



Environmental | Physics | Laboratory

**EPHYS Lab**

**Universidade de Vigo**

Volumen 13 - Diciembre 2023

Avances en Ciencias de la Tierra

# Avances en Ciencias de la Tierra

ISSN: 2172-9328



# Avances en Ciencias de la Tierra

Volumen 13, Diciembre 2023

ISSN 2172-9328

Editado por EPHYSLAB en colaboración con la Asociación  
Ambiental ESCLIMA



**Equipo Editorial** (responsable de este volumen)

**Editores en Jefe:**

**D. Fernández-Nóvoa**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
diefernandez@uvigo.es

**R. Varela**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
ruvarela@uvigo.es

**Editores**

**O. García-Feal**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
orlando@uvigo.es

**J. González Cao**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
jgcao@uvigo.es

**M. Des**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
mdes@uvigo.es

**M.C. Sousa**  
CESAM/Physics Department  
Universidade de Aveiro  
mcsousa@ua.pt

**X. Costoya**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
xurxocostoya@uvigo.es

**M. de Castro**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
mdecastro@uvigo.es

**A.J.C. Crespo**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
alexbexe@uvigo.es

**M. Gómez-Gesteira**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
mggesteira@uvigo.es

**J. M. Domínguez**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
jmdominguez@uvigo.es

**I. Martínez-Estévez**  
EPhysLab, CIM-UVIGO  
Universidade de Vigo  
ivan.martinez.estevez@uvigo.es







## Introducción

La revista *Avances en Ciencias de la Tierra* (ACT) es una publicación científica centrada en los distintos ámbitos de conocimiento relacionados con las Ciencias de la Tierra. A diferencia de otras publicaciones científicas centradas en el mismo ámbito, muchas de las cuales se encuentran indexadas dentro del *Science Citation Index* (SCI), ACT tiene una doble vertiente. Por un lado, como muchas de las anteriormente citadas publicaciones, mantiene una vertiente científica y, por otro lado, pretende añadir un cierto carácter docente a los trabajos que en ella se publican. Esto último, claro está, sin perder un ápice de su rigor científico. Esto hace que la revista ACT sea, primero, un banco de pruebas donde alumnos de diversos grados y másteres aprendan las técnicas de publicación científica y, segundo, una publicación científica al uso donde el rigor científico en los contenidos alcance los mismos niveles que en la mayoría de las publicaciones científicas “tradicionales”.

En este volumen, también se incluyen trabajos realizados por el alumnado de bachillerato del IES As Lagoas (Ourense) dentro del programan STEMbach, principalmente focalizados en la temática de la bioconstrucción. Experiencias previas ya nos mostraron la capacidad de los alumnos de bachillerato para realizar todo el proceso que involucra la investigación científica, incluyendo las ideas iniciales, realización de diseños, ejecución del plan de trabajo y, finalmente, la plasmación de forma escrita en un artículo científico.

Uno de los objetivos principales de la investigación científica es la publicación de sus resultados con el fin de que éstos puedan ser compartidos con el resto de la comunidad científica con el fin de difundirlos, validarlos y corroborarlos o rebatirlos. La publicación de una investigación científica, usualmente en forma de un artículo científico, requiere de una labor de escritura que no resulta sencilla ya que hay una serie de principios y técnicas que deben conocerse y respetarse con el fin de comunicar lo más claramente posible el resultado de dicha investigación a una audiencia experta y profesional. Estos principios fundamentales que deben regir la escritura de un buen artículo científico son tres: brevedad, claridad y precisión. Partiendo de estos tres principios fundamentales, nuestra labor como docentes tiene como objetivo enseñar a los alumnos las normas metodológicas generales que les permitan escribir un buen artículo.

Las características principales de un buen artículo científico, las cuales los alumnos que pretendan sumergirse en la escritura de los mismos deben conocer, son:



- Un artículo científico es un informe sobre los resultados de una investigación relativa a un problema de carácter científico.
- Los resultados de dicha investigación deben ser válidos, fidedignos y reproducibles, a fin de que puedan ser contrastados por el resto de la comunidad científica.
- Los resultados presentados deben ser originales, por lo tanto, un artículo no debe comunicar unos hallazgos que ya hayan sido previamente descritos por los miembros de la comunidad científica. Existe la excepción de los llamados artículos de revisión, donde los autores revisan el estado del conocimiento sobre un cierto tema, compilando los resultados presentados en artículos previamente publicados.

La estructuración del artículo científico es uno de los aspectos a los que se debe prestar también mucha atención. Usualmente los artículos científicos se estructuran de la siguiente forma: primero, además del título, el cual debe ser claro, exacto y conciso, y de la lista de autores, el artículo debe contener un breve resumen donde se describan de forma somera los principales logros de la investigación; a continuación, se debe escribir una introducción de carácter general, para posteriormente detallar los datos y la metodología empleada; posteriormente deben presentarse los resultados, así como una discusión en la que se relacionen los avances mostrados en el manuscrito con el conocimiento previo contenido en la bibliografía. Para ello es necesario que el alumno haya realizado con anterioridad una completa búsqueda bibliográfica que también debe incluirse en el manuscrito. Finalmente, y con carácter opcional, se puede incluir una conclusión, en la que se enumeren y resuman los principales hallazgos de la investigación. Además de lo anterior, no se pueden dejar de lado aspectos formales como, por ejemplo, el empleo de un lenguaje correcto y conciso.

Para asegurar que los artículos publicados supongan un avance significativo en el área de conocimiento se han diseñado los mecanismos de control de la calidad necesarios. Por un lado, se involucrará en la elaboración de los artículos a los supervisores del trabajo, de tal forma que aporten su experiencia en la escritura y estructuración de artículos científicos y, por otro lado, la calidad científica de los artículos será evaluada por dos revisores miembros del equipo editorial y/u otros externos que éstos consideren.

El idioma empleado será, preferiblemente, el español, aunque también existe la posibilidad de presentar los trabajos en gallego, portugués o inglés.



**Contenido:**

**Caracterización del recurso energético undimotriz en el Golfo de Vizcaya en un contexto de cambio climático.** B. Thomas, X. Costoya, M. deCastro ..... 1

**Proyecciones futuras de caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil.** S. Hernández, D. Fernández-Nóvoa, M. deCastro..... 22

**Modelado físico y numérico de la interacción entre olas y objetos flotantes.** J. Ledo-Rodríguez, I. Martínez-Estévez, C. Altomare, J.M. Domínguez, A.J.C. Crespo, M. Gómez-Gesteira ..... 43

**STEMbach IES As Lagoas (Ourense):**

**Medición de temperatura e humidade do modulo bioclimático.** B. Viso Romero, S. Fernández-Trujillo Lamas ..... 60

**Construcción dun aeroxerador eólico.** N. González, S. Castro, D. Barata ..... 69

**Análise da degradación da madeira tratada ao exterior.** C. Rodríguez Pinchete, S. Casto Rúa, N. Fernández Fernández ..... 77







# Caracterización del Recurso Energético Undimotriz en el Golfo de Vizcaya en un contexto de Cambio Climático

B. THOMAS\*, X. COSTOYA, M. DECASTRO

\**thomas.brieuc@alumnos.uvigo.es*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,  
Universidade de Vigo,  
Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

## RESUMEN

Las energías marinas renovables son una herramienta clave para luchar contra el cambio climático. Aunque la energía de las olas todavía no se explota comercialmente, la caracterización de la energía undimotriz es de especial interés de cara a explotarla en los próximos años. A la hora de decidir donde instalar *Wave Energy Converters* (WECs, instrumentos que aprovechan la energía del oleaje), es necesario tener en cuenta diferentes parámetros más allá de la riqueza del recurso. Así, se deben examinar aspectos como la variabilidad del recurso, el riesgo ambiental, y el coste económico de instalación y mantenimiento de estos WECs. En este trabajo se clasificó el recurso undimotriz siguiendo diferentes índices. Estos índices consideran la potencia undimotriz media, la estabilidad del recurso (variabilidad temporal y mensual), la operatividad (índice *Downtime*: porcentaje de tiempo durante el cual el aparato no funciona debido a olas demasiado grandes o pequeñas), el riesgo ambiental (olas extremas) y el coste económico de instalación y mantenimiento (profundidad del agua y distancia a costa). A cada índice se le ha otorgado un peso y se ha realizado el promedio para obtener un único índice que permite clasificar fácilmente el recurso del oleaje. Además, se ha estudiado la potencia eléctrica que dos WECs (AquaBuoy y Pelamis) podrían generar cerca de las costas francesas y españolas del Golfo de Vizcaya. Los datos utilizados para estos análisis, tanto históricos como futuros, provienen de un *downscaling* hecho con el modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). Este modelo se alimentó con datos de viento del modelo climático regional (MIROC5-CCLM4-8-17) y, en las fronteras abiertas oceánicas, con los datos oceánicos de gruesa resolución obtenidos de las simulaciones realizadas con el modelo WAVEWATCH III. En cuanto a los resultados obtenidos, se espera un descenso de la potencia undimotriz media en el Golfo de Vizcaya a lo largo del siglo XXI, siendo más acusado hacia finales de siglo. Este descenso será menor en invierno que en otras estaciones, lo que aumentará la variabilidad del recurso. A pesar de este descenso de la potencia undimotriz en el futuro, la clasificación del recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya muestra que el recurso se considerará “excelente” en la mayor parte de la región y “sobresaliente” en ciertas zonas durante el futuro cercano (2026-2045). A la hora de analizar la potencia generada por los WECs AquaBuoy y Pelamis, se ha visto que Pelamis produce mayor cantidad de potencia pero que su factor de carga y su eficiencia, que es un parámetro que considera el tamaño del dispositivo, son menores que los de AquaBuoy tanto en la costa española como francesa.

*Palabras Clave:* energía undimotriz, método Delphi, clasificación del recurso, cambio climático, Golfo de Vizcaya.



## 1. Introducción

### 1.1. Las energías marinas renovables para mitigar el cambio climático

Durante los últimos siglos, el crecimiento de la población humana y el uso de los combustibles fósiles como fuente de energía han generado un aumento significativo en las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI), entre ellos del CO<sub>2</sub> (Fan *et al.*, 2005). Esta subida de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> ha provocado un aumento de la temperatura global del planeta y ha alterado su clima, provocando más catástrofes naturales y deteriorando las condiciones de vida de mucha gente (IPCC, 2021). Por lo tanto, es fundamental reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente de CO<sub>2</sub>, para mitigar los efectos negativos del cambio climático. En la COP26 (26<sup>th</sup> Conference of the Parties) de Glasgow en 2021, las Naciones Unidas reafirmaron el objetivo de limitar el incremento de la temperatura media mundial a +2°C frente al nivel preindustrial. Para ello, estiman que hace falta alcanzar emisiones netas de CO<sub>2</sub> nulas a mediados del siglo XXI (United Nations, 2021).

Para predecir el clima futuro, en el quinto informe del IPCC (2014) se definieron escenarios climáticos llamados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Son escenarios que modelizan cómo va a variar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y así predicen el forzamiento radiativo (diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra y la energía emitida por la Tierra que llega hasta fuera de la atmósfera) del planeta en 2100. Se definieron cuatro RCPs: uno más optimista (RCP2.6) que predice una bajada de la concentración atmosférica

de CO<sub>2</sub> hasta finales de siglo, uno más pesimista (RCP8.5) que predice una subida muy acusada, y dos intermedios (RCP4.5 y RCP6.0). El número al lado del acrónimo RCP representa el aumento del forzamiento radiativo, frente al nivel preindustrial, a finales del siglo XXI (es decir entre +2.6 W.m<sup>-2</sup> y +8.5 W.m<sup>-2</sup> según el escenario). Así, los modelos del clima futuro de la Tierra varían según el RCP usado. En el trabajo desarrollado por Hennemuth *et al.* (2017) se puede consultar información detallada sobre cada RCP.

Una manera de avanzar en el cumplimiento de los objetivos internacionales de reducción de gases de efecto invernadero es desarrollar nuevas fuentes de energía “limpias”. Teniendo en cuenta que los océanos representan aproximadamente el 71% de la superficie de la Tierra, el estudio de energías marinas renovables (EMR) tiene un gran potencial. La Unión Europea (UE) estima que aproximadamente unos 100 GW, que equivale al 10% del consumo de electricidad en la UE, puede ser generado por energías marinas renovables en 2050 (ETIPOCEAN, 2020). La única EMR madura, que ya se usa de manera comercial, es la energía eólica offshore, es decir, turbinas eólicas instaladas en el mar. Los primeros experimentos europeos empezaron durante los años 90 en Dinamarca (EESI, 2010) y desde 2019 se ha alcanzado el número de 5000 turbinas *offshore* en funcionamiento, con una potencia total mayor de 22 GW (WindEurope, 2020).

Aparte de la energía eólica marina, existen otras EMR, todavía en fases de análisis y estudio, que podrían ayudar a luchar contra el cambio climático en las próximas décadas. Así, por ejemplo, se está estudiando el aprovechamiento energético de las corrientes marinas (debidas a mareas, por ejemplo) o de



gradientes de salinidad y temperatura (Zabihian *et al.*, 2011). La EMR que se va a analizar en este trabajo es la energía undimotriz, que obtiene energía a partir del movimiento del oleaje.

### 1.2. La energía undimotriz

La energía undimotriz todavía no se explota comercialmente, pero existen muchos proyectos que tratan de desarrollar dispositivos que permitan su aprovechamiento (IRENA, 2021). En teoría, la energía llevada por todas las olas de todos los océanos es de casi 30,000 TWh por año, lo que sería suficiente para cubrir la demanda energética mundial (Mørk *et al.*, 2010). Sin embargo, la potencia teórica que existe es muy diferente de la que realmente se puede recoger porque, para aprovechar esta energía, hay que usar aparatos que la transforman en energía eléctrica (WECs) que, como cualquier sistema mecánico, tienen pérdidas energéticas y solo recogen una fracción de toda la energía que lleva el oleaje.

Existen muchos WECs con geometrías y características diferentes (Hayward, 2011). Aunque existen diferentes clasificaciones para los WECs, lo más habitual es clasificarlos de acuerdo a su geometría y su posición frente al tren de olas. Así, los WECs de tipo “Absorbedor puntual” (Figura 1A), son estructuras bastante pequeñas, como boyas flotantes que recogen energía al moverse de manera vertical gracias al oleaje. Los WECs de tipo “Atenuador” (Figura 1B), son estructuras flotantes muy largas que se instalan paralelas al sentido de propagación del oleaje (es decir, perpendicular a las olas) y recogen energía al moverse con el paso de la ola. Finalmente, los WECs de tipo “Terminador” (Figura 1C), son también estructuras flotantes largas, pero que se instalan perpendiculares al sentido de propagación de las olas y captan

directamente su energía. Cada tipo de aparato es más adecuado a ciertos tipos de oleaje y de profundidad.

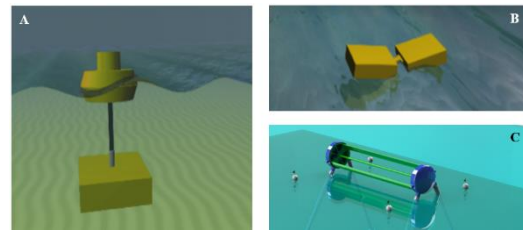


Fig. 1. WECs de tipo (A) Atenuador, (B) Absorbedor puntual, (C) Terminador. Fuente: (A) y (B) aquaret.com ; (C) atargis.com

### 1.3. Análisis de la potencia undimotriz a escala regional y global

Estudios previos ya analizaron las variaciones que se esperan en el recurso undimotriz en las próximas décadas como consecuencia del impacto del cambio climático. Son múltiples los estudios que se han realizado a escala regional. Ribeiro *et al.* (2021) estudiaron el recurso undimotriz futuro bajo el escenario climático RCP8.5 en el noroeste de la Península Ibérica. Estos autores predicen una bajada general de la potencia undimotriz, así como un aumento de la variabilidad estacional y de los eventos extremos. Los datos fueron obtenidos usando el modelo SWAN. Este modelo también ha permitido estudiar el recurso undimotriz futuro en otras zonas, por ejemplo en el mar Negro para el periodo 2021-2050 bajo los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 (Rusu, 2019). Este estudio proyecta un incremento del recurso undimotriz (mayor bajo el escenario RCP8.5) en el oeste y en la región noreste del Mar Negro. SWAN se utilizó también para estudiar la zona de Menorca para el periodo 2071-2100 (Sierra *et al.*, 2017). Este estudio predice una bajada ligera de la potencia undimotriz, tanto a escala anual como estacional, salvo en verano. Por lo tanto, la estabilidad del recurso a lo largo del año mejorará. Lira-Loarca *et al.* (2021) analizaron la variación del



potencial undimotriz en el Mediterráneo utilizando un multimodelo del proyecto CORDEX. Detectaron una disminución en la mayor parte de la cuenca mediterránea, especialmente hacia finales del siglo XXI donde se proyectan disminuciones generalizadas en torno al 10-20% en comparación con el periodo histórico. También en el Mar Mediterráneo, Casas-Prat *et al.* (2013), proyectan en la zona noroeste un aumento de la variabilidad del recurso, es decir, un incremento de la energía undimotriz en invierno y una bajada en verano. Usando el modelo WAVEWATCH III (WWIII), se ha analizado el recurso undimotriz en Cornualles para el periodo 2061-2100 en el trabajo de Reeve *et al.* (2011). Se espera una bajada entre 1 y 3 % de la potencia undimotriz, dependiendo del escenario climático usado. Para estos 3 últimos estudios se consideró el impacto de los GEI bajo los escenarios A1B y B1 del cuarto informe del IPCC (2007), que corresponden respectivamente a emisiones intermedias y bajas.

Otros trabajos estudiaron el impacto del cambio global sobre la potencia undimotriz a escala mundial. Lemos *et al.* (2018) lo hicieron para el periodo 2031-2060 usando el modelo de olas WAM bajo el escenario RCP8.5. Estos autores proyectan un aumento de la potencia undimotriz en latitudes medias y altas, pero una bajada en la zona del Atlántico Norte. En Reguero *et al.* (2019), también se analizaron los cambios futuros de la potencia undimotriz, pero basándose en los cambios de temperatura superficial del mar que se esperan considerando las observaciones del pasado. Observaron un aumento de la potencia undimotriz a escala global de 0.4% por año desde 1948 y se espera un aumento global del 32% bajo el RCP2.6 y del 122% bajo el RCP8.5, frente al periodo 1986-2005, para finales del siglo XXI.

Se observa que hay una gran diferencia en las variaciones futuras de la energía undimotriz dependiendo de las zonas estudiadas. Así, parece más interesante favorecer los estudios a escala local a la hora de decidir dónde se va a aprovechar esta energía.

#### *1.4. Objetivos*

El principal objetivo de este trabajo es caracterizar y clasificar el recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya en un contexto de cambio climático. Con este propósito se va a cuantificar la cantidad de energía que contiene el oleaje en esta zona durante un periodo histórico y a lo largo del siglo XXI. Además, se clasificará el recurso undimotriz atendiendo a diferentes criterios para las próximas décadas. Se toma este período porque es cuando se espera que se pueda aprovechar comercialmente el recurso undimotriz y porque también permite tener en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre el recurso. Finalmente, también se analizará la potencia eléctrica que podrían generar dos tipos de WECs en las zonas costeras del Golfo de Vizcaya.

## **2. Datos y métodos**

### *2.1. Datos*

Para cuantificar la cantidad de energía que contiene el oleaje, es necesario obtener datos de altura significativa de ola ( $H_s$ ) y periodo pico ( $T_p$ ). Son dos parámetros de la representación espectral del oleaje, es decir, de la energía de las olas en función de su frecuencia.  $T_p$  corresponde al periodo de las olas de mayor energía y  $H_s$  es la media aritmética de la altura del tercio de olas más altas registradas y se relaciona con la energía de todo el oleaje (considerando todas las frecuencias de olas). Para llevar a cabo este estudio, se utilizaron datos de  $T_p$  y  $H_s$  generados en



un trabajo previo (Ribeiro *et al.*, 2021). A continuación, se explica de forma breve qué simulaciones se realizaron con el propósito de obtener datos de estos parámetros a una alta resolución espacial. Una información más detallada se puede encontrar en dicho trabajo.

Los datos de  $H_s$  y  $T_p$  se obtuvieron gracias a simulaciones realizadas con WAVEWATCH III (WWIII) por parte de la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) (Hemer *et al.*, 2015). Estos datos están disponibles en la base de datos en línea de CSIRO ([https://data-cbr.csiro.au/thredds/catalog/catch\\_all/CAR\\_CAWCR-Wave\\_archive/Global\\_wave\\_projection/s/catalog.html](https://data-cbr.csiro.au/thredds/catalog/catch_all/CAR_CAWCR-Wave_archive/Global_wave_projection/s/catalog.html)). En esta base de datos están disponibles simulaciones realizadas con varios modelos climáticos globales (*Global Climate Models*, GCMs). Inicialmente lo que se hizo fue comprobar qué GCMs ofrecían unos datos más precisos en la zona de interés, que fue el Arco Atlántico ( $35\text{-}60^\circ\text{N}$  y  $0\text{-}20^\circ\text{W}$ ). Se compararon las salidas de WWIII forzadas con los diferentes GCMs con las salidas de WWIII pero forzadas con datos de la base de datos de reanálisis CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) durante el periodo histórico 1979-2005. Se comprobó que el GCM que modeliza un oleaje más parecido a los resultados de reanálisis es MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*). Se consideraron los datos para los dos periodos futuros bajo el escenario RCP8.5 ofrecidos por CSIRO: un futuro cercano (2026-2045) y uno lejano (2081-2099). Estos datos tienen una resolución espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$ , lo cual es una resolución baja para poder alcanzar los objetivos de este trabajo. En Ribeiro *et al.* (2021), redujeron esta resolución espacial (*downscaling*) de forma dinámica empleando el modelo SWAN. Este modelo se alimentó con datos de viento del modelo climático

regional (*Regional Climate Model*, RCM) MIROC5-CCLM4-8-17 del proyecto EURO-CORDEX (*European branch of Coordinated Regional Downscaling Experiment*) y, en las fronteras abiertas oceánicas, con los datos oceánicos de gruesa resolución obtenidos de WWIII con el GCM MIROC5, que es el que mejor reproduce el oleaje en nuestra zona de análisis. Después de realizar este *downscaling*, se obtuvieron datos de  $H_s$  y  $T_p$  con una diferente resolución espacial dependiendo de la zona (Figura 2):  $1/3^\circ$  en la zona L1 ( $42\text{-}49.5^\circ\text{N}$  y  $0.5\text{-}12.5^\circ\text{W}$ ),  $1/9^\circ$  en la zona L2 ( $42\text{-}47.8^\circ\text{N}$  y  $0.5\text{-}10.8^\circ\text{W}$ ) y  $1/27^\circ$  en la zona L3 (hasta 100 km de la costas españolas y francesas del Golfo). La resolución temporal de los datos de  $H_s$  y  $T_p$  obtenidos es de 1 hora.

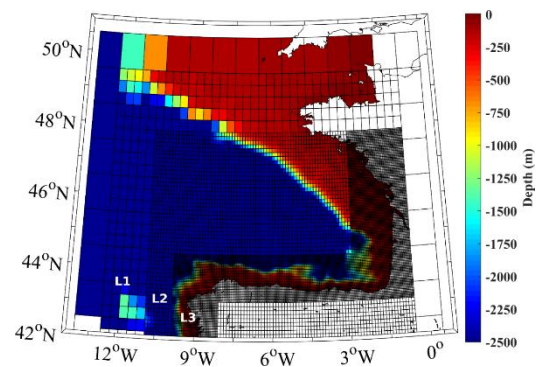


Fig. 2. Batimetría de la zona de estudio y dominios empleados en las simulaciones con SWAN.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1. Potencia del oleaje

La potencia del oleaje (*Wave Power*, WP) es la potencia llevada por las olas por unidad de longitud en la dirección de propagación. Se expresa en  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$  y se calcula según la Fórmula 1:

$$WP = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua ( $1025 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $g$  la aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $H_s$  la altura significativa del



oleaje y  $T_e$  el periodo energético, que se estima a partir del periodo de pico  $T_p$  según la Fórmula 2:

$$T_e = \alpha \cdot T_p \quad (2)$$

El valor de  $\alpha$  depende de la forma del espectro del oleaje. En este estudio se considera  $\alpha = 0.9$  que proviene de asumir un espectro de oleaje JONSWAP estándar con un factor de mejora de pico de  $\gamma=3.3$  (Ribeiro *et al.*, 2021).

### 2.2.2. Clasificación del recurso undimotriz

Para clasificar el recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya, se definieron una serie de índices que, además de tener en cuenta la riqueza del recurso de las olas, tiene en cuenta otros aspectos que son importantes como, por ejemplo, la estabilidad del recurso a lo largo del año, los posibles riesgos derivados del oleaje extremo sobre los dispositivos que se instalen, o factores que condicionan el gasto económico como son la profundidad y la distancia a costa. Una vez definidos estos índices, se aplicó un método Delphi, como ya se usó en estudios previos que tratan de aprovechar la energía eólica offshore (deCastro *et al.*, 2019 ; Ribeiro *et al.*, 2020). Esta técnica consiste en preguntar a expertos, ingenieros y científicos del campo de la energía undimotriz cuales son, bajo su criterio, los parámetros que pueden influir más sobre la viabilidad de instalar cualquier tipo de WECs. En este estudio, se preguntó a 15 expertos del COST Action WECANet: A pan-European Network for Marine Renewable Energy (<https://www.wecanet.eu>), usando la misma metodología que Ribeiro *et al.*, (2021). A continuación, se describen los 7 índices que se definieron para clasificar el recurso undimotriz:

- El recurso energético se define a través del índice WP ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) que hace referencia al potencial de oleaje calculado con la Fórmula 1.

- Además del índice WP, la riqueza del recurso se estima con la operatividad. Se determina a través del índice DWNT (*Downtime*) que representa el porcentaje de tiempo, sobre el periodo considerado, donde el aparato no funciona y entonces no genera electricidad. De forma general, se considera que los aparatos funcionan solo cuando  $H_s$  tiene valores entre 1 m y 8 m. En efecto, olas demasiado pequeñas no permiten la producción de energía, y olas demasiado altas pueden dañar el WEC si está en funcionamiento (por lo que se apaga en esta situación).

- La estabilidad del recurso se cuantificó empleando dos índices: uno de variabilidad temporal ( $C_v$ ) y otro de variabilidad mensual ( $M_v$ ). El primero (Fórmula 3) corresponde a la división entre la desviación estándar del WP por el promedio de este WP sobre el periodo de tiempo considerado. El segundo (Fórmula 4) corresponde a la resta entre el WP del mes más productivo ( $WP_{M1}$ ) y el menos productivo ( $WP_{M12}$ ), dividida por el WP promedio.

$$C_v = \frac{\sigma}{\overline{WP}} \quad (3)$$

$$M_v = \frac{WP_{M1} - WP_{M12}}{\overline{WP}} \quad (4)$$

- Además, se definió un índice Risk (m) asociado al riesgo que corresponde al valor promedio de altura de la ola más extrema anual (que por supuesto podría dañar o romper el aparato).

- En relación al coste económico se tuvieron en cuenta la profundidad (WD) (m) y la distancia a la costa (DC) ( $^\circ$ ). Estos 7 índices tienen unidades y magnitudes muy diferentes, por lo que es



necesario hacer una normalización para poder compararlos entre sí. Así, todos los índices tendrán un valor entre 0 (peor) y 1 (mejor) y además serán adimensionales. Los índices fueron normalizados según 10 categorías, salvo para WD y DC, para los que se consideraron 5 categorías (estos factores no cambian a lo largo del tiempo), como se ve en la Tabla 1 y la Tabla 2. Posteriormente, siguiendo el método Delphi se preguntó a los 15 expertos qué peso darían a cada uno de estos índices para formar un único índice (Tabla 3).

Al final, podemos crear un índice único (Fórmula 5) que tiene en cuenta los 7 índices elegidos  $I_i$ , cada uno con su peso  $W_i$ :

$$I = \sum_{i=1}^7 W_i I_i \quad (5)$$

Este índice tiene valores entre 0 y 1. Como último paso se establecieron 7 categorías diferentes (Tabla 4) para clasificar la energía undimotriz que dependen del valor final del índice.

Valor normalizado	WP (kW.m <sup>-1</sup> )	C <sub>v</sub>	M <sub>v</sub>	DWNT (%)	Risk (m)
0/9	< 10	> 1.9	> 2.5	> 90	> 27
1/9	10-20	1.7-1.9	2.25-2.5	90-80	25.5-27.0
2/9	20-30	1.5-1.7	2.0-2.25	80-70	24.0-25.5
3/9	30-40	1.3-1.5	1.75-2.0	70-60	22.5-24.0
4/9	40-50	1.1-1.3	1.5-1.75	60-50	21.0-22.5
5/9	50-60	0.9-1.1	1.25-1.5	50-40	19.5-21.0
6/9	60-70	0.7-0.9	1.0-1.25	40-30	18.0-19.5
7/9	70-80	0.5-0.7	0.75-1.0	30-20	16.5-18.0
8/9	80-90	0.3-0.5	0.5-0.75	20-10	15.0-16.5
9/9	> 90	< 0.3	< 0.5	< 10	< 15.0

TABLA 1. Criterios de normalización de los índices WP, C<sub>v</sub>, M<sub>v</sub>, DWNT y Risk

Valor normalizado	WD (m)	DC (°)
0	> 500	> 4
0.25	100-500	3-4
0.5	50-100	2-3
0.75	25-50	0.5-2
1	< 25	< 0.5

TABLA 2. Criterios de normalización de los índices WD y DC.

