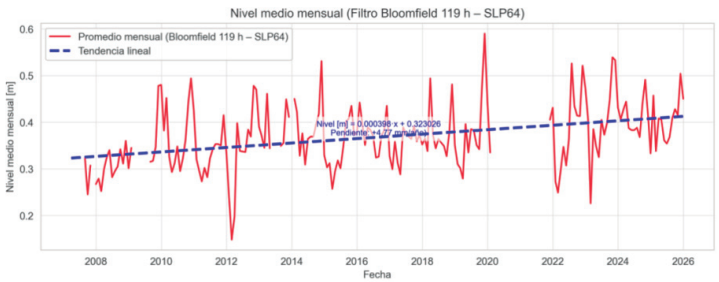


Figura 2. Serie de nivel medio mensual y tendencia relativa en Pasaia (2007–2025). RSLC = +4.77 mm/año.

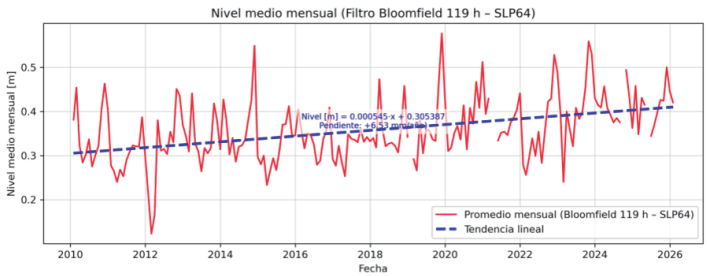


Figura 3. Serie de nivel medio mensual y tendencia relativa en Bilbao (2010–2025). RSLC = +6.53 mm/año.

La velocidad vertical del terreno calculada por la Comisión Especializada del Sistema Geodésico (Consejo Superior Geográfico, 2026), para la estación PASA en el marco IGS20 es VLM = -0.08 mm/año y para la estación APBI es VLM = -1.72 mm/año (con un menor intervalo de observación). Se observa que en estas dos estaciones permanentes hay una ligera subsidencia. Aplicando esta corrección a la tendencia relativa se obtiene la tendencia absoluta del nivel del mar, tanto en Pasaia como en Bilbao.

ASLC (Pasaia) = +4.77 + (-0.08) = **+4.69** mm/año y ASLC (Bilbao) = +6.53 + (-1.72) = **+4.81** mm/año

Así, las tendencias absolutas de ambos puertos convergen en torno a ~4.75 mm/año, a pesar de que sus tendencias relativas difieran en casi 1.76 mm/año. Este resultado pone de manifiesto que la diferencia en las tasas relativas se debe casi en su totalidad a la diferente subsidencia local: APBI presenta una subsidencia ~1.64 mm/año mayor que PASA.

Como verificación independiente de los resultados obtenidos, también se ha calculado la tendencia relativa del mareógrafo Santander III con los promedios mensuales que indica el PSMSL (*Permanent Service for Mean Sea Level*). El mareógrafo también pertenece a Puertos del Estado, tiene un sensor radar Miros y también pertenece a la red PSMSL. El periodo analizado es muy parecido a los anteriores que va desde 2007 a finales de 2024. La tendencia relativa de estos datos es de +5.06 mm/año. Alrededor del mareógrafo, a 1 km se encuentra la estación GNSS denominada CANT donde se detecta una VLM de -0.28 mm/año en el marco IGS20, lo que arroja una tendencia absoluta de +4.78 mm/año, prácticamente idéntica a las obtenidas en Pasaia y Bilbao.

Conclusiones

Las tendencias relativas del nivel del mar resultan considerablemente distintas entre ambos emplazamientos (+4.77 mm/año en Pasaia frente a +6.53 mm/año en Bilbao), una diferencia atribuible principalmente a la distinta subsidencia local de cada punto. Tras aplicar la corrección por movimiento vertical del terreno (VLM), obtenida mediante las estaciones GNSS permanentes PASA (-0.08 mm/año) y APBI (-1.72 mm/año), ambas en el marco IGS20, las tendencias absolutas convergen notablemente: +4.69 mm/año en Pasaia y +4.81 mm/año en Bilbao, con una media conjunta de ~4.75 mm/año. La subsidencia detectada en APBI (-1.72 mm/año) es significativamente mayor que en PASA (-0.08 mm/año), lo que confirma que su cuantificación mediante GNSS resulta indispensable para no sobreestimar la tasa de ascenso del mar en ese emplazamiento. Esta convergencia se ve además respaldada por la estación vecina de Santander III, cuya tendencia absoluta para un periodo similar (2007–2024) se sitúa igualmente en torno a los 4.78 mm/año, lo que sugiere que esta tasa refleja una señal oceánica real y robusta.

La fiabilidad de estos resultados se refuerza con las campañas periódicas de nivelación geométrica realizadas en ambos puertos, que confirman la ausencia de movimientos relativos significativos entre el mareógrafo y sus referencias altimétricas, garantizando así la homogeneidad de las series históricas. En este sentido, la infraestructura geodésica multitécnica integrada (mareógrafo, GNSS permanente, NAP y gravimetría), ya consolidada en Pasaia y actualmente en proceso de consolidación en Bilbao, constituye un modelo de observatorio costero de primer orden para el mantenimiento del datum vertical y el seguimiento del nivel del mar en el País Vasco.

Referencias

Caldwell, P. 2015. Hourly Sea Level Data Processing and Quality Control Software. SLP64 User Manual (v4.0). No. 15-390.

Bloomfield, P. 1976. Fourier Analysis of Time Series: An Introduction. John Wiley and Sons, pp. 129–137.

PyTides developers (s.f.). PyTides: tidal analysis and prediction in Python. https://github.com/sam-cox/pytides (visitado 01-06-2026).

Santamaría-Gómez, A. et al. 2017. Uncertainty of the 20th century sea-level rise due to vertical land motion errors. Earth and Planetary Science Letters. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.05.038

Geolab Pasaia – ARANZADI/AZTI/IGN/DFG. Nivel del mar (mareógrafo de Pasaia). https://geolabpasaia.org/nivel-del-mar/ (visitado 01-06-2026)

EUREF Permanent GNSS Network 2023. Guidelines for EPN Analysis Centres. https://epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf (visitado 01-06-2026).

Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). https://psmsl.org/ (visitado 01-06-2026)

Reconocimientos – Los autores agradecen la colaboración de la Diputación Foral de Gipuzkoa, la Diputación Foral de Bizkaia, la Autoridad Portuaria de Bilbao, AZTI y el Instituto Geográfico Nacional, cuyo apoyo institucional e infraestructura son fundamentales para el mantenimiento de estas redes de observación.

Aplicación de técnicas de IA-ML a la modelización del impacto por riesgo marítimo-costero en la costa vasca

Gaztelumendi, Santiago[1]

Palabras clave: Impacto costero, Riesgo, Randon Forest, XGboost, IA-ML.

Introducción

La gestión del riesgo en el litoral vasco cuenta con un sistema sólido de niveles de aviso/alerta/alarma basado en índices de rebase (Gaztelumendi et al., 2016a, Liria et al 2014). Este enfoque operacional, que integra variables como la altura de ola significativa, la dirección, el periodo pico y la marea (astronómica y meteorológica), ha demostrado una alta fiabilidad en la protección de la costa vasca (Gaztelumendi et al., 2018). Sin embargo, la complejidad intrínseca de los procesos de interacción mar-tierra y la necesidad de un mayor conocimiento sobre los potenciales daños específicos que pueden producirse sugieren la exploración de nuevas metodologías. En este contexto, el presente trabajo analiza la utilidad de técnicas de Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático (IA-ML) como herramientas complementarias para la toma de decisiones en la Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet) (Gaztelumendi et al., 2016b, 2024a).

Este trabajo pretende sondear la capacidad de diferentes modelos de aprendizaje supervisado para predecir categorías de impacto en el litoral vasco, en particular los derivados del riesgo marítimo-costero: impacto en costa (Egaña et al., 2020; Gaztelumendi et al., 2020). El proceso de decisión en esta tipología de riesgo actualmente está basado en la información del sistema de alerta temprana de Euskalmet y en el criterio técnico humano (Gaztelumendi et al., 2024a). Es decir, se fundamenta tanto en las estimaciones de rebases futuros que el sistema proporciona, como en diferentes consideraciones de contexto por parte del personal experto de Euskalmet y de la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) de la Viceconsejería de Protección Civil del Departamento de Seguridad del Gobierno Vasco (GV 2025; Gaztelumendi et al., 2012, 2016a).

Materiales y métodos

El objetivo de este trabajo es avanzar en el diseño e implementación de un sistema predictivo complementario de ayuda a la toma de decisiones en relación al impacto en costa, que sea operativo en las rutinas diarias de Euskalmet/DAEM (GV 2025, Gaztelumendi et al., 2022a). Para que este soporte de ayuda a la toma de decisiones basado en IA-ML sea real, la herramienta debe ser capaz de responder de forma robusta a varias preguntas: 1) ¿En qué medida se puede modelizar que una situación dada genere impacto? y 2) ¿En qué medida se puede modelizar la magnitud del impacto?. El objetivo es sentar las bases para transicionar desde el pronóstico oceanometeorológico hacia el pronóstico de impactos.

En ese contexto de aprendizaje automático, es necesario disponer de un conjunto de datos que contenga variables objetivo (métricas de impacto) y datos de precursores (variables físicas). Estas variables precursoras deben ser susceptibles de ser estimadas mediante los sistemas de observación y predicción operativa disponibles en Euskalmet (Gaztelumendi et al., 2022a,b, 2024b).

Datos de impacto: (1) avisos/alertas/alarmas validadas por riesgo marítimo-costero: impacto en costa emitidas por Euskalmet, en particular días de avisos (Gaztelumendi et al., 2020a) y (2) daños económicos registrados por el Consorcio de Compensación de Seguros, en particular las cuantías económicas abonadas y el número de partes totales diarios para toda la costa vasca (Gaztelumendi 2026, 2020b).

Datos físicos: La serie de precursores físicos oceanometeorológicos consiste en un conjunto de datos observados/estimados compuesto por los valores máximos diarios de altura de ola significativa (Hs), periodo pico (Tp), dirección (DirH), del nivel del mar total (NM), de los índices de rebose (I, Imax), de la energía del oleaje (E), de los residuos meteorológicos (res) y del tiempo que los rebases superan los umbrales amarillos/naranjas/rojos establecidos (GV 2025). Todos estos valores se estiman a partir de los datos subdiarios registrados en la costa vasca (Gaztelumendi et al., 2022a,b).

En este trabajo empleamos dos herramientas de IA-ML robustas y ampliamente extendidas basadas en árboles de decisión, como son el Random Forest (RF) y el Extreme Gradient Boosting (XGB). En este ejercicio prospectivo, estos modelos se entrenan tanto en modo de clasificación (experimentos 1 y 2) como de regresión (experimento 3).

RF: El modelo opera como clasificador mediante un ensamble por ensacado (bagging) de 250 árboles independientes, parametrizado con nodesize = 5 y mtry = 2 para balancear sesgo y varianza. Para la regresión cuantitativa, el algoritmo se configura en modo Extratrees (Extremely Randomized Trees), empleando un criterio de división basado en el Error Medio Absoluto (MAE / Pérdida L1) en lugar del estándar por mínimos cuadrados (MSE) y fijando un min.node.size = 3 para prevenir la hiperespecialización de las ramas.

XGB: Para controlar el sobreajuste secuencial ante eventos de baja prevalencia, el clasificador utiliza una función objetivo logística binaria (binary:logistic) bajo la pérdida de entropía cruzada (logloss). Sus hiperparámetros se fijaron en una tasa

[1c]*Euskalmet - Agencia Vasca de Meteorología, Portal de Foronda, 41, 01010 Vitoria-Gasteiz, Álava, Spain*
E-mail contact: s-gaztelumendi@euskalmet.eus

de aprendizaje moderada (eta = 0.1), profundidad máxima de 4 niveles (max_depth = 4), submuestreo por filas y columnas del 80% (subsample = 0.8, colsample_bytree = 0.8) y un límite estricto de 40 iteraciones (nrounds = 40). En modo regresor, adopta la Función de Pérdida Actuarial de Tweedie (reg:tweedie, tweedie_variance_power = 1.35) para modelar simultáneamente la masa de ceros y los valores continuos positivos de impacto.

Para evaluar y comparar de forma honesta la capacidad predictiva de los algoritmos propuestos (RF, XGB), se aplica una técnica de Validación Cruzada de 5 Pliegues (5-Fold Cross-Validation) sobre la serie de días disponibles, la cual se divide aleatoriamente en 5 bloques independientes. En cada una de las 5 iteraciones, el algoritmo se entrena a ciegas utilizando exclusivamente el 80% de los datos (4 bloques), reservando el 20% restante (1 bloque) como un conjunto de test puro y aislado. El modelo genera predicciones sobre jornadas que jamás ha visto en su aprendizaje y el proceso se repite de forma cíclica hasta que todos los días han sido evaluados en el grupo de test.

En los experimentos de regresión las métricas operativas finales (POD, FAR, CSI y Accuracy) se calculan agrupando estas predicciones a ciegas contra el histórico real, garantizando un análisis transparente y libre de overfitting. Para el escenario de regresión (experimento 3), la validación de los modelos cuantitativos se fundamenta en tres métricas estadísticas estándar: el Coeficiente de Determinación (R^2), que evalúa la proporción de la varianza explicada por el modelo; la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), para penalizar los desvíos mayores en los impactos extremos; y el Error Medio Absoluto (MAE), como medida directa del error promedio en la magnitud de los daños.

Toda la preparación de datos, cálculo de métricas, manipulación de matrices, filtrado temporal de periodos, modelización, validación, graficado y preparación de tablas se realiza en el entorno R (R Core Team, 2026). Para el tratamiento de datos, depuración, pre y postproceso se emplean las herramientas de la suite tidyverse, como dplyr (Wickham et al., 2023). Para los modelos de IA-ML se emplean las librerías randomForest (Liaw y Wiener, 2002) y xgboost (Chen et al., 2024). Los conjuntos de datos se estructuraron de forma eficiente sobre la memoria RAM utilizando la librería de alto rendimiento data.table (Barrett et al., 2026). Las representaciones gráficas para facilitar el análisis (no se muestran aquí) se realizan en base a la librería ggplot2 (Wickham, 2016) junto con patchwork (Pedersen, 2024) para la composición de figuras.

Resultados y discusión

Experimento 1. Clasificación de avisos (sí/no)

Este experimento se lleva a cabo para analizar la capacidad de los algoritmos para clasificar de forma binaria si una jornada estará en riesgo de impacto, entiendido como si estará en aviso/alerta/alarma (SÍ/NO). En este caso se emplea la submuestra (2015–2024) que contiene un 7.02% de días con amarillos/naranjas/rojos emitidos y validados. Este indicador incluye afecciones menores en infraestructuras públicas (tramos amarillos) que no quedan registradas en el Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) al no afectar a propiedades privadas aseguradas.

Se implementaron en paralelo los algoritmos RF y XGB bajo cuatro configuraciones (Tabla 1): un modelo base con 7 variables precursoras (\(I, Imax, NM, Hs, Tp, E, res) sin optimización de umbral (0.50); un modelo con optimización automática de variables y umbrales; un criterio rígido heurístico tradicional (I>5.8 o Imax>7.0); y modelos forzados a 4 variables (I, NM, Hs, Tp) o 2 variables (Hs, Tp).

Los resultados (ver Tabla 1) demuestran que prescindir de los índices de rebase y de la marea colapsa el rendimiento del RF Forzado (Hs, Tp) a un Éxito Crítico (CSI) del 27.54%, debido a una caída en la detección (POD = 34.55%) y un aumento de la Tasa de Falsa Alarma (FAR = 42.42%). Esto evidencia que las variables de oleaje solas no caracterizan los impactos costeros. El RF Base (7 var - 0.50) muestra un comportamiento defensivo (FAR = 13.95%, POD = 67.27%, CSI = 60.66%). En cambio, el XGB Base (7 var - 0.50), arrastrado por el parámetro "scaleposweight", sufre un sobreajuste masivo: registra la mayor POD (90.91%) pero dispara la falsa alarma (FAR = 64.79%), hundiendo el CSI al 34.01%.

Al restringir el espacio dimensional (principio de parsimonia), el RF Forzado y el XGB Forzado convergen en métricas similares (CSI de 59.02% y 57.38%, respectivamente), logrando que XGB reduzca su FAR del 64.79% al 14.63%. Las variantes optimizadas superan al Criterio Tradicional de superación de umbral de rebase (CSI = 54.55%, FAR = 23.40%). El XGB Optimizado (3 var - 0.90) eleva su CSI al 58.73% (POD = 67.27%, FAR = 17.78%). El RF Optimizado (3 var - 0.55) resulta ser la mejor opción global: al integrar el índice de rebase, el nivel del mar y la energía del oleaje, alcanza el máximo rendimiento operativo con un CSI del 62.90% (POD = 70.91%, FAR = 15.22%).

Experimento 2. Clasificación de daños (sí/no)

Este experimento clasifica si una jornada registra partes de daños abonados por el CCS bajo la tipología de "Embate de mar" (2000–2024). La muestra consta de 9,132 observaciones diarias

Tabla 1. Tabla comparativa de capacidad predictiva con la serie diaria de impacto: avisos.

Métrica	Criterio Rígido (I >= 5.8 | Imax >= 7.0)	RF Base (7 var - 0.50)	RF Forzado (Hs, Tp - 0.50)	RF Forzado (I, NM, Hs, Tp - 0.50)	RF Optimizado (I, NM, Energy - 0.55)	XGB Base (7 var - 0.50)	XGB Forzado (I, NM, Hs, Tp - 0.50)	XGB Optimizado (I, NM, Energy - 0.90)
Exactitud (Accuracy)	95.90%	96.72%	94.12%	96.58%	**96.85%**	86.73%	96.44%	96.44%
Detección (POD)	65.45%	67.27%	34.55%	65.45%	**70.91%**	90.91%	63.64%	67.27%
Falsa Alarma (FAR)	23.40%	13.95%	42.42%	14.29%	**15.22%**	64.79%	14.63%	17.78%
Éxito Crítico (CSI)	54.55%	60.66%	27.54%	59.02%	**62.90%**	34.01%	57.38%	58.73%

con un desbalance extremo (solo 1.99% de días con impacto). Se aplicó una Validación Cruzada de 5 Pliegues (5-Fold CV) estratificada para las predicciones Out-of-Fold (OOF) globales y una optimización por Grid Search (umbrales de 0.05 a 0.95) orientada al CSI.

En la primera aproximación (escala diaria con variables físicas), los clasificadores arrojaron métricas inaplicables debido a la asincronía en el registro del CCS y al solapamiento físico de días meteorológicamente análogos sin daños: RF OOF obtuvo 45 aciertos (Hits) y 33 Falsas Alarmas (FA); XGB obtuvo 65 Hits y 93 FA. Las FAR resultaron inviables (42.31% y 58.86%) con un CSI inferior al 31%.

La segunda aproximación agrupó los días con daños próximos en episodios (separación < 48 horas) calculando los máximos de los precursores, lo que generó 77 episodios con daños y 8,579 días aislados sin daños. El rendimiento continuó fallando (CSI máximo de 35.87% en RF y 30.10% en XGB, perdiendo entre 44 y 46 episodios con daños) debido al desplome de la prevalencia al 0.89% (77/8,656).

En la tercera aproximación se aplica un filtro de severidad socioeconómica mediante un análisis multiumbral (0, 5, 10, 15, 20, 50, 100 partes por episodio) para purificar la clase positiva. Al aislar los desastres mayores (Tabla 2), la prevalencia disminuyó pero la señal hidrodinámica se volvió consistente. Al incorporar una penalización asimétrica de costes en el bucle 5-Fold CV OOF, los árboles estabilizaron sus fronteras y redujeron las falsas alarmas a cero, alcanzando picos de CSI del 58.33% y 60.00%.

Experimento 3. Regresión de daños (euros, partes)

Este experimento aborda la predicción cuantitativa del volumen de partes y del coste económico. Para mitigar la asimetría extrema de los datos reales, se aplicó la transformación log1p sobre las variables objetivo, estabilizando la varianza sin alterar el cero absoluto.

El experimento de modelización se estructura en cinco fases consecutivas:

Fase 1 (Escala diaria natural): Evaluada sobre las 9,132 observaciones con las 7 variables líderes, resultó en un colapso generalizado con un Coefficiente de Determinación (R2) inferior al 10% y RMSE inasumibles.

Fase 2 (Escala de episodios): El desbalance de la muestra (99.11% de ceros) limitó las funciones de pérdida de mínimos cuadrados, estancando el \(R2) de partes en un 16.00% (RF) con un RMSE económico superior a los 200,000 €.

Fase 3 (Subconjunto de 77 episodios con siniestralidad): En escala real las métricas reflejaron un (R2 = 16.30%) (RMSE de 76 partes y MAE de 17 partes en RF). El bajo rendimiento se debió al efecto palanca de valores atípicos (Leverage Outliers): la coexistencia de 10 temporales medios-graves (10–141 partes) junto con dos megatemporales extraordinarios (>398 y >614 reclamaciones en 2008 y 2014) penalizó desproporcionadamente la función de mínimos cuadrados, demostrando la inviabilidad algebraica de calcular el (R2) en escala real.

Fase 4 (Escala logarítmica transformando la varianza): Al calcular el R2 sobre la escala estabilizada log1p analizando diferentes subconjuntos de precursores (Tabla 3), los resultados OOF se consolidaron. El algoritmo RF con 11 variables precursoras (C8) alcanzó un R2 del 54.27% en partes y un 46.25% en euros.

Fase 5 (Validación en escenario real): Los algoritmos se entrenaron sobre el universo completo de los 8,656 episodios (con y sin daños). Revirtiendo las predicciones mediante la mediana actuarial directa (expm1), se extrajo una matriz multinivel cruzando el registro histórico frente a las estimaciones ciegas OOF generadas pliegue a pliegue (no mostrado aquí)

Tabla 2. Análisis de sensibilidad y métricas Out-of-Fold (OOF) globales obtenidas aplicadas a episodios.

	I, NM, Energy								**Hs, Tp, I, Imax, NM, res, Energy**						
Criterio de Corte	**Episodios Daño**	**Umbral Óptimo**	**POD**	**FAR**	**CSI**	**Hits**	**FA**	**Misses**	**Umbral Óptimo**	**POD**	**FAR**	**CSI**	**Hits**	**FA**	**Misses**
1 Parte	77	0.80	29.87%	36.11%	**25.56%**	23	13	54	0.85	27.27%	8.70%	**26.58%**	21	2	56
5 Partes	21	0.70	47.62%	37.50%	**37.04%**	10	6	11	0.65	38.10%	38.46%	**30.77%**	8	5	13
10 Partes	12	0.70	58.33%	12.50%	**53.85%**	7	1	5	0.65	58.33%	22.22%	**50.00%**	7	2	5
15 Partes	11	0.70	63.64%	12.50%	**58.33%**	7	1	4	0.55	63.64%	22.22%	**53.85%**	7	2	4
20 Partes	10	0.65	60.00%	25.00%	**50.00%**	6	2	4	0.75	60.00%	0.00%	**60.00%**	6	0	4
50 Partes	7	0.65	42.86%	40.00%	**33.33%**	3	2	4	0.70	42.86%	25.00%	**37.50%**	3	1	4

Tabla 3. Sensibilidad de los algoritmos RF y XGB para estimación de Partes y euros frente a subconjuntos de variables precursoras (R^2 OOF Global).

Algoritmo)	**Métrica de Ajuste (OOF)**	(C1)Hs, Tp	(C2) Hs, Tp, NM, res	(C3) I, Imax	(C4) I, NM, Energy	(C5)I, Imax, NM, Energy	(C6) Hs, Tp, I, Imax, NM, res, Energy	(C7) C6 + sin_dir, cos_dir	(C8) C7 + Horas_I_Ama, Horas_I_Nar, Horas_I_Roj
RF	R^2 Volumen Siniestros *(Partes)*	31.10%	40.87%	44.17%	52.58%	48.76%	49.80%	51.47%	**54.27%**
	R^2 Impacto Económico *(Euros)*	26.60%	32.78%	39.33%	39.74%	39.52%	40.36%	44.15%	**46.25%**
XGB	R^2 Volumen Siniestros *(Partes)*	20.34%	45.46%	36.78%	47.90%	43.32%	47.08%	48.94%	**51.24%**
	R^2 Impacto Económico *(Euros)*	17.83%	26.20%	38.51%	38.01%	38.57%	35.66%	38.88%	**43.50%**

Conclusiones

Este estudio demuestra que, a pesar de no haber incluido información de exposición y vulnerabilidad, la integración complementaria de modelos de IA-ML (RF y XGB) con el sistema operativo de avisos de Euskalmet/DAEM puede fortalecer la toma de decisiones, aportando una capa predictiva sobre la conveniencia de emisión de avisos, la posibilidad de impacto, así como de la cuantía y extensión de los daños materiales esperables.

El Experimento 1 valida la capacidad de los ensamblados de árboles para parametrizar el riesgo por impacto en costa. Al integrar índices de rebase, marea y energía del oleaje, el modelo optimizado de Random Forest elevó el Índice de Éxito Crítico (CSI) al 62.90% y redujo la Tasa de Falsa Alarma (FAR) al 15.22%, demostrando que las variables de oleaje por si solas son insuficientes. Así mismo, la selección parsimoniosa de tres variables clave (I, NM, E) controló eficientemente la varianza y evitó el sobreajuste, explicando por sí sola el 52.58% de la varianza de los partes del CCS.

Respecto a los datos de siniestralidad, el solapamiento físico de los daños menores impide una clasificación binaria diaria eficiente. No obstante, aplicar filtros de severidad socioeconómica (≥ 10–20 partes) purifica la señal física de los desastres reales, estabilizando los modelos fuera de muestra con valores de CSI superiores al 53.85%. Metodológicamente, la escala de episodios (ventanas de fusión de 48 horas) resultó drásticamente superior a la escala diaria al absorber la asincronía en la tramitación del CCS.

Finalmente, la regresión actuarial sobre la escala logarítmica transformada (log1p) con 11 variables precursoras demostró ser la mejor aproximación cuantitativa. El Random Forest entrenado bajo el criterio del Error Medio Absoluto (MAE OOF) logró explicar el 54.27% del volumen de siniestros y el 46.25% del coste económico total, superando el efecto palanca de los valores atípicos extremados.

El esquema planteado a modo prospectivo presenta limitaciones importantes, destacando: la omisión de la vulnerabilidad costera, el sesgo de los datos del CCS (sin bienes públicos y con posible asincronía temporal) y la incapacidad intrínseca de los árboles para extrapolar daños sin precedentes históricos. Para solventar estas y otras carencias, se plantean diferentes líneas de trabajo futuro: (1) Desplegar una solución operativa de previsión de impactos integrada en las rutinas de Euskalmet. (2) Desagregar el modelo para evaluar tipologías específicas de riesgo (viviendas, vehículos, comercios, obra civil, etc.). (3) Testar otras técnicas de IA-ML como Redes Neuronales Recurrentes (RNN) y Máquinas de Vector de Soporte (SVM). (4) Probar modelos de clasificación por categorías ordinales de impacto (verde, amarillo, naranja, rojo). (5) Desarrollar metodologías específicas para modelar cuantitativamente el impacto leve en la zona de transición verde-amarilla. (6) Incorporar descriptores espaciales dinámicos de exposición y vulnerabilidad costera.

Referencias

Barrett, T., Dowle, M., Srinivasan, A., Gorecki, J., Chirico, M., Hocking, T., Schwendinger, B., & Krylov, I. (2026). data.table: Extension of data.frame. R package version 1.18.4. https://CRAN.R-project.org/package=data.table.

Chen, T., He, T., Benesty, M., Khotilovich, V., Tang, Y., Cho, H., Chen, K., Mitchell, R., Cano, I., Zhou, T., Li, M., Xie, J., Lin, M., Geng, Y., Li, Y., & Yuan, J. (2024). xgboost: Extreme Gradient Boosting. R package version 1.7.1. https://CRAN.R-project.org/package=xgboost.

Duan, N. (1983). Smearing Estimate: A Nonparametric Retransformation Method. Journal of the American Statistical Association, 78(381), 159-167.

Egaña, J., Gaztelumendi, S., (2020). Caracterización océano-meteorológica de eventos adversos por riesgo marítimo-costero: impacto en costa en la CAV. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1, p32-34).

Gaztelumendi, S. and Egaña J. (2026). Validación y análisis de avisos/alertas/alarmas por riesgo marítimo-costero: impacto en costa en Euskadi. UHINAK 2026 (en este volumen).

Gaztelumendi, S. and Aranda, J. A. (2025). Artificial Intelligence and Machine Learning at Basque Meteorology Agency, EMS Annual Meeting 2025, Ljubljana, Slovenia, 7–12 Sep 2025, EMS2025-523, https://doi.org/10.5194/ems2025-523, 2025.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., R. Gelpi, I., Gómez de Segura, J. D., Aranda, J. A. (2024a). El sistema de acción temprana frente al riesgo marítimo-costero en Euskalmet. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2024, 30(1), p52-55.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Castaño-Tierno, A., Liria, P., Gonzalez, M., Aranda, J. A. (2024b). El nivel del mar en la costa vasca: caracterización y casos de estudio. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2024, 30(1), p25-28.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Ruiz, R., Diaz de Arcaya, A., Moreno, J., Liria, P., González, M., Aranda, J.A. (2022a). La monitorización del riesgo marítimo-costero en Euskalmet. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2022, 28(2), p62-65.

Gaztelumendi, S., Liria, P., Egaña, J., del Campo, A., Gómez de Segura, J.D., González, M., Aranda, J.A. (2022b). La red océano-meteorológica del País Vasco como soporte a actividades operativas de Euskalmet. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2022, 28(2), p28-31. https://www.azti.es/wp-content/uploads/2026/01/RIM_28_2_baja-1.pdf

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Gelpi, I., Aranda, J. A. (2020a). Los avisos/alertas/alarmas por riesgo marítimo-costero en la CAV. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1), p62-65.

Gaztelumendi, S. (2020b). Caracterización de daños por embate de mar en las costas de Bizkaia y Gipuzkoa. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1, p35-38). https://www.azti.es/rim/wp-content/uploads/2020/11/RIM_27_1.pdf

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., and Aranda, J. A. (2018) Description of a coastal impact event in Basque Country: the 9 February 2016 case, Adv. Sci. Res., 15, 137–143, https://doi.org/10.5194/asr-15-137-2018.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., Gonzalez, M., Aranda, J. A., and Anitua, P. (2016a) The new Euskalmet coastal–maritime warning system, Adv. Sci. Res., 13, 91–96, https://doi.org/10.5194/asr-13-91-2016 .

Gaztelumendi, S., Orbe, I., Salazar, O., Lopez, A., Aranda, J. A., and Anitua, P. (2016b). Delivery and communication of severe weather events in Basque Country: the Euskalmet case, Adv. Sci. Res., 13, 87–90, https://doi.org/10.5194/asr-13-87-2016.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Otxoa-de-Alda, K., Hernandez, R., Aranda, J., and Anitua, P. (2012) An overview of a regional meteorology warning system, Adv. Sci. Res., 8, 157–166, https://doi.org/10.5194/asr-8-157-2012.

GV (2025). Protocolo de predicción, vigilancia y actuación ante fenómenos meteorológicos adversos. Procedimiento DAEM. PE-005

V-14. Departamento de seguridad.
Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. R News, 2(3), 18-22. https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/.
Liria, P., Epelde, I., Gaztelumendi, S., Egaña, J., Gelpi, I. R., Carreño, S., Gonzalez, M., and Aranda, J. (2014). Los temporales de enero, febrero y marzo de 2014 dentro del contexto del clima marino de la costa vasca, Efectos sobre las infraestructuras costeras y las playas, XVI Congreso y Exposición ECOPLAYAS, Bilbao, 2014.
Pedersen, T. L. (2024). patchwork: The Composer of Plots. R package version 1.2.0. r-project.org.
R Core Team (2026). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.
Wickham, H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. tidyverse.org.
Wickham, H., François, M., Bryan, J., & Barrett, M. (2023). dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.1.4. r-project.org.

Agradecimientos - Nuestro más profundo agradecimiento a todas las instituciones que financian la red instrumental y los servicios operativos en la Comunidad Autónoma de Euskadi, en particular a la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Departamento de Seguridad del Gobierno Vasco. Asimismo, manifestamos nuestro sincero agradecimiento al Consorcio de Compensación de Seguros (CCS) por facilitar los registros históricos de siniestralidad. Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo y cofinanciación de la Dirección de Patrimonio Natural y Adaptación al Cambio Climático (Viceconsejería de Medio Ambiente) y a la DAEM (Viceconsejería de Protección Civil) del Gobierno Vasco.

Efectos del cambio climático en el oleaje del sudeste del Golfo de Vizcaya: dirección y magnitud

López, Isabel[1] **y Pagán, José I.**[1]

Palabras clave: Oleaje, Tendencias, Cantábrico, Temporales, Direccionalidad, Cambio climático

Introducción

El estudio de la variabilidad del clima marítimo a largo plazo es esencial para garantizar la seguridad de las infraestructuras portuarias y el desarrollo de planes eficientes para la gestión integrada del litoral (Masselink et al. 2016). La fachada cantábrica se caracteriza por una alta exposición a los sistemas de bajas presiones procedentes del Atlántico Norte, lo que la convierte en una de las regiones costeras más dinámicas y vulnerables de la Península Ibérica (Castelle et al. 2018). En el contexto actual de cambio climático, resulta crítico disponer de una caracterización precisa que determine cómo están cambiando los parámetros de diseño del oleaje en este sector costero.

Las variaciones en la magnitud y procedencia de la energía del oleaje no solo condicionan la estabilidad de los diques y estructuras de defensa, sino que alteran directamente los balances sedimentarios de las playas. Este trabajo se enfoca en analizar de manera exhaustiva las tendencias climáticas del oleaje en el sudeste del Golfo de Vizcaya empleando series de datos de alta resolución temporal que abarcan casi siete décadas. El objetivo primordial es cuantificar las modificaciones tanto en condiciones medias como en los eventos extremos de temporal, proporcionando una base científica sólida para las políticas de adaptación locales.

Materiales y métodos

Para la realización de este análisis se ha utilizado la base de datos SIMAR, facilitada por Puertos del Estado. Se han seleccionado y procesado de forma sistemática las series temporales de oleaje correspondientes a un total de 148 nodos de la red SIMAR distribuidos estratégicamente en el sudeste del Golfo de Vizcaya. Los registros analizados constan de datos horarios continuos que cubren un periodo histórico y reciente de 68 años, abarcando con precisión desde el 1 de enero de 1958 hasta el 31 de diciembre de 2025.

A partir de esta ingente cantidad de datos horarios, se calcularon para cada uno de los 148 nodos las tendencias de cambio a largo plazo para la altura de ola significativa (H_s) y la dirección media de procedencia (D_m). Para determinar el comportamiento del oleaje en diferentes regímenes energéticos, el estudio analiza específicamente tres umbrales estadísticos de H_s:

$H_{s,50\%}$ (mediana): Indicativa de las condiciones medias o habituales del régimen de oleaje.

$H_{s,95\%}$ (percentil 95): Representativa de condiciones de alta energía habituales en la región.

$H_{s,12}$: Altura de ola que es superada únicamente 12 horas al año, parámetro crítico que define las condiciones extremas de los temporales marítimos.

H_{max}: Valor más alto registrado, se utiliza como indicador del riesgo catastrófico e intensidad de las borrascas más violentas.

Complementariamente, se desglosó el incremento de la altura de ola máxima (H_{max}) por sectores direccionales elementales: Norte (N), Norte-Noroeste (NNW), Noroeste (NW), Oeste-Noroeste (WNW) y Oeste (W). Para el análisis de la dirección media, se empleó la convención matemática en la que los valores positivos en la variación direccional indican un giro físico de la procedencia del oleaje desde el Oeste hacia el Norte (giro a la derecha o dextrógiro).

A partir de las diferentes alturas de ola calculadas, se analizó la tendencia de los datos a lo largo del periodo 1958-2025 mediante:

Ajuste Lineal: Se obtuvo la ecuación de la recta de regresión y el coeficiente de ajuste de Pearson (r) para cuantificar la fuerza y dirección de la tendencia.

Cálculo del Incremento/Decremento: Una vez obtenida la curva de ajuste, se determinó el incremento (o decremento) de cada altura de ola como la diferencia entre el valor para el año 1958 y el valor obtenido de la ecuación para el año 2025. Esto proyecta el cambio acumulado en el parámetro de oleaje a lo largo de 68 años.

Los resultados de tendencia (incremento o decremento) se visualizaron mediante mapas de cambio. Para la interpolación de los datos de se empleó el método del vecino más próximo para producir una cuadrícula de valores interpolados a partir de la cual se crea una superficie continua (mapa). La generación de estas superficies se realizó mediante la extensión 3D Analyst del software ArcGIS. Los colores indican la magnitud del cambio (incremento o decremento) en metros para las alturas de olas y en grados para la dirección.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos muestran una clara e inequívoca intensificación de los eventos marítimos más energéticos en la región de estudio. El incremento medio generalizado de la

[1]*Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, 03690 San Vicente del Raspeig – Alicante*
E-mail: lopez.ubeda@ua.es

variable H_{max} se sitúa en 1.10 m a lo largo del periodo analizado (1958-2025). Sin embargo, este crecimiento es marcadamente desigual si se atiende a la procedencia sectorial del oleaje (Figura 1). El sector Oeste-Noroeste (WNW) registra el máximo aumento absoluto, alcanzando un crecimiento de hasta 1.70 m, seguido en magnitud por la componente puramente Oeste (W) con 1.41 m, y un incremento de 1.36 m en el resto de componentes. Por el contrario, las componentes procedentes del Norte muestran un comportamiento significativamente más estable en el tiempo.

La comparación entre los tres umbrales de altura de ola significativa revela un preocupante fenómeno de "agudización" del régimen de oleaje en el sudeste del Golfo de Vizcaya. Mientras que la mediana $H_{s,50\%}$ ha experimentado un incremento moderado de tan solo 0.27 m, las condiciones extremas representadas por el parámetro $H_{s,12}$ han sufrido una acentuación drástica, con un aumento observado de 1.08 m. Este comportamiento diferencial (Figura 2) demuestra que el cambio climático no está afectando al régimen medio de la misma forma en que está agravando los eventos extremos.

Con respecto a la dinámica direccional, se ha detectado una tendencia generalizada hacia un giro positivo medio de +3.48°. De acuerdo con la convención adoptada, este valor positivo confirma un cambio de las procedencias predominantes desde el Oeste hacia el Norte. Este desplazamiento en la dirección de ataque del oleaje sugiere que los temporales actuales no solo son significativamente más intensos en magnitud, sino que están incidiendo sobre la costa con un ángulo mucho más ortogonal (perpendicular al perfil litoral habitual).

Este patrón de rotación y aumento de energía tiene implicaciones directas en la vulnerabilidad de la costa. Al atacar los frentes de onda de manera más perpendicular, se incrementa de forma notable la tasa de rebase en los diques portuarios y obras de defensa. Asimismo, altera los flujos de transporte longitudinal de sedimentos, lo que tiene el potencial directo de desestabilizar el equilibrio geomorfológico secular de las playas encajadas de la costa vasco-cantábrica, variando de forma severa las tasas de transporte y modificando la fisonomía de zonas de abrigo históricas.

Conclusiones

La serie histórica y predictiva analizada (1958-2025) confirma una alteración sustancial y estructural en el comportamiento del clima marítimo de la fachada cantábrica. Las principales conclusiones se resumen en los siguientes puntos:

El incremento del parámetro de diseño extremo $H_{s,12}$ (1.08 m) cuadruplica el crecimiento registrado en la mediana $H_{s,50\%}$ (0.27 m), ratificando un proceso claro de agudización climática del oleaje.

Los temporales más severos muestran un aumento asimétrico, concentrando los mayores incrementos de la altura de ola máxima H_{max} en el sector Oeste-Noroeste (WNW) con

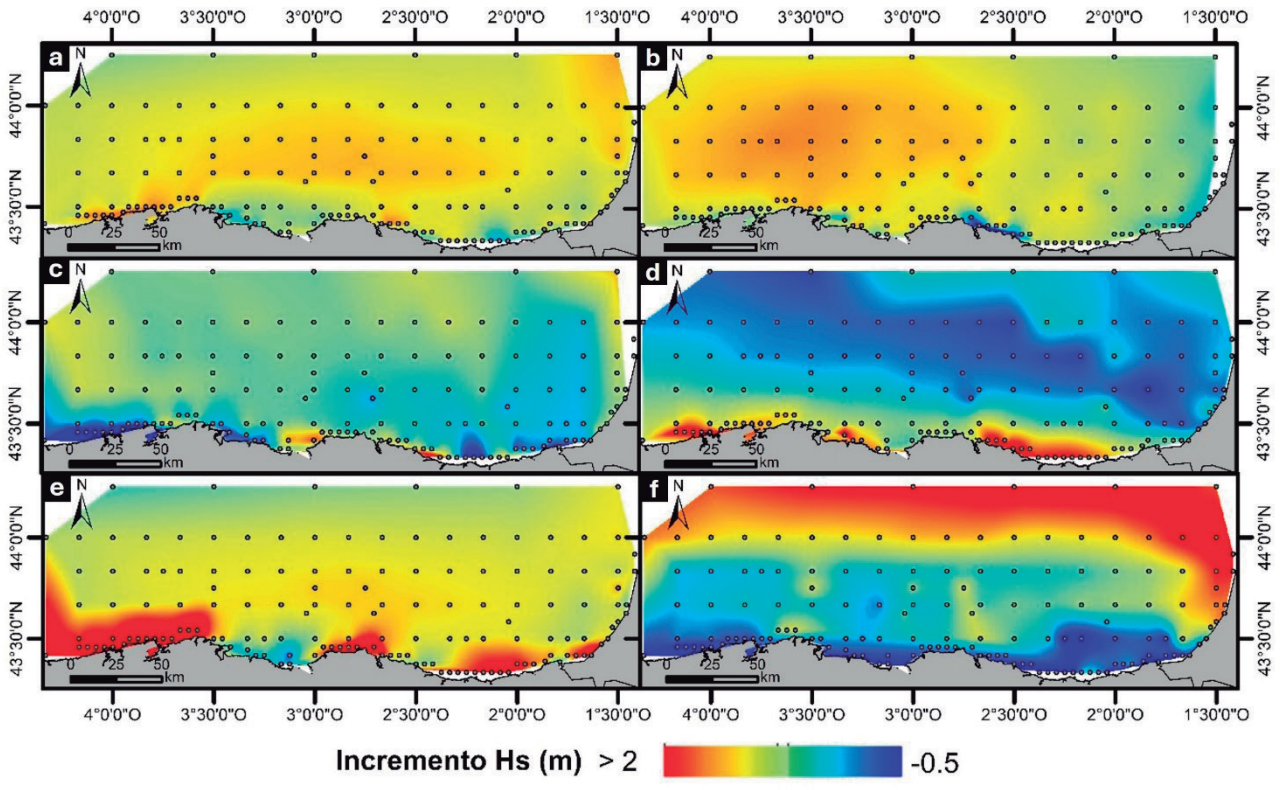


Figura 1. Variación espacial de la altura de ola ***máxima***. (a) Incremento global de H_{max}; (b) Incremento de H_{max} en el sector N. (c) Incremento de H_{max} en el sector NNW. (d) Incremento de H_{max} en el sector NW. (e) Incremento de H_{max} en el sector WNW. (f) Incremento de H_{max} en el sector W.

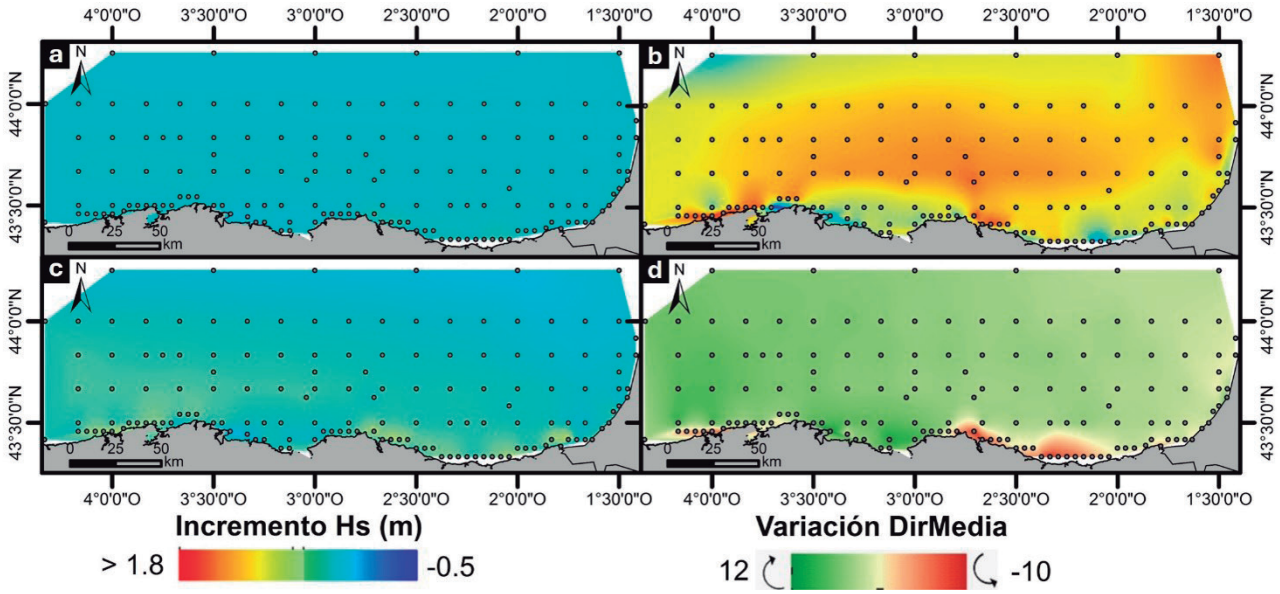


Figura 2. Variación espacial de los parámetros de oleaje en el SE del Golfo de Vizcaya (1958-2025). (a) Incremento moderado de la mediana $H_{s,50\%}$; (b) acentuación de las condiciones extremas $H_{s,12}$; (c) acentuación de las condiciones extremas $H_{s,95\%}$. (d) Variación de la dirección media del oleaje (D_m). Los mapas (a, b y c) emplean una escala común.

registros de hasta 1.70 m.

Existe una rotación dextrógira probada en la dirección media del oleaje (+3.48° hacia el Norte). Esto implica que las olas golpean el litoral con mayor perpendicularidad, lo que eleva el riesgo de inundación y erosión costera.

Los resultados obtenidos fuerzan la necesidad de revisar los cálculos clásicos de rebase en diques e infraestructuras portuarias del Golfo de Vizcaya, los cuales deben actualizarse integrando estos nuevos escenarios de oleaje más enérgico, severo y "norteado".

Referencias

Castelle, B., Dodet, G., Masselink, G., Scott and T. 2018. Increased Winter-Mean Wave Height, Variability, and Periodicity in the Northeast Atlantic Over 1949–2017. Geophysical Research Letters 45 (8): 3586-3596.

Masselink, G., Scott, T., Poate, T., Russell, P., Davidson, M. and Conley, D. 2016. The extreme 2013/2014 winter storms: hydrodynamic forcing and coastal response along the southwest coast of England. Earth Surface Processes and Landforms 41 (3): 378-391.

Reconocimientos – Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el proyecto CIGE/2024/56 financiado por la Generalitat Valenciana.

Entre la presión urbana y la resiliencia natural: vulnerabilidad y exposición del litoral de la Comunidad Valenciana

Pagán, José Ignacio[1], Bañón, Luis[1], López, Isabel[1]

Palabras clave Vulnerabilidad costera, CVI, Gestión del litoral, QGIS, Exposición antrópica, Usos del suelo.

Introducción

Las regiones costeras a nivel mundial están en primera línea de exposición ante los efectos del cambio climático global. El ascenso acelerado del nivel del mar, junto con el incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos meteorológicos extremos, representa una amenaza crítica para la estabilidad socioeconómica y ecológica del litoral. En el contexto del mar Mediterráneo occidental, esta problemática se ve severamente agravada por una presión antrópica histórica y sostenida, caracterizada por un modelo de desarrollo turístico e inmobiliario que ha alterado de forma irreversible la dinámica sedimentaria natural (Ortiz et al., 2024).

La evaluación del riesgo costero requiere herramientas metodológicas precisas que no solo consideren variables físicas y oceanográficas tradicionales, sino que incorporen también la resiliencia intrínseca de los sistemas naturales y el grado de exposición de las infraestructuras humanas. Históricamente, los Índices de Vulnerabilidad Costera (CVI, por sus siglas en inglés) han omitido variables críticas asociadas a la naturaleza intrínseca de los depósitos sedimentarios, limitando su capacidad predictiva a largo plazo (López et al. 2026). La durabilidad del sedimento, entendida como su resistencia al desgaste mecánico y químico ante la acción continua del oleaje, juega un papel determinante en la resiliencia de la playa.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar exhaustivamente 253 km de playas de la Comunidad Valenciana mediante la implementación, de forma pionera, de un Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) ampliado. Este nuevo enfoque integra parámetros avanzados de durabilidad sedimentaria junto con indicadores de peligro oceanográfico y resiliencia ecosistémica. Complementariamente, se analiza la exposición del territorio mediante una caracterización detallada de los usos del suelo en franjas paralelas a la costa. El fin último es proveer un diagnóstico geoespacial de alta resolución que sirva como base científica para la planificación territorial y el diseño de estrategias de adaptación eficaces.

[1] Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Carretera San Vicente del Raspeig s/n, San Vicente del Raspeig - Alicante
E-mail: jipagan@ua.es

Materiales y métodos

El marco espacial del estudio abarca la totalidad del litoral arenoso de la Comunidad Valenciana, cubriendo una longitud de 253 km distribuida entre las provincias de Castellón, Valencia y Alicante. Para garantizar una resolución espacial óptima y capturar la variabilidad geomorfológica local, la línea de costa se dividió sistemáticamente en un total de 1174 tramos de 200 m de longitud. El CVI ampliado se estructuró a partir de la integración ponderada de diez indicadores clave, clasificados en tres dimensiones analíticas fundamentales independientes: Vulnerabilidad Física, Peligro Oceanográfico y Resiliencia Ecosistémica. La gran innovación de esta propuesta radica en la dimensión de vulnerabilidad, donde se introduce la calidad y durabilidad del sedimento (resistencia mineralógica y desgaste) junto a métricas convencionales como el ancho de la playa emergida, las tasas históricas de erosión/acreción, el ancho del cordón dunar y el tamaño medio del sedimento (D_{50}).

Estos indicadores se han obtenido siguiendo la metodología descrita por López et al. (2026) a partir de diversas fuentes de datos, como ortofotografías RGBI de alta resolución (25 cm/pixel) facilitadas por el Institut Cartogràfic Valencià (ICV), datos de oleaje de modelos numéricos SIMAR y Red de Boyas de Puertos del Estado, Ecocartografías del MITECO , así como muestras de sedimento y perfiles topográficos realizados por los investigadores.