Índice	Peso
WP	0.44
C <sub>v</sub>	0.10
M <sub>v</sub>	0.05
DWNT	0.10
Risk	0.14
WD	0.07
DC	0.10

TABLA 3. Peso de cada índice normalizado.

Clasificación	Valores de I	Potencial del recurso
1	≤ 0.2	Pobre
2	0.2-0.3	Marginal
3	0.3-0.4	Suficiente
4	0.4-0.5	Bueno
5	0.5-0.6	Excelente
6	0.6-0.7	Sobresaliente
7	> 0.7	Magnífico

TABLA 4. Clasificación del potencial undimotriz.



### 2.2.3. Índices para analizar los WECs

Aparte de caracterizar el recurso de la energía undimotriz de una región también es necesario analizar qué cantidad de esa energía puede ser transformada en electricidad. Para ello es necesario tener en cuenta que la tecnología de los WECs es otro factor importante. Además, se necesita conocer la potencia generada por cada tipo de WEC dependiendo de las condiciones de oleaje que se dan. La capacidad de cada WEC para generar electricidad a partir del recurso undimotriz ( $P_E$ ) depende de su matriz de potencia. Es una matriz que representa  $P_E$  en función del rango de estados de mar ( $H_s$ ,  $T_p$ ) en los cuales opera el WEC.  $P_E$  se expresa en kW siguiendo la Fórmula 6.

$$P_E = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{j=1}^{n_H} p_{ij} P_{ij} \quad (6)$$

donde  $P_{ij}$  es la potencia eléctrica obtenida del elemento  $[i ; j]$  de la matriz de potencia del WEC,  $p_{ij}$  es la probabilidad de ocurrencia (expresada en porcentaje) de un determinado estado de mar para el elemento  $[i ; j]$  de la matriz de potencia, y  $n_T$  y  $n_H$  son los números de intervalos de período pico y altura significativa que se consideran, respectivamente.

WEC	$P_{MAX}$ (kW)	L (m)	Tipo
AquaBuoy	250	6	Absorbedor puntual
Pelamis	750	150	Atenuador

TABLA 5. Características de los WECs AquaBuoy y Pelamis

La matriz de potencia de un aparato tiene un valor máximo ( $P_{MAX}$ ) para ciertos valores de  $H_s$  y  $T_p$ . Por lo tanto,  $P_{MAX}$  se

define como la potencia eléctrica máxima que puede extraer el WEC con el estado de mar ideal para ello. Así, conociendo  $P_E$  y  $P_{MAX}$ , podemos definir el factor de carga  $\varepsilon$  (Fórmula 7), que es la división de los dos. Este índice nos da información sobre el porcentaje de potencia recogida frente al máximo que se podría recoger con este aparato.

$$\varepsilon (\%) = 100 \cdot \frac{P_E}{P_{MAX}} \quad (7)$$

También hay que tener en cuenta que los WECs tienen longitudes ( $L$ ) diferentes, por eso la unidad del WP es  $\text{kW} \cdot \text{m}^{-1}$ . Así, otro índice interesante es la eficiencia, que permite conocer el rendimiento del aparato a la hora de convertir en electricidad la energía del oleaje, es decir, nos da la potencia generada por unidad de longitud del WEC. La eficiencia se calcula mediante la Fórmula 8.

$$\text{Eficiencia} (\%) = 100 \cdot \frac{P_E}{WP \cdot L} \quad (8)$$

A diferencia de otras energías marinas, como la eólica marina, la tecnología de la energía undimotriz no ha conseguido converger en un único tipo de dispositivo. De hecho, se están desarrollando diferentes tecnologías, aunque todas ellas siguen teniendo un TRL (*Technological Readiness Level*) bajo (entre 5 y 7, IRENA, 2021). Por esta razón en este trabajo, se analizará la potencia eléctrica, el factor de carga y la eficiencia de dos WECs: el AquaBuoy y el Pelamis, cuyas características se definen en la Tabla 5. Elegimos estos aparatos porque se pueden instalar a una profundidad de 50-100 m, una profundidad mayor que para otros WECs que se deben instalar más cerca de costa.

Así, Pelamis y AquaBuoy se adecuan bien a la resolución espacial de los datos que tenemos en este trabajo. El estudio se hará para la zona del Golfo de Vizcaya



que se solapa con la zona L3 (Figura 2). Estos datos tienen una resolución espacial muy alta de  $1/27^\circ$ .

Índice	Significación
WP ( $\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Potencia del oleaje
$C_v$	Variabilidad temporal
$M_v$	Variabilidad mensual
DWNT (%)	Operatividad
Risk (m)	Riesgo
WD (m)	Profundidad del agua
DC ( $^\circ$ )	Distancia a costa
I	Índice de potencia undimotriz
$P_E$ (kW)	Potencia eléctrica
$\varepsilon$ (%)	Factor de carga
Eficiencia (%)	Eficiencia

TABLA 6. Resumen de los índices analizados.

### 3. Resultados

Los datos de  $H_s$  y  $T_p$  simulados permiten calcular el WP en el Golfo de Vizcaya para 3 periodos distintos: histórico (1979-2005), futuro cercano (2026-2045) y futuro lejano (2081-2099). Esto permitirá analizar la variación anual y estacional de WP para los distintos periodos. Después, se analizarán los 7 índices normalizados que caracterizan el recurso undimotriz en el Golfo de Vizcaya y se procederá a la clasificación del recurso. Finalmente, se analizará la potencia eléctrica que se podrá generar con dos WECs (AquaBuoy y Pelamis) en la costa noroeste de España y la costa oeste de Francia.

#### 3.1. Caracterización del recurso undimotriz

##### 3.1.1. Variación del recurso anual

Se caracteriza el clima marítimo de la zona de estudio durante el período histórico a través de  $H_s$  y  $T_p$  que son, además, los parámetros que definen el WP (Figura 3). Vemos que  $H_s$  tiene valores más altos cuanto más lejos de las costas (hasta  $\sim 3.5$  m). En cuanto a  $T_p$ , tiene valores  $\sim 11$  s en todo el Golfo de Vizcaya

salvo en una banda bastante larga adyacente a las costas francesas, donde sus valores decrecen hasta menos de 10 s. Estos parámetros permiten representar el WP promedio anual para este periodo. WP presenta los valores más bajos cerca de las costas ( $\sim 10 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) y va creciendo gradualmente (hasta  $\sim 70 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ) mar a dentro.

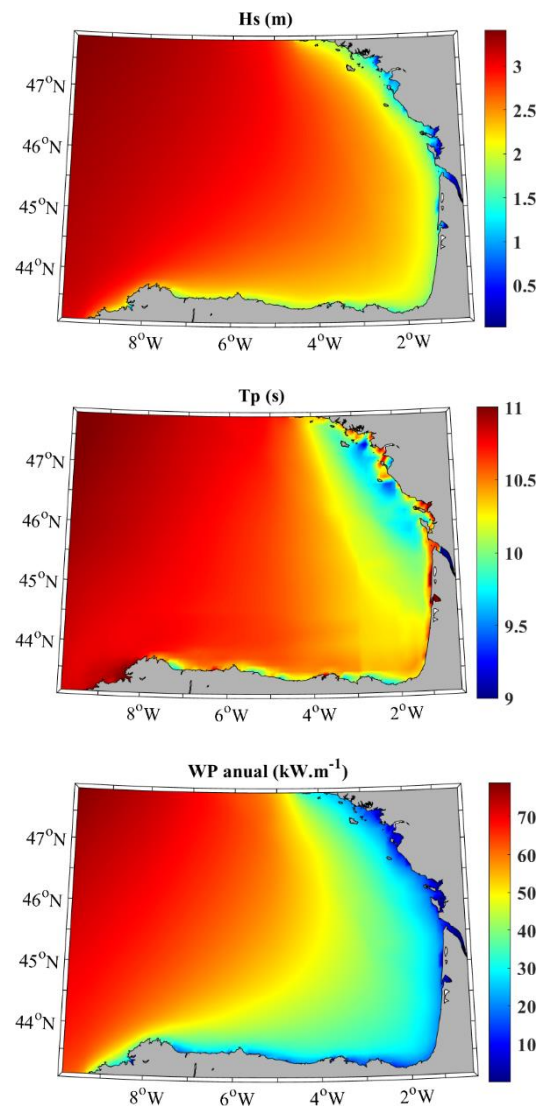


Fig. 3.  $H_s$ ,  $T_p$  y WP anuales para el periodo histórico (1979-2005).

Una vez caracterizado el clima marítimo y el recurso undimotriz de la zona de estudio durante el periodo histórico, se analizó cuál es la variación que se espera en términos de WP durante el futuro cercano y lejano (Figura 4). Los cambios futuros respecto del periodo histórico, se



representan mediante mapas de diferencia (expresados en %) entre el WP del futuro considerado y el del periodo histórico, usando la Fórmula 9.

$$\Delta WP (\%) = 100 \cdot \frac{WP_{\text{futuro}} - WP_{\text{histórico}}}{WP_{\text{histórico}}} \quad (9)$$

Un valor negativo significa una disminución futura del WP y viceversa. El  $\Delta WP$  anual para el futuro cercano y lejano se representa en la Figura 4a y Figura 4b, respectivamente. Se proyecta una disminución de la potencia undimotriz en todo en Golfo de Vizcaya en el futuro independientemente del periodo considerado. Esta disminución será de aproximadamente el 15% para el futuro cercano y del 25% para el futuro lejano.

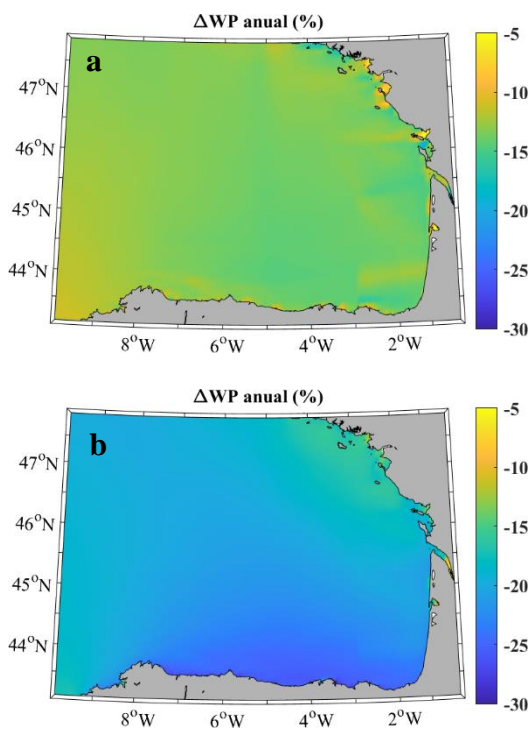


Fig. 4. Variación del potencial del oleaje ( $\Delta WP$ ) anual de los futuros (a) cercano (b) lejano respecto al período histórico.

### 3.1.2. Variación del recurso estacional

La variabilidad estacional de WP para el periodo histórico se representa en la Figura 5 considerando: invierno (diciembre-febrero), primavera (marzo-mayo), verano (junio-agosto) y otoño (septiembre-noviembre). Como para el WP anual, el WP estacional es siempre mayor mar adentro, lejos de las costas. Además, la potencia undimotriz es claramente mayor en invierno (hasta  $\sim 120 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ), menor en verano ( $\sim 20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-1}$ ), e intermedia en primavera y otoño.

También se representa el  $\Delta WP$  (ver Fórmula 9) estacional para los futuros cercano (Figura 6) y lejano (Figura 7). El patrón general es el mismo que para el  $\Delta WP$  anual: independientemente de la estación o el periodo futuro considerado, hay una disminución de la potencia undimotriz. Esta disminución es mayor para el futuro lejano que para el cercano. WP disminuye ligeramente ( $\sim -5\%$ ) en invierno en casi todo el Golfo de Vizcaya independientemente del periodo futuro considerado, salvo en la costa española donde será de  $-15\%$  para el futuro cercano y de  $-20\%$  para el lejano. La disminución en primavera será mayor y casi uniforme en todo el Golfo con valores de en torno a  $-20\%$  para el futuro cercano y de  $-30\%$  para el lejano. Considerando la estación de verano,  $\Delta WP$  es de  $-15\%$  cerca de las costas y de  $-10\%$  en las zonas más alejadas en el futuro cercano mientras que en el futuro lejano se proyecta un descenso de WP uniforme en todo el Golfo del  $-30\%$ . El patrón de otoño es el mismo que el de primavera: un descenso homogéneo en toda la zona, de en torno a  $-15\%$  para el futuro cercano y de  $-20\%$  para el lejano.



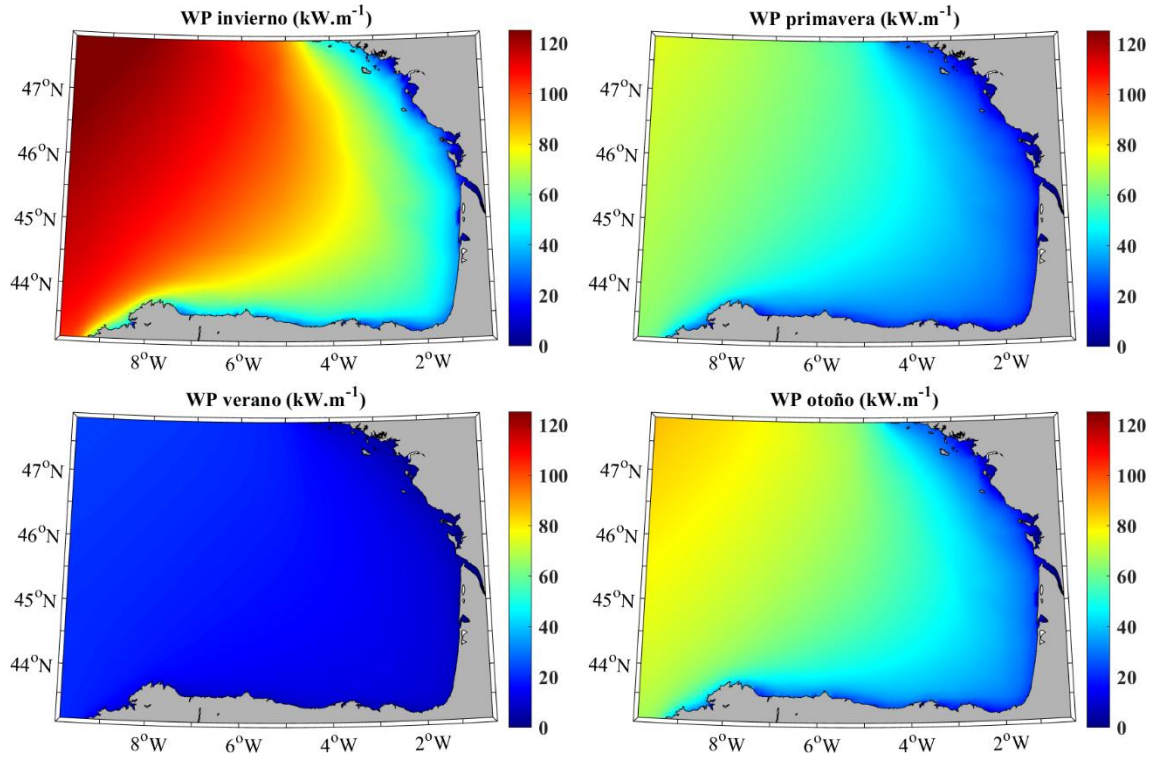


Fig. 5. WP estacionales para el periodo histórico (1979-2005).

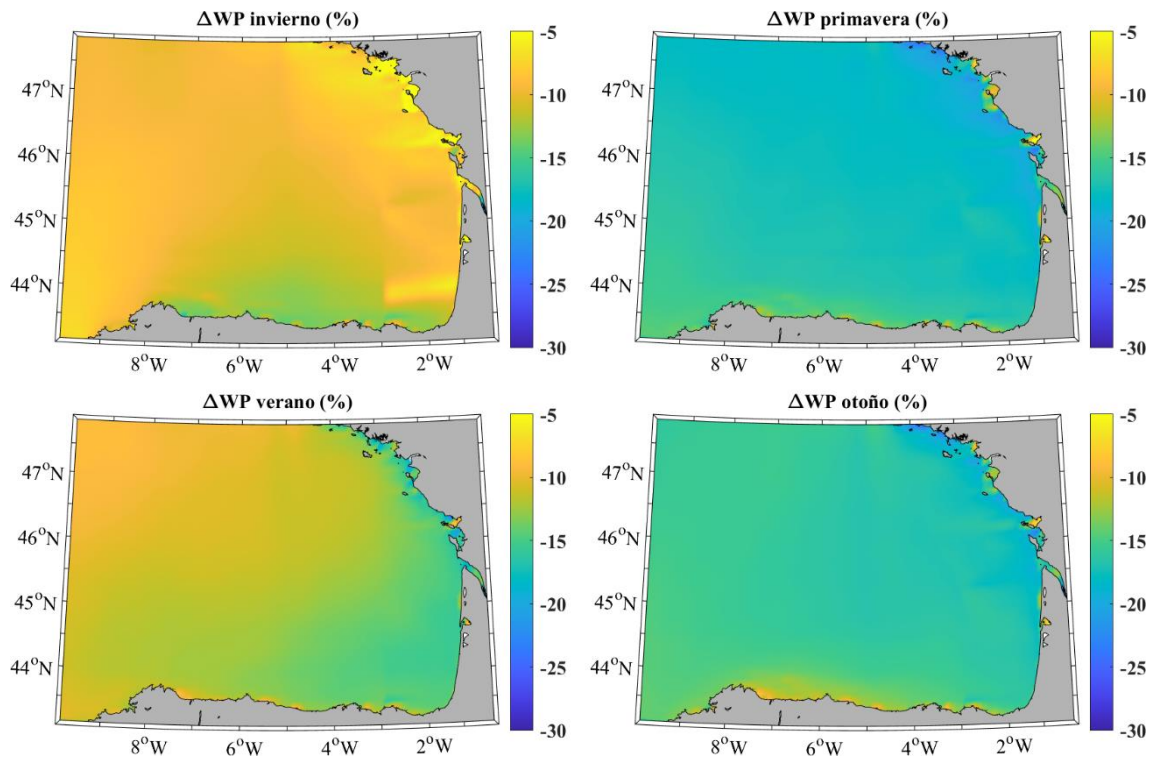


Fig. 6.  $\Delta$ WP estacional para el futuro cercano (2026-2045).



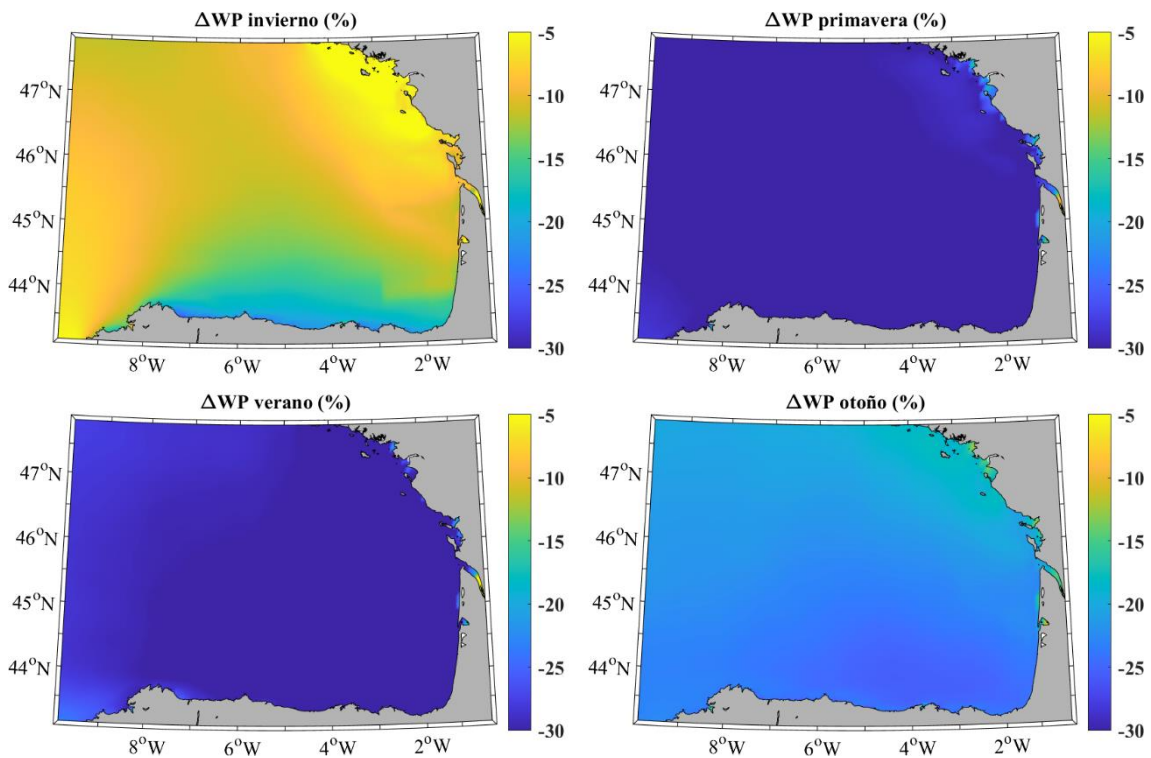


Fig. 7.  $\Delta$ WP estacional para el futuro lejano (2081-2099).

### 3.2. Clasificación del recurso undimotriz

Aunque las variaciones en el recurso se analizaron tanto para el futuro cercano como para el lejano, la clasificación del recurso undimotriz se hizo sólo para el futuro cercano (2026-2045) ya que se espera que el despegue tecnológico de este tipo de recurso renovable ocurra durante los próximos años/décadas.

En primer lugar, la Figura 8 muestra los índices relacionados con el recurso (WP) y la operatividad (DWNT) normalizados siguiendo la Tabla 1. Se observa que el WP se divide en franjas que siguen aproximadamente la forma de la costa, y es mayor cuanto más lejos de tierra (hasta alcanzar un valor de  $\sim 0.7$ ). En cuanto al DWNT, tiene un valor constante y próximo a 1 en todo el Golfo.

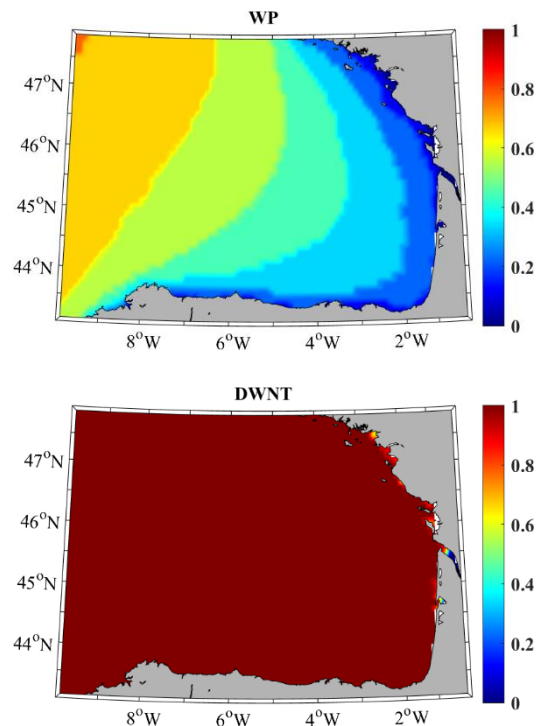


Fig. 8. Índices WP y DWNT normalizado para el futuro cercano (2026-2045).



La estabilidad del recurso se representa en la Figura 9 mediante los valores normalizados de la variabilidad temporal  $C_v$  (ver Fórmula 3) y la variabilidad mensual  $M_v$  (ver Fórmula 4). La variabilidad temporal muestra valores bajos,  $\sim 0.3$ , en toda la zona, siendo aún menores cerca de la costa francesa entre el estuario del río Garona y la región de Bretaña, y también en una franja horizontal ( $44^\circ\text{N}$ ) en el País Vasco francés entre  $1^\circ\text{W}$  y  $3^\circ\text{W}$ . En cuanto a la variabilidad mensual, tiene un valor de  $\sim 0.5$  en casi todo el Golfo, siendo un poco mayor ( $\sim 0.6$ ) cerca de la costa española y menor ( $\sim 0.4$ ) en la franja horizontal comentada anteriormente.

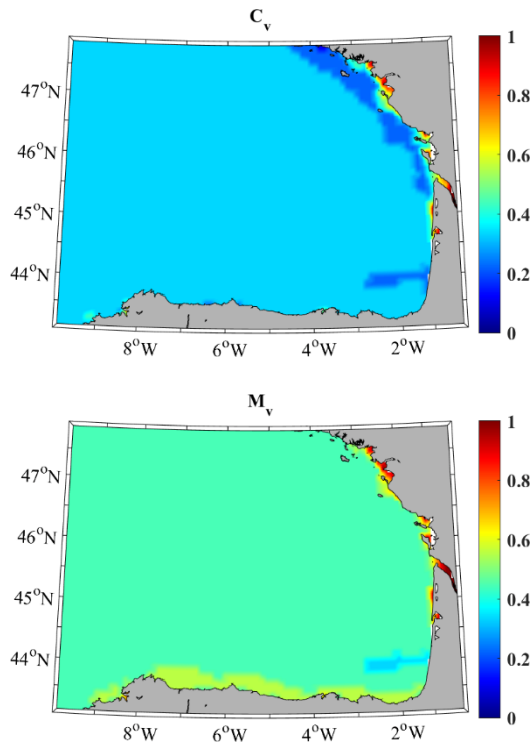


Fig. 9. Índices  $C_v$  y  $M_v$  normalizados para el futuro cercano (2026-2045).

El análisis del riesgo como consecuencia de eventos extremos se hizo en términos del índice Risk (Figura 10). El riesgo es menor (valores normalizados más altos) cerca de las costas y mayor al alejarse hacia el océano abierto.

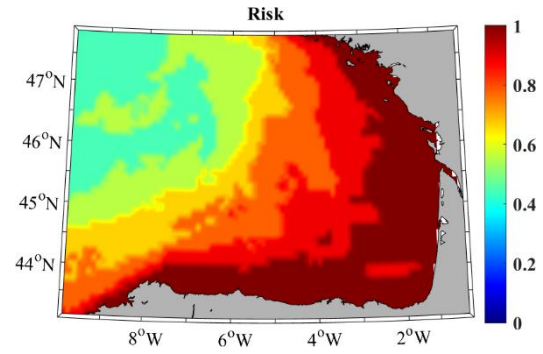


Fig. 10. Índice Risk normalizado para el futuro cercano (2026-2045).

Finalmente, la Figura 11 muestra los dos índices que tienen en cuenta factores económicos, WD y DC. Estos valores no dependen del periodo de tiempo considerado (histórico o futuro) y se normalizaron según la Tabla 2. Como era de esperar, los valores de profundidad normalizada (WD) son mayores cerca de las costas, aunque es interesante destacar que la plataforma continental es mucho más larga en la costa francesa que en la española.

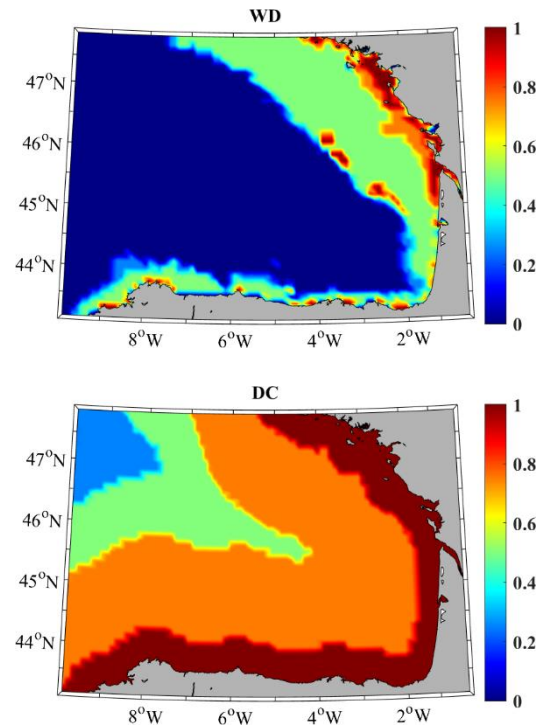


Fig. 11. Índices WD y DC normalizados para el futuro cercano (2026-2045).



A partir de estos 7 índices normalizados y su peso dado por la Tabla 3, se calcula el índice final (Figura 12) y se clasifica el recurso en las 7 clases definidas en la Tabla 4. La mayoría del Golfo de Vizcaya se clasifica como excelente (5/7). Sin embargo, una parte cerca del País Vasco se clasifica solo como buena (4/7) y unas zonas bastante grandes cerca de Galicia y la Bretaña francesa como sobresaliente (6/7).