Para la evaluación detallada de la exposición socioeconómica, se procesaron los datos del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España de Alta Resolución (SIOSE AR). Los usos del suelo se reclasificaron estrictamente en 12 categorías homogeneizadas (residencial, comercial, industrial, agrícola, espacios naturales y viales, entre otros). El análisis espacial de la exposición se ejecutó mediante un análisis de bandas multi-distancia, generando buffers concéntricos de 50 m de ancho, abarcando desde la línea de costa hasta una distancia de 500 m hacia el interior del territorio, con diez bandas analíticas en total (Figura 1). La integración e interconexión geoespacial de todas las variables ambientales, morfométricas y socioeconómicas se llevó a cabo utilizando el sistema de información geográfica QGIS (versión 3.44.6). Los análisis geoespaciales se automatizaron mediante scripts y modelos del entorno de procesamiento de QGIS, consolidando toda la información en una base de datos GeoPackage estructurada. El índice final de vulnerabilidad se tipificó en una escala cualitativa y cuantitativa de 1 (Muy Baja) a 5 (Muy Alta) mediante álgebra de mapas y matrices de decisión jerárquica.

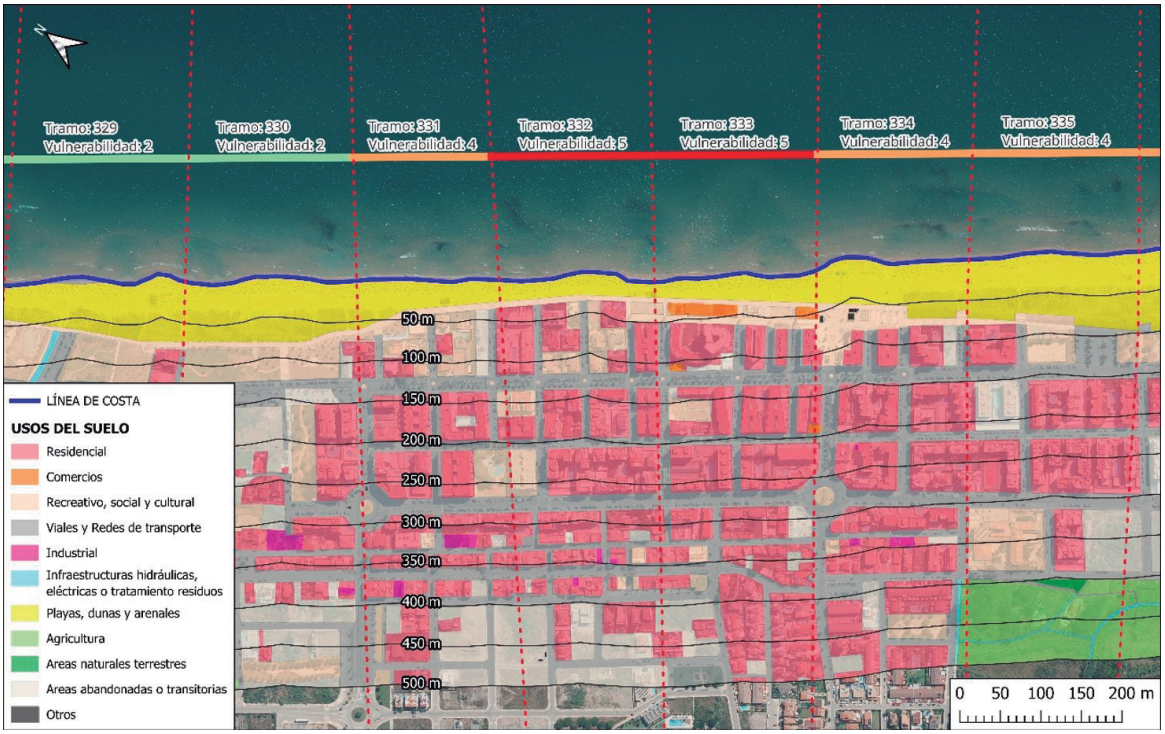


Figura 1. Ejemplo de Vulnerabilidad costera y usos del suelo por tramos.

Resultados y discusión

El análisis geoespacial integrado, del CVI ampliado y las coberturas de uso del suelo, mostró *una correlación espacial directa y preocupante entre los tramos costeros clasificados con alta o muy alta vulnerabilidad (valores de 4 y 5) y la densidad de la ocupación antrópica que se expande de manera sostenida hacia el interior del territorio. Por el contrario, aquellos tramos costeros caracterizados por una baja vulnerabilidad intrínseca suelen coincidir con zonas donde el espacio litoral se encuentra respaldado y protegido por ecosistemas naturales intactos o áreas de explotación agrícola tradicional de baja intensidad, que actúan como zonas de amortiguación natural ante los impactos marinos.*

La ocupación del suelo y la presión antrópica siguen una marcada lógica de distribución en bandas paralelas a la costa, aunque el análisis detallado revela asimetrías y divergencias provinciales muy profundas debido a los diferentes modelos de desarrollo urbanístico implementados en el territorio valenciano durante las últimas décadas. En la primera banda crítica, correspondiente a los primeros 50 m desde la línea de costa, predomina a nivel general la categoría de "Playas, dunas y arenales". Sin embargo, el comportamiento por provincias es radicalmente dispar. La provincia de Valencia destaca de forma sobresaliente al presentar un sistema dunar y de arenales que ocupa el 98,1% de esta primera franja, manifestando un excelente estado de conservación derivado de figuras de protección ambiental severas (como el Parque Natural de la Albufera). En claro contraste, las provincias de Alicante y Castellón mantienen niveles de protección o conservación natural (playas y áreas seminaturales libres de edificación) sensiblemente menores, alcanzando el 83,7% y el 73,0%, respectivamente.

Este escudo protector desaparece por completo en las zonas clasificadas como de alta o muy alta vulnerabilidad. En la provincia de Alicante, las superficies destinadas a usos antrópicos invasivos (principalmente edificaciones residenciales, paseos marítimos y viales) en los primeros 50 m alcanzan un alarmante 64% en los tramos de mayor CVI. Esta ocupación agresiva se intensifica y consolida al avanzar hacia el interior, aumentando hasta representar el 74% en las distancias críticas situadas entre los 100 y 300 m. Un modelo lineal similar, basado en segundas líneas de playa y desarrollos industriales o portuarios, se repite en la provincia de Castellón. Por el contrario, la provincia de Valencia presenta un patrón diferente: en estas franjas críticas predominan las infraestructuras de transporte y las explotaciones agrícolas tradicionales, lo que reduce la exposición de los núcleos urbanos densos. De este modo, Alicante es la provincia con mayor densidad urbana y artificialización en sus franjas costeras más próximas. Este fenómeno destaca en municipios de turismo masivo como Dénia o Benidorm. En estos municipios, el entramado urbano (viviendas de alta densidad, complejos recreativos y redes viarias) en los primeros 50 m ejerce una presión antrópica directa sobre el dominio público marítimo-terrestre. Esta configuración aumenta significativamente la exposición social y económica ante la erosión costera crónica y las inundaciones, tanto las ocasionadas por lluvias torrenciales como por la subida del nivel del mar.

A partir de los 300 m hacia el interior, la presión urbana muestra dinámicas diferenciadas por provincias. En Valencia y Castellón,

el suelo urbano disminuye progresivamente ante la llanura aluvial y los cultivos intensivos de cítricos y huerta. Por el contrario, en Alicante se mantiene un crecimiento urbano continuo y difuso hacia el interior, favorecido por una topografía accidentada que ha propiciado la proliferación de urbanizaciones de baja densidad y viviendas unifamiliares. En resumen, el diagnóstico territorial indica que las zonas costeras físicamente más vulnerables de Alicante y Castellón coinciden con las áreas más urbanizadas, lo que genera escenarios de riesgo crítico. Valencia, en cambio, presenta una ordenación basada en la amortiguación agrícola y natural en sus tramos más sensibles.

Conclusiones

La integración del Índice de Vulnerabilidad Costera (CVI) ampliado junto con el análisis geoespacial de los usos del suelo por franjas ha demostrado ser una metodología robusta de alta resolución diagnóstica. La inclusión pionera de variables ligadas a la durabilidad y mineralogía de los sedimentos permite refinar significativamente los mapas de riesgo tradicionales, evitando falsos positivos de estabilidad en playas compuestas por materiales con baja resistencia mecánica ante la acción climática. El diagnóstico del litoral de la Comunidad Valenciana evidencia la necesidad de transicionar desde una gestión costera reactiva, basada en la aportación artificial recurrente de arena o en defensas rígidas, hacia políticas de ordenación territorial proactivas y adaptativas. La alta exposición de los primeros 50-300 m de la costa alicantina exige aplicar normativas estrictas de restricción de usos, fomentar soluciones basadas en la naturaleza (como la restauración de dunas y la protección de praderas de fanerógamas marinas) y, en los escenarios urbanos más críticos, planificar y ejecutar las actuaciones para la defensa de su frente litoral.

Finalmente, la flexibilidad de la estructura geoespacial desarrollada, basada en software libre (QGIS) y formatos de datos abiertos e interoperables (GeoPackage), dota a esta herramienta de una excelente transferibilidad técnica. Este marco de trabajo es reproducible y escalable a otras regiones costeras mediterráneas y globales, lo que proporciona a los gestores públicos una herramienta científica unificada para optimizar la planificación territorial y la gestión de riesgos a diferentes escalas, desde la nacional a municipal.

Referencias

López, I., Ortiz, P., and Pagán, J. I. 2026. Sediment Quality for Enhanced CVI Assessment and Environmental Management in Mediterranean Micro-Tidal Coasts. Sustainability, 18(6), 20

Ortiz, P., López, I., and Pagán, J. I. 2024. Assessment of Beach Erosion Vulnerability in the Province of Valencia, Spain. Journal of Marine Science and Engineering, 12(12).

Reconocimientos – Esta investigación ha sido financiada por la Universidad de Alicante [GRE23-01A] y por la Generalitat Valenciana [CIGE/2024/56].

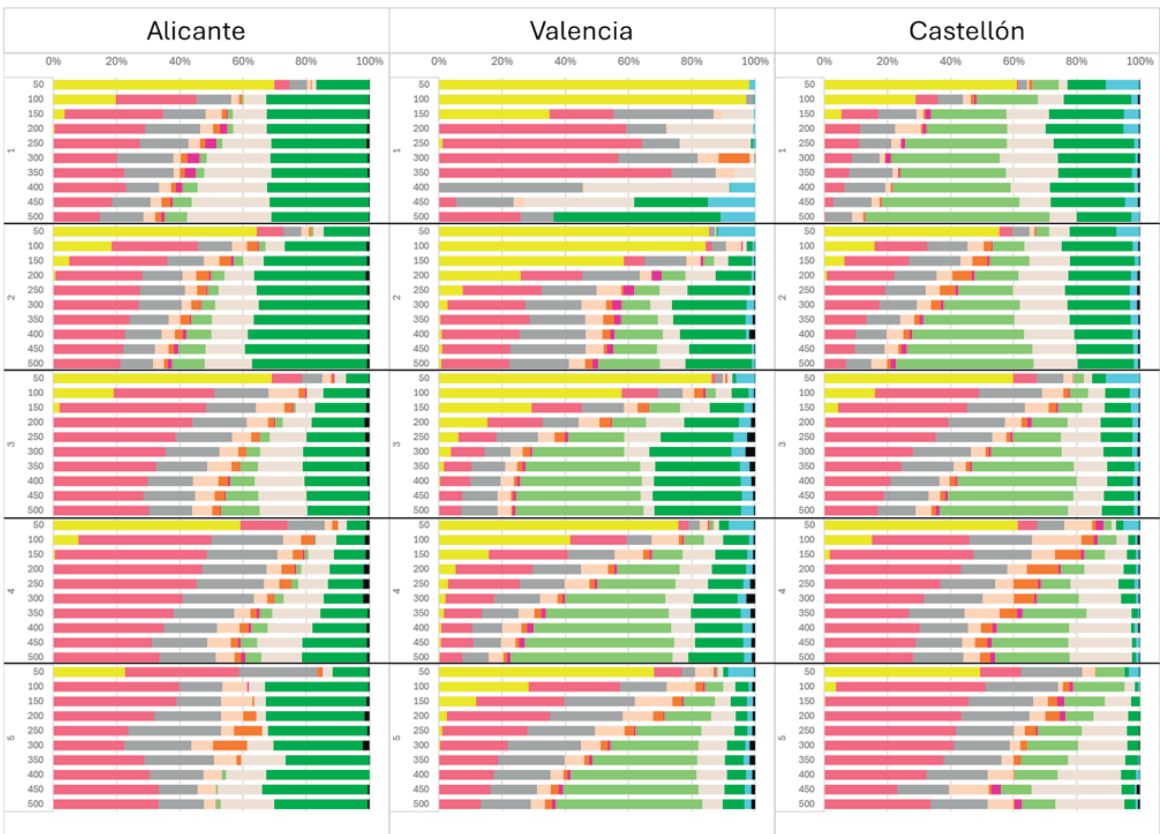


Figura 2. Porcentaje de usos del suelo por distancia a la costa y vulnerabilidad (1 – Muy baja a 5 – Muy alta) para cada provincia estudiada.

Revisión y actualización de los niveles máximos del mar en los estuarios de la Comunidad Autónoma del País Vasco y proyecciones bajo escenarios de cambio climático

Liria Pedro[1], Santiago Iñaki[1], Garnier Roland[1], Epelde Irati[1], Santos Ruben[2], Varela Carmen[2], Abalia Aritz[1], del Campo Andrea[1], González Manuel[1]

Palabras clave: inundación costera, estuario, oleaje, marea, cambio climático

Introducción

La Directiva 2007/60/CE sobre evaluación y gestión de los riesgos de inundación establece la necesidad de elaborar cartografía de peligrosidad y riesgo de inundación, que es la base para la aplicación de la normativa de prevención que establece la normativa en materia de aguas. En el caso de los estuarios, el riesgo de inundación resulta de la combinación de avenidas fluviales con procesos oceánicos que elevan la lámina de agua respecto al nivel medio del mar.

Durante la última década se ha observado un aumento progresivo del nivel medio del mar en la fachada cantábrica, asociado principalmente a la expansión térmica del océano y a la pérdida de masa de glaciares y mantos de hielo. Paralelamente, varios episodios recientes de inundación en localidades como Erandio y Hondarribia durante 2024 han puesto de manifiesto la necesidad de actualizar los niveles de referencia empleados en los estudios de peligrosidad.

En este contexto, el objetivo principal del estudio fue revisar y actualizar los niveles máximos del mar en los estuarios de la CAPV, incorporar la contribución conjunta de marea y oleaje y evaluar cómo estos niveles evolucionarán bajo distintos escenarios de cambio climático.

Materiales y métodos

El análisis de la evolucion del nivel medio del mar se ha basado en los registros del mareógrafo del puerto de Bilbao perteneciente a la red de Puertos del Estado y el mareógrafo perteneciente a la estación geodinámica de Pasaia, fruto de una colaboración entre Aranzadi, Azti y la Diputación Foral de Gipuzkoa. Estos registros han sido seleccionados por disponer de las series más largas y mejor referenciadas de la región. Asimismo, al encontrarse cada una prácticamente en un extremo de la línea de la costa vasca, su comparación directa en el tramo coincidente de las series, permite contrastar las posibles diferencias espaciales a escala del territorio. Para ambas estaciones se utilizaron datos medios cada cinco minutos y se eliminaron las variaciones estacionales para analizar exclusivamente las oscilaciones interanuales del nivel medio del mar.

Los niveles extremos de marea se evaluaron mediante técnicas de análisis de valores extremos aplicadas a las series mareográficas corregidas respecto a la tendencia del nivel medio del mar. Este procedimiento permitió separar los efectos de la variación secular del nivel medio de las fluctuaciones extremas asociadas a la dinámica mareal y meteorológica.

Para evaluar la influencia del oleaje se utilizaron registros de las boyas oceánicas de Bilbao y Donostia correspondientes al periodo 1992–2024. Estas condiciones de oleaje en aguas profundas, se propagaron hasta las desembocaduras de los 19 estuarios considerados, calculándose el *set-up*. El método tuvo en cuenta factores como el ángulo de incidencia del oleaje, la batimetría local y los efectos de abrigo producidos por diques o accidentes naturales situados en las inmediaciones de cada una de las desembocaduras. Los niveles resultantes de marea y *set-up* fueron combinados para generar series temporales horarias en cada estuario y realizar posteriormente análisis extremales específicos.

Para las proyecciones futuras se utilizaron las estimaciones del sexto informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC AR6 , Fox-Kemper et al., 2021). Este informe proporciona datos de proyecciones de nivel del mar según diversos escenarios de emisiones.

Resultados y discusión

3.1 Ascenso observado del nivel medio del mar

Las series mareográficas evidencian una marcada varibilidad interanual del nivel medio pero, con una tendencia ascendente continua. La concordancia entre Bilbao y Pasaia indica que el fenómeno tiene carácter regional y responde a forzamientos climáticos de escala oceánica. La tasa observada, del orden de los 4 mm/año, es coherente con la de otros estudios llevados a cabo en la zona asi como, a la registrada en las series de datos de otros puertos de la fachada cantábrica y atlántica.

[1]AZTI Investigación Marina, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Herrera Kaia. Portualdea Z/g, 20110 Pasaia, Gipuzkoa, España
[2]Agencia Vasca del Agua (URA), Gamarrako Atea kalea 1.A - 11. solairua, 01013 Vitoria-Gasteiz, Álava, España
E-mail: pliria@azti.es

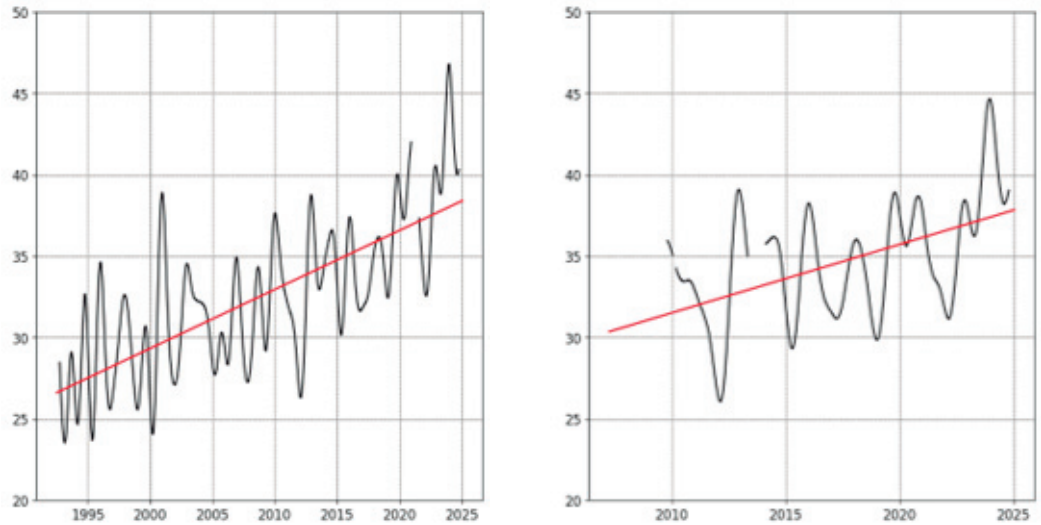


Figura 1. Evolución del nivel medio del mar sin T<1 año y línea de tendencia (líneas rojas) para la serie de datos del mareógrafo de Bilbao (izquierda) y Pasaia (derecha). El eje de ordenadas corresponde a cm sobre el 0 de referencia topográfico (NMMA, REDNAP IGN 2008).

El análisis permitió definir para el año 2025, una posición de referencia del nivel medio del mar, situada 40 cm por encima del Nivel Medio del Mar en Alicante (NMMA, REDNAP IGN 2008), constituyendo el nuevo nivel base actual, recomendado para todos los estudios de inundabilidad.

3.2 Niveles extremos de marea

Los resultados sugieren que los niveles extremos asociados exclusivamente a la combinación de marea astronómica y meteorológica presentan una elevada homogeneidad espacial a escala regional, por lo que pueden utilizarse valores comunes para todo el litoral de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental.

Tabla 1. Niveles extremales de marea en función del periodo de retorno (RP) para el litoral de la DH del Cantábrico Oriental (las cotas están referidas al NMMA REDNAP IGN 2008):

RP (años)	5	10	25	50	100	500
Nivel (m)	2,95	3,00	3,05	3,10	3,20	3,30

El análisis estadístico mostró que los eventos de inundación registrados durante 2024, aunque s*í* se encuentran entre los maximos de la serie en cotas absolutas y por lo tanto son muy relevantes desde el punto de vista de la gestión del riesgo, no representan los máximos históricos cuando se elimina el efecto del ascenso secular del nivel medio del mar. De hecho, las cotas de estos eventos, para la posición del nivel medio del mar actual, se situan en la franja entre los 5 y 10 años de periodo de retorno.

3.3 Influencia del oleaje

Los 19 estuarios analizados fueron clasificados en seis tipologías, en base en sus características geomorfológicas e hidrodinámicas. Esta clasificación permite adaptar la aplicación de los niveles extremos a las particularidades de cada desembocadura y dar una serie de recomendaciones especificas de aplicación con el fin de mejorar la representación de los procesos de inundación combinada.

La contribución del *set-up* del oleaje mostró una fuerte variabilidad espacial. En desembocaduras muy expuestas, como la de Urdaibai o la del Urumea, las sobreelevaciones alcanzan valores cercanos a 1 m. Por el contrario, en estuarios protegidos por bahías, cabos o estructuras portuarias, los incrementos son generalmente inferiores a 0,50 m.

Como referencia operativa, para el caso de una pleamar media se recomiendan unas cotas combinadas de marea y *set-up*, de 2,05 m para desembocaduras expuestas y de 1,90 m para desembocaduras protegidas. De igual forma, para caracterizar las pleamares vivas el nivel combinado recomendado es de 2,40 m y 2,25 m, respectivamente (cotas referidas a NMMA, REDNAP IGN 2008).

3.4 Proyecciones futuras

Se han descargado los datos para un punto coincidente con la localización de Bilbao a partir del servidor de la NASA (https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool), y se presentan los resultados para dos escenarios climáticos: el escenario SSP2-4.5, y el escenario SSP5-8.5. Los datos de proyecciones del IPCC están referidos a un nivel medio del mar para un periodo de referencia 1995-2014 (Figura 2). Se ha trasladado por tanto dicha referencia al nivel del mar calculado para el año 2025, en base a los resultados de evolución del nivel medio del mar, obtenidos del análisis de la serie del mareógrafo de Bilbao, obteniendose finalmente la evolucion esperada para el resto del siglo XXI.

Las proyecciones indican aumentos de la mediana del nivel del mar de aproximadamente 50 cm para SSP2-4.5 y 70 cm para SSP5-8.5 en 2100, con respecto al nivel del mar calculado

para el año 2025, apreciandose una divergencia creciente entre escenarios a partir de mediados de siglo.

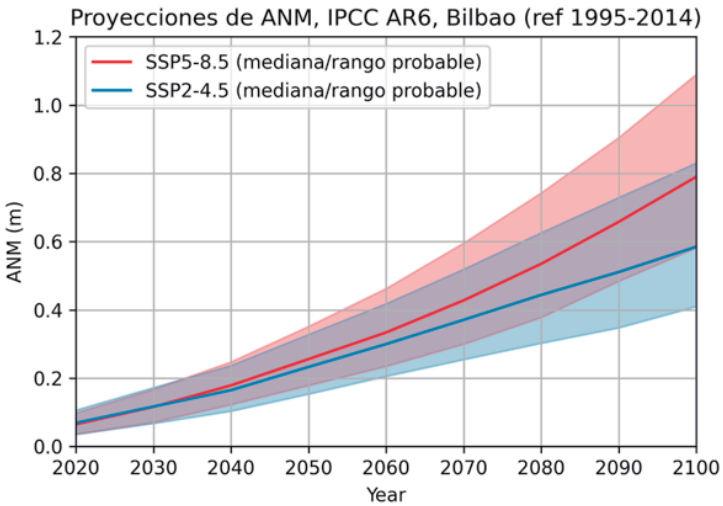


Figura 2. Aumento del nivel del mar en Bilbao respecto al periodo de referencia 1995-2014, según los datos del IPCC AR6. Se muestran los resultados para el escenario SSP2-4.5 (azul) y SSP5-8.5 (rojo). Las líneas continuas representan la mediana y las bandas claras representan el rango probable (entre los percentiles 17 y 83) de los resultados, según la definición del IPCC.

Conclusiones

El estudio confirma la existencia de un ascenso sostenido del nivel medio del mar en la costa vasca y demuestra la necesidad de actualizar los niveles de referencia utilizados para la cartografia de zonas inundables. Los registros de Bilbao y Pasaia evidencian una respuesta homogénea en toda la región y justifican la adopción de nuevo nivel base actual, recomendado para todos los estudios de inundabilidad de 40 cm sobre el NMMA.

El análisis extremal realizado permite establecer valores actualizados de marea para todo el litoral de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico Oriental, mientras que la incorporación del *set-up* del oleaje mejora significativamente la representación de los procesos de inundación en el entorno de las desembocaduras estuarinas.

La clasificación funcional de los estuarios en seis tipologías constituye una herramienta práctica para la aplicación de las condiciones de contorno en los modelos hidráulicos y para la planificación territorial.

Los resultados de esta revisión se incorporaron a los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación de la Demarcación Hidrográfica del Cantábrico oriental, que fueron sometidos a consulta pública durante un periodo de tres meses a finales de 2025. Tras su aprobación definitiva, estos mapas constituyen la base cartográfica para la aplicación de la normativa de prevención del riesgo de inundación durante los próximos seis años.