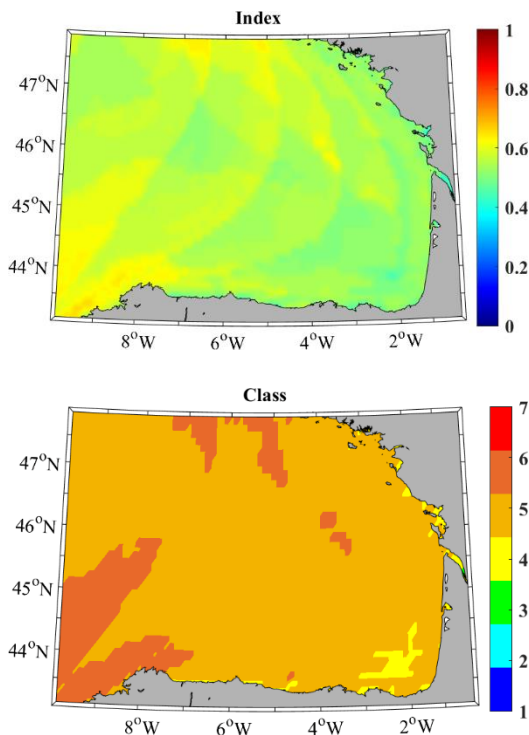


Fig. 12. Índice final y su clasificación para el futuro cercano (2026-2045)

### 3.3. Potencia generada por los WECs

A continuación, se va a analizar la potencia eléctrica generada por dos WECs: AquaBuoy y Pelamis. El análisis de  $P_E$  se va a basar en dos magnitudes: el factor de carga  $\varepsilon$  (ver Fórmula 7) y la eficiencia (ver Fórmula 8). Es importante señalar que estos cálculos se han realizado con datos de alta resolución espacial ( $1/27^\circ$ ) y que además se han seleccionado dos WECs que se pueden instalar a grandes profundidades.

#### 3.3.1. Costa española del Golfo de Vizcaya

La Figura 13 indica los valores de potencia eléctrica, factor de carga y eficiencia para los dos aparatos estudiados en la costa norte de España. En general, la potencia eléctrica es mayor en Galicia y menor en otras regiones, además de ser mayor cuanto más lejos de la costa. La  $P_E$  de AquaBuoy (Figura 13a) es más baja que la de Pelamis: llega hasta 75 kW en Galicia, frente a 150 kW para el Pelamis (Figura 13b). El factor de carga, sigue la misma tendencia que  $P_E$  para los dos aparatos: es mayor en Galicia y cerca de la costa. Sin embargo, los valores son más altos para el AquaBuoy (Figura 13c,  $\sim 30\%$  en Galicia) que para el Pelamis (Figura 13d,  $\sim 20\%$  en Galicia). Finalmente, la eficiencia del AquaBuoy (Figura 13e) es mayor cerca de las costas gallegas ( $\sim 40\%$ ) y menor en otras zonas ( $\sim 20\%$ ). Además, la eficiencia del Pelamis (Figura 13f) es mucho menor ( $<10\%$ ) que la del AquaBuoy y casi constante en toda la zona.

#### 3.3.2. Costa francesa del Golfo de Vizcaya

La Figura 14 representa los mismos índices que la Figura 13, pero a lo largo de la costa francesa. La potencia eléctrica es mayor lejos de la costa para los dos WECs. Sin embargo, la  $P_E$  de AquaBuoy (Figura 14a) es bastante menor: solo llega a 40 kW en comparación con los 100 kW de Pelamis (Figura 14b). El factor de carga también es menor cerca de las costas para ambos WECs, y mayor para el AquaBuoy (Figura 14c, hasta 20%) que para el Pelamis (Figura 14d, hasta 15%). En cuanto a la eficiencia, la del AquaBuoy (Figura 14e) es mayor lejos de las costas (hasta  $\sim 40\%$ ), mientras que la del Pelamis (Figura 14f) es muy baja ( $<5\%$ ) aunque constante en toda la zona.



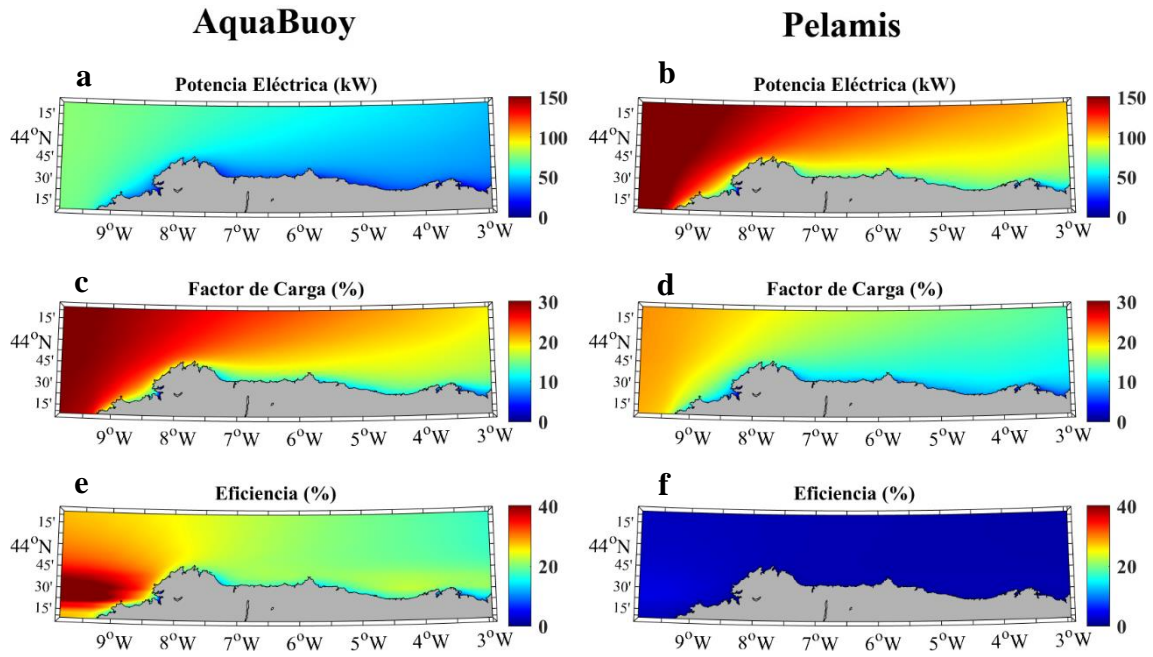


Fig. 13.  $P_E$ ,  $\epsilon$  y Eficiencia del AquaBuoy (columna izquierda) y el Pelamis (columna derecha) en la costa española en el futuro cercano (2026-2045).

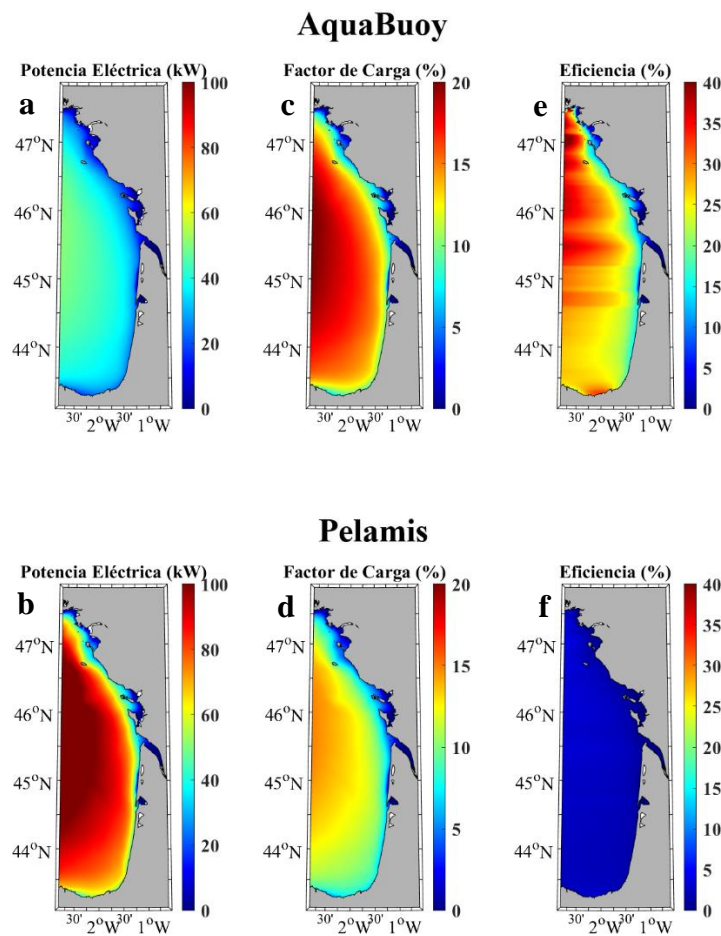


Fig. 14.  $P_E$ ,  $\epsilon$  y Eficiencia del AquaBuoy (arriba) y el Pelamis (abajo) en la costa francesa en el futuro cercano (2026-2045).



#### 4. Discusión

En este trabajo se caracterizó a través de diferentes análisis la energía undimotriz en el Golfo de Vizcaya durante el futuro cercano. El primer paso fue caracterizar esta energía durante el periodo histórico. La Figura 3 muestra que el WP es mayor cuanto más mar a dentro del Golfo de Vizcaya. A primera vista, Galicia y Bretaña parecen zonas de interés para instalar WECs porque el WP en estas áreas es más alto que en otras zonas, incluso cerca de la costa, lo cual es un aspecto relevante ya que una menor distancia a costa y profundidad suponen un abaratamiento de la producción.

Como se ve en la Figura 4, que representa el  $\Delta$ WP para los futuros cercano y lejano frente al periodo histórico, el cambio climático va a influir de manera negativa sobre la potencia undimotriz porque  $\Delta$ WP tiene valores negativos. Esta bajada se notó también para distintos periodos futuros en la mayor parte de la cuenca mediterránea (Lira-Loarca *et al.*, 2021), incluso en la zona de Menorca (Sierra *et al.*, 2017), y también en Cornualles (Reeve *et al.*, 2011). Por tanto, es importante señalar que la explotación de la energía undimotriz permite luchar contra el cambio climático, pero que a su vez se ve impactada por éste. Además, se caracterizó el recurso estacionalmente. Al estudiar los valores medios de WP para cada estación (Figura 5) se ve que el WP varía mucho entre las distintas estaciones durante el periodo histórico siendo mayor en invierno y menor en verano. Este fenómeno se debe al hecho de que los vientos soplan más fuerte en invierno en el hemisferio norte en latitudes medias, lo que provoca olas más energéticas. Este patrón estacional explica que, a la hora de clasificar el recurso undimotriz, los índices que consideran la estabilidad del recurso durante el futuro cercano ( $C_v$  y  $M_v$ ) sean

en general bajos (Figura 9). Además, se ve que las reducciones de WP (Figura 6 y Figura 7) para el futuro serán más fuertes en primavera, otoño y verano y algo menores durante el invierno. Este patrón de cambio estacional en el recurso favorece que de cara al futuro la variabilidad aún sea mayor, como se notó también en el Mar Mediterráneo (Casas-Prat *et al.*, 2013). Una manera de paliar este problema de estabilidad del recurso es combinar varias fuentes de energía en un mismo sitio (Oliveira-Pinto *et al.*, 2020). Por ejemplo, la energía solar también varía mucho a lo largo del año, pero al revés que la undimotriz, es decir, es mayor en verano y menor en invierno. Entonces, la instalación de WECs combinados con paneles fotovoltaicos permitiría reducir la variabilidad del recurso energético: en verano la abundante energía solar compensaría parcialmente la débil energía undimotriz, y al revés en invierno.

Además de los parámetros de estabilidad ( $C_v$  y  $M_v$ ) ya comentados, se clasificó el recurso undimotriz futuro atendiendo a otros parámetros. En relación a la riqueza del mismo, los valores de WP normalizados que se ven en la Figura 8 son bastante modestos en el Golfo de Vizcaya. Sin embargo, los valores de operatividad (DWNT) normalizados son muy altos en toda la zona ( $\sim 1$ ), lo que significa que la altura significativa de las olas está entre 1 m y 8 m durante al menos el 90 % del tiempo para el futuro cercano (ver Tabla 1). La Figura 10 muestra que el índice Risk sigue la tendencia inversa a la de WP: el riesgo es menor (índice normalizado mayor) cuanto más cerca de las costas del Golfo de Vizcaya. Esto significa que las olas extremas son más frecuentes en mar abierto. Estos patrones que siguen los índices de operatividad y riesgo son parecidos en el Noroeste de la Península Ibérica para el mismo futuro cercano



(Ribeiro et al., 2021). Finalmente, se ve en la Figura 11 que es más sencillo en términos económicos instalar un WEC cerca de las costas francesas porque la profundidad allí es menor, pero este índice de profundidad normalizado solo tiene un peso de 7% en el índice final (ver Tabla 3).

Al combinar todos los índices, la Figura 12 muestra que todo el Golfo de Vizcaya es bastante homogéneo a la hora de clasificar como excelente (valores de 5/7, ver Tabla 4) el recurso undimotriz para el futuro próximo. Además, las zonas cercanas a Galicia y Bretaña se clasifican como sobresaliente (6/7) debido a los altos valores del índice WP y a pesar de los bajos valores del índice Risk (que tiene un peso de 14% en el índice final). Finalmente, la parte del Golfo cerca del País Vasco se clasifica solo como bueno (4/7) debido a altos valores de los índices de profundidad, estabilidad y riesgo (probablemente por la presencia del cañón submarino “Gouf de Capbreton”). Se hizo la misma clasificación para la zona Noroeste de la Península Ibérica durante el futuro cercano en Ribeiro et al. (2021) y, como para el Golfo de Vizcaya, la mayoría de la zona se clasifica como excelente, salvo las aguas cerca de Galicia y Lisboa que se clasifican como sobresaliente. Por lo tanto, a pesar de un WP más bajo en el Golfo de Vizcaya que en otras zonas, como por ejemplo el oeste de la Península Ibérica, se obtienen valores altos en la clasificación del recurso undimotriz debido a valores altos del índice Risk y/o el DWNT que compensan un menor WP.

Pero como no toda la energía undimotriz puede transformarse en electricidad, se analizó la potencia eléctrica ( $P_E$ ), el factor de carga ( $\epsilon$ ) y la eficiencia de dos WECs en las costas del Golfo de Vizcaya. El factor de carga (ver Fórmula 7) nos indica lo que produce un WEC

respecto al máximo que podría producir ( $P_{MAX}$ ) y la eficiencia (ver Fórmula 8) representa la potencia generada por el WEC por unidad de longitud respecto a todo el recurso energético disponible, es decir, lo bien aprovechado que está el recurso por el aparato. Este análisis se hizo considerando únicamente dos WECs de entre los múltiples prototipos que existen porque Pelamis y AquaBuoy se pueden instalar a una mayor profundidad, lo que se adecúa mejor a la resolución espacial de los datos que disponemos. En las costas españolas (ver Figura 13), la  $P_E$  del Pelamis (Figura 13b) es bastante mayor que la del AquaBuoy (Figura 13a). Este hecho se debe principalmente a que, por su diseño, un Pelamis puede producir mayor potencia. Así los valores de la matriz de potencia de Pelamis son más altos que los del AquaBuoy. En efecto, se ve en la Tabla 5 que la  $P_{MAX}$  del Pelamis es 3 veces mayor que la del AquaBuoy. En promedio anual, un Pelamis podría generar una potencia eléctrica de hasta 150 kW en Galicia y 100 kW en la plataforma continental francesa. Sin embargo, el factor de carga del AquaBuoy (Figura 13c) es mayor que el de Pelamis (Figura 13d). Por lo tanto, AquaBuoy es un dispositivo mejor aprovechado. Además, la eficiencia del AquaBuoy (Figura 13e) es también mucho mayor que la del Pelamis (Figura 13f) porque su longitud es de solo 6 m (Tabla 5), frente a los 150 m del Pelamis. En las costas francesas (Figura 14) se da el mismo patrón, pero con valores siempre un poco más bajos (para todos los índices y WECs) que en las costas españolas analizadas. Los mismos parámetros que los estudiados en este trabajo se analizaron cerca de las costas gallegas para el periodo 2014-2021 en Arguilé-Pérez et al. (2022), para 4 WECs, entre los que se encuentran AquaBuoy y Pelamis. Este trabajo describe un patrón similar al aquí comentado, es decir, Pelamis puede

generar más energía, pero AquaBuoy tiene un factor de carga y una eficiencia mayores. En este trabajo se propone una estrategia que también podría ser útil para el Golfo de Vizcaya que es la de instalar varios AquaBuoy para alcanzar la  $P_E$  del Pelamis. Al final, cada WEC tiene sus ventajas y desventajas y a la hora de instalar uno en el mar se debe tener en cuenta el estado del oleaje en la ubicación elegida, la profundidad a la que se puede instalar el aparato, así como también factores ambientales y humanos.

## 5. Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido analizar el recurso de energía undimotriz en el Golfo de Vizcaya. Se ha estudiado la potencia undimotriz para un periodo histórico (1979-2005) y dos periodos futuros bajo el escenario RCP8.5: cercano (2026-2045) y lejano (2081-2099). Este análisis se hizo utilizando datos provenientes de simulaciones elaboradas con el modelo SWAN. Se ha estudiado la variabilidad estacional de la potencia undimotriz para los tres periodos. Luego, se ha clasificado el recurso para el futuro cercano. Finalmente, se ha estudiado la potencia eléctrica que generarán dos WECs durante este mismo periodo. Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- En términos anuales, la potencia undimotriz es mayor hacia mar adentro. En el futuro se mantendrá ese mismo patrón, pero se espera que el cambio climático tenga un impacto negativo sobre la potencia undimotriz, porque se ha obtenido una disminución del recurso en el futuro. Al analizar el recurso estacionalmente se observa que la potencia es mucho mayor en invierno, bastante baja en verano, e intermedia en primavera y otoño. Esta variabilidad no bajará para los periodos futuros, incluso

se incrementará, puesto que las simulaciones proyectan que el recurso disminuirá mucho menos en invierno que durante las otras estaciones.

- El recurso undimotriz futuro se clasifica como excelente (5/7) en la mayor parte del Golfo de Vizcaya, y como sobresaliente (6/7) en extensas zonas cerca de Galicia y Bretaña. Solo en las aguas cerca del País Vasco se clasifica como bueno (4/7). Así, el Golfo de Vizcaya parece ser una zona interesante a tener en cuenta a la hora de instalar WECs.

- Se ha calculado la potencia eléctrica que podrían generar dos WECs, AquaBuoy y Pelamis, cerca de la costa española y francesa durante el futuro cercano. En ambas zonas, Pelamis puede producir más potencia eléctrica en término medio. Sin embargo, el factor de carga de un AquaBuoy es mayor, es decir, sus características permiten un mejor aprovechamiento del dispositivo. Además, AquaBuoy también presenta una mayor eficiencia debido sobre todo a sus dimensiones más reducidas (6 m) en comparación con Pelamis (150 m), por lo que aprovecha mejor el recurso de la zona de estudio.

La clasificación que se hizo en este artículo se puede usar en cualquier zona del mundo para conocer las áreas más adecuadas para la instalación de WECs. Además, es importante destacar que existen varios tipos de WECs que usan diferentes tecnologías para aprovechar la energía del oleaje. Así, todos estos aparatos tienen características bastante distintas (potencia máxima, geometría, profundidad a la que se puede instalar, etc.) que también se deben tener en cuenta, dependiendo del entorno en el que se quiere instalar. El futuro de la energía undimotriz dependerá principalmente de los avances tecnológicos que experimenten los



WECs. Esta energía renovable por sí sola no será suficiente para satisfacer toda la demanda energética de España y/o Francia, pero se puede combinar con otras EMR (eólica y fotovoltaica) para aumentar la potencia total y disminuir la variabilidad del recurso.

### Bibliografía

- Arguilé-Pérez B., Ribeiro A.S., Costoya X., deCastro M., Carracedo P., Dias J.M., Rusu L. and Gómez-Gesteira M. (2022). Harnessing of Different WECs to Harvest Wave Energy along the Galician Coast (NW Spain). *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 719.  
<https://doi.org/10.3390/jmse10060719>
- Casas-Prat M. and Sierra J. P. (2013). Projected future wave climate in the NW Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol. 118, 3548–3568.  
<https://doi.org/10.1002/jgrc.20233>
- deCastro M., Costoya X., Salvador S., Carvalho D., Gómez-Gesteira M., Sanz-Larruga F.J. and Gimeno L. (2019). An overview of offshore wind energy resources in Europe under present and future climate. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436 (1), 70-97.  
<https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nyas.13924>
- EESI (2010). Offshore Wind Energy.  
[https://www.eesi.org/files/offshore\\_wind\\_101310.pdf](https://www.eesi.org/files/offshore_wind_101310.pdf)
- ETIPOCEAN (2020). Strategic Research and Innovation Agenda for Ocean Energy. Brussels, Belgium.  
<https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2020/05/ETIP-Ocean-SRIA.pdf>
- Fan Y., Liu L-C., Wu G. and Wei Y-M. (2006). Analyzing impact factors of CO2 emissions using the STIRPAT model. *Environmental Impact Assessment Review*, 26 (4), 377-395.  
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.11.007>
- Hayward J. and Osman P. (2011). The potential of wave energy.  
[https://www.researchgate.net/profile/Jennifer-Hayward-3/publication/265179985\\_The\\_potential\\_of\\_wave\\_energy/links/562eaae308ae518e34838303/The-potential-of-wave-energy.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jennifer-Hayward-3/publication/265179985_The_potential_of_wave_energy/links/562eaae308ae518e34838303/The-potential-of-wave-energy.pdf)
- Hemer M., Trenham C., Durrant T. and Greenslade D. (2015). CAWCR Global wind-wave 21st century climate projections. v2. CSIRO. Service Collection.  
<https://doi.org/10.4225/08/55C991CC3F0E8>.
- Hennemuth T.I., Jacob D., Keup-Thiel E., et al. (2017). Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use.  
<https://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf>
- IRENA (2021). Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment.  
[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA\\_G20\\_Offshore\\_renewables\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_G20_Offshore_renewables_2021.pdf)
- IPCC (2007). Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Synthesis Report.  
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/sres-en.pdf>

- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.  
[https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPC\\_C\\_SynthesisReport.pdf](https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPC_C_SynthesisReport.pdf)
- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter04.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter04.pdf)
- Lemos G., Semedo A., Dobrynin M., Behrens A., Staneva J., Bidlot J-R., Miranda P.M.A. (2019). Mid-twenty-first century global wave climate projections: Results from a dynamic CMIP5 based ensemble, *Global and Planetary Change*, Volume 172, 2019, Pages 69-87.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.09.011>.
- Lira-Loarca A., Ferrari F., Mazzino A. and Besio G. (2021). Future wind and wave energy resources and exploitability in the Mediterranean Sea by 2100. *Applied Energy*, 302 (15), 117492.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117492>
- Mørk G., Barstow S., Kabuth A. and Teresa Pontes M. (2010). Assessing the Global Wave Energy Potential. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering: Volume 3.  
<https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473>
- Oliveira-Pinto S., Rosa-Santos P. and Taveira-Pinto F. (2020). Assessment of the potential of combining wave and solar energy resources to power supply worldwide offshore oil and gas platforms. *Energy Conversion and Management*, 223, 113299.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113299>
- Reeve D.E., Chen Y., Pan S., Magar V., Simmonds D.J., Zacharioudaki A. (2011). An investigation of the impacts of climate change on wave energy generation: The Wave Hub, Cornwall, UK. *Renewable Energy*, Volume 36, Issue 9, 2011, Pages 2404-2413.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.020>
- Reguero B.G., Losada I.J., Méndez F.J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Ribeiro A.S., Costoya X., deCastro M., Carvalho D., Dias J.M., Rocha A. And Gomez-Gesteira M. (2020). Assessment of Hybrid Wind-Wave Energy Resource for the NW Coast of Iberian Peninsula in a Climate Change Context. *Applied Sciences*, 10 (21), 2020, 7395.  
<https://doi.org/10.3390/app10217395>
- Ribeiro A.S., deCastro M., Costoya X., Rusu L., Dias J.M., Gomez-Gesteira M. (2021). A Delphi method to classify wave energy resource for the 21st century: Application to the NW Iberian Peninsula. *Energy* 235, 121396.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121396>



Rusu L. (2019). Evaluation of the near future wave energy resources in the Black Sea under two climate scenarios. *Renewable Energy*, Volume 142, Pages 137-146.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.092>.

Sierra J.P., Casas-Prat M., Campins E. (2017). Impact of climate change on wave energy resource: The case of Menorca (Spain), *Renewable Energy*, Volume 101, Pages 275-285.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.060>.

United Nations (2021). COP26 - Together for our planet.

<https://www.un.org/en/climatechange/cop26>

WindEurope (2020). Offshore Wind in Europe - Key trends and statistics 2019.

<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>

Zabihian A. and Fung A.S. (2011). Review of marine renewable energies: Case study of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (5), 2461-2474.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.006>

## Proyecciones futuras de caudales extremos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil

S. HERNÁNDEZ\*, D. FERNÁNDEZ-NÓVOA, M. DECASTRO

*\*sabrina.hernandez@alumnos.uvigo.es*

*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Facultade de Ciencias,  
Universidade de Vigo, Campus As Lagoas s/n, Ourense, Spain*

### RESUMEN

El cambio climático está dando lugar a una importante intensificación de las lluvias torrenciales, así como de las inundaciones asociadas, en muchas partes del mundo, y se espera que en el futuro la situación sea todavía más crítica. Sin embargo, es necesario hacer análisis regionalizados de estos eventos ya que su evolución va a ser muy dependiente de las características locales de cada zona. En el presente estudio se evalúa como se verá afectada la cuenca del Miño-Sil en relación a estos fenómenos y las implicaciones del cambio climático, mediante un análisis regionalizado de los eventos más extremos de precipitación y las riadas asociadas. Para ello, se utilizaron aquellos modelos climáticos del proyecto EURO-CORDEX que, cuando se compararon con datos reales de la zona, ofrecieron una buena reproducibilidad de los mismos. Una vez validados los modelos, se analizaron los datos de precipitación para el período histórico (1990-2019) y dos futuros, uno próximo (2030-2059) y otro más lejano (2070-2099), considerando el escenario de emisión RCP8.5. Inicialmente, se analizaron los cambios esperados en la precipitación media anual, obteniendo una disminución a lo largo del siglo que rondará el 20% en el futuro lejano. Al evaluar las variaciones estacionales se observó que el mayor descenso de precipitación ocurrirá en los meses de verano, disminuyendo en aproximadamente un 40% a finales de siglo en esta estación, lo que puede implicar una situación crítica de escasez de agua en los meses cálidos en la cuenca del Miño-Sil. Sin embargo, esta disminución de la precipitación media anual y estacional, no implica que los eventos extremos también vayan a disminuir su intensidad en el futuro. Así, se analizaron también las proyecciones futuras de los eventos más extremos de precipitación, considerando como tales aquellos que superasen el percentil 99.9. Se ha obtenido un incremento inequívoco de su intensidad, pudiendo alcanzar un 6.5% en media para la cuenca en el futuro lejano. Además, también se analizó la precipitación extrema en términos de períodos de retorno, obteniéndose también un incremento de sus valores a medida que avanza el siglo. Una vez caracterizadas las precipitaciones y su evolución futura, los datos de precipitación se utilizaron para alimentar un modelo hidrológico y obtener los caudales asociados, para analizar también su evolución futura. Se obtuvo que, de forma general, los eventos extremos de caudal aumentarán en las principales localizaciones de la cuenca, con intensificaciones máximas que pueden rondar el 30% a finales de siglo en la ciudad de Ourense y la desembocadura del Miño. En la zona del río Sil, el afluente principal del Miño, en ciudades como Ponferrada y O Barco la intensificación también será importante, aunque los aumentos serán moderados. Es en la zona superior del Miño, concretamente en la ciudad de Lugo, donde, a pesar de que se esperan ligeras intensificaciones, los resultados arrojan una mayor incertidumbre.

*Palabras Clave:* Eventos extremos; Cambio climático; CORDEX; Precipitación; Caudales; Cuenca del Miño-Sil



## 1. Introducción

La acción antropogénica del ser humano es el principal motor del cambio climático actual que estamos viviendo (Uriarte, 2013; Zalasiewicz y Willians, 2021). Esto es debido, en gran parte, al drástico aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que se está produciendo desde la Revolución Industrial (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2021). La continuada emisión de GEIs a la atmósfera ha dado lugar a un desequilibrio en el balance radiativo del planeta, con un forzamiento radiativo total positivo que conduce a un incremento de la temperatura media de la Tierra. Los registros indican que el planeta recibe más energía en la actualidad en comparación al año 1750, en concreto, un aumento de  $2.3 \text{ W/m}^2$  en 2011, siendo el principal responsable el aumento de dióxido de carbono en la atmósfera (IPCC, 2013). Este desequilibrio en el balance de flujos de energía del planeta da lugar a una serie de cambios en las variables climáticas. Además de la subida de las temperaturas en la atmósfera y los océanos, se asocia con la disminución de la cantidad y extensión de hielo y nieve, la subida del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el desplazamiento de las zonas climáticas hacia los polos o el aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos (olas de calor, precipitaciones extremas...) en muchas regiones del planeta (IPCC, 2013; 2021).