Finalmente, las proyecciones derivadas del IPCC AR6 indican que el ascenso del nivel medio del mar continuará durante el siglo XXI, con aumentos de entre 0,5 y 0,7 m hacia 2100 en los escenarios más probables. Este incremento debería incorporarse explícitamente en las futuras revisiones de mapas de peligrosidad y riesgo y en las estrategias de adaptación al cambio climático desarrolladas para los estuarios del País Vasco.

Referencias

Fox-Kemper, B., H. T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S. S. Drijfhout, T. L. Edwards, N. R. Golledge, M. Hemer, R. E. Kopp, G.Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I. S. Nurhati, L. Ruiz, J-B. Sallée, A. B. A. Slangen, Y. Yu, 2021, Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

Reconocimientos – Los autores agradecen a Euskalmet, Aranzadi, la Diputación de Gipuzkoa y Puertos del Estado la puesta a disposición de los datos utilizados en este trabajo.

Implementación y validación del modelo XBeach para la mejora del sistema de alerta por riesgo costero: aplicación a la playa de Zarautz

Castaño-Tierno A., Gómez de Segura J.D. [1], Gelpi I.R., de Santiago I.[2], Abalia A.[2], Gaztelumendi S.[1]

Palabras clave: XBeach, rebase, inundación costera, alerta temprana, función de transferencia, Zarautz

Introducción

La Agencia Vasca de Meteorología (Euskalmet) tiene entre sus responsabilidades proporcionar información relevante para la gestión de situaciones de emergencia en el ámbito atmosférico y marino, dando soporte a la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Gobierno Vasco (Gaztelumendi et al., 2009). En el ámbito del impacto en costa, de gran importancia por la densidad de población y de infraestructuras sensibles situadas en el litoral vasco, el sistema de avisos, alertas y alarmas se articula en torno a los índices de rebase I e Imax y la superación de ciertos umbrales basados en el impacto esperable. La estimación de estos índices, que son interpretables como la altura que el agua puede alcanzar en la costa por el efecto combinado de marea y oleaje (I la superada por el 2 % de las olas e Imax la alcanzada por la ola mayor), son parte del sistema de acción temprana frente a fenómenos océano-meteorológicos severos en la costa vasca (Gaztelumendi et al., 2016, 2020, 2024).

Los umbrales regionales de tipo empírico pueden complementarse con modelos numéricos de base física capaces de resolver los procesos costeros a escala local, como se ha explorado en trabajos recientes en la playa de Zarautz (de Santiago et al., 2024; Abalia et al., 2024). Sin embargo, la integración operativa de un modelo local plantea un problema práctico: sus salidas (descargas de rebase q, en l/s/m, clasificadas según umbrales de peligrosidad) no son directamente conmensurables con los índices I e Imax sobre los que está construido el sistema de avisos vigente. En esta contribución presentamos (i) la implantación y validación en Euskalmet de una cadena operativa de pronóstico de rebase basada en XBeach (Roelvink et al., 2009) para el paseo marítimo de Zarautz, alimentada con una batería de eventos históricos, y (ii) la derivación y validación cruzada de funciones de transferencia que expresan la salida del modelo en la escala de los índices operativos, permitiendo asimilar ambos sistemas de aviso.

[1]Euskalmet - Agencia Vasca de Meteorología, Portal de Foronda, 41, 01010 Vitoria-Gasteiz, Basque Country
E-mail: a-castanotierno@euskalmet.eus
[2]AZTI, Herrera Kalia, Portualdea z/g, 20110 Pasaia, Basque Country

Materiales y métodos

La cadena de pronóstico encadena tres eslabones: los espectros del modelo de oleaje WAM operativo de Euskalmet se propagan hasta la costa con SWAN sobre una malla local de 50 m del entorno Getaria-Zarautz; el espectro resultante en la bocana fuerza simulaciones XBeach en modo no hidrostático sobre perfiles transversales del paseo de Zarautz (tres estados morfológicos de perfil y cinco semillas aleatorias por caso), con el nivel del mar del análisis-pronóstico IBI de Copernicus Marine como condición de marea. Cada pleamar relevante se simula en una ventana de cinco horas y el sistema deriva la descarga media horaria de rebase q en puntos de control sobre la coronación, clasificada en cuatro niveles mediante los umbrales 1, 2.5 y 20 l/s/m (EurOtop, 2018).

Para la validación se ha construido una batería automatizada de 16 eventos históricos (febrero de 2024 a abril de 2026) seleccionados del catálogo de días con aviso costero, reutilizando los forzamientos archivados (espectros WAM) y regenerando el nivel desde Copernicus Marine. Los resultados se emparejan a escala diaria con los índices I e Imax estimados por Euskalmet: para cada día se toma el máximo de q sobre pleamares y perfiles. Sobre los pares se ajustan dos funciones de transferencia $I(q)$, $I = a + b \cdot \log10(q)$ e $Imax = a' + b' \cdot \log10(q)$. E ajuste principal es el estimador de Theil-Sen sobre los días con rebase apreciable ($q \geq 0.01$ l/s/m), con mínimos cuadrados como contraste; los días sin rebase quedan fuera del ajuste y delimitan el dominio de aplicación de la transferencia, y las traducciones de umbrales se acotan al rango muestreado de q. La capacidad predictiva se evalúa mediante validación cruzada Monte Carlo: en 20 repeticiones se entrena con 10 eventos elegidos al azar y se predice sobre los eventos reservados, cuantificando el error (ME, MAE, RMSE) y el acierto del nivel de aviso derivado.

Resultados y discusión

De la batería se obtienen 24 días emparejados con índice observado, de los cuales 13 presentan rebase apreciable en el perfil de Zarautz; el resto delimita el dominio de no aplicación de la transferencia (situaciones sin rebase local). Sobre los días con rebase, las transferencias ajustadas (Theil-Sen) son $I = 6.53 + 0.29 \cdot \log10(q)$ e $Imax = 7.13 + 0.31 \cdot \log10(q)$, ambas significativas ($r = 0.76$, $p = 0.003$ e $r = 0.62$, $p = 0.024$) y estables frente al submuestreo en la validación cruzada (coeficiente

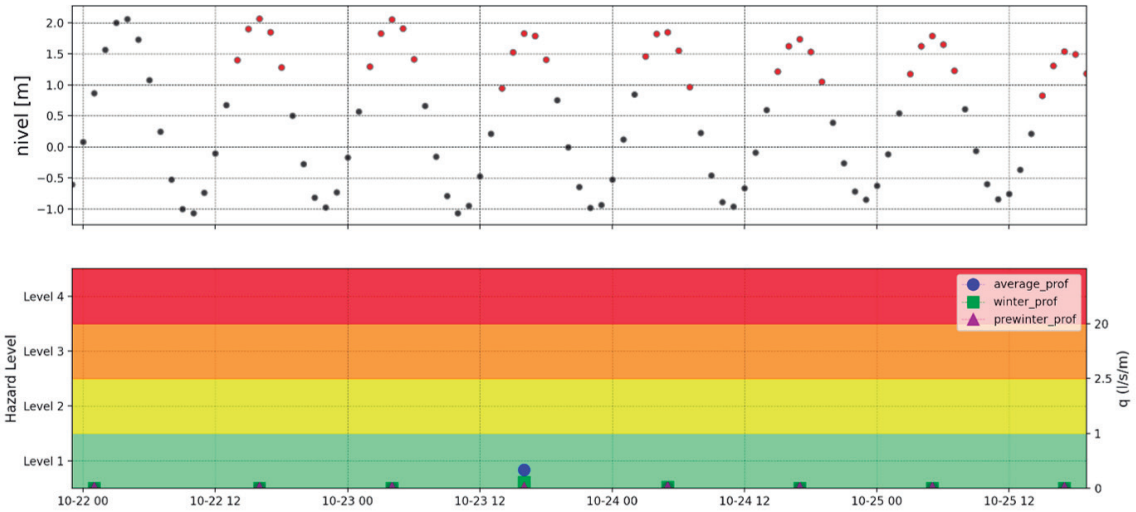


Figura 1. Nivel del mar en Zarautz (arriba) a lo largo de un episodio estudiado (22 a 25 de octubre de 2025) y caudales de rebase calculados por Xbeach en cada una de las pleamares, según el perfil batimétrico utilizado.

de variación de la pendiente del 13 %). La Figura 2 compara los índices observados con sus equivalentes I_eq e Imax_eq obtenidos al aplicar las transferencias al rebase simulado de cada día. La validación cruzada sobre eventos reservados da MAE de 0.23 (I) y 0.34 (Imax) y un acierto exacto del nivel reconstruido del 52 %. La dispersión residual indica que la transferencia es apropiada para reconstruir nivelesI, no para predicciones puntuales de caudal.

La traducción de umbrales que proporcionan las transferencias revela que las dos escalas de aviso, siendo coherentes en la ordenación de los episodios, no están alineadas nivel a nivel. El umbral de nivel 2 del sistema Xbeach (q = 1 l/s/m) se corresponde con I ≈ 6.5, la frontera del naranja regional; el nivel 3 (q = 2.5) con I ≈ 6.6; y el nivel 4 (q = 20 l/s/m) con I ≈ 6.9 e Imax ≈ 7.5, todavía por debajo de los umbrales rojos (7.3 y 8.0), cuya equivalencia en caudal queda deliberadamente acotada al rango muestreado (q > 30 l/s/m, sin extrapolar). En el tramo bajo el desalineamiento es claro: el amarillo del sistema actualmente en vigor corresponde a descargas por debajo del límite de detección —en la mayoría de los días con aviso amarillo el modelo no produce rebase apreciable sobre el paseo, lo que explica la infraestimación sistemática en la comparación directa de niveles— y el naranja se sitúa en q entre 0.4 y 0.8 l/s/m, próximo al arranque del nivel 2 de Xbeach.

De este análisis se derivan dos lecturas operativas. La primera es que ambos enfoques resultan complementarios y no intercambiables: el índice I/Imax actúa como cribado temprano de situación, y el modelo físico aporta la cuantificación local de la severidad allí donde el rebase se materializa. La segunda

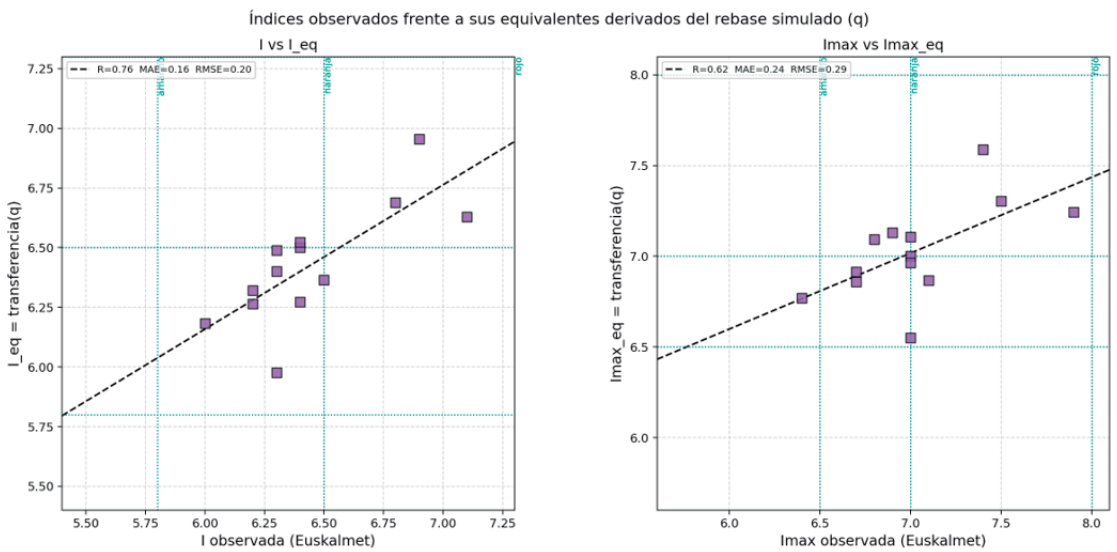


Figura 2. Índices I (izquierda) e Imax (derecha) observados por Euskalmet frente a sus equivalentes derivados del rebase simulado, con la recta de regresión y las métricas de comparación (días con rebase apreciable de la batería de eventos).

es que la función de transferencia permite expresar la salida de XBeach directamente en la escala operativa de Euskalmet con una incertidumbre conocida (del orden de 0.2-0.35 unidades, en validación cruzada), lo que habilita su presentación conjunta en los procedimientos de vigilancia sin modificar el sistema de umbrales vigente.

Conclusiones

Se ha implantado y validado en Euskalmet una cadena operativa de pronóstico de rebase basada en XBeach para la playa de Zarautz, verificada de extremo a extremo con una batería automatizada de eventos históricos. Sobre esa base se han derivado funciones de transferencia entre la descarga de rebase del modelo y los índices operativos I e Imax, estadísticamente significativas, estables frente al submuestreo y con capacidad predictiva cuantificada mediante validación cruzada sobre eventos reservados, que permiten asimilar el nuevo sistema de base física a la escala de avisos existente.

Los resultados indican que los umbrales de ambos sistemas no son equivalentes nivel a nivel, sino que describen ventanas distintas del mismo continuo de severidad, con el sistema Xbeach desplazado hacia los episodios de mayor impacto. La equivalencia del nivel rojo queda fuera del rango muestreado y se reporta como cota, de modo que su consolidación requiere incorporar episodios extremos adicionales a la batería, y el desempeño del conjunto está condicionado por la disponibilidad de batimetrías y perfiles actualizados y de forzamientos de calidad, lo que subraya la importancia del mantenimiento de las redes de observación y monitorización costera.

Referencias

Abalia, A., de Santiago, I., Liria, P., Garnier, R., Epelde, I., Nieto, A., Morichon, D. (2024). Analysis of the coastal flooding exposure of embayed beaches at a regional scale using a video monitoring network: Basque Coast (Spain). Ocean & Coastal Management, 254, 107193.

de Santiago, I., Plomaritis, T.A., Avalos, D., Garnier, R., Abalia, A., Epelde, I., Liria, P. (2024). Comparison of wave overtopping estimation models for urban beaches. Towards an early warning system on the Basque coast. Science of The Total Environment, 912, 168783.

EurOtop (2018). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P., Zanuttigh, B. www.overtopping-manual.com.

Gaztelumendi, S., González, M., Egaña, J., Rubio, A., Gelpi, I.R., Fontán, A., Otxoa de Alda, K., Ferrer, L., Alchaarani, N., Mader, J., Uriarte, Ad. (2009). Implementation of an operational oceanometeorological system for the Basque Country. Thalassas, 26 (2), 151-167.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., González, M., Aranda, J.A., Anitua, P. (2016). The new Euskalmet coastal-maritime warning system. Advances in Science and Research, 13, 91-96.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Gelpi, I., Aranda, J. A. (2020). Los avisos/alertas/alarmas por riesgo marítimo-costero en la CAV. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2020, 27(1, p62-65).

Gaztelumendi, S., Egaña, J., R. Gelpi, I., Gómez de Segura, J. D., Aranda, J. A. (2024). El sistema de acción temprana frente al riesgo marítimo-costero en Euskalmet. Revista de Investigación Marina, AZTI, UHINAK 2024, 30(1), p52-55).

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering, 56 (11-12), 1133-1152.

Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Sallenger, A.H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coastal Engineering, 53 (7), 573-588.

Agradecimientos - Los autores expresan su agradecimiento a todas las instituciones que financian la red instrumental y los servicios operativos en la Comunidad Autónoma de Euskadi, en particular a la Dirección de Atención de Emergencias y Meteorología (DAEM) del Departamento de Seguridad del Gobierno Vasco. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto Regions4Climate (R4C) del programa Horizon Europe de la Unión Europe.

Field observations and modelling of the waters of the southeastern Bay of Biscay

Ferrer, Luis[1], Ciliberti, Stefania[2], Sagarminaga, Yolanda[1], Alonso-Valle, Axel[2], Fontán, Almudena[1], Alonso, Raúl[2], Franco, Javier[1], García-Valdecasas, José María[2], Nieto, Asier[1], Jiménez, Beatriz[2], Manso-Narvarte, Iván[1], Moros, Mario[2], del Campo, Andrea[1], García-Sotillo, Marcos[2], Solabarrieta, Lohitzune[1] and Rubio, Anna[1]

Keywords: Bay of Biscay, Copernicus Marine Service, CROCO, EUSCOMvu

Introduction

Coastal hydrodynamic modelling aims to understand and predict water circulation generated by wind, tides, density differences between water masses and freshwater discharges from rivers. Accurate coastal modelling and field observations are essential to correctly assess and predict the risks of adverse events for human life, activities and infrastructure. With this in mind, the EUSCOMvu (EUSkadi Coastal Operational Model validation & user-engagement) project was launched in 2023 by AZTI and NOW Systems to provide reliable monitoring and forecasting in the southeastern Bay of Biscay.

The EUSCOMvu project aims to: (1) generate a highly optimized oceanic and coastal operational forecast for the waters of the Basque Country (Euskadi) using the Coastal and Regional Ocean COmmunity model (CROCO); (2) develop and implement an online and delayed-mode validation capability to assess the performance of this forecast using available *in situ* and satellite observations, including an intercomparison with the Iberia–Biscay–Ireland (IBI) product provided by the Copernicus Marine Service; and (3) promote close cooperation with end users for the operational exchange of data and the definition of new hydrological indicators. These objectives will help lay the foundation for a seamless coastal hydrodynamic forecasting service in the southeastern Bay of Biscay and consolidate the use of Copernicus Marine Service products.

Funded by the Copernicus Marine Service National Collaboration Programme 2022–2028, EUSCOMvu is also supported by EBEGI, a research project funded by the Basque Government. EBEGI is an observatory located in the southeastern Bay of Biscay that enables integrated and multidisciplinary observation of the marine environment and its ecosystem. It also encompasses technological innovation and experimentation tasks to identify and test cutting-edge ocean observation methodologies, including autonomous vehicles. This will expand the key knowledge required for the development of policies and directives for the conservation and recovery of biodiversity and marine habitats, as well as to address the challenges associated with climate and global change. Two gliders are among the instruments used in the EBEGI project. The data collected by these vehicles will be essential in the short term to evaluate the performance of the coastal hydrodynamic forecasting service established for the waters of the Basque Country. All data obtained from both instruments and models are integrated into the Basque Operational Oceanography System (EuskOOS).

[1]AZTI, Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Herrera Kaia, Portualdea z/g, 20110 Pasaia, Spain
[2]Nologin Oceanic Weather Systems (NOW Systems), Rúa de Lope Gómez de Marzoa (FEUGA), s/n, 15705 Santiago de Compostela, Spain
E-mail contact: lferrer@azti.es

Methods

CROCO is the numerical modelling tool used in EUSCOMvu to simulate the spatiotemporal evolution of the main physical variables of the marine environment in the southeastern Bay of Biscay. CROCO is an extension of the Regional Ocean Modeling System (ROMS), from which it inherited the robustness and efficiency of its time-splitting implementation, the accuracy of high-order method, including its pressure gradient scheme for terrain-following coordinates, and its high computational performance (Shchepetkin and McWilliams, 2005; Debreu et al., 2012).

ROMS has been used for modelling ocean circulation in various regions worldwide (e.g. Haidvogel et al., 2000; Malanotte-Rizzoli et al., 2000; Penven et al., 2001; Marchesiello et al., 2003; Choi and Wilkin, 2007), including the Bay of Biscay (e.g. Ferrer et al., 2009, 2015; Ferrer and Caballero, 2011; Caballero et al., 2014; Laiz et al., 2014; Legorburu et al., 2015). CROCO is based on a new non-hydrostatic and non-Boussinesq solver (Auclair et al., 2018), developed within the original ROMS kernel. CROCO opens up new possibilities in the field of small-scale process modelling. This section describes in detail the main features of the CROCO configuration implemented for the waters of the Basque Country.

The CROCO domain used in EUSCOMvu covers the southeastern Bay of Biscay, extending from 43.24° N to 44° N and from 3.4° W to 1.3° W, with a mean horizontal resolution of 670 m. Vertically, the water column is divided into 32 sigma-coordinate levels, which are clustered near the surface where most of the oceanic variability occurs. The bathymetry of the study domain was obtained from the European Marine Observation and Data Network (EMODnet) and smoothed to ensure stable and accurate simulations.

The hourly atmospheric forcing data used in CROCO are provided by MeteoGalicia (the meteorological agency of Galicia).

These data, with a 12 km horizontal resolution, are obtained using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. A more detailed description of this model can be found in Skamarock et al. (2019). The WRF variables used in CROCO include wind velocity at 10 m, air temperature at 2 m above sea level, precipitation rate, relative humidity at 2 m, and long- and short-wave radiation fluxes.

The marine conditions applied to the open boundaries of the domain are estimated using data from the Copernicus Marine Service. This service provides free and open marine data to enable marine policy implementation and support blue growth and scientific innovation. The CROCO configuration uses the hourly and three-dimensional data provided by the Iberia–Biscay–Ireland Monitoring and Forecasting Centre (IBI-MFC). The IBI-MFC provides a high-resolution ocean analysis and forecasting product covering European waters, using the Nucleus for European Modelling of the Ocean (NEMO). The horizontal resolution of this product is 1/36°. A detailed description of the NEMO ocean engine is provided by Madec et al. (2026). The extracted NEMO variables include sea surface height, potential temperature, salinity, and the eastward and northward components of the velocity.

The CROCO simulations also include the freshwater discharges from the main rivers in the study domain, namely: Barbadun, Nerbioi, Butroe, Oka, Lea, Artibai, Deba, Urola, Oria, Urumea, Oiartzun, Bidasoa and Adour. Among these, the Adour is the only French river included in the simulations, while the remaining rivers discharge along the Basque Country coast in Spain. Based on this configuration, CROCO provides 96-hour forecasts of sea conditions in the southeastern Bay of Biscay. The integrated Lagrangian particle-tracking module is also activated to simulate the drift of several virtual floats over the same forecasting horizon. These floats are deployed at fixed locations within the study domain and are advected by the simulated marine currents.

Results and conclusions

Figure 1 shows an example of the sea surface currents, temperature and salinity forecasts obtained using CROCO for 2 February 2025, which also displays the three-dimensional drift of virtual floats. The forecast reveals that freshwater discharges from rivers noticeably influence the hydrodynamics and hydrography of the study area. Data from metocean buoys, CTD casts and gliders are used in EUSCOMvu for model validation.

Figure 2 displays the developed web application for this purpose, where users can select, among other options, the type of observations to be analysed, the variable of interest and the reference model for comparison. Here the application compares an observed salinity profile at a selected station (D1) with outputs from both the EUSCOMvu and IBI models. The integration of real-time data on freshwater river flow into EUSCOMvu is expected to improve the solution provided by the IBI service.

In conclusion, numerical models, such as CROCO, are essential tools for predicting future sea conditions at both regional and local levels. These models are based on the current state of the sea, which is estimated from marine observations or previous simulations. The use of these models in different oceanic regions and a detailed analysis of the resulting outputs will contribute to a better understanding of water mass circulation, as well as to the development of improved numerical methods for solving the mathematical equations.

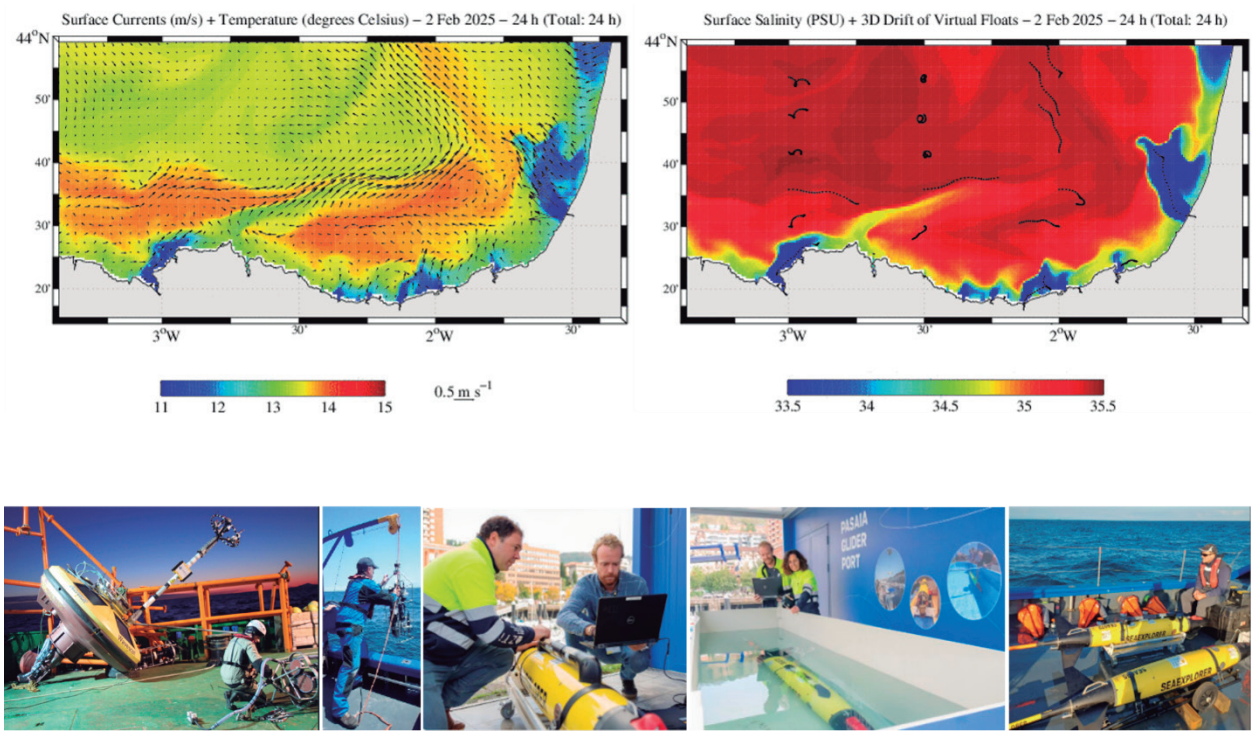


Figure 1. Top: Sea surface currents, temperature, salinity, and three-dimensional drift of virtual floats simulated using CROCO in the southeastern Bay of Biscay at the end of the day on 2 February 2025. Bottom: Instrumentation (metocean buoys, CTD casts, and gliders) used in EUSCOMvu for model validation.

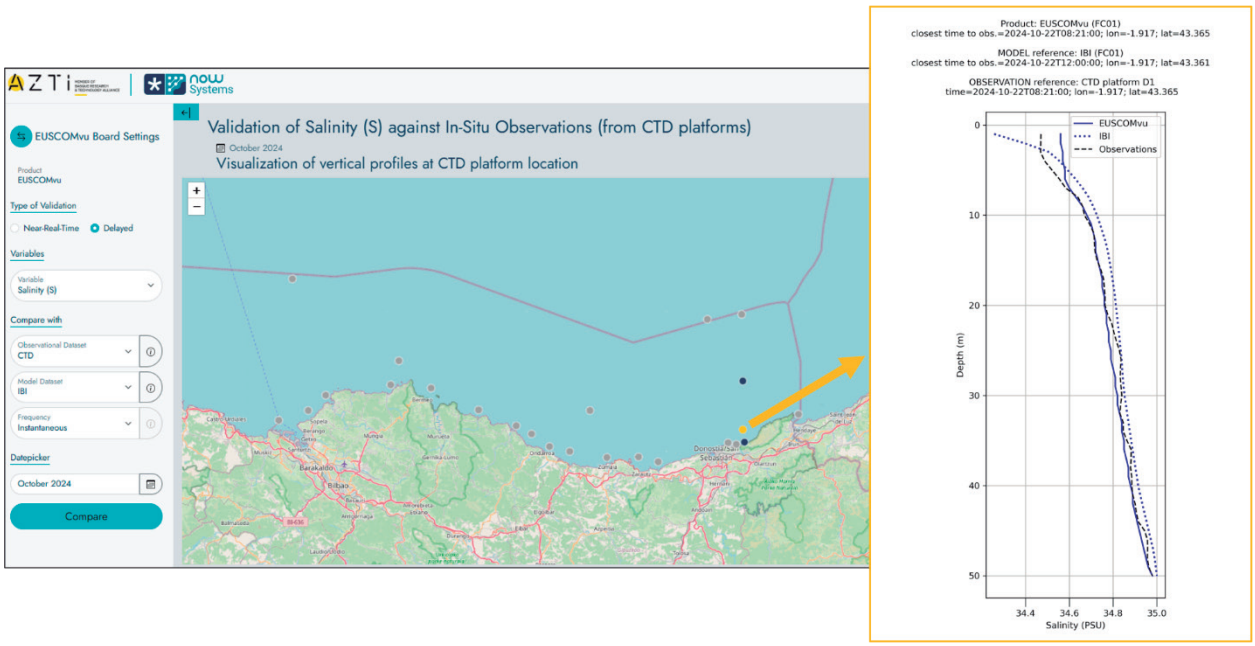


Figure 2. Web application used in EUSCOMvu for model validation, showing an example of observed and forecast salinity profiles at a selected CTD station (D1) on 22 October 2024.

References

Auclair, F., Bordois, L., Dossmann, Y., Duhaut, T., Paci, A., Ulses, C. and Nguyen, C. 2018. A non-hydrostatic non-Boussinesq algorithm for free-surface ocean modelling. Ocean Modelling 132:12–29. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.011

Caballero, A., Ferrer, L., Rubio, A., Charria, G., Taylor, B.H. and Grima, N. 2014. Monitoring of a quasi-stationary eddy in the Bay of Biscay by means of satellite, *in situ* and model results. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 106:23–37. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.09.029

Choi, B.-J. and Wilkin, J.L. 2007. The effect of wind on the dispersal of the Hudson River plume. Journal of Physical Oceanography 37:1878–1897. https://doi.org/10.1175/JPO3081.1

Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P. and Cambon, G. 2012. Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. Ocean Modelling 49–50:1–21. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2012.03.003

Ferrer, L. and Caballero, A. 2011. Eddies in the Bay of Biscay: A numerical approximation. Journal of Marine Systems 87:133–144. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.03.008

Ferrer, L., Fontán, A., Mader, J., Chust, G., González, M., Valencia, V., Uriarte, Ad. and Collins, M.B. 2009. Low-salinity plumes in the oceanic region of the Basque Country. Continental Shelf Research 29:970–984. https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.12.014

Ferrer, L., Zaldua-Mendizabal, N., Del Campo, A., Franco, J., Mader, J., Cotano, U., Fraile, I., Rubio, A., Uriarte, Ad. and Caballero, A. 2015. Operational protocol for the sighting and tracking of Portuguese man-of-war in the southeastern Bay of Biscay: Observations and modeling. Continental Shelf Research 95:39–53. https://doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.011

Haidvogel, D.B., Arango, H.G., Hedström, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P. and Shchepetkin, A.F. 2000. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. Dynamics of Atmospheres and Oceans 32:239–281. https://doi.org/10.1016/S0377-0265(00)00049-X

Laiz, I., Ferrer, L., Plomaritis, T.A. and Charria, G. 2014. Effect of river runoff on sea level from in-situ measurements and numerical models in the Bay of Biscay. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 106:49–67. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.12.013

Legorburu, I., Ferrer, L., Galparsoro, I. and Larreta, J. 2015. Distribution of river-borne particulate Pb in the Basque continental shelf (Bay of Biscay). Environmental Earth Sciences 74:4261–4279. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4495-3

Madec, G. and the NEMO System Team. 2026. NEMO Ocean Engine Reference Manual. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.1464816

Malanotte-Rizzoli, P., Hedström, K., Arango, H.G. and Haidvogel, D.B. 2000. Water mass pathways between the subtropical and tropical ocean in a climatological simulation of the North Atlantic Ocean circulation. Dynamics of Atmospheres and Oceans 32:331−371. https://doi.org/10.1016/S0377-0265(00)00051-8

Marchesiello, P., McWilliams, J.C. and Shchepetkin, A. 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current system. Journal of Physical Oceanography 33:753−783. https://doi.org/10.1175/1520-0485(2003)33<753:ESADOT>2.0.CO;2

Penven, P., Lutjeharms, J.R.E., Marchesiello, P., Roy, C. and Weeks, S.J. 2001. Generation of cyclonic eddies by the Agulhas Current in the lee of the Agulhas Bank. Geophysical Research Letters 28:1055−1058. https://doi.org/10.1029/2000GL011760

Shchepetkin, A.F. and McWilliams, J.C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. Ocean Modelling 9:347–404. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M. and Huang, X.-Y. 2019. A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4 (NCAR Technical Note NCAR/TN-556+STR). National Center for Atmospheric Research. https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97

*Acknowledgement*s - This work is supported by EUSCOMvu (Copernicus Marine Service National Collaboration Programme 2022–2028), EBEGI and EuskOOS (Basque Government).

Quadtree mesh technique for shallow water problems in coastal environment

Bosi, Umberto[1], Delpey, Matthias[2], Morichon, Denis[1] and Roeber, Volker[1]

Keywords: quadtree, adaptive meshes, shallow water equation

Introduction

Coastal regions face increasing threats associated with climate change, including sea-level rise and more frequent extreme weather events *(GIEC, 2014)*. In this context, understanding and accurately modelling the processes governing wave propagation and coastal flooding has become essential. Coastal wave propagation and inundation modelling involve large spatial domains and processes acting at different spatial scales. A uniformly fine computational mesh can provide the required resolution in nearshore areas, but leads to high computational costs, particularly for large-scale coastal applications. Adaptive mesh approaches can reduce this cost by concentrating the computational resolution where it is most needed.

To address these limitations, we propose the use of non-uniform non-conforming quadtree meshes for solving the shallow water equations in coastal environments *(Popinet, 2012)*. Quadtree meshes provide an efficient framework for multiscale problems and complex computational domains. This approach employes coarser meshes in the offshore regions, where wave fields vary smoothly over large distances, and finer resolution nearshore areas to accurately capture shoaling, swashing on the beach, wave transformations, and coastal interactions. This provides a flexible framework for resolving coastal processes while reducing the total number of computational cells.

Method

The present work focuses on the development of a quadtree mesh application for the shallow water equation (SWE). Although dispersive wave models such as Boussinesq equations or Serre–Green–Naghdi equations *(Filippini, 2015)*, provide a more accurate representation of wave dispersion and nonlinear wave transformation, their increased mathematical complexity makes their implementation on non-uniform meshes more demanding. After wave breaking and in inundation zones, where dispersive effects become progressively less significant, nonlinear advection, bottom friction, and wetting-drying processes become dominant. Under these conditions, the nonlinear SWE shown in Eq. 1, provides an appropriate balance between physical realism and computational efficiency:

$$h_t + \nabla \cdot (\boldsymbol{F}) = 0 \qquad (1)$$
$$\boldsymbol{F}_t + \nabla \cdot (\boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{u}) + gh\nabla h = 0$$

defined in terms of elevation h, velocities $\boldsymbol{u} = [u,v]$ and fluxes $\boldsymbol{F} = h\boldsymbol{u}$.

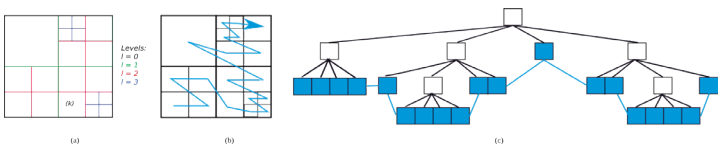


Figure 1: Example of quadtree mesh. Fig. (a) highlights the levels, fig. (b) shows the ordering of the elements and fig. (c) shows the underlying tree

The SWE are solved on the adaptive quadtree mesh using a staggered-grid finite-volume formulation *(Mihami, 2023)*. The conserved variables are discretized on a staggered arrangement in which the free-surface elevation is stored at cell centres, while the depth-averaged horizontal velocity components are defined at the cell faces. The finite-volume formulation ensures local conservation of mass and momentum, while numerical fluxes are evaluated using an upwind scheme to provide stability in the presence of rapidly varying flow conditions.The advantage of an adaptive mesh process is that coastal bathymetry, shoreline geometry, wave fronts, and inundation limits exhibit very localized spatial scales and requires a fine resolution to be accurately resolved, whereas large offshore regions are generally characterised by relatively smooth variations that can be represented adequately on a much coarser mesh. Therefore, it allocates computational resources only where they are most beneficial, allowing accurate simulation of nearshore processes while keeping the overall computational cost manageable.

The quadtree mesh strategy is generated from the Cartesian discretization of the computational domain. As shown in fig. 1, the mesh is organized into hierarchical tree structure: from each element four neighbouring cells can be merged into a coarser elements to form a lower resolution level or each cell can be recursively subdivided to locally increase the resolution. The full coverage of the domain in ensured using the space filling curve as shown in fig. 1(b).

Although the complete hierarchy is initialized at the beginning of the simulation and the initial solution propagated to the whole tree, at any time only a subsection of the total number of cells is active and participate in the numerical computation. The tree data structure enables rapid access to different levels of resolution and

[1]*Université de Pau et Pays de L'Adour, E2S-UPPA, SIAME, 55 rue de Mirambeau, 64600 Anglet, France*
[2]*Rivages Pro Tech, 2 Allée Théodore Monod, F - ESPACE HANAMI; Izarbel; 64210 BIDART*
E-mail contact:u.bosi@univ-pau.fr

allows local mesh refinement.

Because neighboring cells may belong to different refinement levels, additional care is required at coarse-fine interfaces: to maintain the physical representation the exchange of fluxes we impose that each edge can be shared at most by three elements. The flow is exchanged across the non-conforming interfaces (one coarse element to two finer ones) using linear interpolation procedures *(Borthwick et al., 2001)*, ensuring a consistent representation of the flow variables while maintaining conservation and numerical stability. This ensure also a smooth transition between the finest and the most coarse area of the domain.

The resulting staggered-grid quadtree formulation combines the robustness of finite-volume methods with the efficiency of adaptive mesh with an efficient refinement strategy that does not require repeated mesh generation or costly remeshing procedures. Moreover, unlike nested-grid techniques, which require predefined refinement regions and explicit coupling between multiple grids, quadtree meshes permit flexible, localized refinement wherever it is needed.

Results

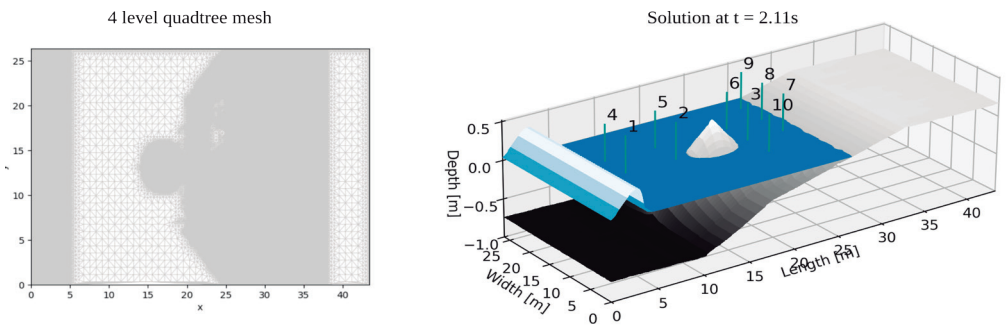
We evaluate the proposed adaptive quadtree solver using the reef benchmark 5 *(Roeber and Cheung, 2012)*, which considers the propagation of a solitary wave over a complex fringing-reef bathymetry. This benchmark incorporates several processes encountered in realistic coastal environments, including wave shoaling, wave transformation over rapidly varying bathymetry, partial reflection, and wave run-up on a sloping beach, providing a demanding test of both the numerical scheme and the adaptive mesh strategy.

Several quadtree configuration are tested. The original configuration is based on a cartesian mesh with resolution $dx_0 = dy_0 = 0.1m$, which permits the proper resolution for the incoming wave and correspond to a mesh of 115275 elements. Fig. 2(a) shows a quadtree mesh with the finest level corrisponding to the benchmark and three coarser level of resolution *0.2m, 0.4m* and *0.8m,* with 37803 active elements. Two more setting has been tested: a two level quadtree mesh (resolution *0.05m* and *0.1m*, 218226 active elements) and four levels of resolution (*0.05m, 0.1m, 0.2m* and *0.4m*, 115275 active elements*)*. The finest resolution is employed near the wave generation boundary at the left of the domain to accurately resolve the incident solitary wave, around the reef crest where strong bathymetric gradients induce rapid wave transformation, and along the sloping beach to capture shoreline motion and inundation. Regions where the solution varies more smoothly are discretized using cells up to eight times larger, substantially reducing the overall number of computational cells. The large offshore resolution have been deliberately chosen to test the robustness of the method to propagate the wave through regions with very different cell sizes, preserving the solution without generating instabilities.

Free-surface elevations are recorded at ten gauges (Fig. 2(b)) and compared with the corresponding results obtained the SWE on a uniform cartesian mesh. Fig. 3 shows the comparison between the water elevation of the different quadtree meshes (in solid lines) recorded at the most significant gauges 1, 2, 5, 6 and 11, against the benchmark solution from literature, evaluated with the Nwogu equation (in the grey dashed line). We can observe that all the quadtree meshes can reproduce the principal features of the benchmark Nwogu solution throughout the domain as the dispersive model has an impact mainly on the early stage of propagation of the soliton. In particular, we observe that the refined mesh (in blue) has very limited effects over the base resolution of *0.1m* (in black) as the latter is already sufficient to solve the simulation. On the other hand, the coarser quadtree meshes (in red and green) deviates more from the SWE base solution: this is due to the fact that the propagation area is now discretized by very large elements that can not fully represent the incoming soliton. We can still observe that the main features of the wave are conserved throughout the simulation.

This simple test permits also to evaluate the variation in performance. The base test is solved in *388.9s*, the 2 level test increases the number of cells by refininig the surf zone and as expected decrease the performance to *1883.2s*, the third test uses a refined surf zone but have less elements in the propagation areas and it is simulated in *558.7s* and, finally, the coarsest quadtree mesh is simulated in *173.1s.* This performance comparison shows also that the loss of time due to the interpolation steps between non uniform mesh is well recovered by the lowest number to elements to solve. In the future, it will be investigated the optimal ratio between computational performance and precision.

In addition, it is possible to combine the Nwogu propagation equation on the uniform mesh and the quadtree mesh. In Fig. 3, the magenta dashed lines shows the result by running the Nwogu



(a) (b)

Figure 2: fig. (a) shows the 4 level quadtree mesh for the reef benchmark 5 and fig. (b) a time snapshot of the solution

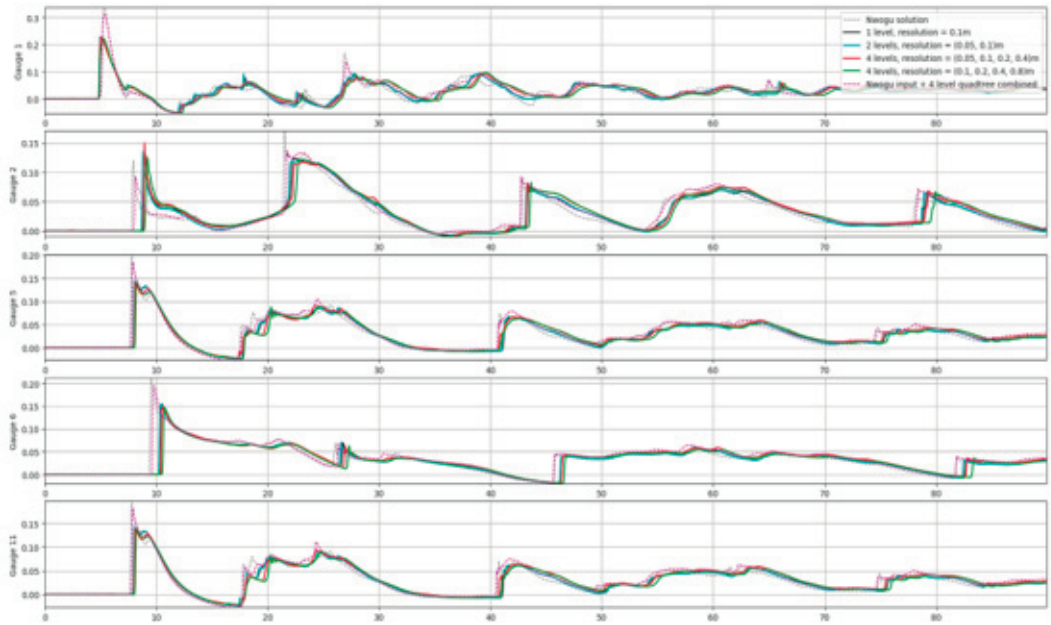


Figure 3: Comparison of elevation gauges between several quadtree simulations against the Nwogu solution and the SWE solution on a uniform cartesian mesh. (--) Nwogu reference solution, (-) 1 level, resolution 0.1m, (-) 2 levels, resolution (0.05, 0.1)m, (-) 4 levels, resolution (0.05, 0.1, 0.2, 0.4)m, (-) 4 levels quadtree mesh, resolution (0.1, 0.2, 0.4, 0.8)m, (--) Nwogu input + 4 levels, resolution (0.05, 0.1, 0.2, 0.4)m.

code for the first 8 second and use the resulting solution as input for the quadtree mesh, such that the code runs the SWE only when the dispersive effects are less significant. As we can see, the mixed result can follow closely the dispersive solution (in the grey dashed line), suggesting the potential of this coupled approach.

These results demonstrate that adaptive quadtree refinement enables the swe to efficiently resolve the dominant coastal processes while using a substantially reduced number of computational cells, making the approach attractive for large-scale coastal inundation and tsunami simulations. The result shows that the code is also robust as it can solve a complex case on a strongly non-uniform mesh without instabilities appearing.

Conclusions

The proposed quadtree shallow water solver provides an efficient framework for nearshore wave propagation and coastal inundation modelling. By concentrating computational resolution in regions with complex bathymetry, wave transformation, breaking, and wetting-drying processes, while using coarser cells elsewhere, the method can reduce the computational cost associated with uniformly fine meshes without compromising the representation of the dominant hydrodynamic processes.

The results obtained for the reef benchmark demonstrate that the proposed quadtree shallow water solver is robust on a strongly non-uniform mesh and can reproduce the main features of the benchmark Nwogu solution and be comparable with the uniform mesh SWE solution. It can be employed in near- and on- shore application, with fine and complex features, without expanding a costly uniform mesh in the complete domain. The present work establishes a solid foundation for several future developments. Those will focus on coupling the adaptive quadtree shallow water solver with offshore dispersive wave models, such as Boussinesq-type or Serre–Green–Naghdi formulations. A further development will be the implementation of fully dynamic, solution-driven mesh adaptation, allowing the refinement to evolve with the propagating waves and moving shoreline. These developments could provide an efficient multiscale modelling framework for large-scale coastal hazard applications, including tsunami and storm-surge inundation.

References

GIEC (2014). Changements climatiques 2014: Incidences, adaptation et vulnérabilité Résumés, foire aux questions et encarts thématiques.

Popinet, S. (2011). Quadtree-adaptive tsunami modelling. Ocean Dynamics, 61, 1261-1285.

Filippini, A. G., Bellec, S., Colin, M., & Ricchiuto, M. (2015). On the nonlinear behaviour of Boussinesq type models: Amplitude-velocity vs amplitude-flux forms. *Coastal Engineering*, *99*, 109-123.

Mihami, F. Z. (2023). *Development of a Phase-resolving Computer Model for Operational Nearshore Wave Assessment Développement d'un modèle de vagues littorales dispersives pour l'évaluation opérationnelle des risques côtiers* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).

Borthwick, A. G. L., Cruz León, S., & Józsa, J. (2001). Adaptive quadtree model of shallow-flow hydrodynamics. *Journal of Hydraulic Research*, *39*(4), 413–424. https://doi.org/10.1080/00221680109499845.

Roeber, V., and Cheung, K. F. (2012). Boussinesq-type model for energetic breaking waves in fringing reef environments. Coastal Engineering, 70, 1-20.

*Acknowledgement*s - The authors thank the R4C (Regions for Climate) project and the found AIRCE, Communauté d'agglomeration Pays Basque that founded this research.

GOBERNANTZA, KUDEAKETA-TRESNAK ETA KOMUNIKAZIOA
GOBERNANZA, HERRAMIENTAS DE GESTIÓN Y COMUNICACIÓN
GOUVERNANCE, OUTILS DE GESTION ET COMMUNICATION
GOVERNANCE, MANAGEMENT TOOLS AND COMMUNICATION

The roads in Coastal Management and Protection Plans in a climate change scenario: a case study in Biscay

de Ortuzar, José María[1], de Ortuzar Mikel[1] and Amo, Miren Aranzazu[1]

Keywords: Coastal protection plans, roads, climate change, mitigation, adaptation, vulnerability

Introduction and object

On 2007 the Basque Government (Basque Autonomous Community or CAPV, Spain) approved the first Territorial Sectoral Plan for the protection of the Coast of the CAPV. Almost twenty years later, an update of this plan is ongoing. Thus, on December 2025, the Basque Government (EJ-GV) adopted the Order approving initially the Draft Territorial Sectoral Plan for the Protection and Management of the Coastline of the CAPV (EJ-GV, 2025). The Order opened a period of public information and hearing of the mentioned Draft Territorial Sectoral Plan, (Draft PTS). Currently the Draft PTS is pending approval by the Basque Government.

The aim of the Draft PTS is the protection of the Coast of the CAPV to preserve its natural values. This aim is further emphasized nowadays due to the concern about the consequences of the Climate Change, since this change may have a special impact on the coast, such as on the increase of seawater temperature owing to the greenhouse gas (GHG) emissions, and thus on the sea level rise, or on the occurrence of extreme climate events on the coast. The Memory of the Draft PTS (EJ-GV,2025a) presents in detail its objectives.

In the Draft PTS, after stating its general objectives, which include Goals 11, 13, 14 and 15 of the Agenda 2030 for Sustainable Development, its specific objectives are presented as follows: 1) Consider the Basque coastline as a whole as a valuable natural heritage for which it is necessary to implement protection measures that reduce the impacts derived from the significant dynamics of the implementation of activities. 2) Consider the effects of climate change in territorial and urban planning, as an overlapping condition that covers the entire area of the PTS, contributing through its proposals for adaptation to the impacts foreseen by climate change to improve resilience. 3) To provide the criteria, guidelines and basic standards that must be observed in the preparation of partial territorial plans (PTP) and in urban planning at the municipal level that contribute to protecting the coastline and allow the development of proposals for adaptation to climate change, defining beforehand a thematic cartography of impacts and vulnerabilities and proposing planning measures that allow the reduction of impacts. 4) To make the planning proposed by the PTS *(here: Draft PTS)* compatible within its scope of application with the regime of uses established by coastal legislation, in the public maritime-terrestrial domain and in the protection easement zone and with the current regulations approved by the competent hydraulic administration within the scope of its powers. 5) Coordinate the Plan with other territorial, environmental, or natural planning instruments operating on the coast and in the estuaries; and 6) To achieve optimal coordination of territorial and urban planning actions between the Administrations that operate on the coast and its terrestrial environment (Central, Regional and Local Administrations) under the prior and obligatory respect for the administrative powers of each party and the coordination mechanisms in force

Specific objective 5) regards coordination of the Draft PTS with, among others, territorial planning instruments other than urban planning. The object of this extended abstract concerns this specific objective and is focused on a particular planning, namely, road design, construction and maintenance planning. The Draft PTS contains several specifications which may affect road design, construction and maintenance in coastal areas, including limitations for these activities. In the framework of the above mentioned period of public information and hearing of the Draft PTS, the Technical Services of the Department of Infrastructures and Territorial Development of the Biscay Territorial Council (DFB), responsible for the road network of Biscay, in a constructive spirit, elaborated suggestions, remarks and allegations to the Draft PTS. Although these suggestions, remarks and allegations derive from the experience with the roads of Biscay, it can be easily verified that they may also be valid for other coastal territories, as for Gipuzkoa in the CAPV. Then, the object of this extended abstract is to highlight the interest of a revision of these limitations from the environmental and functional perspectives. With this aim, the present abstract tackles the next aspects: an overwiew of the beneficial impacts of actions on roads, applicable to coastal areas; subsequently, the main limitations to road projects, execution and maintanance contained on the Draft PTS are addressed; next a proposal for revision of these limitations is included, considering several factors, such as the beneficial impacts of the actions on roads on the coast. Finally, conclusion are presented.