Entre los eventos extremos que se ven intensificados por la acción del cambio climático, los fenómenos de precipitación intensa y los eventos de inundación asociados, se sitúan como unos de los más importantes y preocupantes debido a sus catastróficas consecuencias, ya que tienen una gran

capacidad de causar daños importantes en infraestructuras, además de poner en riesgo la integridad de las personas (Noji, 2000; Fekete *et al.*, 2017; Paprotny *et al.*, 2018). Más allá del incremento tanto en frecuencia como en magnitud de estos fenómenos detectado recientemente en muchas partes del planeta, se espera que en el futuro la situación sea todavía más crítica, aunque bien es cierto que este aumento no es homogéneo, sino que depende considerablemente de las características regionales, pudiendo incluso existir alguna localización donde el riesgo disminuya (Arnell y Gosling, 2016; Alfieri, 2017; Jongman, 2018; Blöschl *et al.*, 2019). Sin embargo, de forma general, el aumento de la temperatura global facilita que la atmósfera retenga más humedad, contribuyendo a la intensificación de los eventos de precipitación extrema, y las consecuentes inundaciones, en muchas regiones del planeta (IPCC, 2021).

Como se ha comentado, la variabilidad de los eventos extremos ante el cambio climático va a ser muy dependiente de cada región, de ahí que sea fundamental analizar su evolución en cada localización que pueda ser vulnerable a dichos eventos. Es por ello que surgieron proyectos enfocados a mejorar la resolución de los modelos climáticos globales (GCM por sus siglas en inglés) para así poder analizar la evolución del clima de forma regional. Los GCMs permiten obtener simulaciones globales del clima abarcando todo el planeta, sin embargo, sus resoluciones máximas están en el entorno de los 100 km, lo que no permite analizar de forma precisa el clima a escala regional. De esa necesidad surgen los modelos climáticos regionales, como los desarrollados en el proyecto EURO-CORDEX (Coordinated Regional

Climate Downscaling Experiment, <http://www.euro-cordex.net>). Estos modelos se alimentan en sus fronteras de los datos proporcionados por los GCMs, pero proporcionan una mejor resolución espacial (en el entorno de los 12.5 km). Esto permite analizar con mayor precisión y detalle la variabilidad climática futura de las diferentes regiones. Aprovechando la información proporcionada por estos modelos, se han realizado investigaciones acerca de la evolución del ciclo hidrológico a lo largo del próximo siglo. Los resultados de estas investigaciones determinaron que la intensificación del ciclo hidrológico a causa de temperaturas atmosféricas crecientes va estrechamente ligada a la recurrencia de lluvias torrenciales que repercutirán directamente sobre el riesgo de fenómenos de inundación, que se verán intensificados en muchas regiones (Alfieri et al., 2015a). En este sentido, se ha determinado que la frecuencia de los eventos extremos de inundación en Europa se duplicará en las próximas tres décadas, con una tendencia que continuará aumentando a medida que avance el siglo. De hecho, se espera que esta intensificación afecte aproximadamente al 75% de los ríos europeos (Alfieri et al., 2015a). Esto provocará, además, un aumento significativo tanto en el número de personas afectadas, como en las pérdidas económicas asociadas a los daños provocados por las inundaciones (Alfieri et al., 2015b). También se han realizado estudios enfocados en zonas más locales. Un ejemplo es el proyecto llevado a cabo desde AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, <https://www.aemet.es/>) donde se desarrollaron modelos estadísticos de regionalización para España, una región especialmente vulnerable a estos eventos debido a sus características sinópticas (Trigo et al., 2004; Lavers et al., 2011). El objetivo

de este proyecto era elaborar proyecciones más precisas sobre cómo iban a evolucionar las principales variables climáticas en las próximas décadas en esta región. A pesar de que se detectó una disminución general de los días con lluvia, estos modelos confirmaron un aumento en la tasa de precipitaciones extremas (Morata, 2014). La evolución del caudal es más incierta, ya que hay una insuficiencia de estudios que apliquen varios modelos hidrológicos de forma simultánea para su proyección, sin embargo, se pueden detectar algunos cambios importantes y que parecen robustos. Se esperan aumentos inequívocos en los caudales extremos (periodo de retorno de 100 años) en las demarcaciones hidrográficas del Miño-Sil, Galicia Costa, Duero y Ebro (Inundaciones y Cambio Climático, 2018).

Los principales objetivos del presente estudio son determinar de forma particular la evolución futura de las precipitaciones en la cuenca del Miño-Sil, así como la evolución de los caudales extremos asociados en las localizaciones más importantes de la cuenca durante el siglo XXI, debido a que, como se ha comentado, es una demarcación especialmente vulnerable a dichos eventos.

## 2. Área de estudio

El área de estudio de este trabajo se enfoca en la demarcación hidrográfica del Miño-Sil, situada en el noroeste de la Península Ibérica (Figura 1). Este territorio abarca gran parte de Galicia, atravesando también territorio leonés, incluyendo una mínima parte en Asturias e introduciéndose en su parte final en el norte de Portugal. La superficie total de la cuenca se sitúa en torno a los 17.000 km<sup>2</sup>.





**Figura 1.** Representación del área de estudio. En azul se representa la superficie ocupada por la cuenca hidrográfica del Miño-Sil. Los puntos rojos indican las principales localizaciones en las que se analizará la evolución de los caudales extremos, de este a oeste: Ponferrada y O Barco (río Sil, principal afluente del río Miño); Lugo, Ourense y la desembocadura (río Miño).

La precipitación anual de la cuenca oscila entre 700 y 1.900 mm/año, con una media anual de 1.175 mm, según los datos de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (CHMS [www.chms.es](http://www.chms.es)). El régimen fluvial de la cuenca es básicamente pluvial, principalmente influenciado por el ciclo hidrológico caracterizado por caudales mínimos en los meses de verano y máximos durante el final del otoño y el invierno (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2017). El caudal medio supera los 300 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> en la desembocadura. Durante los meses de caudales máximos, la cuenca puede presentar recurrentemente caudales elevados que provocan que el río se desborde, causando inundaciones en importantes poblaciones (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020). Esto principalmente se asocia a los sistemas de tormentas que llegan desde el Atlántico al noroeste de la Península Ibérica cargados de calor y humedad, y que por lo tanto pueden provocar, bajo condiciones favorables de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO por sus siglas en inglés), eventos intensos y duraderos de precipitación sobre la cuenca causando inundaciones asociadas (Trigo *et al.*, 2004; Trigo, 2006; Lavers *et al.*, 2011; Trigo *et al.*, 2014).

### 3. Datos y metodología

#### 3.1. CORDEX

Para la realización de este trabajo se utilizaron los datos diarios de precipitación del proyecto EURO-CORDEX, con una resolución espacial de 0,11° x 0,11°, con el objetivo de analizar los cambios futuros esperados tanto en la precipitación, como en los caudales asociados. El proyecto CORDEX, a través de la integración de diferentes modelos climáticos regionales (RCMs por sus siglas en inglés), realiza simulaciones históricas y proyecciones futuras, que se extienden a lo largo del siglo XXI, de las variables climáticas más importantes a escala regional y bajo los distintos escenarios de emisión de gases de efecto invernadero propuestos por el IPCC (Giorgi *et al.*, 2009). Para el desarrollo de este trabajo se consideraron un total de 31 RCMs disponibles en la rama europea del proyecto (dominio EURO-CORDEX, [www.euro-cordex.net](http://www.euro-cordex.net)). Se descargaron los datos diarios de precipitación para el área de estudio para el período histórico 1990-2019, y el futuro, tanto cercano (2030-2059) como lejano (2070-2099), bajo el escenario de emisión RCP8.5. Este escenario es el más pesimista de todos, en el que se contempla la posibilidad de que los esfuerzos realizados por las autoridades políticas para combatir el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero sean escasos y muy limitados. Sin embargo, algunos estudios señalan el RCP8.5 como uno de los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero más realistas, ya que las emisiones de GEIs en los últimos años han estado más próximas a este escenario (Schwalm *et al.*, 2020). Además, desde el punto de vista del análisis de riesgos de eventos extremos, siempre es preferible tomar una perspectiva más conservadora, que considere el peor escenario posible, para

así aplicar medidas de adaptación y mitigación suficientes.

### 3.2. *MeteoGalicia*

Los datos diarios de precipitación medidos por los pluviómetros de MeteoGalicia (Unidad de Observación y Predicción Meteorológica de Galicia) ([www.meteogalicia.gal](http://www.meteogalicia.gal)), se utilizaron para realizar comparaciones con los datos ofrecidos por los modelos de CORDEX y así evaluar la eficiencia de estos modelos en el área de estudio. Para ello, se seleccionaron aquellos pluviómetros de MeteoGalicia incluidos en la cuenca del Miño-Sil que tenían disponibles datos desde, al menos, 2008, con el fin de tener datos suficientes para realizar una buena comparación. En este sentido, se descargaron los datos de 54 pluviómetros para el período 2008-2020.

### 3.3. *Modelo Hidrológico HEC-HMS*

Se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS (Feldman, 2000; Scharffenberg, 2018; U.S. Army Corps of Engineers, 2018) para realizar el procesamiento hidrológico y transformar la precipitación en el caudal correspondiente (Cea y Fraga, 2018; González-Cao *et al.*, 2019; Fraga *et al.*, 2020; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020). El modelo fue parametrizado atendiendo a las calibraciones y validaciones previas realizadas en un estudio en donde se desarrolló un sistema de alerta temprana para el río Miño (Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020).

### 3.4. *Metodología*

De entre los 31 modelos de CORDEX con datos de precipitación disponibles para la zona de estudio, solamente se tuvieron en cuenta para el estudio aquellos que presentaron una alta fiabilidad a la hora de representar la precipitación en la cuenca del Miño-Sil.

Para realizar esta validación, se compararon los valores de precipitación obtenidos por estos modelos con los datos registrados por los 54 pluviómetros de MeteoGalicia disponibles para el período 2008-2020 en la zona de estudio. Esta validación se realizó mediante dos métodos estadísticos: el test de solapamiento o de Perkins (Perkins *et al.*, 2007) y el análisis de la desviación de los valores más extremos, donde se analiza el valor del percentil 99 de los pluviómetros y el correspondiente de cada modelo, y se compara la diferencia entre ambos con respecto al valor observado en el pluviómetro, obteniendo así el porcentaje de desviación:

$$Desv = 100 \times \frac{abs(P_{pl}^{99} - P_{co}^{99})}{P_{pl}^{99}}$$

Donde  $P_{pl}^{99}$  es el percentil 99 del pluviómetro,  $P_{co}^{99}$  el percentil 99 de CORDEX correspondiente al píxel en el que se localiza el pluviómetro y *abs* se refiere al valor absoluto.

Estos dos métodos para la validación son complementarios, permitiendo una mejor validación de los modelos (Des *et al.*, 2021). Por un lado, el test de solapamiento o de Perkins permite la evaluación de toda la serie mientras, por otro lado, el análisis de los valores extremos permite analizar como divergen aquellos valores más críticos, que son los más importantes para el desarrollo de este estudio.

Considerando cada modelo de CORDEX, se calculan tanto el test de Perkins como la desviación de los valores extremos para cada pluviómetro y su punto correspondiente en el modelo, con lo que se van a obtener 54 valores para cada modelo, a los cuales se le hace el promedio obteniendo así el dato representativo de cada modelo para la cuenca. Para que el modelo sea considerado válido, debe cumplir simultáneamente dos condiciones: que



el promedio del test de Perkins sea superior al 90%, y que el promedio de la desviación de los valores extremos sea inferior al 30%. Los modelos de CORDEX que cumplan estos requisitos serán los que se tendrán en cuenta para analizar la evolución de las precipitaciones y caudales en el futuro. Este análisis se llevará a cabo analizando, primeramente, los cambios esperados en la precipitación media en el futuro respecto al período histórico, tanto a nivel anual como estacional, y también analizando los cambios en las precipitaciones extremas. También se evaluarán los cambios esperados en las situaciones extremas de precipitación analizando los cambios en los valores asociados a diferentes probabilidades de ocurrencia, lo que se conoce como periodos de retorno. Esto permitirá estimar cómo se espera que cambien estos eventos extremos en el futuro, que son los más relevantes a nivel de impacto sobre las actividades socio-económicas, infraestructuras y población. Tras obtener los datos individuales para cada modelo, se realizará el promedio de los resultados de todos los modelos para poder analizar los resultados desde un enfoque multi-modelo. Este procesado se realiza puesto que estudios previos evidencian que un enfoque multi-modelo limita los errores de cada modelo por separado y favorece la consistencia de los datos (Jacob *et al.*, 2014).

Una vez analizada la precipitación, los datos de precipitación de cada modelo válido de CORDEX se introducirán en el modelo hidrológico y se obtendrán los caudales diarios representativos de las principales ciudades de la cuenca Miño-Sil, así como en su desembocadura, tanto para el período histórico (1990-2019) como para el período futuro más lejano (2070-2099). Poniendo el foco en la evolución de los caudales extremos, este procesado permitirá estudiar y analizar la

evolución futura de estos caudales críticos en diferentes localidades de la cuenca mediante un procedimiento similar al comentado anteriormente: primero observando y analizando el cambio individual arrojado por cada modelo en referencia a diferentes períodos de retorno, y posteriormente analizando los cambios según un enfoque multi-modelo. Mediante este enfoque se podrá evaluar si las situaciones de caudal extremo, aquellas que conllevan un importante riesgo de inundación asociado, se van a intensificar en el futuro.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Análisis de los modelos climáticos

En primer lugar, se ha analizado que modelos disponibles de CORDEX, para la región de estudio, son capaces de representar adecuadamente los patrones característicos de precipitación en la cuenca del Miño-Sil. Para ello, se han comparado los datos de cada modelo disponible (Tabla 1, donde un número fue asignado a cada modelo) con los registros de precipitación de los pluviómetros gestionados por MeteoGalicia, para el período 2008-2020. Esta comparación se realizó para los meses lluviosos (de noviembre a marzo), puesto que es el período cuando existe una mayor probabilidad de precipitaciones intensas e inundaciones en la zona de estudio (González-Cao *et al.*, 2019; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2022). Como se ha comentado, los criterios de validación para los modelos implican un valor en el test de Perkins superior al 90% y una desviación de los valores extremos menor al 30%. Los modelos 1, 4, 6, 13, 14, 26 y 29 son los que cumplen ambos criterios y, por lo tanto, serán los que se tendrán en cuenta en el desarrollo de este estudio.

#	Modelo Climático Global // Regional	Test de Perkins	Desviación Extremos
1	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CLMcom//CCLM4-8-17	Sí	Sí
2	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_RMIB-UGent//ALARO-0	-	-
3	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_SMH// RCA4	-	-
4	ICHEC-EC-EARTH_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
5	ICHEC-EC-EARTH_DMI//HIRHAM5	Sí	-
6	ICHEC-EC-EARTH_KNMI// RACMO22	Sí	Sí
7	ICHEC-EC-EARTH_SMHI//RCA4	-	Sí
8	IPSL-IPSL-CM5A-MR_DMI//HIRHAM5	-	-
9	IPSL-IPSL-CM5A-MR_GERICs//REMO2015	-	-
10	IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-INNERIS// WRF331F	-	-
11	IPSL-IPSL-CM5A-MR_KNMI//RACMO22E	-	-
12	IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMH// RCA4	-	-
13	MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom// CCLM4-8-17	Sí	Sí
14	MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
15	MOHC-HadGEM2-ES_CNRM//ALADIN63	-	-
16	MOHC-HadGEM2-ES_ICTP//RegCM4-6	-	Sí
17	MOHC-HadGEM2-ES_SMHI//RCA4	-	-
18	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom// CCLM4-8-17	-	-
19	MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	-
20	MPI-M-MPI-ESM-LR_CNRM//ALADIN63	-	-
21	MPI-M-MPI-ESM-LR_DMI//HIRHAM5	-	-
22	MPI-M-MPI-ESM-LR_ICTP//RegCM4-6	-	Sí
23	MPI-M-MPI-ESM-LR_KNMI//RACMO22E	-	-
24	MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC//REMO2009	-	-
25	MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI//RCA4	-	-
26	NCC-NorESM1-M_CLMcom//ETH-COSMO-crCLIM-v1-1	Sí	Sí
27	NCC-NorESM1-M_CNRM//ALADIN63	-	-
28	NCC-NorESM1-M_GERICs//REMO2015	-	-
29	NCC-NorESM1-M_IPSL//WRF381P	Sí	Sí
30	NCC-NorESM1-M_KNMI//RACMO22E	-	Sí
31	NCC-NorESM1-M_SMHI//RCA4	-	-

**Tabla 1.** Validación de los modelos climáticos de CORDEX con precipitación diaria y proyecciones del RCP8.5, disponibles para la cuenca del Miño-Sil. Los modelos con un valor del test de Perkins superior al 90% y una desviación en los valores extremos menor del 30%, serán considerados como válidos (marcados en verde).

#### 4.2. Análisis de la precipitación obtenida a través de los modelos climáticos y sus proyecciones futuras

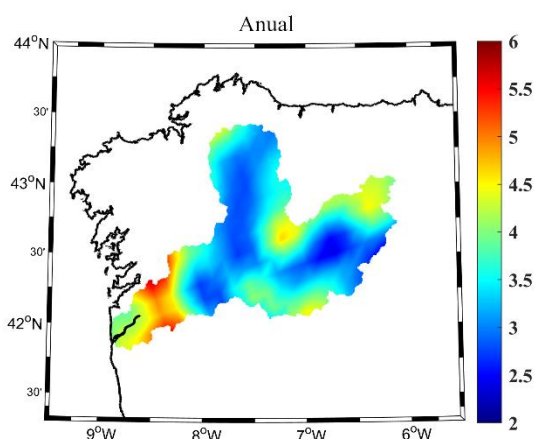
La precipitación característica de la cuenca del Miño-Sil, en el período histórico considerado, que ofrecen los modelos de CORDEX validados, tanto a nivel anual como estacional, será analizada y contrastada en este apartado. Además, se profundizará en la estimación y evaluación de los cambios futuros esperados como consecuencia del cambio climático.

En la Figura 2 se muestra la distribución anual de precipitación para el período histórico (1990-2019) a partir del promedio ofrecido por los 7 modelos

válidos seleccionados. Se puede apreciar que la zona final de la cuenca (suroeste) es la que presenta los mayores valores de precipitación, superando en algunas zonas los 6 mm diarios de media. Este valor se traduce en más de 2000 mm de precipitación acumulados a lo largo del año. Por otra parte, los menores valores de precipitación se detectan en las zonas interiores del río Sil y del río Miño superior, con valores inferiores a 3 mm diarios de media, que implican una precipitación acumulada de aproximadamente 1000 mm a lo largo del año. El valor anual promedio de la precipitación para el período histórico



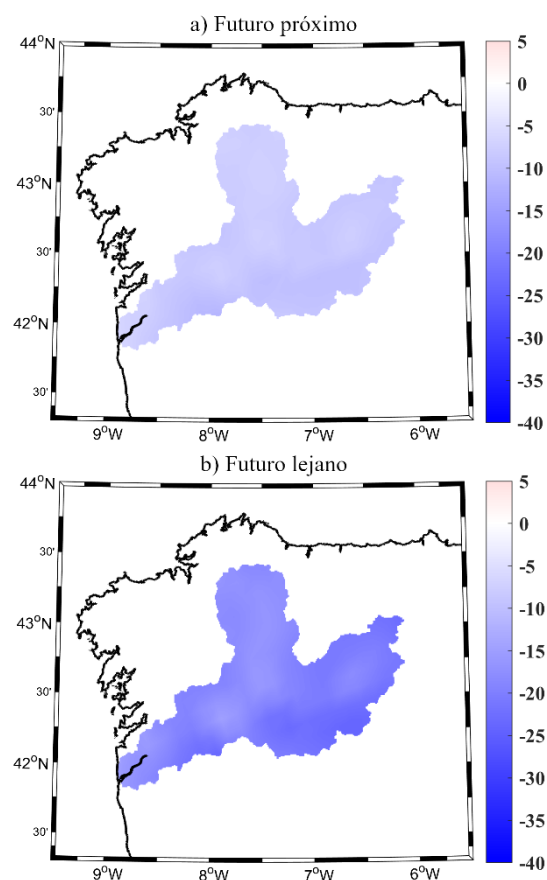
proporcionado por los modelos es de 3.74 mm diarios, que se corresponde con una precipitación acumulada de aproximadamente 1365 mm anuales para la cuenca. Una vez obtenidos los datos que arrojan los modelos válidos, estos se contrastaron con estudios previos que analizan la precipitación característica de la cuenca del Miño-Sil utilizando datos reales medidos (Cortizas y Alberti, 1999), resultando que los valores de precipitación y variabilidad indicados por los modelos se aproximan a la realidad de la cuenca. Por lo tanto, se puede concluir que los modelos utilizados ofrecen una buena representatividad de la realidad a escala anual, tanto de los valores de precipitación en términos absolutos como en su variabilidad espacial.



**Figura 2.** Valores medios de precipitación a escala anual (mm/día), promediando los resultados ofrecidos por los 7 modelos válidos para el período histórico considerado (1990-2019).

Una vez analizados los valores medios de la precipitación a escala anual, se evaluaron los cambios esperados de cara al futuro (Figura 3). Se identifica un ligero descenso en los valores medios de precipitación anual hacia el futuro cercano (Figura 3a), con un descenso promedio para la cuenca en torno al 8.50% respecto al período histórico. Hacia finales de siglo, cabe esperar un descenso más drástico de la precipitación (Figura 3b), lo que

confirma la tendencia hacia una probable disminución en la frecuencia de las precipitaciones. Según indican los valores obtenidos, en el futuro lejano puede llover alrededor de un 20% menos que en la actualidad a escala anual. Estudios previos centrados en la Península Ibérica reafirman las expectativas de disminución de la precipitación media a lo largo del siglo XXI (Morata, 2014), situación que ya fue observada en los años más recientes en muchas zonas de la Península Ibérica (Inundaciones y Cambio Climático, 2018). En concreto, estudios previos llevados a cabo en la cuenca del Miño-Sil, mediante diferentes modelizaciones, también detectaron una futura disminución de la precipitación media anual, con valores en rangos similares a los obtenidos en el desarrollo del presente estudio (Morata, 2014).

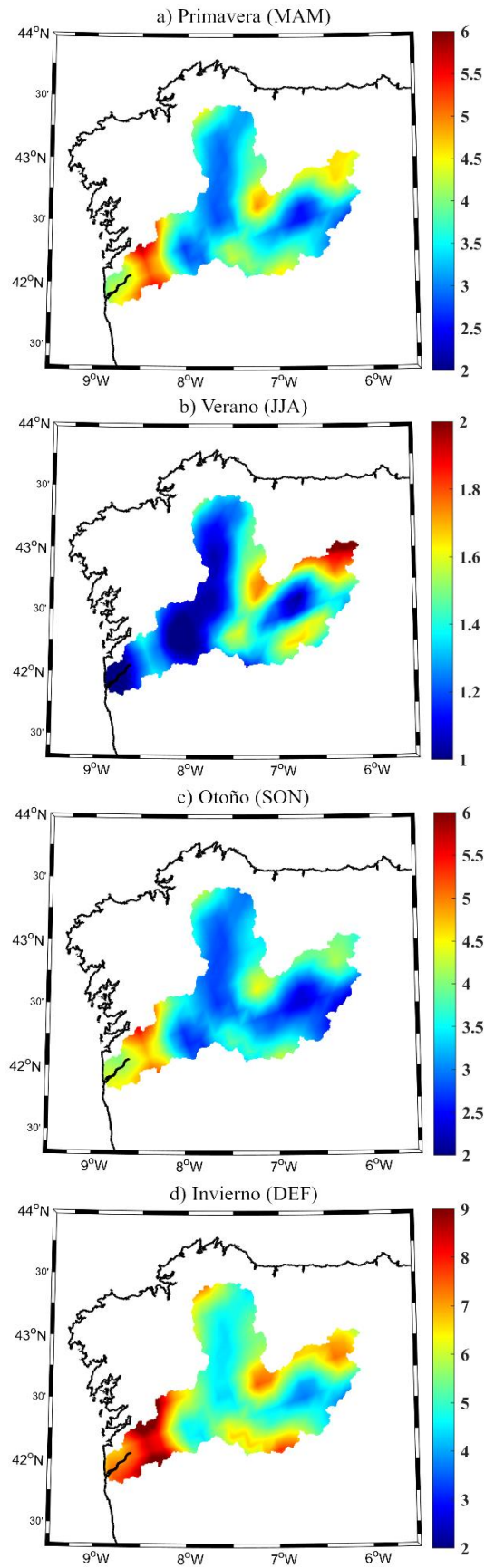


**Figura 3.** Cambios en las precipitaciones medias anuales (%) en (a) el futuro próximo (2030-2059) y (b) futuro lejano (2070-2099), promediando los 7 modelos válidos.

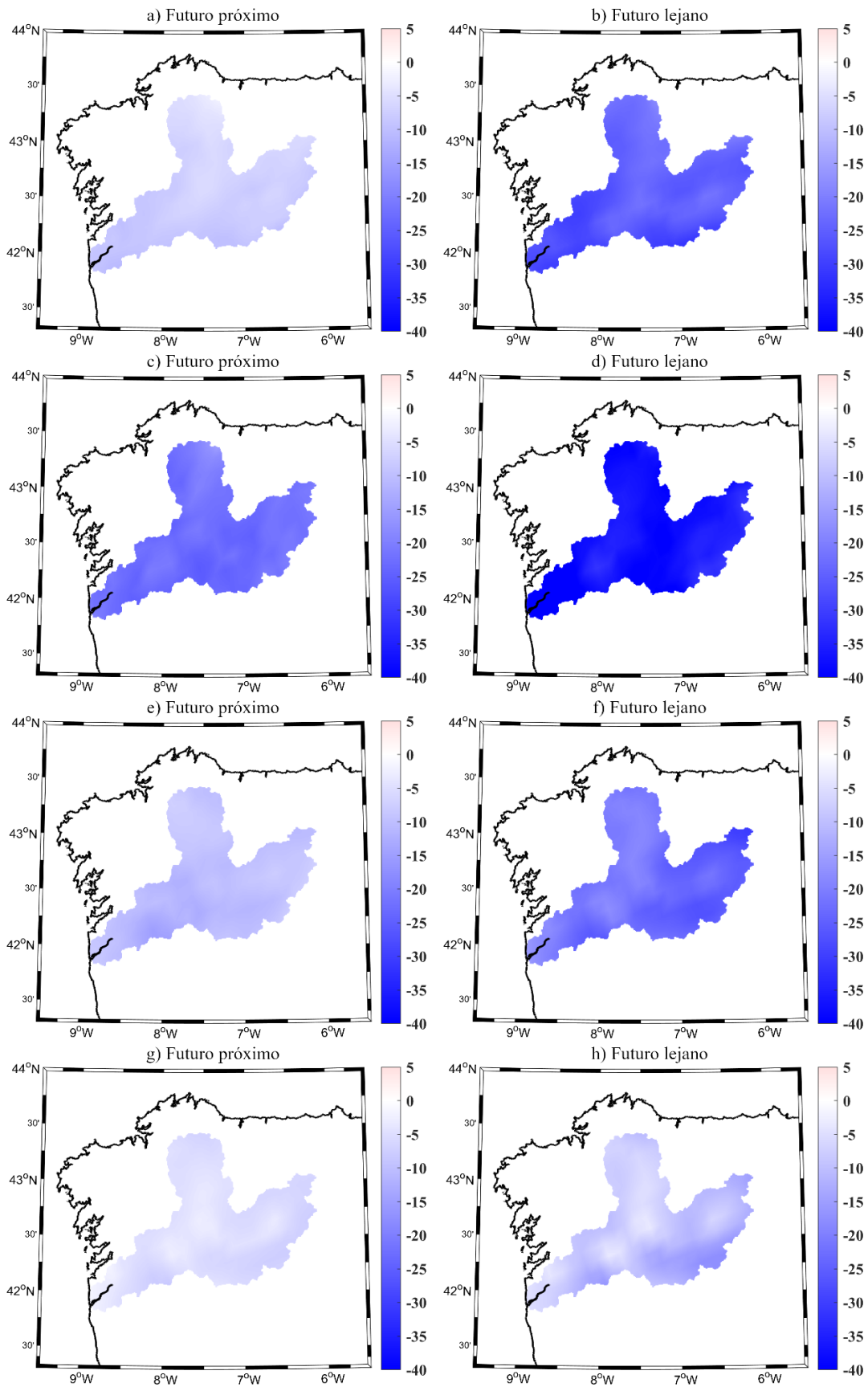
A pesar de que la tendencia indica una disminución de la lluvia en el futuro a escala anual, también es fundamental analizar en qué épocas se van a producir esos cambios en la precipitación, es decir, como se distribuirán esas variaciones a lo largo de las diferentes estaciones del año. A continuación, se caracterizará la precipitación a escala estacional, junto con los cambios esperados. Así, en la Figura 4 se muestra la distribución estacional de las precipitaciones en referencia al período histórico, lo que permite apreciar las variaciones en los patrones de precipitación a lo largo del año. En general, se observan patrones espaciales semejantes a la media anual, por lo que las variaciones se dan principalmente en los valores absolutos, a excepción de los meses de verano, donde la menor precipitación se da en la parte final de la cuenca. En particular, la estación más seca es el verano, registrándose una media en torno a los 1.30 mm diarios, lo que equivale aproximadamente a 120 mm de lluvia acumulados durante la estación. Por otro lado, la mayor precipitación a escala estacional tiene lugar durante el invierno, donde en promedio se tiene una precipitación de 6.21 mm diarios, que supera los 9 mm en algunas zonas cercanas a la desembocadura. Esto supone una precipitación acumulada a lo largo de la estación en el entorno de los 550 mm, que puede superar los 800 mm acumulados cerca de la desembocadura. Se dan valores intermedios en primavera y en otoño, con un valor promedio para la cuenca de 3,88 y 3,63 mm diarios, respectivamente. Nuevamente, estos valores concuerdan con los datos obtenidos en estudios previos (Cortizas y Alberti, 1999). En cuanto a los cambios que se esperan en el futuro, en la Figura 5 se puede

observar cómo en todas las estaciones se espera una disminución de la lluvia, que será más acusada en el futuro lejano. El verano presentará la reducción porcentual más drástica en la precipitación, donde la disminución será superior al 20% en media para la cuenca en el futuro próximo, pero que alcanzará un descenso promedio cercano al 40% en el futuro lejano. Por tanto, se espera que a finales de siglo llueva casi la mitad en verano de lo que llueva actualmente, atendiendo a los resultados arrojados por los modelos analizados. Esto puede tener consecuencias críticas ya que, como se ha mostrado anteriormente, el verano es la época en la que menos llueve con diferencia y, a mayores, se va a experimentar la mayor disminución relativa en precipitación, lo que puede provocar importantes problemas de disponibilidad de agua en la cuenca en el futuro. De hecho, esta mayor pérdida de precipitación en la época estival detectada en este estudio es coherente con los resultados obtenidos en estudios previos (Morata, 2014), lo que corrobora esa situación crítica de escasez de agua hacia la que se tiende en el futuro en los meses más cálidos en la cuenca del Miño-Sil. En el lado opuesto se encuentra el invierno, que es la estación que menos va a sufrir ese decrecimiento de la precipitación, con escasas disminuciones en el futuro próximo (~ 5%), y con valores en torno al 10% de disminución a finales de siglo en promedio para la cuenca. La primavera y el otoño presentan disminuciones intermedias, con valores promedio de 7.73% y 9.82%, respectivamente en el futuro próximo, que se incrementarán hasta alcanzar bajadas de 25.90% y 22.04%, respectivamente, para el futuro lejano.





**Figura 4.** Valores medios de la precipitación para cada estación (mm/día) promediando los 7 modelos válidos para el período histórico (1990-2019). Entre paréntesis se indican los meses considerados para cada estación.



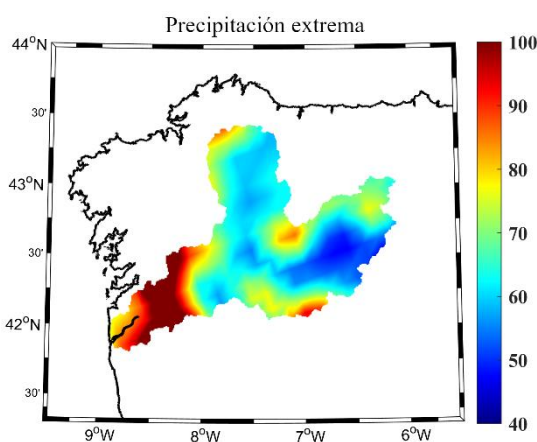
**Figura 5.** Cambios en las precipitaciones medias estacionales (%) en el futuro próximo (2030-2059) y lejano (2070-2099) promediando los 7 modelos válidos. a) y b) primavera, c) y d) verano, e) y f) otoño, g) y h) invierno.



### 4.3. Valores extremos de precipitación y sus proyecciones futuras

Los resultados obtenidos indicaron que, de forma general, la precipitación en la cuenca del Miño-Sil va a disminuir en el futuro, tanto a escala anual como estacional. Sin embargo, también es relevante analizar de forma particular los valores más extremos, considerados aquellos que superen el percentil 99.9 de precipitación, ya que pueden llevar asociados eventos de inundación. Así, se caracterizarán los eventos extremos y se analizará su evolución futura.

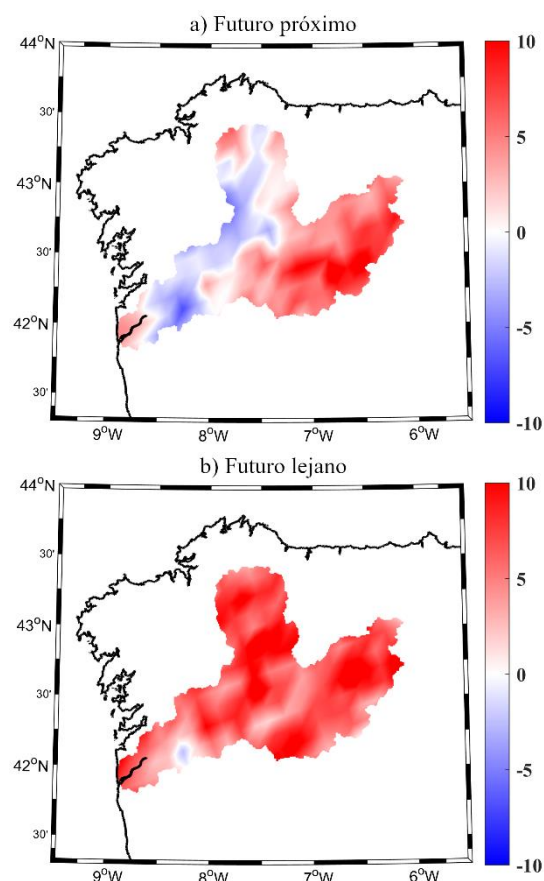
El patrón medio de precipitaciones extremas presenta una distribución espacial similar a la precipitación media anual, con los valores más altos en la zona próxima a la desembocadura y los valores más bajos en las zonas interiores de la cuenca (Figura 6). La media de valores extremos considerados en toda la cuenca es de 73.28 mm diarios, pudiendo llegar a superar los 100 mm diarios en las zonas próximas a la desembocadura.



**Figura 6.** Valores extremos de precipitación (percentil 99.9) en la cuenca del Miño-Sil (mm/día) promediando los 7 modelos válidos para el período histórico (1990-2019).

Una vez evaluado el patrón medio de precipitaciones extremas, se analizó su evolución futura (Figura 7). El futuro próximo presenta una evolución variable a escala espacial, ya que en unas zonas de la cuenca la precipitación extrema aumentaría (principalmente en

la cuenca del río Sil), disminuyendo en otras (principalmente en la cuenca del río Miño) (Figura 7a). A pesar de esa variabilidad espacial, en promedio la cuenca muestra una ligera tendencia a la intensificación de los valores extremos en el futuro próximo (2.62%). En el futuro más lejano la tendencia apunta más claramente hacia un aumento en la intensidad de los valores extremos de forma general para toda la cuenca, con un aumento medio del 6.44%, llegando a superar el 10% en una parte importante de la cuenca (Figura 7b). Estos resultados corroboran el pronóstico de que los eventos de precipitación serán más intensos con el paso de los años, lo que puede llevar asociadas inundaciones más importantes.



**Figura 7.** Cambios en los valores extremos de precipitación (percentil 99.9) (%) en (a) el futuro próximo (2030-2059) y (b) lejano (2070-2099), promediando los 7 modelos válidos.

Una vez confirmado que, a pesar de la disminución general de las precipitaciones medias, los eventos más extremos tienden a intensificarse, se analizará este punto en más profundidad haciendo una evaluación en términos de períodos de retorno, es decir, aquellos eventos que tienden a darse una vez cada ciertos años. Se van a considerar diferentes períodos de retorno (10, 25, 50 y 100 años), calculándose tanto a nivel diario, como aplicando una media móvil a 3 días, es decir, la lluvia acumulada en 3 días, ya que los frentes que llegan a la cuenca suelen tener varios días de duración (Cabalar, 2000). Considerando el análisis a nivel diario, de los 7 modelos climáticos validados, 4 de ellos muestran un aumento de precipitaciones extremas en términos de períodos de retorno para el futuro próximo, mientras que 5 confirman esta tendencia para el futuro lejano (Tabla 2). Por lo tanto, el mayor aumento, y más robusto, se da para el futuro lejano. Considerando la media de precipitación de 3 días (Tabla 3), en el futuro lejano la mayoría de modelos también indican un aumento de las precipitaciones extremas asociadas a períodos de retorno, mientras que para el futuro próximo existe mayor incertidumbre. Las Tablas 4 y 5 muestran los valores de precipitación extrema para los diferentes periodos de retorno promediando los resultados ofrecidos por todos los modelos climáticos considerados. En promedio, los modelos indican un aumento muy ligero en el futuro próximo, pero que se intensificará a finales de siglo. Concretamente, se observa un ligero aumento de los valores de precipitación de cara al futuro próximo de apenas 0.5 mm en promedio, que se vuelve considerablemente mayor si nos enfocamos en el futuro lejano, desde un incremento de aproximadamente 10 mm para el menor período de retorno considerado, llegando hasta 20 mm para

el período de retorno de 100 años, considerando los datos diarios (Tabla 4). Estos valores, en términos relativos, implican un aumento aproximado del 12% para la precipitación correspondiente al período de retorno de 10 años, que se incrementa hasta alcanzar un 17% para el período de retorno de 100 años. Al analizar los resultados considerando la media móvil a 3 días (Tabla 5), el promedio de los modelos también indica un ligero aumento de los diferentes períodos de retorno considerados en el futuro próximo, aún a pesar de la incertidumbre asociada a que prácticamente tantos modelos indicaban disminución como aumento en este período. A finales de siglo la tendencia nuevamente es más clara, con un aumento aproximado en el entorno del 7% para el período de retorno de 10 años, que aumenta hasta un 10% para el valor del período de retorno de 100 años. En ambos casos se observa que, cuanto más alto es el período de retorno considerado, las precipitaciones extremas tendrán un mayor porcentaje de intensificación, de forma que los eventos más extremos son los que experimentarán un aumento todavía mayor. Estudios previos que analizaron algunos modelos de EURO-CORDEX a través de un downscaling dinámico, disponible en AEMET, también concluyeron que, a pesar de que se espera una disminución de las precipitaciones medias en la cuenca del Miño-Sil, los eventos extremos de precipitación tenderán a intensificarse (Inundaciones y Cambio Climático, 2018), lo que refuerza los resultados obtenidos en la elaboración de este trabajo. Lorenzo y Alvarez, 2020, mediante un análisis general de proyecciones futuras de precipitación para toda la Península Ibérica, también obtuvieron una tendencia hacia el incremento de los eventos extremos de precipitación en la cuenca del Miño-Sil.

Futuro próximo														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
$P^R$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$
$P^{R10}$	76	84	83	80	79	79	76	72	74	76	78	83	70	65
$P^{R25}$	87	98	96	94	92	92	90	85	88	90	91	96	83	74
$P^{R50}$	95	108	107	105	101	103	101	95	97	101	101	106	92	81
$P^{R100}$	103	118	117	115	110	112	112	105	107	111	111	115	101	87
Futuro lejano														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
$P^R$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$
$P^{R10}$	76	83	83	79	79	84	76	107	74	93	78	87	70	69
$P^{R25}$	87	96	96	93	92	98	90	134	88	115	91	103	83	81
$P^{R50}$	95	105	107	103	101	108	101	154	97	131	101	114	92	90
$P^{R100}$	103	115	117	113	110	118	112	174	107	146	111	125	101	99

**Tabla 2.** Valores de precipitación extrema en la cuenca Miño-Sil para cada modelo válido (Mod) según diferentes periodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo ( $F_p$ ) y el futuro lejano ( $F_l$ ), considerando datos diarios. En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro respecto al período histórico.

Futuro próximo														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
$P^R$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$	H	$F_p$
$P^{R10}$	44	55	51	47	49	48	49	47	52	52	45	51	45	40
$P^{R25}$	50	66	60	56	56	56	57	56	62	61	52	61	54	45
$P^{R50}$	54	74	67	63	62	62	64	62	69	69	57	68	60	49
$P^{R100}$	58	83	73	69	67	68	70	68	77	76	63	75	67	54
Futuro lejano														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
$P^R$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$	H	$F_l$
$P^{R10}$	44	50	51	48	49	49	49	62	52	63	45	48	45	40
$P^{R25}$	50	58	60	56	56	57	57	75	62	77	52	56	54	48
$P^{R50}$	54	64	67	63	62	62	64	85	69	88	57	62	60	53
$P^{R100}$	58	70	73	69	67	68	70	95	77	98	63	68	67	58

**Tabla 3.** Valores de precipitación extrema en la cuenca Miño-Sil para cada modelo válido (Mod) según diferentes periodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo ( $F_p$ ) y el futuro lejano ( $F_l$ ), considerando 3 días de lluvia acumulada. En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro respecto al período histórico.



$P^R$	H	$F_p$	$F_l$
$P^{R10}$	$76.58 \pm 3.97$	$76.96 \pm 6.67$	$86.11 \pm 11.69$
$P^{R25}$	$89.54 \pm 4.34$	$89.97 \pm 8.15$	$102.70 \pm 16.96$
$P^{R50}$	$99.16 \pm 4.79$	$99.63 \pm 9.37$	$115.02 \pm 20.91$
$P^{R100}$	$108.70 \pm 5.34$	$109.21 \pm 10.61$	$127.23 \pm 25.01$

**Tabla 4.** Promedio y desviación estándar de la precipitación, promediando los resultados de todos los modelos válidos en la cuenca Miño-Sil, según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo ( $F_p$ ) y el futuro lejano ( $F_l$ ), considerando datos diarios.

$P^R$	H	$F_p$	$F_l$
$P^{R10}$	$47.96 \pm 3.36$	$48.69 \pm 4.89$	$51.34 \pm 8.02$
$P^{R25}$	$55.94 \pm 4.42$	$57.37 \pm 6.56$	$60.93 \pm 10.82$
$P^{R50}$	$61.86 \pm 5.29$	$63.81 \pm 7.83$	$68.06 \pm 12.91$
$P^{R100}$	$67.73 \pm 6.19$	$70.20 \pm 9.07$	$75.12 \pm 15.03$

**Tabla 5.** Promedio y desviación estándar de la precipitación, promediando los resultados de todos los modelos válidos en la cuenca Miño-Sil, según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (H), el futuro próximo ( $F_p$ ) y el futuro lejano ( $F_l$ ), considerando 3 días de lluvia acumulada.

#### 4.4. Proyecciones futuras de caudales extremos

Los resultados obtenidos en los análisis previos indicaron una disminución, en promedio, de la precipitación en el futuro. Sin embargo, también se detectó que las precipitaciones extremas, cuando se produzcan, van a ocurrir con mayor intensidad en el futuro, lo que implicará eventos de precipitación cada vez más extremos. Esta intensificación de los eventos extremos de precipitación puede tener unas consecuencias importantes sobre las poblaciones, ya que pueden dar lugar al desbordamiento de los ríos, lo que puede provocar inundaciones cada vez más devastadoras. En este sentido, para analizar la correspondiente evolución de los caudales, los datos diarios de precipitación proporcionados por los 7 modelos climáticos validados se introdujeron en el modelo hidrológico, para obtener y analizar cómo se verán afectados los eventos extremos de caudal en las principales ciudades de la

cuenca del Miño-Sil, contrastando los valores esperados de cara al futuro con los obtenidos para el período histórico. Dado que los modelos muestran un inequívoco y robusto incremento de las precipitaciones extremas en el futuro lejano, el análisis de los caudales se centrará en los cambios esperados a final de siglo (2070-2099) (Tabla 6).

En el área correspondiente a Lugo, los resultados no son muy claros, ya que 4 modelos indican un aumento moderado de los caudales extremos, mientras que los otros 3 indican una disminución. Al focalizarnos en otras áreas de estudio, los cambios son más consistentes. Para las áreas correspondientes a Ponferrada y O Barco, se detecta una tendencia hacia la intensificación de los caudales extremos en 6 de los 7 modelos, aunque también indican que ésta será moderada. En cuanto a las áreas correspondientes a Ourense y a la desembocadura de la cuenca, todos los modelos indican de forma unánime que los caudales extremos van a experimentar una intensificación de mayor magnitud.

Lugo														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
<b>p<sup>R</sup></b>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>
<b>p<sup>R10</sup></b>	702	819	808	725	575	592	701	933	1001	876	851	804	321	475
<b>p<sup>R25</sup></b>	863	1014	1039	915	731	738	888	1205	1332	1130	1082	1021	388	595
<b>p<sup>R50</sup></b>	902	1158	1211	1056	846	846	1028	1407	1578	1318	1253	1182	438	685
<b>p<sup>R100</sup></b>	1101	1301	1381	1196	960	954	1166	1608	1821	1505	1423	1342	488	773
Ponferrada														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
<b>p<sup>R</sup></b>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>
<b>p<sup>R10</sup></b>	737	788	570	636	666	701	566	872	636	889	623	544	596	762
<b>p<sup>R25</sup></b>	963	991	719	806	827	865	714	1139	811	1180	770	683	754	1006
<b>p<sup>R50</sup></b>	1095	1142	829	933	946	986	825	1338	941	1395	880	786	871	1187
<b>p<sup>R100</sup></b>	1247	1292	938	1058	1064	1107	934	1534	1069	1609	988	888	987	1367
O Barco														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
<b>p<sup>R</sup></b>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>
<b>p<sup>R10</sup></b>	1329	1434	856	1096	919	959	926	1288	1139	1390	924	884	839	943
<b>p<sup>R25</sup></b>	1668	1792	1046	1381	1127	1167	1153	1647	1457	1800	1105	1077	1038	1194
<b>p<sup>R50</sup></b>	1919	2058	1188	1592	1282	1321	1322	1913	1693	2105	1238	1220	1186	1381
<b>p<sup>R100</sup></b>	2169	2321	1328	1802	1436	1474	1489	2176	1928	2407	1371	1362	1332	1565
Ourense														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
<b>p<sup>R</sup></b>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>
<b>p<sup>R10</sup></b>	3379	4280	2666	3232	2704	2985	2838	4249	3330	4213	2659	2894	2229	2630
<b>p<sup>R25</sup></b>	4179	5333	3254	4009	3280	3586	3511	5440	4201	5416	3191	3539	2710	3325
<b>p<sup>R50</sup></b>	4773	6115	3691	4587	3709	4033	4012	6326	4847	6310	3586	4019	3067	3842
<b>p<sup>R100</sup></b>	5362	6891	4124	5159	4133	4476	4508	7203	5488	7195	3978	4494	3421	4353
Desembocadura														
Mod	#1		#4		#6		#13		#14		#26		#29	
<b>p<sup>R</sup></b>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>	<i>H</i>	<i>F<sub>l</sub></i>
<b>p<sup>R10</sup></b>	4224	5349	3333	4040	3379	3731	3547	5311	4162	5266	3324	3617	2787	3288
<b>p<sup>R25</sup></b>	5224	6666	4068	5011	4100	4483	4389	6800	5251	6700	3989	4424	3388	4157
<b>p<sup>R50</sup></b>	5966	7644	4614	5733	4636	5041	5015	7907	6059	7887	4483	5023	3834	4802
<b>p<sup>R100</sup></b>	6702	8613	5155	6448	5166	5595	5635	9003	6860	8994	4972	5617	4276	5442

**Tabla 6.** Valores de caudal extremo en las principales localizaciones de la cuenca según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico (*H*) y el futuro lejano (*F<sub>l</sub>*). En rojo (azul) se indica el incremento (disminución) en el futuro.

En la Tabla 7 se muestran los valores extremos de caudal para los diferentes períodos de retorno y los períodos histórico y futuro, promediando los resultados de los 7 modelos validados. En promedio, se espera un aumento de un 4~5% para la localidad de Lugo (Miño Alto), lo que supone una intensificación, aunque ligera, en comparación con otras localidades. En Ponferrada (río Sil), el aumento en la intensidad de los caudales extremos ronda entre un 18% y un 23% según el período de retorno considerado. De la misma forma, en O Barco (río Sil) este incremento será de entre un 15% y un 18%. Los cambios más notables se producirán en la localidad de Ourense (Miño medio) y en la desembocadura (Miño bajo), con aumentos desde un 24% para un período de retorno de 10 años, hasta un 28% para un período de retorno de 100 años. Estos resultados corroboran que los eventos extremos de caudal cada vez serán más críticos en las principales ciudades de la cuenca del Miño-Sil. Muchas de estas localizaciones, que están sujetas a inundaciones cuando el río Miño y sus afluentes sobrepasan ciertos umbrales de caudal (González-Cao *et al.*, 2019; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2020, 2022), sufrirán consecuencias cada vez más frecuentes y drásticas debido a esta intensificación de los caudales extremos, por lo que será necesaria la aplicación de medidas de mitigación y/o adaptación para contrarrestar el incremento futuro de esta problemática. Estudios previos de carácter más general, a nivel europeo, en donde se analizan los cambios esperados en los caudales extremos a través de la inclusión de las variables climáticas proyectadas en modelos hidrológicos, también obtuvieron una intensificación de los caudales extremos y riesgo de inundación para la cuenca del Miño-Sil a medida que avanza el siglo (Alfieri *et al.*, 2015a), resultados corroborados en

Inundaciones y Cambio Climático, 2018, lo que va en consonancia y muestra la robustez de los resultados obtenidos en el presente trabajo.

	<b>Lugo</b>	
<b>p<sup>R</sup></b>	<b>H</b>	<b>F<sub>l</sub></b>
<b>p<sup>R10</sup></b>	708.57 ± 217.59	746.35 ± 162.30
<b>p<sup>R25</sup></b>	903.36 ± 297.51	945.40 ± 215.32
<b>p<sup>R50</sup></b>	1048.09 ± 357.44	1093.28 ± 255.10
<b>p<sup>R100</sup></b>	1191.45 ± 417.02	1239.76 ± 294.68
	<b>Ponferrada</b>	
<b>p<sup>R</sup></b>	<b>H</b>	<b>F<sub>l</sub></b>
<b>p<sup>R10</sup></b>	627.61 ± 60.11	741.69 ± 124.72
<b>p<sup>R25</sup></b>	790.95 ± 79.13	952.75 ± 179.25
<b>p<sup>R50</sup></b>	912.31 ± 209.36	1109.56 ± 220.66
<b>p<sup>R100</sup></b>	1032.51 ± 108.61	1264.89 ± 262.06
	<b>O Barco</b>	
<b>p<sup>R</sup></b>	<b>H</b>	<b>F<sub>l</sub></b>
<b>p<sup>R10</sup></b>	990.37 ± 178.48	1142.13 ± 227.19
<b>p<sup>R25</sup></b>	1227.75 ± 240.07	1436.75 ± 303.33
<b>p<sup>R50</sup></b>	1404.11 ± 286.53	1655.65 ± 367.73
<b>p<sup>R100</sup></b>	1578.79 ± 332.91	1872.46 ± 427.92
	<b>Ourense</b>	
<b>p<sup>R</sup></b>	<b>H</b>	<b>F<sub>l</sub></b>
<b>p<sup>R10</sup></b>	2829.22 ± 405.01	3497.32 ± 723.24
<b>p<sup>R25</sup></b>	3475.17 ± 544.02	4378.41 ± 974.14
<b>p<sup>R50</sup></b>	3955.09 ± 648.76	5033.01 ± 1163.28
<b>p<sup>R100</sup></b>	4430.45 ± 752.64	5681.41 ± 1352.06
	<b>Desembocadura</b>	
<b>p<sup>R</sup></b>	<b>H</b>	<b>F<sub>l</sub></b>
<b>p<sup>R10</sup></b>	3536.53 ± 506.26	4371.66 ± 904.05
<b>p<sup>R25</sup></b>	4343.96 ± 680.01	5473.01 ± 1217.57
<b>p<sup>R50</sup></b>	4943.86 ± 810.66	6291.26 ± 1454.13
<b>p<sup>R100</sup></b>	5538.06 ± 940.78	7101.77 ± 1689.89

**Tabla 7.** Promedio y desviación estándar del caudal extremo, considerando los resultados de todos los modelos válidos en las principales localizaciones de la cuenca, según diferentes períodos de retorno obtenidos para el período histórico y el futuro lejano.



## 5. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo consistió en analizar la evolución futura de las precipitaciones extremas en la cuenca del Miño-Sil, así como los cambios esperados en los caudales extremos asociados en las principales localidades de la cuenca, que incluyen las ciudades de Lugo, Ponferrada, O Barco y Ourense, así como el río Miño en su desembocadura. Para ello, se emplearon datos de precipitación obtenidos de 7 RCMs de la rama europea del proyecto CORDEX seleccionados tras una validación, considerando un período histórico (1990-2019) y dos períodos futuros: uno próximo (2030-2059) y otro lejano (2070-2099), bajo el escenario de emisiones RCP8.5. En primer lugar, se analizaron las proyecciones futuras de la precipitación, con especial atención a la evolución de sus valores extremos. Una vez realizado dicho análisis, con los datos de precipitación se alimentó un modelo hidrológico que permitió obtener el caudal fluvial correspondiente y analizar así la evolución futura de los caudales en la cuenca, con especial atención a aquellos caudales más extremos. Las principales conclusiones obtenidas fueron las siguientes:

- De forma general, se espera una disminución de la precipitación media anual en la cuenca del Miño-Sil. En particular, las proyecciones futuras indican una disminución media de un 8.50% para el futuro próximo, disminución que se espera que sea más acusada, en torno a un 20% en promedio para la cuenca, en el futuro lejano. La situación podría ser especialmente crítica en los meses de verano, puesto que se espera una disminución promedio cercana al 40% en el futuro lejano, lo cual puede conllevar problemas importantes de disponibilidad de agua.
- En cuanto a los eventos extremos de precipitación, cabe esperar una intensificación en el futuro. Se espera que los eventos de precipitación extremos (por encima del percentil 99.9), aumenten su intensidad en más de un 6% a finales de siglo en promedio para la cuenca. Analizando los valores extremos de precipitación en términos de períodos de retorno, se espera una intensificación en torno a un 12% a finales de siglo considerando un período de retorno de 10 años, que se incrementa hasta un 17% para el período de retorno de 100 años.
- El incremento de la precipitación extrema va a propiciar que los eventos extremos de caudal también se vean intensificados en el futuro. En zonas del alto Miño, como Lugo, existe una mayor incertidumbre en los resultados, aunque la tendencia en promedio es hacia una ligera intensificación de los caudales extremos. En el río Sil, el principal afluente del Miño, concretamente en áreas como Ponferrada y O Barco, los caudales extremos aumentarán de forma consistente, aunque de manera moderada. Ya aguas abajo de la desembocadura del río Sil en el río Miño, el incremento de los caudales extremos se verá todavía más intensificado. A la altura de la ciudad de Ourense y en la desembocadura del río Miño, se esperan intensificaciones de entre un 25% y un 30% al considerar un período de retorno del caudal de entre 10 y 100 años, con una mayor intensificación cuanto mayor es el período de retorno considerado, lo que indica que los caudales más extremos sufrirán una mayor intensificación. Esto dará lugar a más situaciones de desbordamiento de los ríos y mayor amplitud de las zonas inundadas, lo que tendrá consecuencias notables sobre las poblaciones afectadas.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a los responsables del proyecto CORDEX y a MeteoGalicia, por el suministro de los datos de precipitación. Los autores también agradecen a los desarrolladores del modelo hidrológico HEC-HMS por su desarrollo y la libre disponibilidad del modelo.