[1]*Bizkaiko Foru Aldundia, Azpiegituretarako eta Lurralde Garapenerako Saila (Diputación Foral de Bizkaia, Departamento de Infraestructuras y Desarrollo Territorial, Biscay Territorial Council, Infrastructures and Territorial Develpment Department), Bilbao, Biscay*
E-mail contact: jose.maria.de.ortuzar@bizkaia.eus

Beneficial impacts of actions on roads applicable to coastal areas

Form the authors' experience, actions on roads can be beneficial for the Coast from several points of view, comprising among them the environmental perspective. The following benefits can be mentioned:

- Contribution to mitigate climate change and consequently, also the sea level rise: This contribution, expressed succinctly, could be summarized as the contribution to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. It is well known that road construction generates GHG emissions; road operational phase also generates GHGs, primarily due to vehicle emissions. The effect of construction is limited in time, while the effect during operation is permanent, both being negative. However, the construction or renovation of roads can also have positive effects, contributing to a permanent reduction in GHG emissions, depending on the configuration (or alignment) and design of the roadwork. An example of this would be a new road that reduces travel distance (one that provides a shortcut), as it reduces GHG emissions, which are generally proportional to the distance traveled. Roads that reduce congestion also contribute to the reduction of GHG emissions by minimizing stop-and-go traffic, which generates extra GHGs. A recent example is the Lamiako Subfluvial Tunnel in Biscay project , which will reduce the distance traveled by vehicles from 14 km to 4.5 km between Portugalete and Getxo (Biscay). This represents an annual minimal reduction of 6,000 tons of CO_2 emissions, according to DFB (2025). In short, a new road, but also a renovated one, can contribute to reducing GHG emissions and thus to mitigating climate change and, consequently, to reducing sea level rise.
- Contribution to climate change adaptation. Vulnerability. The public consultation document for the Basque Country's Coastal Protection and Management Plan (Draft PTS) refers in multiple sections to measures to combat vulnerability, understood as vulnerability due to factors related to climate change, such as sea level rise, torrential rains, or flooding caused by extreme weather events. Furthermore, depending on its configuration and design, a road can also contribute to reduce this vulnerability and thus to adapt to extreme weather events resulting from climate change. Returning to the example of the Lamiako Subfluvial project, it is well known that between Bilbao and the mouth of the estuary, there is only one high-capacity road connection across the river: the Rontegi Bridge. This connection is currently operating at its maximum capacity (it is not uncommon to see 160,000 or more vehicles per day on the bridge—which has a total of eight lanes—which is synonymous with capacity being exhausted in such situations). Evidence of this is the frequent congestion and traffic jams that occur on the bridge with any traffic incident, even minor accidents: this congestion quickly spreads to the network, which becomes almost immediately overwhelmed. The network is, thus, currently vulnerable to traffic incidents and accidents, but it is also vulnerable to extreme weather events—such as those mentioned above potentially related to climate change—which would certainly cause accidents or road closures due to landslides and, consequently, a collapse of the network, similarly to road accidents. All this would imply the inability to access emergency services (ambulances, firefighters, etc.) and to properly evacuate those affected. However, the Lamiako Subfluvial Tunnel, due to its alignment and configuration, provides an escape route: it offers a second option for evacuating the estuary. This reduces vulnerability, also to extreme weather events resulting from climate change.
- Other features that increase climate neutrality: a significant number of road improvements do not involve building new roads—as is the case with the Lamiako Subfluvial Tunnel —but rather remodeling existing ones. These remodels can be of various types: they can be actions to eliminate a bottleneck that generates congestion—and therefore increases GHG emissions—as was the remodeling of the Kukularra interchange in Biscay between the BI-637 and the N-637 roads in 2021 (now the BI-30); another remodeling can consist of modifying the alignment, without deviating significantly from the existing road channel, by increasing curve radii, lane or shoulder widths, or improving overtaking possibilities on certain sections of road: all of this improves traffic flow and reduces road hazards and accidents. Additionnaly these improvements facilitate the access of public transport vehicles and discourages the use of private cars. There are other examples of remodeling besides those mentioned. All the above mentioned examples help to avoid congestion and reduce GHG emissions. The road actions mentioned contribute to mitigate the climate change effects, comprising global warming and thus the sea level rise.
- Other features that increase resilience to climate change Furthermore, in scenarios of extreme weather events, it will undoubtedly be necessary to have roads that allow for the smooth flow of traffic in order to respond to emergencies and ensure the safety of the population—in other words, to adapt to the potential consequences of climate change. A specific case might be the evacuation of the people of coastal areas in an extreme weather event scenario (as a tsunami). In short, it is essential to maintain the functionality of roads, since in some cases they can become critical infrastructure in emergency situations and must be fully operational. In other words, roads may permit to adapt to climate change. Preserving road functionality with adequate road maintanance and upgrading actions contributes to the adaptation to climate change.

These considerations aim to highlight the beneficial contribution of roads to climate change action (mitigation and adaptation). Road actions, as stated, may reduce GHG emissions and, in scenarios of extreme weather events, roads can help minimize the negative effects of these events, since it is essential in such scenarios that emergency services can reach the locations where they are needed and that evacuations can proceed without disruption.

And to achieve all this, it is necessary to remodel and maintain roads so that their configuration and alignment permanently comply with sufficient design and safety standards and regulations to ensure safe traffic, especially in emergency situations. Therefore , we believe that when establishing limitations on the construction or remodeling of transport infrastructure, and specifically roads, within the Coastal Transport Plan (Draft PTS), it is essential to consider and assess the contribution of roads to face climate change effects, and in particular the need to guarantee safe traffic, especially during extreme weather events. In fact, in these situations roads become critical infrastructures, which, if they form a resilient network, can prevent the environment from becoming a death trap with incalculable consequences, with no chance to escape for the affected population or of moving smoothly to public emergency services.

Main limitations to road projects and maintenance on the Draft Basque Country's Coastal Territorial Sectoral Plan currently on approval process

The Draft PTS includes several limitations to actions on roads. The main limitations can be summarized as follows

- In certain zones of the coast, only actions to reform of modify roads with an environmental protection objective (or main objective) will be authorized. In some cases this (main) objective is the reduction of vulnerability, or the minimization of risks (associated with sea level rise), and other environmental objectives.
- Actions on roads on special protection zones are prohibited
- The creation of a new transport route will only be permitted if the latter is comprised in the Road Territorial Sectoral Plan. However, no limitation will be imposed to execute new roads linked to the maintenance or protection of the natural environment.
- In the Draft PTS, in our view, there is not a clear or sufficiently emphasized distinction between actions on roads depending on their type or relevance: upgrading, enhancement, remodelling, new road, etc, do not have a distinct enough approach.
- For certain building rehabilitation or regeneration activities (without distinction between public or private actions) , it is permitted the consideration of the parameters of the RCP 4.5 scenario, instead of those of the RCP 8.5 adopted in other sections of the Draft PTS. This possibility is not considered for actions on roads.
- Regarding actions on roads, in certain sections of the Draft PTS, to enable the execution of certain actions, it is required to provide an impact analysis of the infrastructure in the Urban detailed Planning ("ordenación pormenorizada") . Similarly, in other section of the Draft PTS it is required a hydrogeological analysis in the Urban Planning.

Proposals for revision of the Draft Plan

As stated above, the Technical Services of the Department of Infrastructures of DFB elaborated, in a constructive spirit and based on the beneficial effects of the actions on roads, several suggestions, remarks and allegations to the Draft PTS, which may be summarizead as the proposals listed below for a revision of the said Draft PTS, and specifically of the limitations mentioned in the previous section:

- Add to the environmental objectives of the permitted actions on roads of the Dratf PTS, other simultaneous and compatible objectives, as the functional enhancement, upgrading to standards, alignment and road safety adaptations, and in general remodelling of roads, taking into account their contribution -also- to relevant aspects, as mitigation and adaptation to Climate change, to provide escape routes from the coast regarding extreme climate events, to enhance road functionality and road safety. Thus, permit the simultaneity and compatibility of both environmental and functional objectives of the actions on roads in the Draft PTS
- A case-by-case examination of actions on special protection zones, since currently existing roads on these zones provide a public road service comprising access to the territory, and require regular maintenance, and also upgrading over time presumably. Besides, the interest of other enhancements should not be discarded.
- Eliminate the requirement of the Draft PTS for the inclusion of new transport road projects in the Road Territorial Sectoral Plan, due to the long approval process of this Plan: a fact that may make unrealistic the execution of urgent road projects in a reasonably short period. The Biscayan Road Norm, however, includes other options of road planning tools, as the planning tools or studies (instrumentos o estudios de planeamiento), or simply construction projects, which both comprise complete Environmental impact Assessment and public information periods, ensuring thus environmental protection and public participation and have shorter and more realistic approval periods than the Roads Territorial Sectoral Plan for urgent projects.
- Include a more clear distinction of road project actions (road enhancemenmt, maintenance, upgrading to stardards, new projects, etc), so that limitations to these actions may be adequately graded to the type and the relevance of each action.
- Extend the consideration of RCP 4.5 scenario parameters also to certain road actions, conceptually similar to rehabilitation or regeneration, taking into account their public utility and interest.
- Eliminate the requirement of the inclusion impact and hydrogeologial studies of a specific road project in Urban Plans or Urban detailed plans ("ordenación pormenorizada") and, instead, require them in the construction projects and mentioned Planning studies or tools (estudio o instrumento

de planeamiento), where the the level of detail is high and the spatial scope and the objectives of these documents are much more suited to the road project than the Urban Plans (detailed o not), which cover much larger areas and consequently loss precision.. In addition, construction projects and mentioned Planning studies or tools, ensure, as stated, environmental impact assessment and public participation.

Conclusions

It is known that road construction and operation generate GHG emissions, and that they impact the environment. However actions on roads can also help reduce these effects, and specifically contribute to reduceçing those of the climate change. These beneficial effects together with the contribution to providing escape roads may be of interest regarding coast protection. The present Draft PTS in approval process, comprises several limitations to actions on roads on coastal areas in the CAPV. They have been analysed by the Technical Services of the Department of Infrastructures of the DFB. The present abstract presents the mentioned beneficial effects of the actions on roads, the limitations included in the Draft PTS and a prosposal for revision of these limitations considering the environmental and functional contributions of the actions on roads on the Coast.

References

EJ-GV, 2025 Order approving the initial Territorial Sectoral Plan for the Protection and Management of the Coastline of the Basque Autonomous Community, December 15, 2025 (BOPV No. 241, 15-XII-2025), Vitoria.Gasteiz, Basque Country, Spain

EJ-GV, 2025a "Plan Territorial Sectorial de Protección y Ordenación del Litoral de la CAPV" Documento de Aprobación Inicial A. Memoria", noviembre de 2025 "Sectoral Territorial Plan for Protection and Management from the Coastline of the CAPV" initial approval document A." Memory november 2025, Vitoria.Gasteiz, Basque Country, Spain

DFB 2025 (Diputación Foral de Bizkaia). Proyecto de construcción del enlace subfluvial Lamiako-Ballonti. https://www.contratacion.euskadi.eus/anuncio_contratacion/pc-subfluvial-lamiako-enlace-del-ballonti/webkpe00-kpeperfi/es/

*Acknowledgement*s - The authors thank Biscay Territorial Council (DFB), where they carry out their activity.

Desarrollo de herramientas para un sistema de alerta temprana de inundación costera en una bahía confinada: el caso de Pasaia

Abalia Aritz[1], Gaztelumendi Santiago[2], Auzokoa Joana,[3] Epelde Irati[1], Egaña Joseba[2], Liria Pedro[1], del Campo Andrea[1], González Manuel[1], de Santiago Iñaki[1], Nieto Asier[1], Garnier Roland[1]

Palabras clave: Sistema de alerta temprana, inundación costera, bahía confinada, formulación empírica.

Introducción

Los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) proporcionan información sobre las zonas afectadas y el momento en que se producirán los posibles riesgos de inundacion costera, así como la gravedad de los impactos esperados. Su objetivo es informar y mitigar el impacto de estos eventos mediante la puesta en marcha, a tiempo, de medidas locales de protección contra inundaciones, activar planes de evacuación o la prohibición del acceso de peatones y vehículos a zonas críticas. Esto beneficia a las autoridades locales, los usuarios de las zonas afectadas o los propietarios de inmuebles y otros bienes que se ven directamente afectados por las inundaciones costeras.

En el caso del País Vasco, actualmente opera un SAT regional de impacto en costa, diseñado de forma general para entornos expuestos de costa abierta y con un enfoque principal en áreas urbanas adyacentes a playas y estructuras de protección (Gaztelumendi et al., 2024, Gaztelumendi et al., 2016). Este sistema funciona como una herramienta de gestión costera a corto plazo para predecir riesgos causados por los temporales, informar a la poblacion y asistir a las autoridades en la implementación de medidas. Sin embargo, la costa vasca también incluye otros entornos litorales confinados, como bahías, donde la contribucion de los agentes hidrodinámicos actuantes puede diferir notablemente de la costa abierta, lo que requiere enfoques específicos para predecir con precisión el nivel de riesgo (de Santiago et al., 2024, Abalia, 2025).

El presente trabajo describe el desarrollo y validación de herramientas para un SAT de inundaciones de origen marino adaptado al entorno confinado de la bahía de Pasaia, concretamente, al nucleo urbano de Pasai Donibane. Este entorno experimenta episodios recurrentes de inundación, cuya frecuencia e intensidad se espera que aumente debido a la subida del nivel del mar, lo que hace necesaria la creación e implementación de herramientas específicas adecuadas a sus características hidrodinámicas particulares que permita anticipar el peligro.

[1]*AZTI Marine Research, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Herrera Kaia. Portualdea Z/g, 20110 Pasaia, Gipuzkoa, Spain.*
[2]*Basque Meteorology Agency (Euskalmet), Portal de Foronda, 41, 01010 Vitoria-Gasteiz, Álava, Spain.*
[3]*Pasaiako Udala, Donibane kalea, 19, 20110 Pasaia, Spain.*
E-mail: aabalia@azti.es



Figura 1. Zona de estudio y ubicación de materiales. Circulo azul: Boya de Donostia. Círculo verde: dispositivo de medición RBR. Estrella verde: Mareógrafo.

Materiales y métodos

El desarrollo se basa en la formulación del Nivel de Agua Total (TWL, siglas en inglés), descompuesto en cuatro componentes:

TWL = AT + SS + IG + SW

donde AT es la marea astronómica, SS la marea meteorológica, IG las oscilaciones infragravitatorias y SW el oleaje. Esta formulación tiene como objetivo estimar el nivel máximo de agua alcanzado en Pasai Donibane ante eventos de temporal. Mientras que AT y SS son variables del nivel del mar que se pueden predecir con la suficiente precisión a escala regional, IG y SW requieren de un análisis local específico.

IG en Pasai Donibane se define como la semi-amplitud de la altura de ola infragravitatoria,

$$IG = H_{Donibane_{IG}}/2$$

Mientras que SW en Pasai Donibane se define como la semi-amplitud de la altura del oleaje de gravedad,

$$SW = H_{Donibane_{SW}}/2$$

Para el desarrollo y calibración de una formulación que permita calcular $H_{Donibane_{IG}}$ y $H_{Donibane_{SW}}$ se dispone de datos hidrodinámicos horarios de la Boya de Donostia (Hs, Tp y Dir), datos cada segundo del mareógrafo ubicado en AZTI y del dispositivo de medición RBR colocado para este fin en la plaza de Pasai Donibane. La localización de los sensores se muestra en la Figura 1. Las series de datos analizadas se limitaron al periodo más corto de datos (RBR), entre el 23 de agosto de 2025 y el 30 de enero de 2026 para la calibración y entre el 30 de enero de 2026 y el 30 de abril de 2026 para la validación. La metodología implementada consiste en:

- Aplicar filtros digitales (González et al., 2013) a las series de datos del mareografo de AZTI y del RBR para extraer los datos de las frecuencias $H_{Donibane_{IG}}$ y $H_{Donibane_{SW}}$.
- Obtener las correlaciones entre las series de datos de la Boya de Donostia, y los datos de $H_{Donibane_{IG}}$ y $H_{Donibane_{SW}}$ extraidos del mareógrafo de referencia AZTI y el dispositivo de medición RBR de Pasai Donibane.
- Generar las formulaciones empíricas para el cálculo de $H_{Donibane_{IG}}$ y $H_{Donibane_{SW}}$.
- Validar las formulaciones empíricas.

Resultados y discusión

Las correlaciones entre las fuentes de datos derivan en las siguientes formulaciones empíricas:

$$H_{Donibane_{IG}} = \frac{(0.74 \cdot H_{azti_{IG}} + 0.017)}{1000};\ \text{RMSE: 5 cm} \mid R^2 = 0.94$$

$$I_{azti_{IG}} = -1.44 + (0.61 \cdot I_{index}) + (0.06 \cdot {I_{index}}^2);\ \text{RMSE: 10 cm} \mid R^2 = 0.94$$

$$H_{Donibane_{SW}} = 0.048 \cdot H_s - 0.02;\ \text{RMSE: 4 cm} \mid R^2 = 0.74$$

Para el ajuste de la componente infragravitatoria se utiliza el indicador de IG (Ardhuin et al., 2010):

$$I_{index} = T_p \cdot \sqrt{g \cdot H_{sc}}$$

Donde se ha corregido la H_s en aguas profundas en función de la alineación costera de la zona del siguiente modo:

$$H_{sc} = H_s \cdot \sqrt{\cos(320 - \alpha)}$$

H_s=Altura de ola significante en la localización de la boya de Donostia (m)

T_p=Periodo de pico del oleaje en la localización de la boya de Donostia (s)

α=Dirección media del oleaje en la localización de la boya de Donostia (º)

g=9.81m/s²

Las relaciones empíricas obtenidas presentan coeficientes de determinación superiores a 0.94 con un RMSE entre 5 y 10 cm para la componente infragravitacional ($H_{Donibane_{IG}}$) y superiores a 0.74 con un RMSE de 5 cm para las ondas cortas ($H_{Donibane_{SW}}$) en condiciones de pleamar.

La validación del sistema de predicción se realizó utilizando las series de datos entre el 30 de enero y el 30 de abril de 2026. La comparación de los niveles de agua total predichos (TWL) frente a los medidos por el mareógrafo RBR de Pasai Donibane muestra un rendimiento satisfactorio del sistema (Figura 2) con un un RMSE de 0.19 m, un valor de correlación de 0.98 y un BIAS de 0.01 m, confirmando la validez de las formulaciones propuestas. En la Figura 2 se muestra también un zoom a la comparativa entre el 15 y 28 de febrero de 2026, cuando ocurre el valor máximo del RBR de Pasai Donibane. Se aprecian diferencias máximas de hasta 0.25 m de sub y sobreestimación

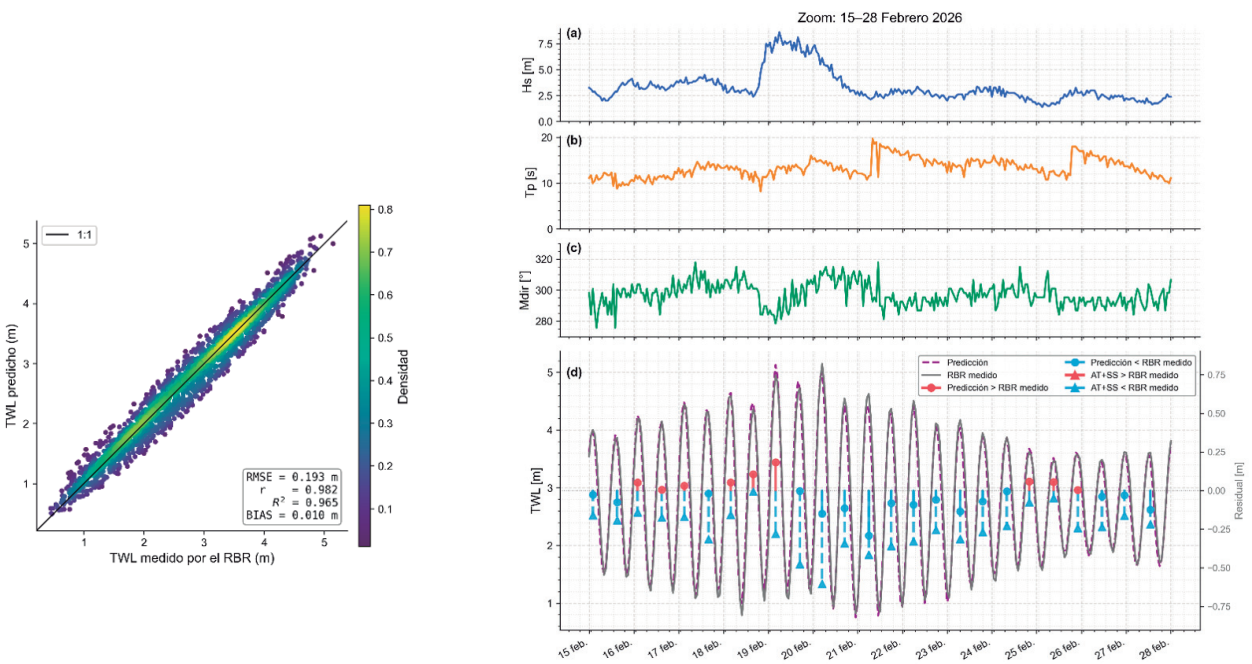


Figura 2. Validación de las herramientas desarrolladas en el periodo entre el 30 de enero de 30 de abril de 2026. Detalle temporal al valor máximo de la serie de validación donde se muestran las predicciones de oleaje y nivel del mar junto al TWL predicho y medido.

por parte de la previsión (círculo), que pueden ser de hasta 0.6 m si no se considera la componente IG y SW del oleaje (triángulo). Esto resalta la influencia del oleaje en la precisa estimación del TWL, a pesar de ser una bahía muy confinada.

Conclusiones

El trabajo ha demostrado la viabilidad de desarrollar herramientas para un SAT de inundación costera específicamente adaptado a entornos confinados como la bahía de Pasaia, a través de formulaciones empiricas con medidas de nivel del mar. El indicador de nivel del mar total basado en la formulación TWL = AT + SS + IG + SW ha sido calibrado y validado satisfactoriamente a partir de datos hidrodinámicos horarios de la Boya de Donostia (Hs, Tp y Dir), datos cada segundo del Mareógrafo ubicado en AZTI y del dispositivo de medición RBR ubicado en la plaza de Pasai Donibane, cubriendo el periodo agosto 2025 – abril 2026.

Las relaciones empíricas obtenidas durante el periodo agosto de 2025 y enero de 2026 presentan coeficientes de determinación superiores a 0.94 para la componente infragravitacional ($H_{Donibane_{IG}}$) y superiores a 0.74 para las ondas cortas ($H_{Donibane_{SW}}$) en condiciones de pleamar, lo que garantiza la robustez del sistema. La validación con datos independientes a los de calibración entre enero y abril de 2026, confirma la aplicabilidad del sistema en modo pre-operativo, con un un RMSE de 0.19 m, un valor de correlación de 0.98 y un BIAS de 0.01 m resaltando la importancia que tiene la componente $H_{Donibane_{IG}}$ del oleaje en el cálculo del TWL.

Como próximas líneas de actuación se proponen: validar la metodología utilizando las fuentes de previsión y operativa de Euskalmet en lugar de datos medidos, relacionar valores de TWL con distintos niveles de riesgo mediante una reconstrucción de la serie histórica de eventos extremos con valoración de daños, el análisis de medidas de atenuación de inundaciones, el diseño de la instrumentación para la monitorización permanente de la Bahía (incluyendo análisis de ubicaciones y definición de equipos), y una reflexión sobre riesgos compuestos. Para el invierno de 2026 se plantea la implementación de una fase pre-operativa de las herramientas para predecir el nivel de riesgo en Pasai Donibane en una ventana de 72 h.

Referencias

Abalia. A. (2025). *Coastal flooding hazard assessment at different spatial scales-Basque coast* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).

Arduin, Fabrice, Devaux, Emmanuel, et Pineau-Guillou, Lucia. Observation et prévision des seiches sur la côte Atlantique française. XIièmes Journées Nationales» Génie Civil-Génie Côtier, 2010, p. 22-24.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., R.Gelpi I., Gómez de Segura J.D., Aranda, J.A. (2024). El sistema de acción temprana frente al riesgo marítimocostero en Euskalmet. VI Congreso transfronterizo sobre cambio climático y litoral UHINAK. Irun, octubre 2024.

de Santiago, I., Plomaritis, T. A., Avalos, D., Garnier, R., Abalia, A., Epelde, I., & Liria, P. (2024). Comparison of wave overtopping estimation models for urban beaches. Towards an early warning system on the Basque coast. *Science Total Environment*, *912*, 168783.

Gaztelumendi, S., Egaña, J., Liria, P., González, M., Aranda, J. A., & Anitua, P. (2016). The new Euskalmet coastal–maritime warning system. *Advances in Science and Research*, *13*, 91-96.