## Bibliografía

- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. y Forzieri, G. (2015a). Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(5), 2247-2260.
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F. y Bianchi, A. (2015b). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35, 199-212.
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., Wyser, K. y Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5, 171-182.
- Arnell, N. W. y Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climate Change*, 134(3), 387-401.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... y Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111.
- Cabalar Fuentes, M. (2005). Los temporales de lluvia y viento en Galicia. Propuesta de clasificación y análisis de tendencias (1961-2001). *Investigaciones geográficas*, 36, 103-118.
- Cea, L. y Fraga, I. (2018). Incorporating antecedent moisture conditions and intraevent variability of rainfall on flood frequency analysis in poorly gauged basins. *Water Resources Research*, 54, 8774-8791.
- Cortizas, A. M. y Alberti, A. P. (1999). Atlas climático de Galicia. Xunta de Galicia, 187.
- Des, M., Fernández-Nóvoa, D., deCastro, M., Gómez-Gesteira, J. L., Sousa, M. C. y Gómez-Gesteira, M. (2021). Modeling salinity drop in estuarine areas under extreme precipitation events within a context of climate change: Effect on bivalve mortality in Galician Rías Baixas. *Science of the Total Environment*, 790, 148147.
- Fekete, A., Tzavella, K. y Baumhauer, R. (2017). Spatial exposure aspects contributing to vulnerability and resilience assessments of urban critical infrastructure in a flood and blackout context. *Natural Hazards*, 86(1), 151-176.
- Feldman, A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual. USA Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA; Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA.
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., deCastro, M. y Gómez-Gesteira, M. (2022). Multiscale flood risk assessment under climate change: the case of the Miño river in the city of Ourense, Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22, 3957-3972.
- Fernández Nóvoa, D., Des Villanueva, M. y Gómez Gesteira, M. (2021). O Cambio Climático. Esenciais. Breviarios de Divulgación do Saber. Universidade de Vigo. ISBN: 9788481588910.
- Fernández-Nóvoa, D., García-Feal, O., González-Cao, J., de Gonzalo, C., Rodríguez-Suárez, J. A., del Portal, C. R. y Gómez-Gesteira, M. (2020). MIDAS: A New Integrated Flood

- Early Warning System for the Miño River. *Water*, 12 (9), 3420.
- Fernández-Nóvoa, D., deCastro, M., Des, M., Costoya, X., Mendes, R. y Gómez-Gesteira, M. (2017). Characterization of Iberian turbid plumes by means of synoptic patterns obtained through MODIS imagery. *Journal of Sea Research*, 126, 12-25.
- Fraga, I., Cea, L. y Puertas, J. (2020). MERLIN: a flood hazard forecasting system for coastal river reaches. *Natural Hazards*, 100 (3), 1171–1193.
- Giorgi, F., Jones, C. y Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at regional level: The CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58, 175-183.
- González-Cao, J., García-Feal, O., Fernández-Nóvoa, D., Domínguez-Alonso, J.M. y Gómez-Gesteira, M. (2019). Towards an automatic early warning system of flood hazards based on precipitation forecast: the case of the Miño River (NW Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 2583-2595.
- Inundaciones y Cambio Climático (2018). Ministerio para la Transición Ecológica. Madrid, 105.
- IPCC (2013). Cambio climático 2013: Bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley P. M. (eds.)]. Cambridge University Press.
- IPCC (2021). Climate change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K. y Caud., N. (eds.)]. Cambridge University Press.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... y Georgopoulou, E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14, 563-578.
- Jongman, B. (2018). Effective adaptation to rising flood risk. *Nature communications*, 9(1), 1-3.
- Lavers, D. A., Allan, R. P., Wood, E. F., Villarini, G., Brayshaw, D. J. y Wade, A. J. (2011). Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 38(23).
- Lorenzo, M. N. y Alvarez, I. (2020). Climate change patterns in precipitation over Spain using CORDEX projections for 2021-2050. *Science of The Total Environment*, 723, 138014.
- Morata, A. (2014). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR4. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 197.
- Noji, E. K. (2000). The public health consequences of disasters, Prehospital and disaster medicine: the official journal of the National Association of EMS Physicians and the World Association for Emergency and Disaster Medicine in association with the Acute Care Foundation, 15 (4), 147-157.
- Paprotny, D., Sebastian, A., Morales-Nápoles, O. y Jonkman, S. N. (2018). Trends in flood losses in Europe over the past 150 years. *Nature communications*, 9(1), 1-12.
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J. y McAneney, J. (2007).



- Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. *Journal of Climate*, 20, 4356-4376.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M. y Karlovits, G. (2018). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). User's Manual: Version 4.3. USA Army Corps of Engineers: Washington, DC, USA.
- Schwalm, C. R., Glendon, S. y Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO<sub>2</sub> emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656-19657.
- Trigo, I. F. (2006). Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: a comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses. *Climate Dynamics*, 26, 127–143.
- Trigo, R. M., Pozo-Vázquez, D., Osborn, T. J., Castro-Díez, Y., Gámiz-Fortis, S. y Esteban-Parra, M. J. (2004). North Atlantic Oscillation influence on precipitation, river flow and water resources in the Iberian Peninsula. *International Journal of Climatology*, 24, 925–944.
- Trigo, R. M., Varino, F., Ramos, A. M., Valente, M. A., Zêzere, J. L., Vaquero, J. M., Gouveia, C. M. y Russo, A. (2014). The record precipitation and flood event in Iberia in december 1876: Description and synoptic analysis. *Frontiers in Earth Science*, 2, 3.
- Uriarte, A. (2013). *Historia del clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Victoria-Gasteiz, Spain, 306.
- U.S. Army Corps of Engineers (2018). *Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) User's Manual: Version 4.3*. Institute for Water Resources Davis: Hydrologic Engineering Center. 2018.
- Zalasiewicz, J. y Williams, M. (2021). Climate change through Earth's history. *Climate Change*, 3–17.

# Modelado físico y numérico de la interacción entre olas y objetos flotantes

J. LEDO-RODRÍGUEZ\*<sup>1</sup>, I. MARTINEZ-ESTÉVEZ<sup>1</sup>, C. ALTOMARE<sup>2</sup>,  
J. M. DOMÍNGUEZ<sup>1</sup>, A. J. C. CRESPO<sup>1</sup>, M. GÓMEZ-GESTEIRA<sup>1</sup>

\*jledo@alumnos.uvigo.es

<sup>1</sup>*EPhysLab (Environmental Physics Laboratory), Universidade de Vigo, Ourense*

<sup>2</sup>*Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona*

## RESUMEN

Este artículo se ha centrado en estudiar la interacción entre olas y objetos flotantes utilizando el modelado físico y el modelado numérico. En el caso del modelado físico se realizaron experimentos en el canal de oleaje nanoCIEM, que permite generar olas monocromáticas con un pistón. Como objeto flotante, se utilizó una esfera de dimensiones y masa conocidas que fue construida con una impresora 3D. Las simulaciones numéricas fueron realizadas con el código DualSPHysics, que es un modelo Lagrangiano de dinámica computacional de fluidos basado en el método de partículas *Smoothed Particles Hydrodynamics* (SPH). Se han realizado varios experimentos para tres condiciones de oleaje distintas. En primer lugar, se ha validado la generación, propagación y absorción de oleaje en el tanque numérico. Después, se ha colocado un objeto flotante libre en el tanque de olas y se han analizado sus desplazamientos longitudinales y verticales respecto a su posición inicial. Por último, se ha añadido al objeto flotante una línea de amarre conectada al fondo del tanque y se ha estudiado cómo se restringen sus desplazamientos respecto al caso anterior. La validación realizada ha demostrado que DualSPHysics es capaz de reproducir la interacción entre olas y objetos flotantes libres o amarrados.

*Palabras Clave:* modelado físico, nanoCIEM, modelado numérico, DualSPHysics, CFD, SPH, olas, boya.

---

## 1. Introducción

La interacción entre el oleaje y un objeto flotante es un problema complejo no lineal que se puede resolver utilizando la Dinámica de Fluidos Computacional, CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Los métodos CFD tienen en cuenta las fuerzas viscosas y las características no lineales de la interacción entre las olas del mar y un objeto. Los códigos CFD se basan en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones se pueden resolver utilizando una aproximación

Euleriana (generalmente asociado al uso de una malla) o una aproximación Lagrangiana (usando métodos sin malla).

Algunos de los métodos numéricos para dinámica de fluidos más populares y utilizados están basados en mallas, como son los métodos de volúmenes finitos. Sin embargo, en algunos casos, estos métodos tienen dificultades para modelar geometrías complejas en movimiento o grandes deformaciones de la superficie libre. Un ejemplo de estos casos son las olas del mar impactando

con objetos flotantes donde el flujo de agua se separa y se reconstruye (las olas pueden romper, rebasar el objeto, etc.).

Este trabajo se centra en el análisis de la interacción entre olas y objetos flotantes utilizando tanto el modelado físico como el modelado numérico. Se han realizado varios experimentos en el canal de oleaje nanoCIEM del grupo EPhysLab de la Universidad de Vigo y simulaciones numéricas con el código DualSPHysics.

El modelado físico es una representación a escala, es decir, una maqueta del experimento real escalada respetando precisos criterios de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Los ensayos en canales físicos suelen acarrear un coste y consumo de tiempo elevados y necesitan unas instalaciones adecuadas para cada ensayo. Además, hay que considerar los efectos de escala cuando se ensayan problemas a una escala diferente a la de la realidad.

El modelado numérico aplicado a la dinámica de fluidos, CFD, es el resultado de utilizar métodos numéricos para resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un fluido. Durante las últimas décadas, el modelado numérico ha tenido una gran influencia en todos los campos de la ciencia. El gran desarrollo que han experimentado los equipos de cálculo en los últimos años permite realizar simulaciones complejas con gran precisión y en tiempos razonables. Además, el modelado numérico puede proporcionar información adicional que no es posible obtener con la observación experimental. Sin embargo, el modelado numérico no sustituye al modelado físico, ya que éste sigue siendo usado como solución de referencia para confirmar que los resultados numéricos obtenidos son válidos.

Una de las funciones más destacadas del modelado numérico tras su validación es reducir el número de pruebas experimentales ya que, algunos diseños, pueden descartarse directamente con los resultados numéricos. De este modo, se consigue reducir el número de ensayos físicos y ahorrar tiempo y dinero, por lo tanto, el modelado numérico complementa al modelado físico.

Tal y como se ha comentado anteriormente, los métodos numéricos para dinámica de fluidos más populares están basados en mallas, como son los métodos de volúmenes finitos. Sin embargo, en algunos casos, estos métodos tienen dificultades a la hora de modelar geometrías complejas en movimiento y grandes deformaciones de la superficie libre. Una de las mejores opciones para modelar la interacción entre olas y objetos flotantes es el método SPH (del inglés *Smoothed Particle Hydrodynamics*).

El método SPH es un modelo numérico Lagrangiano desarrollado durante la década de 1970 para resolver problemas de astrofísica y cosmología (Gingold y Monaghan, 1977; Lucy, 1977). En las últimas décadas, se ha utilizado con éxito para estudiar diferentes situaciones de la dinámica de fluidos, tales como la propagación del oleaje y la interacción entre olas y estructuras costeras u objetos flotantes (Gotoh y Khayyer, 2018; Luo et al., 2021).

El código DualSPHysics (Domínguez et al., 2022) es un software basado en el método SPH (Violeau, 2012) y desarrollado por el grupo EPhysLab de la Universidad de Vigo. DualSPHysics se ha desarrollado especialmente para simular problemas de la superficie libre de agua. Las investigaciones del grupo EPhysLab se centran, sobre todo, en la propagación del oleaje y la interacción entre olas y estructuras flotantes o fijas



tanto en 2D como en 3D (Crespo *et al.*, 2011; Altomare *et al.*, 2015; Domínguez *et al.*, 2019).

Para modelar el comportamiento de una boya flotante amarrada al fondo es necesario acoplar a DualSPHysics la librería MoorDyn, que resuelve la dinámica de un sistema de amarres.

El objetivo principal de este trabajo es demostrar la capacidad que tiene el software DualSPHysics para simular la propagación de olas regulares y su interacción con estructuras flotantes libres y amarradas al fondo en un entorno cercano a la costa.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Modelado físico

Los ensayos físicos se han llevado a cabo en el canal de oleaje de muy pequeña escala llamado nanoCIEM (Figura 1). Este canal fue construido por el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de

Cataluña (UPC). Esto incluye también el sistema de generación de oleaje, a nivel de hardware y de software.

El nanoCIEM tiene una longitud total de 200 cm, con una sección útil de 20 cm de ancho y 35 cm de alto. Las paredes del tanque son de metacrilato transparente y tienen un espesor de 1 cm. La mínima y la máxima profundidad de agua permitidas son 12 y 15 cm, respectivamente. Para su funcionamiento, el nanoCIEM necesita una alimentación de corriente continua a 12 V y una conexión a un ordenador portátil para controlar el sistema de generación.

El canal de oleaje tiene tres partes básicas: i) la zona de generación situada en un extremo del tanque y que contiene el sistema de generación de oleaje, ii) la zona de disipación situada en el extremo opuesto a la zona de generación y que está llena de virutas de plástico retenidas por una rejilla, iii) la zona de ensayos que se encuentra entre las dos anteriores y es donde tiene lugar la interacción entre las olas y los objetos flotantes.



Fig. 1. Canal de olas nanoCIEM.

El tanque tiene un sensor de ultrasonidos de pequeño formato que se puede mover a lo largo del canal. El sensor es el modelo XX918A3F1M12 de la empresa Schneider Electric, con un rango máximo de 50 cm y un tiempo de respuesta de 25 ms. Su finalidad es medir la variación de la superficie libre. Para ello, el sensor suministra al software de generación una señal de voltaje (0-10 V)

proporcional a la distancia entre él y la superficie libre de agua.

La generación de olas se lleva a cabo mediante una pala del tipo pistón, que está situada en uno de los extremos del tanque. El movimiento del pistón lo realiza un actuador lineal con una carrera máxima de 10 cm y una velocidad de respuesta de 1.6 m/s. Para controlar el

movimiento del pistón se utiliza un software instalado en un ordenador portátil que se conecta al tanque mediante USB. El software instalado en el portátil permite configurar la carrera del pistón o *stroke* ( $S_0$ ) (llamado amplitud en la interfaz del software) y el período de movimiento del pistón ( $T$ ) para la generación de oleaje regular.  $S_0$  puede tener un valor comprendido entre 0.3 y 10 cm en función del período seleccionado y  $T$  puede tener un valor comprendido entre 0.3 y 2 s en función del valor de  $S_0$  seleccionado.

Como se puede ver en la Figura 2, el software del nanoCIEM muestra en pantalla las gráficas de la variación temporal del movimiento del pistón (*Pala* en cm) y de la variación temporal de la superficie libre en la posición del sensor acústico (*Nivel* en cm). También muestra en la esquina superior derecha de la gráfica inferior el valor del nivel de profundidad en todo momento.

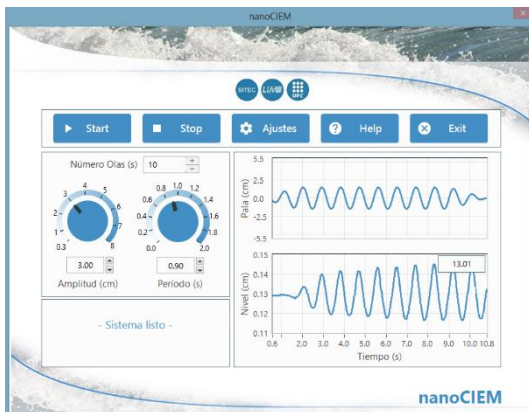


Fig. 2. Software para el manejo del nanoCIEM.

El objeto flotante (Figura 3) utilizado en los experimentos es una boya esférica. Tiene un radio de 3.0795 cm, una masa de 60.78 g y una densidad de 505 kg/m<sup>3</sup>, que es aproximadamente la mitad que la del agua, por lo tanto, con el agua en reposo, la boya se encontrará semisumergida.



Fig. 3. Boya flotante utilizada en los ensayos físicos.

La boya se ha diseñado con SolidWorks, que es un software CAD (del inglés *Computer Aided Design*). La densidad de la boya se ha calculado teniendo en cuenta el material utilizado (PETG o poliéster de glicol de densidad 1270 kg/m<sup>3</sup>), y el radio interno y externo de la boya, ya que es una esfera hueca. Sabiendo estos datos, se han calculado tanto la masa como el volumen de la boya y, por lo tanto, su densidad. Cabe destacar que la distancia entre el radio interno y el radio externo debe ser lo suficientemente grande para que la boya no sufra deformaciones y para que sea impermeable. Para el cálculo de la densidad no se ha tenido en cuenta una pequeña argolla que tiene la boya, ya que debido a su pequeño tamaño no tiene un efecto significativo en el valor final de la densidad. La finalidad de la argolla es la de poder amarrar la boya con una cuerda.

Una vez obtenido el diseño definitivo de la boya en SolidWorks, se ha guardado como un archivo STL y se ha cargado en el software Ultimaker Cura, donde se ajustaron varios parámetros de impresión y se pudo ver una vista previa de dicha pieza 3D capa a capa, la cantidad de material necesario para su impresión y el tiempo de impresión. Después, se ha generado un código G, que es el lenguaje de programación más usado en máquinas que trabajan por control numérico computarizado (CNC), que se ha guardado en una tarjeta micro SD. El siguiente paso ha sido introducir

la tarjeta micro SD en la impresora 3D Anet ET4 X y ajustar algunos parámetros como la temperatura de extrusión y la temperatura de la cama, que dependen del material utilizado (PETG).

Por último, los movimientos de la boya en el tanque experimental han sido analizados en el software Kinovea para obtener su desplazamiento longitudinal (*surge* en inglés) y vertical (*heave* en inglés), con el objetivo de poder comparar los datos experimentales con los resultados del modelo numérico utilizado en este trabajo.

## 2.2. Modelado numérico

Para el modelado numérico se utiliza el código DualSPHysics, que es un modelo Lagrangiano sin malla basado en el método SPH. El método SPH discretiza el dominio en un conjunto de nodos o partículas. Las propiedades físicas de cada partícula (posición, velocidad, densidad y presión) se obtienen por interpolación local de las propiedades de las partículas circundantes. Las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven en cada par de interacción entre partículas. La teoría de SPH implementada en DualSPHysics se detalla a continuación:

El método SPH está basado en la teoría de los interpolados integrales, cuyo principio básico es aproximar cualquier función  $A(\mathbf{r})$  por:

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}') W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \quad (1)$$

siendo  $\mathbf{r}$  el vector de posición de una partícula y  $W$  la función *kernel*, que depende de la distancia entre partículas y del radio de interacción  $h$ , que es la distancia de interacción entre partículas en un dominio cerrado  $\Omega$ .

La aproximación integral anterior se puede reescribir en notación discreta por medio del siguiente sumatorio:

$$A_i = \sum_{j=1}^N A_j W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (2)$$

donde el sumatorio se lleva a cabo sobre las partículas vecinas  $j$  de la partícula de interés  $i$  que se encuentran en el radio de interacción del *kernel*. Además, el volumen de una partícula se expresa como su masa ( $m_j$ ) dividida por su densidad ( $\rho_j$ ).

### 2.2.1. Función Kernel

Para pasar de un dominio continuo, como un fluido, a un dominio discreto, partículas, se utiliza la función *kernel*. El *kernel* es una función que interpola los valores de cualquier propiedad del fluido en función del valor de las partículas vecinas que se encuentran dentro del radio de interacción ( $h$ ).

La Figura 4 muestra el dominio de influencia de la función *kernel* ( $W$ ). Las partículas que se encuentran a una distancia menor que  $kh$ , en nuestro caso,  $2h$ , son las que interactúan con la partícula de interés. La función *kernel* tiene forma de Campana de Gauss, por lo que la contribución de las partículas cercanas será mucho mayor que las partículas que se encuentran más alejadas de la partícula de interés.

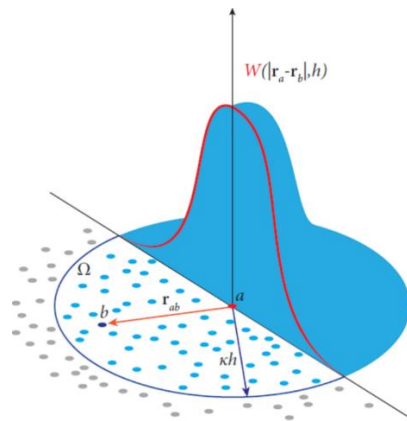


Fig. 4. Esquema del dominio de influencia de la función Kernel.



## 2.2.2. Ecuaciones fundamentales

La ecuación de continuidad (o conservación de la masa) de Navier-Stokes para un dominio continuo es:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $t$  es el tiempo y  $\mathbf{v}$  la velocidad del fluido.

Utilizando la función *kernel* para pasar de un dominio continuo a un dominio discreto, la ecuación anterior se reescribe como:

$$\left( \frac{d\rho}{dt} \right)_i = \sum_{j=1}^N m_j (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (4)$$

La ecuación de conservación del momento de Navier-Stokes para un dominio continuo es:

$$\rho \left( \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \nabla \cdot \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla f_{viscosas} + \mathbf{f}_{ext} \quad (5)$$

donde ahora  $p$  es la presión.

Utilizando la función *kernel*, se puede reescribir la ecuación anterior como:

$$\left( \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right)_i = - \sum_{j=1}^N m_j \left( \frac{p_j}{\rho_j^2} + \frac{p_i}{\rho_i^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g} \quad (6)$$

siendo  $\Pi_{ij}$  el término de la viscosidad y  $\mathbf{g}$  la aceleración de la gravedad.

La viscosidad  $\Pi_{ij}$  tiene un papel importante en la simulación del movimiento del fluido, ya que representa la fricción interna entre las moléculas del fluido, es decir, la resistencia del fluido al flujo. La manera más simple de representar el término de la viscosidad es con la viscosidad artificial de Monaghan (1992), siendo esta la formulación utilizada en las simulaciones de este trabajo. Su uso es común en SPH debido a su simplicidad y resulta adecuada para modelar la generación, propagación e interacción de olas con estructuras costeras obteniendo buenos resultados (Altomare *et al.*, 2017).

## 2.2.3. Ecuación de estado

La ecuación de estado se usa para relacionar la densidad y la presión. Esta ecuación ha sido desarrollada por Monaghan y Kos (1999) y Batchelor (1974).

$$p = b \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right] \quad (7)$$

Siendo  $\rho_0$  la densidad de referencia y  $b$  un factor que depende de la densidad de referencia, de la velocidad del sonido y del índice politrópico ( $\gamma$ ). En aplicaciones marítimas el índice politrópico es igual a 7, por lo que pequeñas variaciones en la densidad provocarán un cambio considerable en la presión, siendo un fluido débilmente compresible.

Según Monaghan (1994), la compresibilidad se ajusta en el modelo para que la velocidad del sonido pueda reducirse artificialmente, lo que establece un valor razonable para el tamaño del paso de tiempo. Sin embargo, este ajuste obliga a que la velocidad del sonido sea al menos 10 veces mayor que la velocidad máxima del fluido, manteniendo las variaciones de densidad en un margen inferior al 1%. Esto es necesario porque si se utilizase la velocidad del sonido real, se necesitaría un paso de tiempo muy pequeño para asegurar la convergencia de la solución numérica, lo que aumentaría significativamente el tiempo de cálculo. Debido a esto, se define el factor  $b$  en la Ecuación 7 como:

$$b = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \quad (8)$$

siendo  $c_0$  la velocidad del sonido cuando la densidad es igual a  $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

## 2.2.4. Condiciones de contorno

El objetivo principal de las condiciones de contorno es contener el fluido y modelar los elementos sólidos con los

que debe interactuar el fluido sin atravesarlos. Por otro lado, también completan el soporte del *kernel* de las partículas de fluido próximas al límite, porque en estos casos la función *kernel* no sería una función normalizada y proporcionaría resultados incorrectos.

Las Condiciones de Contorno Dinámicas (DBC), cuya descripción completa se encuentra en Crespo et al. (2007), es un método en el que las partículas de contorno se rigen por las mismas ecuaciones que las partículas de fluido, con la diferencia de que no se mueven de acuerdo a las fuerzas ejercidas sobre ellas, si no que permanecen fijas en su posición (contorno fijo) o se mueven según un movimiento pre-impuesto (pistón, flap, compuerta...). Cuando una partícula de fluido se aproxima a una partícula de contorno y su distancia es menor que la distancia de interacción entre las partículas, la densidad de las partículas de contorno aumenta y provoca un aumento de la presión. Debido a esto, se origina una fuerza de repulsión sobre las partículas de fluido, que suele ser excesiva y genera un hueco entre el fluido y el contorno.

Para solucionar los problemas de las DBC se desarrollaron las DBC modificadas (mDBC), descritas en English et al. (2022) y que se han usado en este trabajo. En este caso, las partículas de contorno se colocan de la misma manera que en las DBC, con la interfaz limítrofe situada a medio espacio entre las partículas de fluido y de frontera. Para cada partícula contorno se proyecta un nodo fantasma en el fluido respecto a la interfaz limítrofe usando un método semejante al de Marrone et al. (2011). Para una superficie plana, el nodo fantasma se refleja a través de la interfaz limítrofe en la dirección de la normal que apunta al fluido. Las propiedades del fluido se calculan en este nodo fantasma a través de una suma

SPH corregida de las partículas de fluido circundantes.

Este método para hallar la densidad de las partículas contorno, proporciona campos de presión y densidad más suaves en la frontera y reduce considerablemente la brecha entre el contorno y el fluido, que es uno de los principales problemas de las DBC. Las partículas de frontera obtienen las propiedades del fluido extrapolando los valores calculados en el nodo fantasma de una manera similar a la utilizada para las fronteras abiertas en Tafuni et al. (2018).

#### 2.2.5. Objetos flotantes

Los objetos flotantes en SPH son objetos rígidos que se mueven libremente en función del fluido que los rodea. Para simular el movimiento de un objeto flotante hay que tener en cuenta su interacción con las partículas del fluido y las fuerzas que estas ejercen sobre él y luego añadirle la fuerza de su peso. Suponiendo que el objeto flotante es un cuerpo rígido, la fuerza neta sobre cada partícula se calcula sumando las contribuciones de cada partícula de fluido según la función *kernel*. La descripción detallada de los objetos flotantes en DualSPHysics está en Canelas et al. (2015).

#### 2.2.6 Acoplamiento con MoorDyn

Este trabajo modela el comportamiento de una boya flotante amarrada al fondo del tanque para limitar su movimiento. Los grados de libertad afectados son: el desplazamiento longitudinal (*surge*), el vertical (*heave*) y la rotación de cabeceo (*pitch*). El amarre ejerce una fuerza adicional sobre la boya que debe ser simulada de manera precisa para reproducir numéricamente su movimiento en el experimento. Esta nueva fuerza adicional se resuelve en

DualSPHysics utilizando la librería externa MoorDyn.

MoorDyn es un código abierto y gratuito que resuelve la dinámica de un sistema de amarres y ha sido desarrollado para poder ser acoplado con otros modelos. MoorDyn resuelve las líneas de amarre como masas puntuales unidas por modelos lineales de amortiguación para modelar la elasticidad en la dirección axial del amarre. La amortiguación hidrodinámica y la masa añadida se caracterizan mediante la ecuación de Morrison aplicada a cada masa puntual. Además, también resuelve la fricción de los amarres con el fondo y permite unir varias líneas de amarre y conectar varias estructuras flotantes.

MoorDyn ha demostrado, con una formulación muy simple, que es computacionalmente eficiente y preciso para simular objetos flotantes con amarres en condiciones de oleaje regular (Domínguez *et al.*, 2019).

### 2.2.7. Generación de oleaje

El generador de oleaje en DualSPHysics puede ser del tipo pistón o del tipo *flap*, y permite generar tanto olas regulares como irregulares. La teoría implementada en DualSPHysics para la generación de oleaje está basada en Madsen (1971), que desarrolló una teoría simple de generación de olas de segundo orden de Stokes que no cambian su forma al propagarse. La descripción completa del método de generación de olas implementado en DualSPHysics está en Altomare *et al.* (2017). El código admite también series temporales externas para el desplazamiento del sistema de generación numérico.

### 2.2.8. Generación de condición inicial

La condición inicial de un caso de simulación en DualSPHysics se crea con

la herramienta de pre-procesado llamada GenCase. Este programa discretiza la geometría del contorno y el fluido en partículas SPH.

Como se mencionó anteriormente, SPH es un método sin malla, pero para definir la posición inicial de las partículas sí se utiliza una malla. Sin embargo, una vez creadas las partículas, estas se moverán libremente por el dominio según las ecuaciones de SPH.

GenCase utiliza una malla tridimensional con una distancia entre nodos constante denominada  $dp$  (distancia inicial entre partículas), de forma que sólo se crean partículas en los nodos que se corresponden con la geometría a discretizar en partículas. Este método permite utilizar geometrías con cualquier resolución, aunque la precisión del resultado dependerá de la resolución empleada. La Figura 5 muestra la representación en partículas de la boya empleada en el modelado numérico con diferentes resoluciones. Al disminuir la distancia entre partículas, aumenta el número de partículas obteniendo un resultado más parecido al modelo físico.

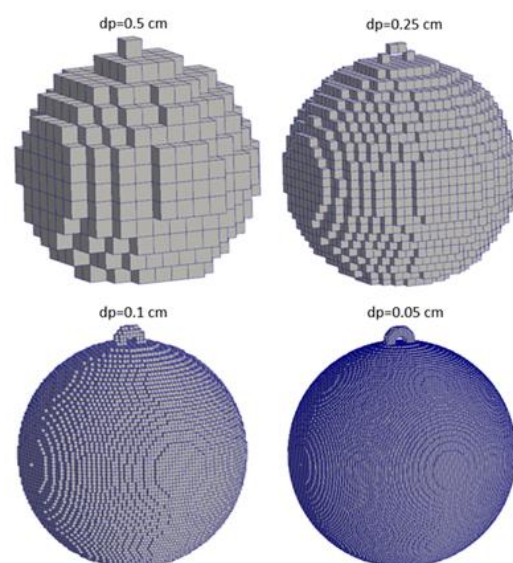


Fig. 5. Discretización de la boya utilizando diferentes resoluciones (las partículas se representan con cubos para mejorar la visualización).



### 3. Resultados

Los experimentos que se han realizado son: i) validación del tanque numérico, ii) validación de generación y propagación de olas regulares sin objetos flotantes, iii) validación de propagación de olas regulares con objetos flotantes libres, iv) validación de propagación de olas regulares con objetos flotantes amarrados.

#### 3.1. Generación y absorción numérica de olas

Para comprobar que el oleaje se genera, propaga y absorbe de forma correcta en nuestro tanque numérico se reproduce una ola regular de período  $T=0.9$  s, carrera del pistón  $S_0=3$  cm, altura de ola  $H=2.67$  cm y longitud de onda  $\lambda=90.65$  cm, con diferentes resoluciones. La resolución está definida por la distancia inicial entre partículas. Altomare *et al.* (2017) recomiendan usar una resolución en la que haya 8-10 partículas por altura de ola, ya que con esos valores se obtiene una buena precisión con unos tiempos de cálculo razonables. Los valores de  $dp$  utilizados en este caso han sido de 0.01 m, 0.005 m y 0.002 m.

La Figura 6 muestra un esquema del tanque numérico utilizado en DualSPHysics para el caso de objetos flotantes con amarres, que es el caso más complejo. Tiene un pistón en uno de sus extremos, que es el encargado de generar el oleaje, y una playa de disipación con una pendiente ( $\alpha$ ) de 1:15.68 en el otro extremo, cuya finalidad es absorber el oleaje para evitar que se produzcan olas reflejadas.

Para validar la generación y propagación del oleaje se utilizará el mismo tanque sin la boya ni el amarre. En este caso el tanque tiene una naturaleza bidimensional, ya que la interacción de las partículas fluidas con las partículas de las paredes laterales del tanque no altera su propagación, lo que supone un gran ahorro de tiempo computacional sin prácticamente afectar a los resultados. En esta primera validación se comparan resultados numéricos con la solución teórica y las variables analizadas, que han sido la superficie libre de agua ( $\eta$ ) y la velocidad orbital (horizontal y vertical) a 103.5 cm del pistón y 5 cm por debajo de la superficie libre inicial (WG en la Figura 6).

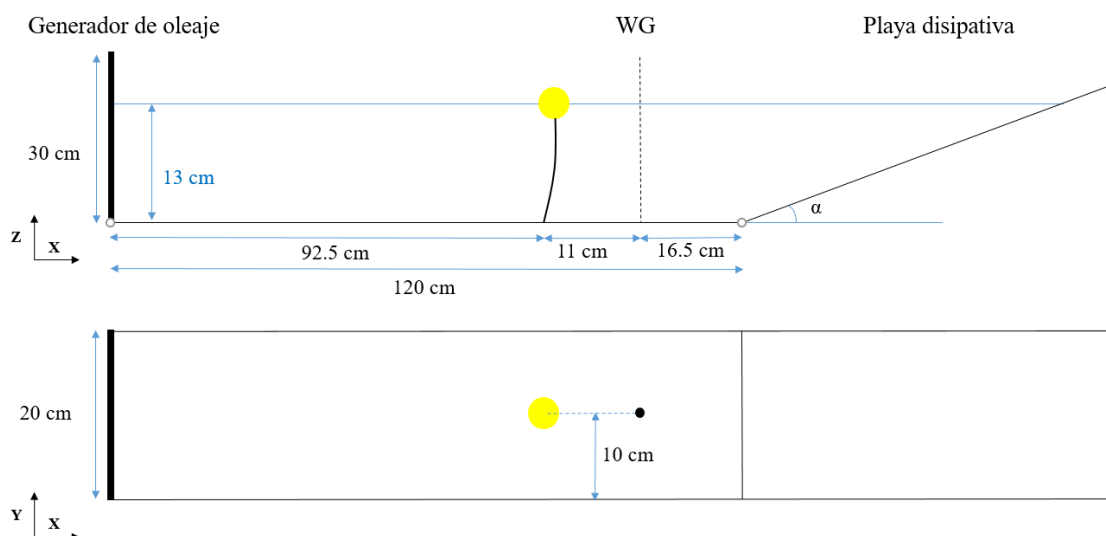


Fig. 6. Esquema del tanque numérico para test con la boya flotante amarrada al fondo.

La variación temporal de la superficie libre y la velocidad orbital en un punto se puede obtener gracias a la teoría de Stokes de segundo orden. En la Figura 7 se muestra una comparación de los valores teóricos con los resultados numéricos para las tres resoluciones. Puede observarse que para un  $dp$  de 0.01 m la velocidad orbital vertical tiene grandes fluctuaciones. Además, tanto los valores de la velocidad orbital horizontal, como la elevación de la superficie libre, distan bastante de los valores teóricos. Por esta razón, se puede concluir que los resultados con este  $dp$  no son precisos. En cambio, los resultados numéricos para un  $dp$  de 0.002 m y 0.005 m muestran una buena correspondencia con los resultados teóricos, siendo mejores para el  $dp$  menor, que equivale a una mayor resolución (mayor número de partículas). Atendiendo a los resultados obtenidos, las demás simulaciones numéricas utilizan un  $dp$  de 0.002 m. Los resultados con esta resolución confirman la correcta generación y propagación de oleaje en nuestro tanque numérico con DualSPHysics.

Por otra parte, para validar la capacidad de absorción del oleaje de la playa disipativa del tanque numérico, se utiliza el método de Healy (Eagleson y Dean, 1966), con el que se obtiene el coeficiente de reflexión,  $K_R$ , cuyo valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$K_R = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (9)$$

siendo  $H_{max}$  la altura máxima y  $H_{min}$  la altura mínima.

En este caso  $K_R$  es inferior al 4.5%, por lo que la reflexión será mínima y prácticamente no afectará a las olas incidentes, lo que significa que las olas se propagan de forma correcta y no existe reflexión al final del tanque numérico.

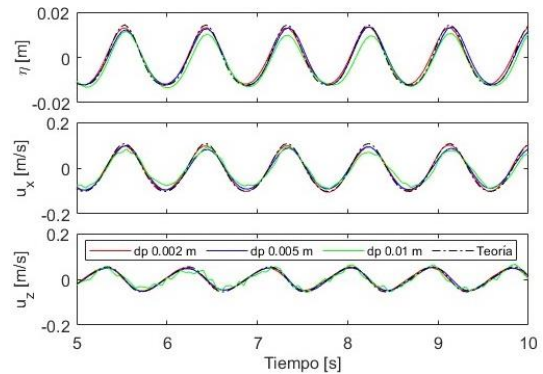


Fig. 7. Series temporales teóricas y numéricas (2D) de la elevación de la superficie libre y velocidades orbitales ( $T=0.9$  s,  $H=2.67$  cm).

La Tabla 1 incluye el número de partículas y el tiempo de ejecución para cada resolución requerido para simular 12 segundos de tiempo físico usando una tarjeta gráfica Nvidia GeForce RTX 2080 Ti. A menor distancia inicial entre partículas ( $dp$ ), mayor número de partículas y mayor tiempo de cálculo.

$dp$ [m]	Partículas	Tiempo de cálculo (min)
0.010	4,209	2.27
0.005	13,736	5.11
0.002	75,335	14.27

TABLA 1. Número de partículas y tiempo de ejecución según la resolución utilizada.

Una vez validado nuestro tanque numérico en 2D, se confirma la misma precisión de los resultados en simulaciones 3D, ya que las siguientes simulaciones con objetos flotantes tienen una naturaleza tridimensional. La comparación entre los resultados numéricos en 3D y la teoría es realmente buena tanto para la variación temporal de la superficie libre como para la velocidad orbital. El coeficiente de reflexión,  $K_R$ , aumenta ligeramente hasta un 6.65% pero sigue siendo un valor muy bajo. En el caso 3D para simular 12 s de tiempo físico en la misma tarjeta gráfica, el tiempo de cálculo ha sido de 1,892.31 minutos (31.53 h). Este elevado tiempo de ejecución se debe a la gran cantidad de partículas simuladas (6,833,500).

### 3.2. Propagación de olas regulares

Los primeros test donde se comparan datos experimentales con datos del modelo numérico tienen como objetivo validar la generación y propagación para tres condiciones de oleaje distintas (Tabla 2). Las olas A y B tienen la misma carrera del pistón y las olas B y C tienen el mismo período.

Ola	Stroke $S_0$ [m]	Período $T$ [s]	Altura $H$ [m]	Longitud de onda $\lambda$ [m]
A	0.0035	0.7	0.0422	0.6503
B	0.0035	0.9	0.0311	0.9065
C	0.0030	0.9	0.0267	0.9065

TABLA 2. Condiciones de oleaje estudiadas.

La Figura 8 representa las tres condiciones de oleaje en el ábaco de Le Méhauté. Las tres olas se encuentran en la zona de profundidad intermedia, las olas B y C se encuentran dentro de la teoría de Stokes de segundo orden y la ola A pertenece a la teoría de Stokes de tercer orden, pero debido a su proximidad a la teoría de segundo orden se puede aproximar por esta última teoría, ya que las diferencias serán mínimas.

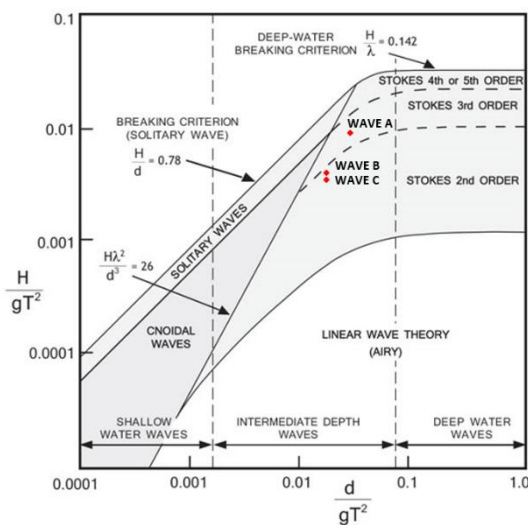


Fig. 8. Condiciones de oleaje estudiadas representadas en el ábaco de Le Méhauté (2013).

En la Figura 9 se muestran las series temporales de la superficie libre a 103.5 cm del pistón generador. Los resultados numéricos y teóricos para las tres condiciones de oleaje son prácticamente idénticos. Los resultados numéricos son muy parecidos a los datos experimentales, aunque existen algunas pequeñas desviaciones en estos últimos debidas a pequeñas vibraciones que afectan a la sensibilidad del sensor acústico del experimento.

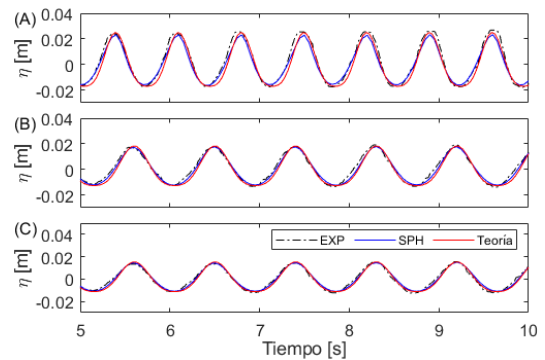


Fig. 9. Series temporales experimentales, numéricas y teóricas de la elevación de la superficie libre de las tres olas (A, B y C).

### 3.3. Interacción de olas regulares con objetos flotantes libres

Se realizó el mismo ensayo para las tres condiciones de oleaje seleccionadas anteriormente (Tabla 2). El experimento consiste en colocar un objeto flotante y medir su desplazamiento horizontal (*surge*) y su desplazamiento vertical (*heave*) respecto a su posición inicial con el agua en reposo.

Las simulaciones numéricas de este experimento han sido realizadas en el tanque numérico mostrado en la Figura 6 sin el cabo que amarra la boya al fondo del tanque. Como se puede observar la boya se ha colocado prácticamente a una longitud de onda ( $\lambda$ ) del pistón para las olas B y C y casi a  $1.5\lambda$  para la ola A, con lo que la ola se habrá formado correctamente cuando llegue al objeto flotante.



Para la ola A los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 10. En cuanto al desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos y experimentales son prácticamente iguales para la ventana temporal de 2 a 8 segundos. A partir del segundo 8, el desplazamiento experimental disminuye debido a la reflexión que existe en el tanque experimental, ya que la zona de amortiguamiento de la parte final del nanoCIEM no está optimizada para un amplio rango de períodos y puede generar cierta reflexión, también por la falta de un sistema de absorción activa. En cuanto al desplazamiento vertical, la amplitud de los resultados experimentales y numéricos se mantiene constante, pero hay una ligera diferencia entre ellos.

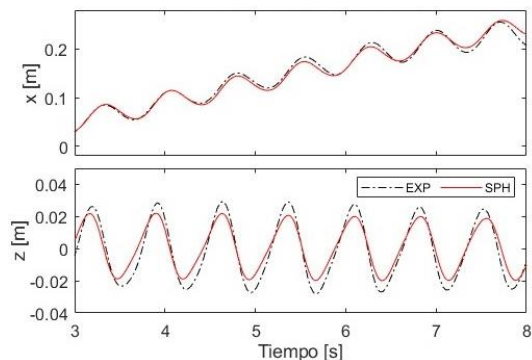


Fig. 10. Movimiento longitudinal y vertical de la boya usando la configuración de la ola A ( $T=0.7$  s,  $H=4.22$  cm).

Los resultados numéricos y experimentales del movimiento de la boya para la ola B se muestran en la Figura 11. En el desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos y experimentales son muy parecidos desde el segundo 3 hasta el 6, momento en el que la boya durante el experimento avanzó menos debido a que empieza a afectar la reflexión del final del tanque físico. En cuanto al desplazamiento vertical, la amplitud de los resultados numéricos se mantiene constante pero la de los resultados experimentales crece con el paso del tiempo.

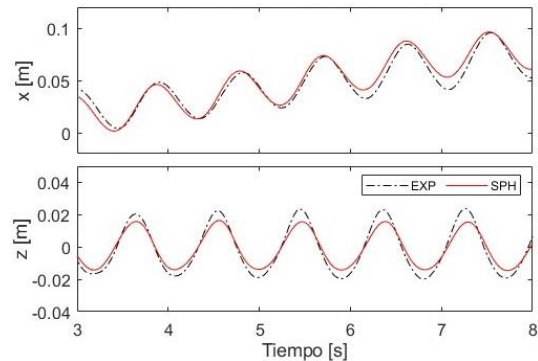


Fig. 11. Movimiento longitudinal y vertical de la boya usando la configuración de la ola B ( $T=0.9$  s,  $H=3.11$  cm).

Para la ola C los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 12. Se observa una mayor diferencia entre el desplazamiento longitudinal numérico y experimental. Del segundo 3 al segundo 6 el desplazamiento es prácticamente el mismo, pero a partir de este momento la boya experimental avanza menos que la boya numérica, ya que la reflexión en el tanque experimental no es tan eficiente como la implementada en la simulación numérica. En cuanto al desplazamiento vertical, igual que sucede en el caso anterior, la amplitud de los resultados numéricos se mantiene constante pero la de los resultados experimentales crece con el paso del tiempo.

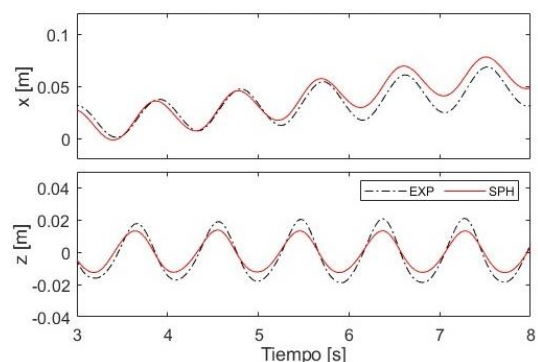


Fig. 12. Movimiento longitudinal y vertical de la boya usando la configuración de la ola C ( $T=0.9$  s,  $H=2.67$  cm).

Para las tres condiciones de oleaje se puede apreciar que los resultados numéricos y experimentales son muy similares para el desplazamiento

longitudinal. Las comparaciones del desplazamiento vertical son las que presentan una mayor discrepancia. Esto puede ser debido a que la boya genera una componente transversal de la velocidad de las partículas fluidas que provoca reflexión con las paredes laterales del tanque. En el caso del tanque numérico esto se ha solucionado con una zona de amortiguamiento lateral a lo largo de las dos paredes laterales, pero en el tanque experimental no se ha podido solucionar. Para ello, tendría que utilizarse otro tanque experimental donde la distancia entre sus paredes laterales sea lo suficientemente grande para reducir la reflexión lateral y su influencia en el movimiento de la boya. Esta reflexión lateral afecta al campo de velocidades tras la boya y, por lo tanto, a las olas que llegan a la zona de amortiguación al final del tanque, por lo que la eficiencia de la zona de absorción de energía del tanque experimental funciona peor.

Los resultados de este apartado muestran la capacidad de DualSPHysics para simular objetos flotantes libres bajo condiciones de oleaje regular.

### 3.4. Interacción de olas regulares con objetos flotantes amarrados

Este experimento consiste en simular objetos flotantes amarrados al fondo del tanque, lo que afectará y limitará su movimiento. La simulación de objetos flotantes con amarres utiliza la librería MoorDyn acoplada a DualSPHysics para calcular y aplicar la tensión ejercida por el amarre. En este caso no tenemos datos experimentales de la tensión de amarres, ya que el tanque experimental nanoCIEM no dispone de ningún sensor que permita medirla. Por lo tanto, se comparan los mismos datos numéricos y experimentales que en el caso sin amarres: desplazamiento horizontal (*surge*) y desplazamiento vertical

(*heave*) de la boya. Además, se mostrarán las tensiones producidas en el amarre únicamente para las simulaciones numéricas.

La Figura 6 muestra la configuración del tanque numérico empleado para este caso. El amarre de la boya al fondo del tanque está situado a 92.5 cm del pistón, siendo esta distancia mayor de una longitud de onda para las tres configuraciones de oleaje (Tabla 2).

La Tabla 3 contiene los principales parámetros de configuración de la línea de amarre, una cuerda de nylon en el experimento físico, para su simulación numérica con MoorDyn.

Parámetro	Valor
Longitud	0.075 m
Densidad longitudinal	0.00077 kg/m
Diámetro	0.002 m
Módulo de elasticidad	$1.59 \times 10^9$ N

TABLA 3. Propiedades de la línea de amarre utilizadas en el modelado numérico.

En la Figura 13, se muestran 5 instantes de la simulación de DualSPHysics que representan un período completo. El color del fluido muestra la velocidad longitudinal de las partículas fluidas y la posición de la superficie libre para las condiciones de oleaje correspondientes a la ola C. Se ha añadido una línea negra de referencia para comparar en cada instante la posición de la boya respecto al instante inicial (8.10 s). En el segundo instante (8.36 s) se observa la mayor distancia respecto a la línea negra de referencia. Mientras que en el instante final (9.0 s) la posición de la boya casi no se ha desplazado de la posición de referencia. La boya nunca se aleja mucho de su posición inicial debido al amarre y mantiene un movimiento oscilatorio, como muestran las siguientes gráficas de desplazamiento longitudinal (*surge*).

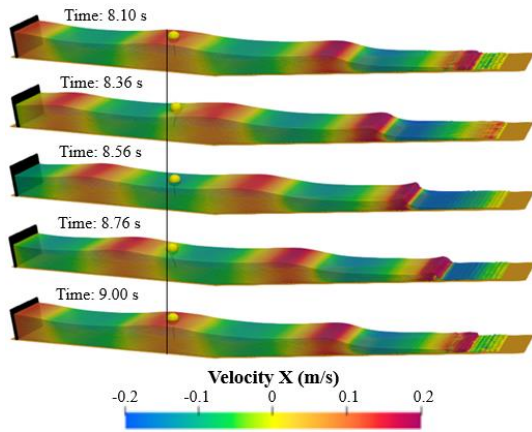


Fig. 13. Diferentes instantes de la simulación con DualSPHysics de la ola C ( $T=0.9$  s,  $H=2.67$  cm).

Para la ola A los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 14. En el desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos son muy parecidos a los experimentales, siendo la amplitud de los resultados numéricos un poco menor. Las oscilaciones son constantes en ambos casos, lo que refleja el efecto del amarre. En cuanto al desplazamiento vertical, los resultados numéricos presentan una muy buena correspondencia con los experimentales durante toda la simulación.

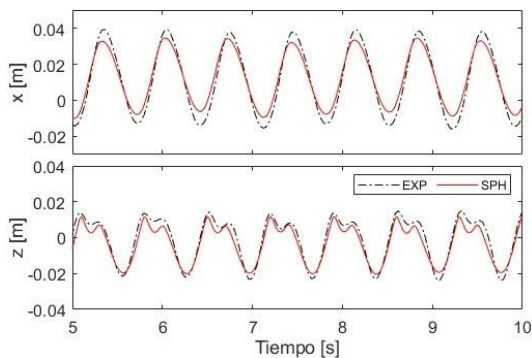


Fig. 14. Movimiento longitudinal y vertical de la boya amarrada usando la configuración de la ola A ( $T=0.7$  s,  $H=4.22$  cm).

Los resultados numéricos y experimentales del movimiento de la boya para la ola B se muestran en la Figura 15. En el desplazamiento longitudinal, los resultados numéricos y experimentales muestran una ligera diferencia, del segundo 5.5 al segundo 7

los resultados numéricos se aproximan más a las crestas de los resultados experimentales y del segundo 7.5 al segundo 9 se aproximan más a los valles de los resultados experimentales. En cuanto al desplazamiento vertical, los resultados numéricos se ajustan muy bien con los experimentales en todo el dominio temporal.

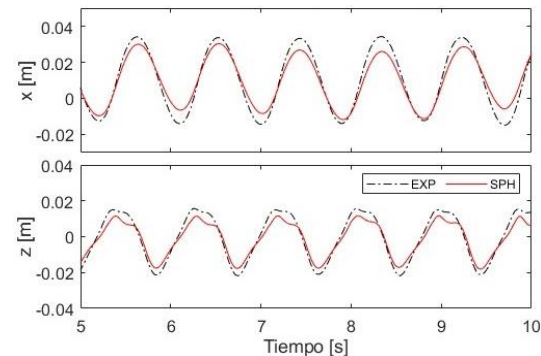


Fig. 15. Movimiento longitudinal y vertical de la boya amarrada usando la configuración de la ola B ( $T=0.9$  s,  $H=3.11$  cm).

Para la ola C los desplazamientos de la boya numérica y experimental se muestran en la Figura 16. El desplazamiento longitudinal muestra un buen ajuste entre resultados numéricos y experimentales. La amplitud del desplazamiento experimental se mantiene constante desde los 5 hasta los 10 segundos. En cuanto al desplazamiento vertical, los resultados numéricos y experimentales coinciden durante toda la simulación.

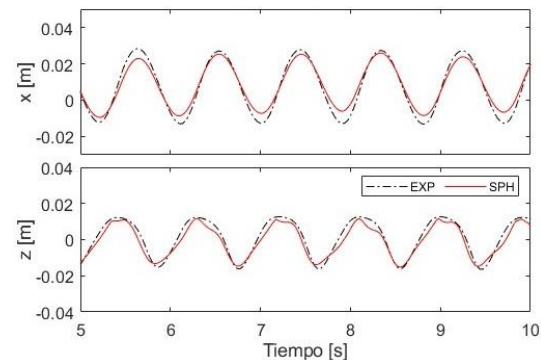


Fig. 16. Movimiento longitudinal y vertical de la boya amarrada usando la configuración de la ola C ( $T=0.9$  s,  $H=2.67$  cm).



La principal diferencia entre el comportamiento de la boya libre y amarrada al fondo del canal se da en el desplazamiento longitudinal. La boya amarrada no puede desplazarse más de 4 cm desde su posición original, pasando a tener un movimiento oscilatorio. La boya avanza y retrocede con la acción del oleaje, pero en la medida que lo permite la longitud de la línea de amarre. El amarre también afecta al desplazamiento vertical al reducir significativamente su amplitud.

Por último, en la Figura 17 se puede ver la variación temporal de las tensiones registradas en el punto de amarre para las simulaciones numéricas de las tres condiciones de oleaje.

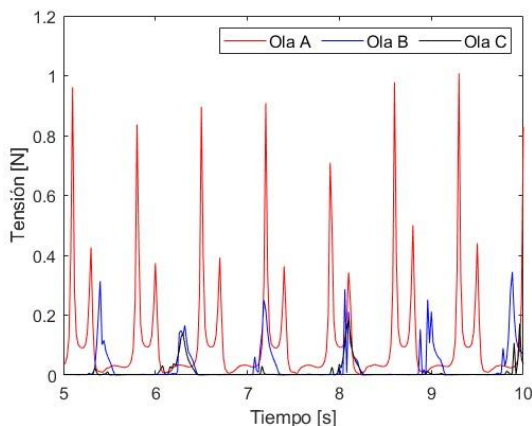


Fig. 17. Tensiones medidas en la línea de amarre para las tres condiciones de oleaje.

Las tensiones de la ola A tienen unos picos máximos alrededor de 1 N seguidos de otro menor de 0.5 N que se repiten de forma periódica con la llegada de las olas. Las tensiones para la ola B son menores y muestran picos de tensión periódicos con valores próximos a 0.35 N. Para la ola C, la variación de la tensión sigue siendo periódica pero los valores ya son mucho más bajos, siendo menores a 0.2 N. Por lo tanto, los valores máximos de las tensiones en la línea de amarre aumentan con la altura de la ola (H). Además, también se puede ver como los picos de tensión para las olas B y C coinciden en los mismos instantes,

por lo que se puede afirmar que la tensión máxima depende del período de la ola.

Estos resultados muestran la capacidad de DualSPHysics y MoorDyn para simular objetos flotantes amarrados bajo condiciones de oleaje regular.

#### 4. Conclusiones

Este trabajo muestra que el método numérico SPH es una alternativa viable a los métodos basados en mallas para simular un objeto flotante bajo condiciones de oleaje regular. Se ha demostrado que DualSPHysics es capaz de generar, propagar y absorber las olas, y de reproducir la interacción entre estas olas y un objeto flotante libre o amarrado. Además, también es posible reproducir el comportamiento de las líneas de amarre con el acoplamiento de DualSPHysics con la librería MoorDyn.

Para el experimento con la boya libre, sus desplazamientos longitudinales numéricos y experimentales son muy similares. Sin embargo, existen ciertas discrepancias en el desplazamiento vertical debido a la reflexión lateral y en la parte final del tanque experimental. Es decir, el sistema de reflexión pasiva instalado en el nanoCIEM presenta una eficacia que varía según la condición de oleaje, posiblemente debido a la longitud fija del mismo sistema de absorción no optimizada para un rango amplio de periodos. Esto puede tener consecuencias sobre la respuesta de objetos flotantes bajo la acción del oleaje.

En el experimento con la boya atada al fondo del tanque, los desplazamientos longitudinales y verticales son muy parecidos comparando experimentos y simulaciones. En este caso, la línea de amarre limita el movimiento de la boya y esto provoca que la componente

transversal, perpendicular a la dirección de propagación, de la velocidad del fluido sea menor, lo que hace que la reflexión lateral sea más pequeña e influya menos.

Además, se ha demostrado que aumentando la resolución en las simulaciones numéricas se obtienen unos resultados más precisos, muy próximos a los datos experimentales.

En cuanto a los problemas surgidos, la reflexión tanto longitudinal como lateral es una limitación del tanque experimental que en las simulaciones numéricas se puede solucionar fácilmente gracias a las zonas de amortiguamiento. También hay que comentar las limitaciones del modelado numérico en simulaciones 3D, ya que para tener una resolución aceptable en 3D se requiere simular varios millones de partículas y los tiempos de ejecución se vuelven bastante elevados.

## Referencias

- Altomare C., Crespo A.J.C., Domínguez J.M., Gómez-Gesteira M., Suzuki T., Verwaest T. 2015. Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coastal Engineering*, 96, 1-12.
- Altomare C., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., González-Cao J., Suzuki T., Gómez-Gesteira M., Troch P. 2017. Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering*, 127, 37-54.
- Batchelor G.K. 1974. *Introduction to fluid dynamics*. Cambridge University Press.
- Canelas R.B., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Ferreira R.M. 2015. A Smooth Particle Hydrodynamics discretization for the modelling of free surface flows and rigid body dynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 78, 581-593.
- Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Dalrymple R.A. 2007. Boundary Conditions Generated by Dynamic Particles in SPH Methods. *CMC: Computers, Materials, & Continua*, 5(3), 173-184.
- Crespo A.J.C., Domínguez J.M., Barreiro A., Gómez-Gesteira M., Rogers B.D. 2011. GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods. *PLoS ONE*, 6 (6), e20685.
- Domínguez J.M., Crespo A.J.C., Hall M., Altomare C., Wu M., Stratigaki V., Troch P., Cappelletti L., Gómez-Gesteira M. 2019. SPH simulation of floating structures with moorings. *Coastal Engineering*, 153, 103560.
- Domínguez J.M., Fourtakas G., Altomare C., Canelas R.B., Tafuni A., García-Feal O., Martínez-Estévez I., Mokos A., Vacondio R., Crespo A.J.C., Rogers B.D., Stansby P.K., Gómez-Gesteira M. 2022. DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 867-895.
- Eagleson P., Dean R. 1966. *Small Amplitude Wave Theory*. McGraw-Hill, New York.
- English A., Domínguez J.M., Vacondio R., Crespo A.J.C., Stansby P.K., Lind S.J., Chiapponi L., Gómez-Gesteira M. 2022. Modified dynamic boundary conditions (mDBC) for general-purpose smoothed particle hydrodynamics (SPH): application to tank sloshing, dam break and fish pass problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 911-925.
- Gingold R., Monaghan J. 1977. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of*

- the Royal Astronomical Society, 181 (3), 375-389.
- Gotoh H., Khayyer A. 2018. On the state-of-the-art of particle methods for coastal and ocean engineering. *Coastal Engineering Journal*, 60, 79-103.
- Le Méhauté, B. 2013. An introduction to hydrodynamics and water waves. Springer Science & Business Media.
- Lucy L. 1977. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. *Astronomical Journal*, 82, 1013-1024.
- Luo M., Khayyer A., Lin P. 2021. Particle methods in ocean and coastal engineering. *Applied Ocean Research*, 114, 102734.
- Madsen O.S. 1971. On the generation of long waves. *Journal of Geophysical Research*, 76, 8672-8683.
- Marrone S., Antuono M.A.G.D., Colagrossi A., Colicchio G., Le Touzé D., Graziani G. 2011.  $\delta$ -SPH model for simulating violent impact flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(13-16), 1526-1542.
- Monaghan J. 1992. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 543- 574.
- Monaghan J. 1994. Simulating Free Surface Flows with SPH. *Journal of Computational Physics*, 110(2), 399-406.
- Monaghan J., Kos A. 1999. Solitary waves on a Cretan beach. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 125, 145-154.
- Tafuni A., Domínguez J.M., Vacondio R., Crespo, A.J.C. 2018. A versatile algorithm for the treatment of open boundary conditions in Smoothed particle hydrodynamics GPU models. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 342, 604-624.
- Violeau, D. 2012. Fluid mechanics and the SPH method: theory and applications. Oxford University Press.