González M. y Fontán A. Filtros digitales para suprimir la variabilidad estacional y plurianual en series climáticas de datos. Revista de Investigación Marina, AZTI, 2013; 20: 71-76.

Reconocimientos – Los autores agradecen al Ayuntamiento de Pasaia la colaboración y financiación de este estudio. Dicha financiación ha contado con la subvención del Departamento de Sostenibilidad de la Diputación Foral de Gipuzkoa.

(175... años de cambio) en torno a Txingudi

Castro, Raúl[1]

Palabras clave: antropología, biodiversidad, cambio, historiografía, litoral

Introducción

La bahía de Txingudi, entorno que acoge este congreso internacional, experimenta a lo largo de los tiempos innumerables avatares; principalmente ligados a su carácter transfronterizo.

Materiales y métodos

A través de cartografía y recopilación de documentos pasados y actuales, el autor pretende centrar hitos, hechos de interés y sucesos acaecidos en los últimos ciento setentaicinco años (1850-2025); refiriéndolos a un ámbito geográfico, contexto histórico y marco normativo más amplio (de 175.000 a 1.750 años/artículos).

Resultados y discusión

A partir de un contexto geomorfológico, biogeográfico y antropológico centrado en el cañón de Capbretón (medio marino), Landas del Adour (fluctuante entre Vieux Boucau y Bayonne hasta su canalización en 1578), el valle cantábrico del Baztán-Bidasoa y acantilados costeros en erosión de Biarritz a Matxitxako; cabe destacar los siguientes hallazgos:

- *Características oceanográficas singulares*. Los restos más antiguos de la ballena vasca en la zona tienen 20.000 años, luciendo además en los blasones de Hendaia y Hondarribia. Por su parte, la aparición más reciente de mero "frontalier" data de hace apenas seis años y puede observarse en https://www.youtube.com/watch?v=0P4_0D5YVm4 .
- *Peñas y coronas que enmarcan un espacio* hidráulico-marítimo-terrestre transfroterizo en el que destacan sus peces migrantes (salmón, anguila, sábalo y lamprea:



Figura 1. Ilustraciones correspondientes al Atlas Emocional del Bidasoa (Massetani *et al*. 2022).

[1]*AZTI, Herrera Kaia. Portualdea. 20110 Pasaia (Gipuzkoa)*
E-mail: rcastro@azti.es

https://www.gipuzkoa.eus/es/web/flora-fauna/kantauribai) y humedales LIFE 3.0 - LIFE24-IPN-ES-LIFE-HumedalES/101202850

- El estuario es utilizado para el ocio intergeneracional, centrado en el paseo y el remo (piragüismo). El baño y la observación de aves y fenómenos naturales constituyen también importantes recursos culturales.
- *Consecuencia del cambio, las huertas inundadas en las islas del Bidasoa se restauran a marisma.*
- *El marco normativo transfornterizo conlleva situaci*ones tan curiosas como que, al menos durante años, seis meses (de febrero a julio) las márgenes de la isla de los Faisanes fueron en español "una masa de agua natural, no modificada" y el resto (de agosto a enero) en francés "une masse d›eau fortement modifiée".
- Futuro incierto ¿conseguiremos manejar adecuadamente esta biodiversidad natural en declive aparente a través de una maquinaria teórico-administrativa cada vez más compleja? El Atlas Emocional del Bidasoa, con sus 10 cuadernillos ilustrados (Figura 1: Massetani et al. 2022), nos aporta ideas útiles.

Conclusiones

Un espacio natural en equilibrio, consentido entre todas las personas usuarias, no debe requerir de costosas actuaciones, ni de farragosa normativa ni de coacciones para su mantenimiento.

Referencias

McGrath, K., van der Sluis, L.G., Lefebvre, A. et al. Author Correction: Late Paleolithic whale bone tools reveal human and whale ecology in the Bay of Biscay. Nat Commun 16, 7795 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-63273-w

Massetani Piemonte, Helga; María José Noain y Elena Odriozola 2022. «Atlas Emocional Del Bidasoa». AusArt 10 (2). https://doi.org/10.1387/ausart.23921.

Reconocimientos – El autor agradece a todas las personas que hacen posible esta publicación y a cuantas contribuyan con sus aportaciones.

IDAFE: acción climática e innovación en el sistema educativo

Oyola Hernández, Facundo[1], Pestana Pérez, Gustavo[2], Puga García, María Ángeles[2], González Navarro, Jesús[1], Ramos Sánchez, Reynaldo[1], Santana Santana, Sara Beatriz[1], Ojeda Ramírez, Laura[1], Cabrera Peñate, Alejandro Doramas[1], Rendal Freire, Sara[1], Abreu Hernández, Marta Victoria[3], Ruíz Rodríguez, Almudena[3]

Palabras clave: alfabetización climática, adaptación curricular, resiliencia, educación ambiental, altas temperaturas, innovación educativa

Introducción

El Proyecto IDAFE nació en 2024 como una respuesta estratégica del Servicio de Cambio Climático e Información Ambiental de la Consejería de Transición Ecológica y Energía del Gobierno de Canarias ante los retos climáticos que afectan a los territorios insulares, caracterizados por su fragmentación geográfica, la presión sobre la franja costera, la dependencia de sectores sensibles al clima y la creciente exposición a episodios de altas temperaturas. En este contexto, dicho Servicio, en coordinación con la Consejería de Educación, Formación Profesional, Actividad Física y Deportes, diseñó e impulsó una iniciativa orientada a integrar la acción climática en los centros educativos sostenidos con fondos públicos de Canarias, contribuyendo al desarrollo de una cultura climática basada en el conocimiento científico, la participación educativa y la adaptación del entorno escolar.

IDAFE parte de una premisa operativa fundamental: la educación climática debe conectar la evidencia científica con problemas locales, observables y significativos para el alumnado. Por ello, el proyecto traslada el cambio climático al entorno escolar mediante una propuesta competencial que convierte los centros educativos en espacios de investigación, diagnóstico, deliberación y acción. Su finalidad no se limita a sensibilizar, sino que busca fortalecer capacidades para comprender los impactos del cambio climático en Canarias, interpretar datos, identificar vulnerabilidades y diseñar respuestas de adaptación contextualizadas.

La iniciativa se alinea con la Ley 6/2022, de 27 de diciembre, de Cambio Climático y Transición Energética de Canarias, con la Estrategia Canaria de Acción Climática y con los principios educativos de la LOMLOE y del currículo canario, especialmente en lo relativo al desarrollo sostenible, la educación ambiental, la ciudadanía activa, la inclusión y la transferencia del conocimiento científico al aula.

IDAFE se inserta, además, en un marco operativo ya consolidado. El Plan de Formación ante Emergencias de Protección Civil en centros educativos no universitarios de Canarias (curso 2025-2026) responde al aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos naturales extremos y establece una formación anual del alumnado y una formación previa del profesorado en prevención y respuesta ante los riesgos recogidos en el Real Decreto 524/2023, entre ellos los fenómenos meteorológicos adversos. En el ámbito específico del calor, el Protocolo de actuación en el ámbito educativo ante situaciones de altas temperaturas define cuatro niveles de riesgo con medidas progresivas, y el Plan de adaptación de los centros educativos a las altas temperaturas incorpora medidas estructurales de acondicionamiento del entorno escolar.

Estos instrumentos abordan el calor como episodio y como intervención, pero no como objeto de aprendizaje. Ahí opera IDAFE, aportando la dimensión educativa y competencial: el alumnado mide el confort térmico de su propio centro, interpreta los datos, identifica vulnerabilidades y propone soluciones de adaptación. Así, la cultura de la prevención y la cultura climática se refuerzan mutuamente, y las medidas de acondicionamiento dejan de percibirse como intervenciones externas para convertirse en decisiones comprendidas y apropiadas por la comunidad educativa.

Materiales y métodos

La intervención se estructura en torno a la Situación de Aprendizaje "Guardianes del Planeta: hacia un espacio educativo bioclimático", diseñada para Educación Primaria y Educación Secundaria Obligatoria. La propuesta permite al alumnado analizar su propio centro educativo, realizar mediciones climáticas, identificar zonas vulnerables frente al calor y formular una Estrategia Escolar frente a Episodios de Altas Temperaturas (EsAE).

La metodología combina formación docente especializada,

[1] Dirección de Medio Ambiente Las Palmas y Cambio Climático. Gestión y Planeamiento Territorial y Medioambiental S.A. (Gesplan S.A.), Calle Prof. Agustín Millares Carlo, 10, Las Palmas de Gran Canaria, España.
[2] Servicio de Cambio Climático e Información Ambiental. Viceconsejería de Lucha contra el Cambio Climático del Gobierno de Canarias, Avenida Francisco La Roche nº35, Edificio de Usos Múltiples I, planta 5, Santa Cruz de Tenerife, España.
[3] Área de Educación Ambiental y Sostenibilidad. Dirección General de Ordenación de las Enseñanzas, Inclusión e Innovación Educativa. Consejería de Educación, Formación Profesional, Actividad Física y Deportes del Gobierno de Canarias
E-mail: proyectoidafe@gesplan.es

acompañamiento técnico, uso de instrumentos de medición del confort térmico, trabajo cooperativo, aprendizaje basado en problemas y aprendizaje-servicio. El profesorado recibe apoyo para integrar la propuesta en sus concreciones curriculares, mientras que el alumnado trabaja con materiales didácticos específicos, cuadernos de registro, recursos audiovisuales y una caja de instrumentos para medir variables como temperatura, humedad, radiación, iluminación o concentración de CO_2, según la disponibilidad de cada centro.

El proceso de implementación se organiza en tres fases: formación del profesorado, desarrollo de la situación de aprendizaje en el aula y socialización de resultados en el Encuentro IDAFE. Durante el desarrollo de la experiencia, cada grupo participante elabora un diagnóstico del centro y propone medidas de adaptación y mejora de los espacios escolares, priorizando soluciones pasivas, soluciones basadas en la naturaleza y acciones de sensibilización de la comunidad educativa.

Resultados y discusión

La experiencia piloto desarrollada durante los cursos 2024-2025 y 2025-2026 permitió validar el enfoque metodológico y operativo del proyecto. Participaron 67 centros educativos públicos, más de 5.000 estudiantes, 236 grupos-clase y 288 docentes. Los centros elaboraron diagnósticos climáticos escolares, mapas de calor, propuestas de mejora de patios y espacios exteriores, acciones de sensibilización y estrategias de adaptación frente a episodios de altas temperaturas.

Uno de los principales resultados del proyecto ha sido la capacidad de transformar un contenido científico complejo en una experiencia educativa contextualizada. El alumnado no trabaja el cambio climático como un fenómeno abstracto, sino como una realidad que afecta a su bienestar, a la habitabilidad del centro, a los espacios de sombra, a los recorridos cotidianos y a la organización de los tiempos escolares. Esta aproximación favorece la comprensión de la adaptación climática desde una perspectiva práctica, participativa y emocionalmente significativa.

El Encuentro IDAFE, ya en su segunda edición, funcionó como espacio regional de intercambio de experiencias y buenas prácticas. En él, los centros participantes presentaron sus propuestas de actuación y se seleccionaron grupos representantes de Canarias en la Conferencia Internacional de Jóvenes (CONFINT). Esta dimensión pública del proyecto refuerza el protagonismo del alumnado y contribuye a consolidar una cultura escolar de participación climática.

Tabla 1. Principales resultados de la experiencia piloto del Proyecto IDAFE.

Indicador	Resultado curso 2024-2025 y 2025-2026
Centros educativos participantes	67
Alumnado participante	Más de 5.000 estudiantes
Grupos-clase	236
Docentes implicados	288
Productos generados	Diagnósticos escolares, mapas de vulnerabilidad y Estrategias Escolares frente a Episodios de Altas Temperaturas

Durante los cursos 2025-2026 y 2026-2027, IDAFE continúa su expansión con cofinanciación de la Unión Europea en el marco del Programa Canarias FEDER 2021-2027. La nueva fase amplía la participación a 37 centros educativos y consolida la presencia del proyecto en todas las islas del archipiélago, reforzando su potencial como herramienta de adaptación educativa y climática.

Conclusiones

IDAFE demuestra que la educación climática puede actuar como palanca de adaptación, innovación pedagógica y participación comunitaria cuando se diseña desde el contexto local y se apoya en metodologías activas. La propuesta favorece que el alumnado comprenda el cambio climático en Canarias, intérprete evidencias, identifique riesgos próximos y participe en la construcción de soluciones viables para su centro educativo.

El proyecto aporta un modelo transferible para integrar la acción climática en el sistema educativo desde una perspectiva competencial, inclusiva y ecosocial. Su valor estratégico reside en combinar formación docente, recursos didácticos, acompañamiento técnico, medición ambiental y socialización pública de resultados. La continuidad del proyecto permitirá mejorar la evaluación de impacto, consolidar indicadores comunes y reforzar la conexión entre políticas climáticas, políticas educativas y gestión de centros resilientes.

Referencias

González Navarro, J., Abaroa Pérez, B., Melián Melián, A., Ramos Sánchez, R. y Santana Santana, S. B. 2024. El abordaje del cambio climático en el aula. Propuesta didáctica en el contexto educativo de Canarias. Volumen II. Contenidos prácticos para la implementación en el aula. Gobierno de Canarias, Servicio de Cambio Climático e Información Ambiental de la Consejería de Transición Ecológica y Energía. Coordinación general: Gesplan, S.A. ISBN 978-84-09-80708-6.

González Navarro, J., Abaroa Pérez, B., Ramos Sánchez, R., Santana Santana, S. B. y Melián Melián, A. 2024. Guardianes del Planeta. Hacia un entorno educativo bioclimático. Gobierno de Canarias, Servicio de Cambio Climático e Información Ambiental de la Consejería de Transición Ecológica y Energía. Coordinación general: Gesplan, S.A. ISBN 978-84-09-80709-3.

González Navarro, J., Abaroa Pérez, B., Ramos Sánchez, R., Santana Santana, S. B. y Melián Melián, A. 2024. Guardianes del Planeta. Hacia un espacio educativo bioclimático. Cuaderno de Bitácora. Gobierno de Canarias, Servicio de Cambio Climático e Información Ambiental de la Consejería de Transición Ecológica y Energía. Coordinación general: Gesplan, S.A. ISBN 978-84-09-81049-9.

Gobierno de Canarias. 2025. Protocolo de actuación en el ámbito educativo

ante situaciones de altas temperaturas. Consejería de Educación, Formación Profesional, Actividad Física y Deportes. Septiembre, 2025.

Gobierno de Canarias. 2024. Plan de adaptación de los centros educativos a las altas temperaturas. Consejería de Educación, Formación Profesional, Actividad Física y Deportes y Consejería de Transición Ecológica y Energía.

Resolución conjunta de 2 de marzo de 2026 (BOC nº 57, 24/03/2026, nº 955) de la Viceconsejería de Educación y la Viceconsejería de Formación Profesional, con las instrucciones para desarrollar el Plan de Formación ante Emergencias de Protección Civil en centros educativos no universitarios de Canarias, curso 2025-2026.

Reconocimientos – Las personas autoras agradecen la colaboración de los centros educativos participantes, del profesorado y alumnado implicado, así como el apoyo técnico e institucional de las áreas de cambio climático y educación ambiental del Gobierno de Canarias y de Gesplan S.A.

The littoral observatory of the Emerald Coast and Mont-Saint-Michel Bay (North Brittany, France): bridging science and policy through integrated LiDAR, hydrodynamic modeling and virtual reality visualization

Nogue, Laurine[1,2], Collin, Antoine[1,2], Lamontagne, Nancy[1,2], James, Dorothée[1,2], Gloria, Hélène[1,2], Lesacher, Manuel[1,2]

Keywords: LiDAR, Digital Elevation Model, Multispectral, Machine Learning, Hydrodynamic modeling, Virtual Reality

Introduction

The Emerald Coast and Mont-Saint-Michel Bay represent one of Europe's most dynamic and ecologically significant coastal zones, yet they face mounting pressures from climate change, anthropogenic land-use modification, and sea-level rise. Effective coastal management requires robust scientific understanding coupled with accessible communication of complex environmental data to policymakers and stakeholders. This study presents an integrated observational framework that synthesizes high-resolution lidar processing, three-dimensional hydrodynamic modeling, and immersive virtual reality (VR) visualization to establish a science-policy nexus tailored to North Breton coastal governance.

Materials and methods

Our littoral observatory uses two main types of data to study the coastal habitats: multispectral images and LiDAR topography.

Multispectral images can be acquired by different types of sensors and different means of acquisition platform. These range from close-range, high-precision multispectral UAV campaigns to wide-coverage satellite imagery, complemented by punctual airborne campaigns using aircraft-mounted sensors.

Currently, the third generation of PlanetScope satellites provide us multispectral imagery composed of 8 spectral bands (Coastal blue, Blue, Green I, Green II, Yellow, Red, Red Edge and Near Infrared) every day on any land surface of Earth at a spatial resolution of 3 m. These data allow us to monitor land-sea use and cover over rich time series (Planet, 2021).

The Coastal GeoEcology Lab also conducts UAV campaigns to obtain multispectral images at ultra-high spatial resolution with different UAVs and sensors, such as the DJI Zenmuse P1 sensor on a DJI Matrice 300 RTK. This sensor acquires images at a spatial resolution of 0.08 m in 3 spectral bands (Red, Green and Blue) (DJI Enterprise, 2026a).

LiDAR data that we use are obtained by two types of acquisition platform: plane and UAV.

In France, the SHOM (*Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*, Naval Hydrographic and Oceanographic Service) provides LiDAR campaigns over the French coasts with the product Litto3D. This product provides point clouds and DTMs (Digital Terrain Models) at 1 m and 5 m resolution (SHOM, n.d.).

Also, with the Coastal GeoEcology Lab LiDAR UAV campaign, topographic data is also obtained at an ultra-high resolution. For example, the UAV DJI Zenmuse L3 sensor on a DJI Matrice 400 RTK can be used and allows us to get data at a spatial resolution of less than 0.10 m (DJI Enterprise, 2026b).

From all that data, different methods can be applied to obtain a lot of information over the Emerald Coast and Mont-Saint-Michel Bay.

Multispectral images can be used to classify the land-sea use and land-sea cover. For that, different Machine Learning and Deep Learning algorithms can be applied. One of the most famous is the Machine Learning algorithm named Random Forest.

Random Forest is a simple algorithm based on a composition of several decision trees to decide if one pixel belongs to one land-sea use-cover or to another. To train this algorithm, we indicate the Regions of Interest (ROI) with a specific number of pixels for each class. Those pixels are located on spots where the land-sea use-cover is present. Thus, the algorithm associates the values of the pixels with the class associated with. Also, the ROI of validation is indicated in another part where the class is present with certainty on the image. Using those pixels, we build a confusion matrix between the class of each validation pixel and the class indicated for this same pixel by the classification. To interpret the performance of the classification, several scores can be used; the most common is the kappa score.

In Mont-Saint-Michel Bay, the classification of the land-sea cover is very interesting to better understand and follow

[1]*Coastal GeoEcology Lab, EPHE – PSL, 35800 Dinard, France*
[2]*Laboratory of Biology of Aquatic Organisms and Ecosystems, 35800 Dinard, France*
E-mail contact: laurine.nogue@ephe.psl.eu

the change over the years. Between June 2017 and September 2024, the land-sea cover is studied using 30 PlanetScope images (three different generations: Dove-C, Dove R and SuperDove) for each of the 30 seasons between the summer of 2017 and autumn of 2024. For each date, we test different algorithms, varying the size of the train ROI (number of pixels per class) and the sensor (satellite generation). The goal was to follow the evolution of the cover of 12 different classes: Fresh water, Sea water – Turbid, Sea water – Non turbid, Sand – Dry, Sand – Wet, Mud, Soil, Vegetation – Schorre, Vegetation – Slikke, Buildings and roads, Crop fields and Honeycomb worm reefs (Nogue, 2025).

In this article, we show one result for the classification of an image (4 bands: Red, Green, Blue and Infrared) acquired by a SuperDove satellite on the 15th of September 2023, using 600 pixels (50-50% train and validation) and Random Forest.

LiDAR raw data are available as a point cloud in .LAS format. To obtain maps of the Digital Terrain, Surface and Height Model we need to do some treatment.

In this article, we present an example of the production of a DTM over the Mont-Saint-Michel Bay from Litto3D SHOM data. On 11th of May 2018, the SHOM acquired LiDAR data over the Mont-Saint-Michel Bay by plane during a low water spring tide. Downloading Litto3D products, we directly obtain LiDAR point clouds but also DTMs at 1 and 5 m of resolution. In this way, we know the topography of land and the intertidal part of the Mont-Saint-Michel Bay in spring 2018.

In the following work we use the DTM Litto3D product, but when we use LiDAR UAV data acquired by our own laboratory, we should rasterize the point cloud to obtain DSM (with upper points) and DTM (with lower points).

Topographic data are not an end in themselves. This can be used to simulate a hydrological event. CGWAVE is a function available on the application SMS AQUAVEO to simulate a particular event over a surface. In the Mont-Saint-Michel Bay, different habitats exist: honeycomb worm reefs, sand dune, and schorre, for example. Indeed, with the sea-level rise and the increased frequency and intensification of weather events, the Mont-Saint-Michel Bay coast should be exposed to more and more water submersion. Literature shows that habitats like schorre can be a natural barrier to protect our coast. Using CGWAVE, we can simulate special events like storms during high water spring tides with or without each natural habitat (playing on the DSM data) to know if and how much those habitats are essential for the future of our coasts.

CGWAVE is a function of SMS AQUAVEO developed by Panchang and Xu (1995) on the elliptic mild-slope wave equation. This model can "simulate the effects of refraction, diffraction, reflections by bathymetry and structures, dissipation due to friction and breaking, and nonlinear amplitude dispersion". In our work, we represent the topography using a point cloud grid at 10 m resolution, created from the SHOM's 5 m DTM product (AQUAVEO, n.d.).

The simulation is run over 8 different DTMs. The original DTM, a product of the SHOM, and 7 DTMs modified by hand to smooth each natural habitat of interest. Thus, the 8 DTMs are the original one, one without honeycomb worm reefs, one without sand dunes, one without schorre, one without both honeycomb worm reefs and sand dunes, one without both sand dunes and schorre, one without both honeycomb worm reefs and schorre, and one without the three habitats (honeycomb worm reefs, sand dunes, and schorre).

In this way, the measurement of the wave height with and without each habitat should show if and how much each habitat has an impact on the wave height and potentially on the submersion.

We choose to simulate an event particularly important with an atmospheric pressure of 963.5 hPa and gusts of wind reaching 165.7 km/h with the Ciarán storm. We replay the strongest day of the Ciarán storm, the 2nd of November 2023 with a wave period of 6.8 s, a wave amplitude of 2.5 m and an orientation of the wave from the west (265°).

Finally, to expose those results of coastal science to everyone and especially to local actors, it is important to find a good way of communicating. Virtual Reality is a good way to immerse someone in another reality. Moreover, some places, like honeycomb worm reefs and sand dunes far from several kilometers from the coast, are hard to access. With Virtual Reality, we can take anyone anywhere.

To build a VR world, in our case in the Mont-Saint-Michel Bay, we first build a model and texture on Agisoft Metashape from the LiDAR SHOM point cloud. Then we import this model and texture into Unity applications and create moving commands for HTC Vive headset to permit us to travel over the study area.

Results and discussion

In this part, the results of topographic analysis, land-sea cover, hydrodynamic modeling, and Virtual Reality are presented (Figure 1).

To begin, the analysis of topographic data. In part A of Figure 1, the Digital Terrain Model acquired by the SHOM using a LiDAR sensor during a campaign on the 11th of May 2018 during a low water spring tide is shown. The map clearly reveals the architecture of the polders built by humans a few centuries ago. The schorre seems to be at the same height as the crop lands located in the polders. The topography also differs markedly between each sand band and their environment (schorre, slikke). In the lowest part, we can see the presence of honeycomb worm reefs.

This first result permits us to better understand the topography of a big area in this part of Mont-Saint-Michel Bay. To go further, LiDAR UAV campaigns are done twice a year to more specifically follow the evolution of the topography over the honeycomb worm reefs, getting point clouds and images at a finer spatial resolution.

In part B of Figure 1, we can see the result of a land-sea cover classification using 300 pixels of training and Random Forest. This classification obtains a kappa score of 0.87, which is a good performance. In fact, looking at the distribution of

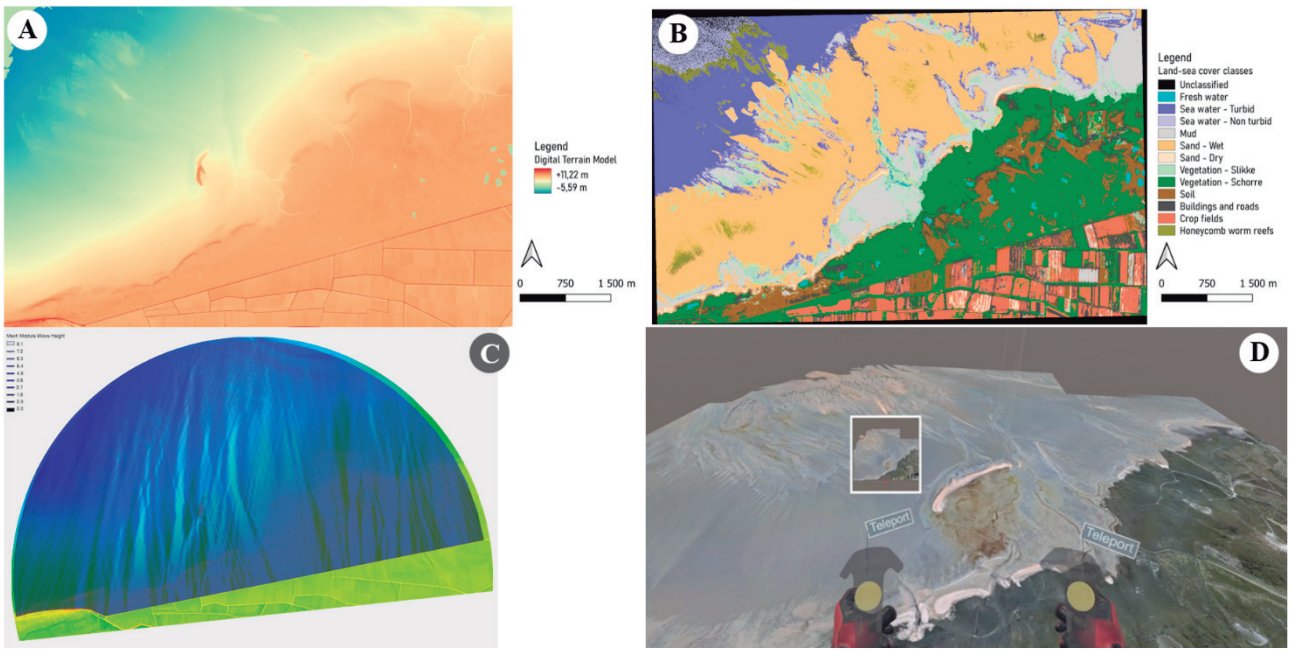


Figure 1. Littoral observatory results over Mont-Saint-Michel Bay with: Digital Terrain Model at 5 m from SHOM LiDAR acquired in 2018 (A), land-sea cover classification map for the 15th of September 2023 using 300 pixels of training for a Random Forest model (B), hydrodynamic modeling with the presence of all habitats from SHOM LiDAR acquired in 2018 (C), and a screenshot of Virtual Reality from CGEL UAV LiDAR (D)

the classes in the image, we correctly find crops, roads, and buildings in the part behind the dike in the south. We find schorre, soil, and land water in the schorre part, in front of the dike. And we find sand, seawater, mud, and honeycomb worm reefs in the intertidal part of the image.

We can also identify some errors, especially for the honeycomb worm reefs, which is a minor class in the image. To get better results, we can suppose that using the 8 spectral bands of the SuperDove satellite, instead of only 4 bands, can enhance the score.

Using the CGWAVE model, we obtain 8 wave height maps over 8 different DTMs with more or less intertidal habitats (schorre, sand bands, and honeycomb worm reefs). In part C of Figure 1, the map corresponding to the hydrodynamic simulation over the original DTM (with all the habitats) is presented. By comparing each wave height map, we expect to see if and how much each habitat of the intertidal part of the Mont-Saint-Michel Bay has an impact on the wave during a special event. In the next table, we can find the result of amplification and dissipation of the wave height in the absence of each habitat in comparison to the presence of all the habitats.

Table 1 shows that the habitat that has the most impact on dissipation is the schorre. The combination of habitats that dissipates the wave height the most is that of sand dunes and schorre, even more than all the habitats combined.

This result shows that intertidal habitats play a role in the wave height and in the protection of our coasts from the sea submersion. The protection of honeycomb worm reefs, sand dunes, and schorre could be a Nature-based Solution (NbS) for coastal risks.

To go further, the SMS model as TUFLOW permits us to model several tides by implementing topographic and land-sea cover data. In this way we use two of our results: the DTM from LiDAR data and classification results from multispectral data.

In the last part of Figure 1, part D, we can see a screenshot of the VR game over Mont-Saint-Michel Bay using a CGEL LiDAR UAV campaign. In this picture we can clearly recognize the study area, with polders, schorre, slikke, sand bands, and honeycomb worm reefs. We can also notice that a few commands are available to explore this area, like teleportation using the hand controllers. Also, we can check our localization on the map with a minimap in the top right-hand corner.

This VR game is a first step in the modeling of a scientist's

Table 1. Table of influence of the presence of habitats in the intertidal zone of the Bay of Mont-Saint-Michel on wave height during storm Ciarán

Habitat impact	Honeycomb worm reefs	Sand dunes	Schorre	Honeycomb worm reefs and sand dunes	Sand dunes and schorre	Honeycomb worm reefs and schorre	All habitats
Amplification (%)	48.34	49.34	47.7	47.92	46.26	47.02	46.92
Dissipation (%)	51.66	50.66	52.3	52.08	53.74	52.98	53.08

study area. An infinite number of possibilities open up to us. We can imagine adding time teleportation to see the evolution of a study area, adding meteorological events, adding hydrodynamic data with tides and waves, and more.

Conclusions

To conclude, multispectral and LiDAR data are precious information that can help us to better understand Emerald Coast and Mont-Saint-Michel Bay. From multispectral data, we can follow the evolution of the land-sea use and cover over time at ultra-high spatial resolution with UAV and high temporal resolution with satellites. From LiDAR campaigns, we can analyze the topography of our study area at ultra-high spatial resolution with UAV and over a large area by plane. Combined with the CGWAVE simulations, these topographic data also let us quantify how intertidal habitats such as schorre, sand dunes, and honeycomb worm reefs dissipate wave energy during extreme events, providing concrete evidence for Nature-based Solutions in coastal risk management. But also from LiDAR we can simulate hydrological events and build a virtual world, which turns these otherwise inaccessible and highly technical results into an immersive experience that policymakers and local actors can explore directly. All of those first and few results open a lot of outlooks to transmit knowledge, and together they form the integrated observational framework: a science-policy nexus where lidar processing, hydrodynamic modeling, and virtual reality visualization jointly support evidence-based coastal governance.

References

AQUAVEO, n.d. CGWAVE, wave transformation Modelling with SMS. Available online:
https://aquaveo.com/software/sms/models/cgwave

DJI Enterprise, 2026a. Zenmuse P1 technical specifications. Available online:
https://enterprise.dji.com/fr/zenmuse-p1/specs

DJI Enterprise, 2026b. Zenmuse L3 technical specifications. Available online:
https://enterprise.dji.com/fr/zenmuse-l3/specs

Nogue, L. 2025. Évolution du complexe écosystémique de la baie du Mont-Saint-Michel via l'imagerie optique et LiDAR à très haute résolution et la simulation hydrodynamique. Dinard, France.

Panchang, V. and Xu, B. 1995. CGWAVE: a coastal wave transformation model for arbitrary domains. Technical Report. Orono, ME, USA. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maine.

Planet, 2021. PlanetScope product specifications. Available online:
https://assets.planet.com/docs/Planet_PSScene_Imagery_Product_Spec_June_2021.pdf

SHOM, n.d. Litto3D v1.0, spécifications techniques. Available online:
https://services.data.shom.fr/static/specifications/Specifications-techniques-Litto3D_v1_0-Doc_v1_5.pdf

The IGS reference frame transitions: IGb14 vs IGS20 as the latest frame

Zurutuza, Joaquín[1], **Aguinaga, Aitor**[1], **and García-Armenteros, Juan Antonio**[1]

Keywords: ITRF, IGS, sea-level trend, reference frame transition, time series

Introduction

Tide gauges provide long-term observations of sea level, but they measure a relative variation between the sea surface and the land on which the instrument is installed. Therefore, any vertical land motion must be estimated and removed in order to derive absolute sea-level trends. GNSS long-term solutions provide the vertical land motion estimates required for this correction. These solutions depend on the terrestrial reference frame and on the processing standards used to generate coordinate time series and velocities.

The International Terrestrial Reference Frame (ITRF) is a multi-technique realization of the terrestrial geodetic reference system, constructed through the combination of multiple space geodetic techniques such as Global Navigation Satellite Systems (GNSS), Very Long Baseline Interferometry (VLBI), and Satellite Laser Ranging (SLR) (Altamimi et al., 2004, 2007, 2011, 2016, 2023), while the International GNSS Service (IGS) is a subset of ITRF based only on GNSS observations (Johnston et al., 2017). Both are periodically updated to take advantage of improved models and equipment. Each new IGS realization is accompanied by an updated set of station coordinates and velocities, together with products such as orbits, clocks, biases, and antenna definition files (ANTEX), to ensure consistency between the IGS and ITRF solutions, particularly in scale.

A critical aspect for long-term geophysical applications is that changes in ITRF/IGS realizations introduce discontinuities in GNSS coordinate time series, particularly in the vertical component, which may bias estimated trends if GNSS-derived velocities are not fully consistent across reference frame realizations. The most recent IGS realizations are IGS08/IGb08, IGS14/IGb14 and IGS20, the latter introduced on 27 November 2022. When we combine multiannual GNSS solutions we may find solutions computed using different conventions and antenna models. This can imply jumps in the time series that reflect the impact on the sites' positions of using different antenna offsets. In some cases, to make a certain IGS release compatible with the previous one, the IGS provides latitude-dependent models allowing the position offsets due to the antenna model switch to be corrected. This was the case for the IGS08 to IGS14 switch (IGS Mail #7399). Figure 1 shows examples of these latitude-dependent correction models. For each antenna whose calibration values were updated, two sets of station coordinates were estimated using the NAPEOS software in static PPP strategy for 24 h of data: one set of 384 stations using the igs08.atx calibration and the other using the igs14.atx calibration. The coordinate differences were then computed and latitude-dependent functions were fitted for the North, East and Up components. Antennas with absolute individual calibration values are not affected by the IGS08 to IGS14 offsets.

Figure 2 illustrates the effect of the latitude-dependent corrections through two examples of detrended (velocities removed) time series, comparing the solutions before and after applying the corrections to the IGS08/IGb08 solutions. Without these corrections, combining IGb08 and IGS14

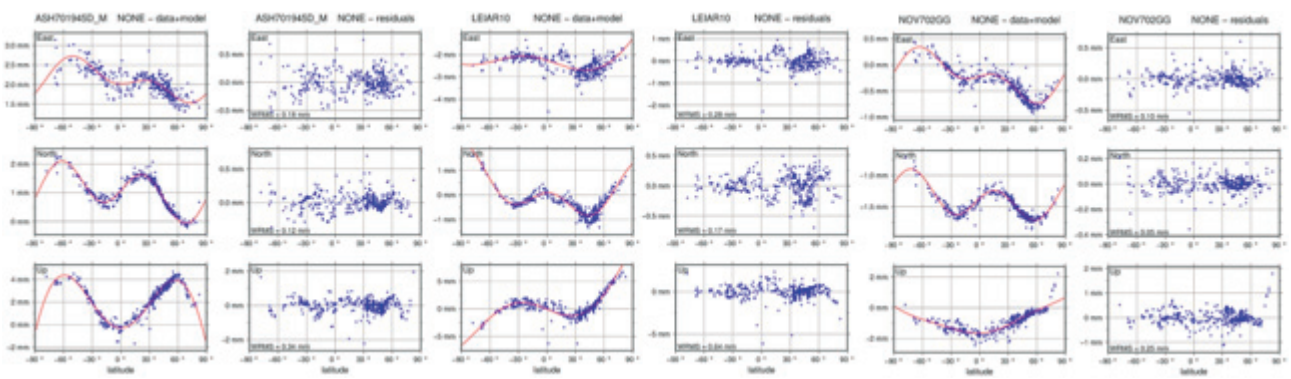


Figure 1. Selected IGS14 to IGb08 antenna model latitude-dependent corrections (fit model in red and residuals). Source: IGS (ftp://igs-rf.ign.fr/pub/IGS14/lat_models).

[1]*Sociedad de Ciencias Aranzadi, Zorroagagaina 11, 20014 Donostia - San Sebastián*
E-mail contact: geodesia@aranzadi.eus

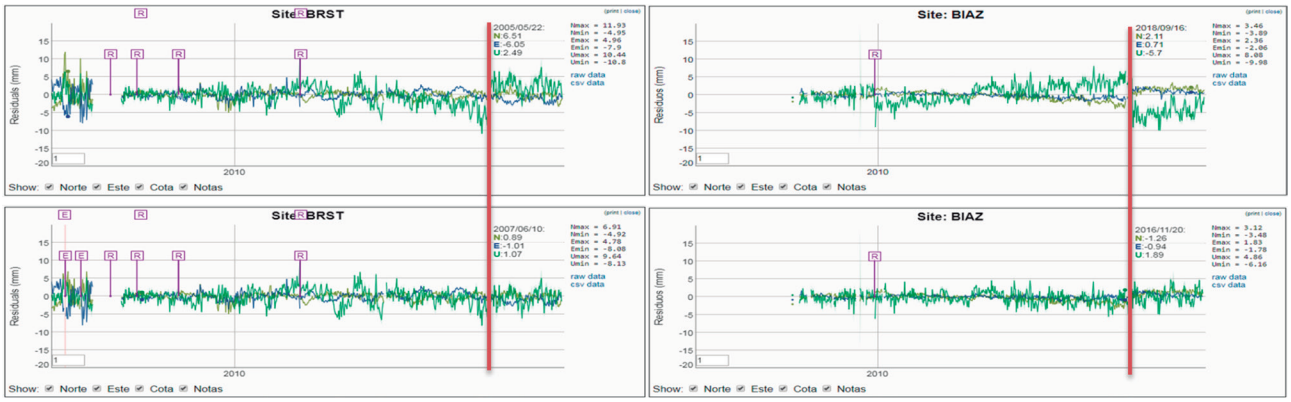


Figure 2. Impact of the IGb08 to the IGS14 frame transition (vertical red line shows the IGS14 introduction date, 2019/01/29). Selected cases.

solutions introduces discontinuities in the coordinate time series. In both examples, jumps of several millimeters can be observed not only in the Up component, but also in the North and East components. Therefore, all IGS14 (or its IGb14 realization) based solutions can be consistently combined with the former IGS08 (or its IGb08 realization) solutions. As a consequence, all analysis centers should use the same standards to make all results comparable and fully compatible. However, no equivalent correction model exists for the transition from IGb14 to IGS20 (IGS Mail #8238). Given the importance of the improvements, the IGS adopted a full reprocessing strategy (repro3) for the IGS20 realization (Rebischung, 2022). Consequently, the historical observations were reprocessed using IGS20-compliant products in order to obtain homogeneous coordinate time series and consistent velocity estimates.

This study presents the results of the latest cumulative solutions computed at ARA, a Dedicated Analysis Centre (DAC) for EUREF, within the EUREF Permanent Network Densification (EPND) framework.

The IGS20: new standards and products

One new fact of the IGS used solutions to compute the ITRF2020 is that the scale of the IGS frame is realized through the European GNSS Service Centre calibrated Galileo satellite phase center offsets (PCOs) in the repro3 campaign (Rebischung, 2020). The GPS and GLONASS offsets are corrected accordingly to be consistent with the Galileo scale realization. This way an independent scale can be computed for the reference frame using GNSS solutions. In ITRF2014 the GPS and GLONASS PCOs (no Galileo observations were used) were re-adjusted by aligning the IGS14 scale to the one provided by ITRF2014 (igs14.atx file). Therefore, the scales of ITRF2014 and ITRF2020 are independent (Rebischung, 2022).

According to the information provided in the igs20.atx file (latest release available at: https://www.epncb.oma.be/pub/station/general/igs20.atx), the Galileo PCOs, except for E102 (E12), are aligned to the ITRF2020 and the trend is corrected to epoch 2015.0. In addition to the antenna PCO variations, the repro3 campaign adopted updated processing conventions (Rebischung, 2022), including the use of the new IERS secular Pole model, the application of PCO/PCV rotations for antennas not oriented to the North, the inclusion of GLONASS and Galileo, the use of the FES2014b ocean tide model, refined solar radiation pressure models, the sub-daily EOP tide model from Desai & Sibois, and a time-variable gravity field model.

If we follow the EUREF Guidelines for the EPN Analysis Centers (EUREF, 2023), the following additional changes related to the former IGb14 processing options must be taken into account: do not use individual antenna absolute calibration values, do not use any GNSS for which no antenna calibration values are available in the IGS20 ANTEX file, correct PCVs of antennas misaligned from North, and do not use atmospheric loading. Using type mean calibration values instead of individual absolute calibration values has a remarkable impact on the vertical velocities, which are critical for absolute sea-level trend determination.

Normal equation combination methodology

Following the IGS20 standards and repro3 products described in the previous section, the existing observations acquired before the introduction of IGS20 (27 November 2022) were reprocessed. Once the daily sessions were computed, the normal equations (reduced to retain only the coordinate information) were combined using the IGS20 as the reference frame to align our solution for positions and velocities. The combination strategy using minimum constraint solutions and its theoretical background is detailed in Altamimi et al. (2008, 2023) and Brockmann (1996). The combinations were computed with Bernese GNSS Software, v5.4 (Dach et al., 2015). Minimum-constrained SINEX solutions were first unconstrained and subsequently combined using the selected IGS20 reference sites. Minimum constraints (translations only) were applied to the positions and the same conditions to the velocities.

The general least-squares model for the combination of the

normal equations can be summarized as (see Brockmann, 1996; Dach et al., 2015 for full details):

$$\left[\sum_{i=1}^{n} A_i^t P_i A^t\right] \hat{p}_c = \left[\sum_{i=1}^{n} A_i^t P_i y_i\right] \qquad (1)$$

where A_i is the design matrix of the *i-th* solution, P_i is the corresponding weight matrix, is the vector of the parameters to be estimated, and y_i is the vector of observations (observed minus computed values). The corresponding quadratic form is given by:

$$\Omega_c = \sum_{i=1}^{n} y_i^t P_i y_i - \sum_{i=1}^{n} y_i^t P_i A_i \hat{p}_c \qquad (2)$$

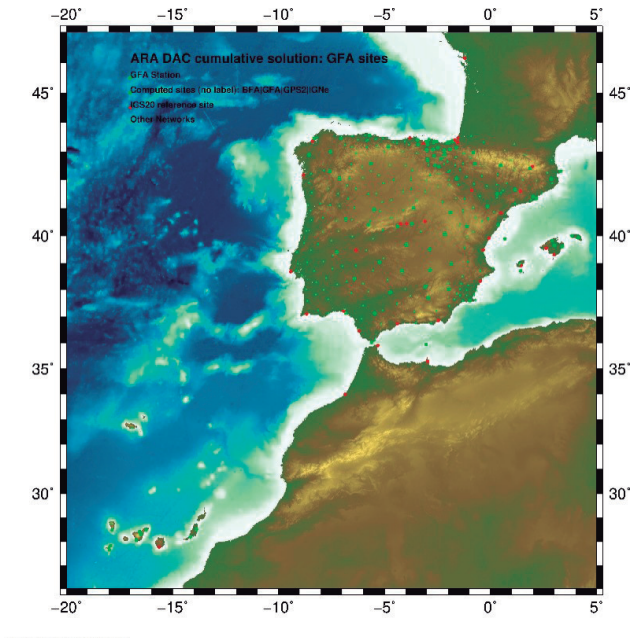
be a minimum and the unit weight variance () is estimated as:

$$\hat{\sigma}_c^2 = \frac{1}{f_c}\left[\sum_{i=1}^{n} y_i^t P_i y_i - \sum_{i=1}^{n} y_i^t P_i A_i \hat{p}_c\right] \qquad (3)$$

where denotes the degrees of freedom of the combined solution.

The station positions were adjusted to the selected reference epoch and the velocities were estimated by linear regression when the observation span allowed it. Finally, the computed positions and velocities were compared with the published IGS20 cumulative solution. The comparison was performed by means of a Helmert 3D transformation for the positions and by comparing the estimated velocities with the published IGS20 values.

Results and discussion



In this section, we provide a summary of the ARA multiyear stacking or combination, in terms of differences related to the IGS20 cumulative solution (as of November 2025). The computed test network includes most public GNSS stations of Spanish National and Regional Agencies and spans over the whole Iberian Peninsula and is made up of around 300 stations, many of them tied to tide gauges and other geodetic techniques. The solutions are computed daily using the latest EPN recommendations. Excluding the Canary Islands, which are outside the scope of ETRS89, the solutions are combined with the daily solutions provided to the Spanish Superior Council (ETRS89 Working Group) to be combined with the IGN and IGCC solutions and submitted in standard SINEX format to the EPND as the ITRF/ETRF national realization. Stations that belong to the IGS cumulative solution (red dots on the left figure) are used to align our solution to the IGS20 reference frame. For this example, we use weekly solutions instead of daily, and the observations span from 2006-NOV-05 to 2026-JUL-04. Velocities are estimated only if a site spans more than 3 years.

The mean repeatabilities for all the stations are of 1.09 mm, 1.06 mm, and 2.25 mm (North, East and Up components, respectively).

The alignment with the IGS20 reference frame shows excellent results. For the coordinates (59 stations; 177 coordinates), the mean residuals (differences between our computed values and the IGS20 nominal values at epoch 2015.0) are 0.02 ± 1.48 mm, 0.80 ± 1.79 mm, and -0.19 ± 2.99 mm (North, East and Up components, respectively). For the velocities, the differences with respect to the IGS20 nominal values are -0.01 ± 0.20 mm/year, 0.00 ± 0.25 mm/year, and 0.00 ± 0.45 mm/year for the North, East and Up velocities, respectively.

These results indicate that the estimated vertical rates can be used to compute absolute mean sea-level rates. According to the EPN results, if we compare the IGS20 (C2385 release) and IGb14 results (C2237 release) for PASA, we can see that the vertical velocity varies from -1.1 mm/year (IGb14) to -0.3 mm/year (IGS20). This change in the vertical velocity confirms the impact of the datum switch in long-term time series and shows the importance of using standardized products and processing methodologies.

Conclusions

In this paper we show the issues derived from IGS reference frame transitions in the estimation of velocities from long-term data analysis. We also describe the ARA network and how it is aligned to the IGS20 reference frame. In addition, we present the differences in the estimated velocity of PASA by comparing two EPN releases, emphasizing the impact of discontinuities caused by IGS reference frame transitions.

The transition from IGb14 to IGS20 introduces significant changes in GNSS processing standards and reference frame realization. Since no empirical correction model exists to ensure compatibility between IGb14 and IGS20, homogeneous reprocessing using IGS20-compliant products is required for long-term applications, especially when the vertical rate is involved in additional research, such as absolute sea-level

estimation, where an accuracy of 1 mm/year or better is required. The excellent alignment with the IGS20 reference frame for both positions and velocities indicates that the estimated vertical rates can be used to compute absolute mean sea-level rates.

The consistency of GNSS-derived vertical land motion is essential for reliable sea-level trend estimation in climate studies and must be treated very cautiously following very strict, globally accepted guidelines. It is very common for sea-level trends to be computed by different Analysis Centers, so the harmonization of the computation procedures is crucial to obtain comparable and high-quality results.

References

Altamimi, Z., Sillard, P. and Boucher, C. 2004. ITRF2000: From Theory to Implementation. In: Sansò F (ed) V Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy. Springer, Berlin, Heidelberg, International Association of Geodesy Symposia, pp 157–163. https://doi.org/10.1007/978-3-662-10735-5_21.

Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. and Boucher, C. 2007. ITRF2005: A new release of the international terrestrial reference frame based on time series of station positions and earth orientation parameters. J. Geophys. Res. Solid Earth. https://doi.org/10.1029/2007JB004949.

Altamimi, Z., Collilieux, X. and Métivier, L. 2011. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. J. Geodesy 85(8):457–473. https://doi.org/10.1007/s00190-011-0444-4.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L. and Collilieux, X. 2016. ITRF2014: a new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. J. Geophys. Res. Solid Earth 121(8):6109–6131. https://doi.org/10.1002/2016JB013098.

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X. et al. 2023. ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. J. Geod 97:47. https://doi.org/10.1007/s00190-023-01738-w.

Brockmann, E. 1996. Combination of solutions for geodetic and geodynamic applications of the Global Positioning System (GPS), University of Bern. http://ftp.aiub.unibe.ch/papers/ebdiss.pdf.

Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P. (eds) 2015. Bernese GNSS Software, Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland. https://doi.org/10.7892/boris.72297, http://ftp.aiub.unibe.ch/BERN52/DOCU/DOCU52.pdf.

EUREF 2023. Guidelines for the EPN Analysis Centres. https://www.epncb.oma.be/_documentation/guidelines/guidelines_analysis_centres.pdf (Accessed 13 July 2026).

IGS Mail #7399 2016. Upcoming switch to IGS14/igs14.atx. https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2016/001233.html (Accessed 7 July 2026).

IGS Mail #8238 2022. Upcoming switch to IGS20/igs20.atx and repro3 standards. https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008234.html (Accessed 7 July 2026).

Johnston, G., Riddell, A. and Hausler, G. 2017. The International GNSS Service. In: Teunissen, P. J. G. and Montenbruck, O. (eds) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems (1st ed., pp. 967–982). Springer International Publishing, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1.

Rebischung, P. 2020. IGS Reference Frame Working Group Coordinator Report (2019). In: Villiger, A. and Dach, R. (eds) International GNSS Service: technical report 2020. IGS Central Bureau and University of Bern, Bern. https://boris.unibe.ch/144003/1/2019_techreport(2).pdf.

Rebischung, P. 2022. The IGS contribution to ITRF2020. Tech. rep., available at the ITRF2020 website https://dtrf.dgfi.tum.de/media/filer_public/41/9a/419a4bdf-1f0d-41ed-be98-2d8d3f144ea4/igs-contribution-to-itrf2020.

AZTI

MEMBER OF
BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE

/ **HEADQUARTERS**

Txatxarramendi Ugartea z/g
E-48395 Sukarrieta - BIZKAIA (Spain)

Parque Tecnológico de Bizkaia
Astondo Bidea, Edificio 609
E-48160 Derio - BIZKAIA (Spain)

Herrera Kaia - Portualdea z/g
E-20110 Pasaia - GIPUZKOA (Spain)

/ **t.** (+34) 946 574 000

/ **e**-mail: info@azti.es

/ www.**azti**.es