## **Medición de temperatura e humidade do módulo bioclimático**

B. Viso Romero\*, S. Fernández-Trujillo Lamas

[\\*98braso@gmail.com](mailto:*98braso@gmail.com)

*IES As Lagoas, Rúa Blanco Amor, 2, 32004 Ourense*

### RESUMO

Durante o período establecido logrouse elaborar, sistematizar e colocar un equipo para medir e analizar o comportamento bioclimático da vivenda pasiva que se construíu ao longo do curso 2021-2022 no IES As Lagoas de Ourense. Dito módulo foi edificado para cumprir coas bases da bioconstrución e a arquitectura solar pasiva. O obxectivo principal deste proxecto foi verificar e confirmar que a construción se realizou de maneira correcta e cumpre con éxito a súa capacidade como illante térmico, ademais de acadar niveis internos óptimos de temperatura, humidade ou iluminación, entre outros. Deste xeito, constataríase a bioconstrución dunha vivenda pasiva que presenta uns niveis internos ideais para a vida humana e que non precisa apenas de enerxía térmica artificial achegada de forma externa para manter a temperatura da casa.

*Palabras Clave:* Bioconstrución, vivenda pasiva, análise do comportamento bioclimático.

---

## 1. Introducción

Ao longo do período 2019-2022 levouse a cabo, no marco do STEMBach do IES As Lagoas, o deseño e edificación dun módulo bioclimático no patio do instituto co obxectivo de poder realizar futuros proxectos de investigación nos anos vindeiros. Este módulo cumpre cos requisitos da bioconstrución, é dicir, unha edificación sostible co medio ambiente, co uso de materiais ecolóxicos de baixo impacto medioambiental, e a creación de ambientes interiores (de humidade, temperatura, iluminación e acústica) óptimos e cuxo gasto enerxético de construción sexa mínimo.

Para logralo seguíronse unha serie de pasos. En primeiro lugar, a edificación dunha planta rectangular con proporción 10:14m, para unha maior eficiencia enerxética e unha orientación da fachada en sentido de norte a sur para captar a maior cantidade posible de horas de luz solar (Figuras 1 e 2).

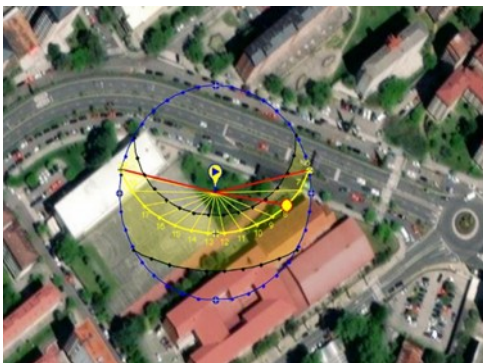


Figura 1. Orientación do módulo bioclimático.



Figura 2. Fachada do módulo bioclimático.

En segundo lugar, todos os materiais empregados foron de baixo impacto ambiental. Para a estrutura das paredes empregouse un bloque de Cannabric (BTC), un material vexetal feito a base de cânabo procedente de Granada (Figura 3).



Figura 3. Bloque de Cannabric (BTC) empregado na construción das paredes.

O morteiro para pegar os bloques preparouse con cal hidráulica natural NHL5 (Figura 4) que é un gran substituto ecolóxico para o cemento industrial. Para as vigas e máis o teito utilizouse madeira laminada de piñeiro radiata (Figura 5), que é unha especie autóctona da Cordilleira Cantábrica. Finalmente, para un bo illamento, usáronse paneis de cortiza tostada (Figura 6).



Figura 4. Cal Hidráulica NHL5 empregada para pegar os bloques de Cannabric.



Figura 5. Madeira Piñeiro Radiata empregada nas vigas e no teito.



Figura 6. Cortiza tostada empregada para o illamento.

Todos estes materiais son eleccións moito máis ecolóxicas respecto á construción tradicional. Son, ademais, elementos de baixo impacto medioambiental e, tamén,

materiais locais, o que consegue que a pegada de carbono sexa mínima.

Por último, unha característica fundamental na busca dun confort interno do módulo foi a elaboración dun eficiente illamento en todos os sistemas do módulo. Comezando pola soleira, que é o elemento máis convencional de toda a casa xa que, a día de hoxe, a bioconstrución non outorga unha alternativa para a base dunha edificación, por enriba do chan botouse grava para pór unha capa de polietileno dun milímetro de grosor seguido dunha malla de electrosoldado (20x20x6m) para rematar co formigón (Figura 7).



Figura 7. Soleira da vivenda.

En canto ao cerramento (Figura 8), de dentro cara fóra, púxose primeiro unha lámina EPDM seguida dunha previsión de zócolo para a protección fronte á humidade. Posteriormente, pegáronse os bloques de cannabric co morteiro de cal e cerámica de barro para despois poñer os paneis de cortiza de 15 centímetros. Preparouse unha última capa de morteiro cunha malla en fibra de vidro e finalizouse cun recebo de revestimento en cor.

Na cuberta, a continuación das vigas laminadas GL-32 de piñeiro radiata, púxose tamén un panel de cortiza (de 20 centímetros de grosor), seguido dunha tarima de piñeiro radiata de 30 milímetros. Despois, botouse un recheo de grava e area para colocar unha capa xeotéxtil de protección e impermeabilización seguida dunha lámina nodular de drenaxe de EPDM. Por último, remátase cunha capa de terra sobre a que irá vexetación de forma natural.



Figura 8. Cerramento e estrutura das paredes.

Un esquema de todo o sistema preséntase na figura 9.

Todo este conxunto de elementos confírenlle á estrutura do módulo o illamento necesario para manter no interior uns niveis de temperatura e humidade ideais. Para comprobar esta afirmación na práctica, colocáronse uns sensores para medir estas variables tanto no interior como no exterior da bioconstrución, e conectáronse a un programa informático que gardou estes datos de xeito continuo coa finalidade de analizalos e comparalos coa información ofrecida pola estación meteorolóxica de Meteogalicia (www.meteogalicia.gal) en Ourense. Deste xeito, a idea é comprobar que a realización deste módulo bioclimático foi moi eficiente e cumpriu todos os obxectivos propostos.

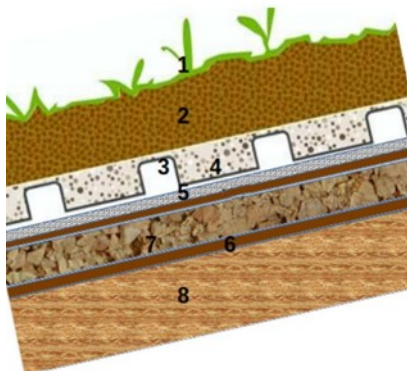


Figura 9. Díptico da cuberta da bioconstrución.

## 2. Metodoloxía

Para a realización deste proxecto usáronse tres sensores de temperatura e humidade

colocados tanto no exterior como no interior da bioconstrución. Realizouse un circuíto electrónico cableado nunha placa protoboard, que se uniu á controladora Raspberry Pi e aos sensores xa comentados. Os datos recolléronse ao longo de dous meses (entre febreiro e abril) cada 10 minutos e almacenáronse na controladora. Para isto programouse un programa en Python que recolle os datos e os almacena na controladora para a súa posterior análise. As medicións almacenáronse na Raspberry Pi para o seu posterior tratamento. O diagrama de bloques do proceso é o que se indica a continuación na Figura 10, e se comentou en detalle.

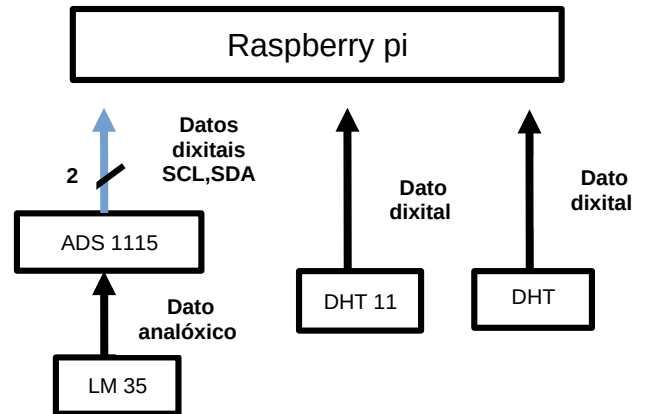


Figura 10. Diagrama do circuíto.

Empregáronse dous sensores, o LM35 de temperatura e o DHT11 de temperatura e humidade. Situamos no exterior, na parte posterior da construción e baixo cuberta un



DHT11; no interior situamos un DHT11 e un LM35.

### 2.1 LM35

O sensor de temperatura LM35 proporciona unha voltaxe de saída que varía de forma lineal coa temperatura. Non necesita calibración, proporciona unha voltaxe de saída de 750 mV a 25 °C e varía linealmente 10mV/°C (Figura 11).



Figura 11. Sensor LM35 v.4.

A relación lineal de temperatura e voltaxe fai que responda cunha expresión moi simple, do tipo  $V = 10 \cdot T$ , sendo a voltaxe en mV e a temperatura en °C. O equivalente é  $T = 0,1 \cdot V$  (Figura 12).

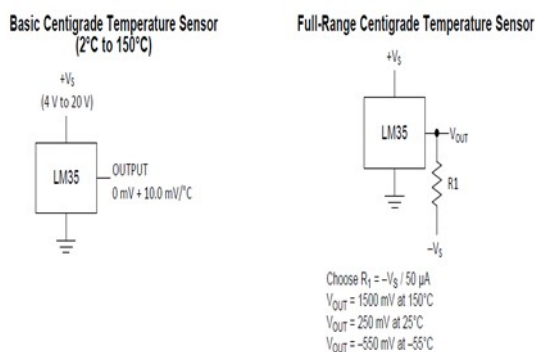


Figura 12. Diagrama Sensor LM35

O sensor LM35 ten tres terminais, dúas de alimentación (5V e GND) e unha de saída de información en Voltios. O sensor encóntrase encapsulado en placa e soldado á placa base, polo que só é preciso unir os cables. No controlador haberá que pasar esta información a graos centígrados sabendo que a 25°C da un resultado de 0,75 V e varía 10 mV con cada grao centígrado de aumento ou baixada de temperatura.

### 2.2 DHT 11

Este sensor pode medir temperatura e humidade. En particular, mide a temperatura entre 0 e 50°C, cunha precisión de 2° C, e a humidade relativa de 20-80% cunha precisión de 5%. Pode tomar unha mostra por segundo (Figura 13).

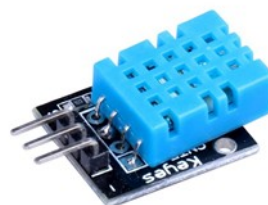


Figura 13. Sensor DHT 11

A conexión é simple, +V e GND, coas correspondentes do microcontrolador e o pin de sinal directamente a unha entrada dixital, pero cunha resistencia de 10 K conectada a +V, como se ve na figura 14.

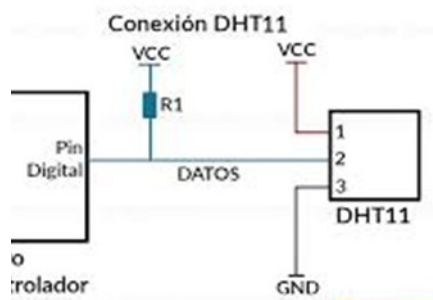


Figura 14. Diagrama conexións DHT 11.

O DHT11 ten unha alta fiabilidade e estabilidade. Pódese obter de dúas maneiras, de forma individual onde só temos o sensor DHT11, ou acoplado nunha PCB. Unha das vantaxes que nos ofrece o DHT11, ademais de medir a temperatura e a humidade, é que é dixital. Este sensor utiliza un pin dixital para enviar a información.

Polo tanto, pártese dun sinal analóxico que logo é convertido en formato dixital e se envía ao microcontrolador. A trama de datos é de 40 bits, correspondente a información de humidade e temperatura do DHT11.

O primeiro grupo de 8-bit é a parte enteira da humidade e o segundo grupo a parte decimal. O mesmo ocorre co terceiro e cuarto grupo, a parte enteira da temperatura e a parte decimal. Por último, os bits de paridade para confirmar que non hai datos corruptos.

Estes bits de paridade o único que fan é asegurar que a información é correcta, sumando os catro primeiros grupos de 8-bit. Esta suma debe ser igual aos bit de paridade (Figura 15).

0011 0101  
8 bits humedatad
0000 0000  
8 bits humedatad
0001 1000  
8 bits temperatura
0000 0000  
8 bits temperatura
0100 1001  
bits de paridad

Figura 15. Datos analóxicos DHT11.

### 2.3 Conversor Analóxico: ADS 1115

Transforma os datos analóxicos que recibe do LM35 en datos dixitais, que os envía á Raspberry Pi para que os procese. O ADS1115 (Figura 16) proporciona unha precisión de 16 bits a 860 mostras por segundo.

Ten catro canles de entrada, que se enlazan da seguinte maneira. A2 e A3 recollen os datos que proceden do sensor LM35. Trabállase con 5V que tomamos do controlador.

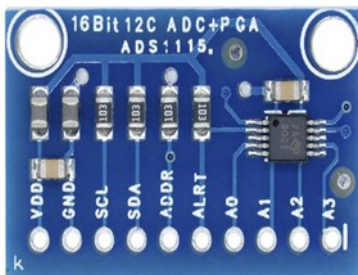


Figura 16. ADS 1115.

A placa ADS 1115, comunícase coa Raspberry e cos terminais SCA / SDL co protocolo I<sup>2</sup>C, cos correspondentes da Raspberry, que son os GPIO 2 e GPIO 3 (Figura 17).

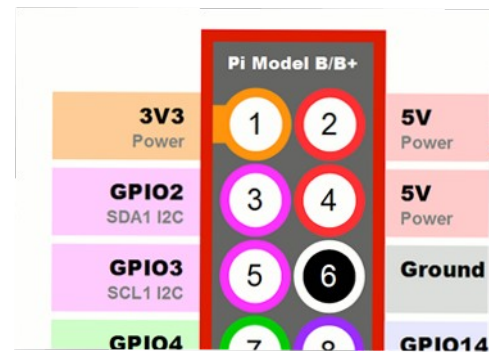


Figura 17. Placa GPIO Raspberry.

### 2.4 Controladora: Raspberry Pi v.4

A placa Raspberry Pi (Figura 18) é a tarxeta controladora de todo o proceso de medidas, de actuadores e de almacenamento de datos. Ten a capacidade de procesar toda a información que é necesaria e de actuar sobre as entradas e saídas, o que fai que sexa a peza central do proceso.

Proporciona a alimentación dos circuítos de lectura dos sensores e dos compoñentes dixitais e analóxicos (LM35, DHT11 e convesor AD 1115) e recibe a información dos datos do ADS 1115, polos terminais SCA / SDL co protocolo I<sup>2</sup>C, nos terminais GPIO 2 e GPIO 3.



Figura 18. Placa Raspberry Pi.

### 3. Datos

Unha vez preparado todo o circuío de sensores e a programación en Python, e máis instalados os sensores fóra e dentro da construción, comezouse a tomar datos da temperatura e da humidade tanto no ambiente interior como no ambiente exterior do módulo. Os datos foron tomados cada 10 minutos durante todo o día, ao longo de case dous meses.

Un dos problemas que se presentaron baséase na existencia de problemas eléctricos, é dicir, nos días nos que a luz se desconecta por fortes temporais ou por inconvenientes no cadro eléctrico do instituto, o circuío reiniciábase e volve a tomar datos dende cero. Porén, tamén se reiniciaba o reloxo dixital que contabilizaba a hora á que eran tomados os datos. Debido a elo, nesas ocasións, a información foi descartada pola falta de exactitude e correspondencia entre uns e outros datos. Deixouse un ordenador no interior da casa conectado ao circuío para facilitar a recuperación de datos, ademais de facer máis fácil o reinicio da medición.

Toda a información rexistrouse automaticamente nunha tarxeta de memoria inserida no mesmo circuío e cada unha ou dúas semanas extraéronse os datos mediante un lapis de memoria. Os datos foron transcritos e procesados para almacenalos de maneira ordenada nunhas follas de cálculo. Unha vez ben organizados os datos, o primeiro que procede é corrixir os posibles erros que

poidan presentarse nas referencias. Por exemplo, un dos sensores colocados no exterior do módulo procesaba, de cando en vez, datos totalmente erróneos sen razón aparente, polo que eses erros valóranse e corríxense para despois analizar os datos correctamente. Cos datos tabulados e comprobados, elaboráronse diferentes gráficos de temperatura (Figuras 19 e 20) e humidade ( Figuras 21 e 22) de varios días nos que se contraponen un día moi frío (25 de febreiro) e outro caloroso (18 de febreiro).

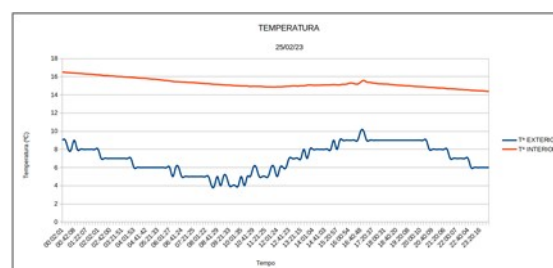


Figura 19. Gráfico da temperatura exterior (azul) e do interior (laranxa) do módulo bioclimático nun día bastante frío (25 de febreiro).

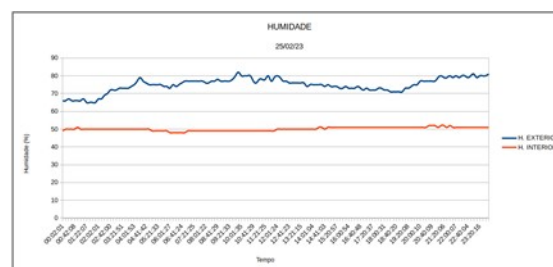


Figura 20. Gráfico da humidade exterior (azul) e do interior (laranxa) do módulo bioclimático nun día bastante frío (25 de febreiro).

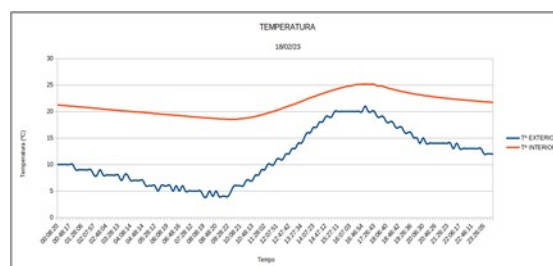


Figura 21. Gráfico da temperatura exterior (azul) e do interior (laranxa) do módulo bioclimático nun día bastante caloroso (18 de febreiro).

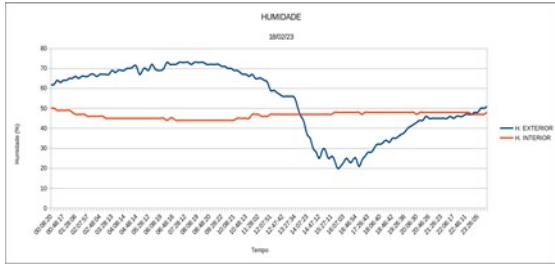


Figura 22. Gráfico da humidade exterior (azul) e do interior (laranja) do módulo bioclimático nun día bastante caloroso (18 de febreiro).

Despois realizouse unha gráfica que representase un intervalo de tempo maior (10 días) para analizar esa evolución na temperatura e na humidade (Figuras 23 e 24).

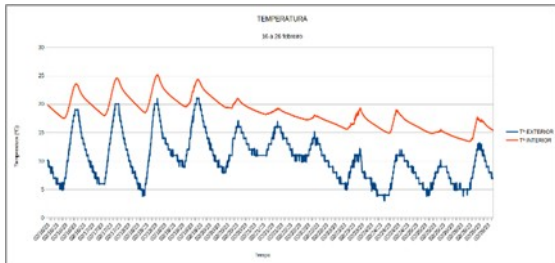


Figura 23. Gráfico da temperatura exterior (azul) e do interior (laranja) do módulo bioclimático no intervalo de 10 días (16 - 26 de febreiro).

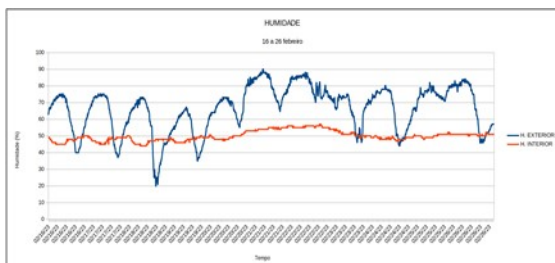


Figura 24. Gráfico da humidade exterior (azul) e do interior (laranja) do módulo bioclimático no intervalo de 10 días (16 - 26 de febreiro).

Con toda esta información analizouse e comprobouse que o módulo cumpre cos requisitos da bioconstrución respecto á súa capacidade como illante térmico.

Ademais, os datos que se obtiveron no exterior do módulo sobre a temperatura e humidade ambiente foron comparados cos datos ofrecidos pola estación de Meteogalicia en Ourense coa intención de verificar a funcionalidade dos sensores (Figuras 25 e 26).

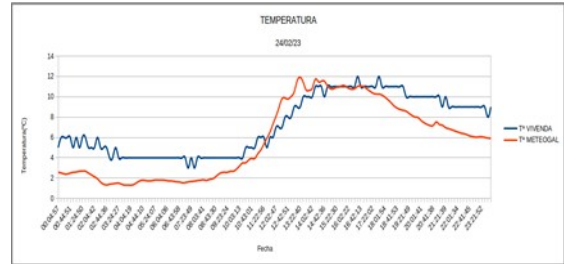


Figura 25. Gráfico comparativo entre a temperatura da vivenda (azul) e da estación de Meteogalicia (laranja) nun día calquera (24 de febreiro).

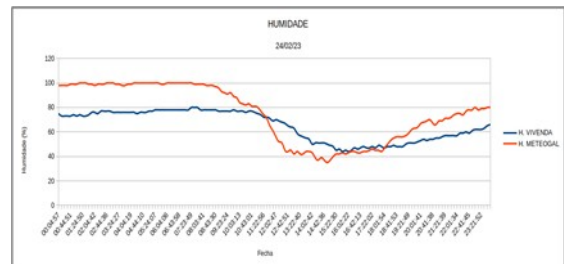


Figura 26. Gráfico comparativo entre a humidade da vivenda (azul) e da estación de Meteogalicia (laranja) nun día calquera (24 de febreiro).

Mediante esta comparativa entre os datos obtidos no módulo e os datos ofrecidos pola estación de Meteogalicia en Ourense pódese analizar e vulgar a funcionalidade dos sensores. A estación encóntrase, aproximadamente, a unha distancia de un quilómetro respecto ao instituto, preto da pista de atletismo localizada máis arriba do Campus Universitario (Figura 27). Polo tanto, a estación meteorolóxica encóntrase nunha localización diferente e a unha altitude maior.



Figura 27. Distancia entre a vivenda pasiva e a estación meteorolóxica de Meteogalicia.

Esta diferenza na posición e na altitude explica nun primeiro lugar a inexactitude entre os datos rexistrados polos sensores do módulo e os datos rexistrados pola estación. Ao situarse ambas estruturas en



lugares distintos é normal que os niveis de humidade e temperatura poidan diferir un pouco, ademais ao situarse a estación meteorolóxica nunha altitude maior é normal que as temperaturas sexan máis frías.

Outro factor que repercutiu no distanciamento dos datos no exterior do módulo foi a posición dos sensores. Estes sensores colocáronse enriba das vigas que sobresaen do teito da casa, polo que quedaron un pouco agochados entre a madeira, tamén coa intención de protexelos fronte aos fortes refachos de vento que puidesen producirse e afectasen á medición dos datos. Esta situación produce as diferenzas nas medicións, xa que os sensores captan con menor intensidade os datos respecto aos rexistros da estación de Meteogalicia.

Aínda así, as disparidades na información non foron moi acentuadas, pódese observar na figura 25 que a desemeillanza na temperatura comprende intervalos máximos de tan só dous ou tres graos centígrados entre os sistemas. En canto á humidade (Figura 26), os datos da vivenda sepáranse en 20 puntos, en picos máximos, respecto as medicións da estación.

En suma, pese a estas inexactitudes numéricas, pódese reparar en que as curvas das gráficas non son diferentes, é dicir, as curvas de ambos estruturas seguen movementos moi similares e os picos desiguais son mínimos. Deste xeito, confírmase o bo funcionamento do sistema de medición na vivenda pasiva.

#### **4. Conclusión**

En definitiva, a elaboración do circuío eléctrico e o programa en Python, ademais da instalación de todo o sistema cos sensores, fíxose no prazo esperado. Xa a mediados de febreiro comezouse a estudar o comportamento climático do módulo e, salvo certas ocasións nos que a existencia de problemas técnicos impediu una

medición ininterrompida, esta levouse a cabo ao longo de dous meses, até mediados de abril.

Tendo en conta toda esta información pódese concluír que permanece, tanto no exterior como no interior da vivenda, polo menos un sensor que recolle e traduce información correcta diariamente e durante os intervalos correspondentes. É dicir, pódese afirmar que ambos os dous sistemas, o circuío conectado aos sensores e máis o programa en Python, cumpren as súas funcións con éxito. Ademais, os datos estudados demostran e confirman na práctica a capacidade bioclimática que posúe a vivenda pasiva. En canto á temperatura, dentro do módulo mantense nuns termos ideais todo o tempo, sen cambios bruscos ao longo do día e suavizando tanto a calor como o frío extremos característicos dos parámetros que se presentan no exterior. A humidade tivo un comportamento similar. Fronte a unha forte ou baixa humidade no exterior, no interior mantívose estable arredor dun 50%, unha franxa idónea para o ser humano. Este comportamento climático do módulo tradúcese nunha actuación como illante térmico excepcional, noutras palabras, a súa edificación seguindo as bases da bioconstrución foi un éxito. Isto implica que a vivenda non precisará en demasía dunha achega externa artificial para quentar ou arrefriar o ambiente interno para a súa ocupación.

# CONSTRUCCIÓN DUN AEROXERADOR EÓLICO

Nuno González, Santiago Castro e Daniel Barata

*IES As Lagoas, Rúa Blanco Amor, 2, 32004 Ourense*

## RESUMO

O proxecto a realizar consistía, inicialmente, no deseño e elaboración dun aeroxerador funcional co obxectivo de obtención de electricidade, para poder subministrar enerxía ao módulo bioconstruído no IES As Lagoas de Ourense, ademais de facer unha análise dos datos que se irían obtendo. Sen embargo, durante o transcurso da construción inicial, decatámonos de que o proxecto presentaba unha serie de complicacións, que nos impediron facer todo o desenvolvemento inicialmente plantexado, aínda que a idea é a de resolver estas dificultades nun futuro e elaborar o proxecto inicialmente ideado. Sen embargo, a pesar das limitacións, creouse un prototipo para investigar a técnica e métodos de obtención de enerxía mediante os xeradores, asegurándose, durante o proceso, de usar as mellores técnicas para que nun futuro o proxecto se leve a cabo con éxito.

*Palabras Clave:* Aeroxerador, prototipo, construción, módulo bioconstruído, IES As Lagoas de Ourense.

---

## 1. Introducción

Un aeroxerador, coñecido tamén como unha turbina eólica ou simplemente unha aeroxeradora, é unha estrutura que se emprega para transformar a enerxía cinética do vento en enerxía eléctrica. Estas estruturas son compoñentes esenciais das plantas de enerxía eólica, que aproveitan a enerxía do vento para xerar electricidade dunha forma limpa e renovable.

Un aeroxerador común está composto por unha base alta que suxeita as pas, tamén coñecidas como hélices ou rotores, que xiran coa acción do vento. A enerxía cinética do vento fai que as pas xiren a alta velocidade, o que a súa vez activa unha caixa de cambios que aumenta a velocidade de rotación e a

transmite a un xerador eléctrico que produce electricidade.

Os aeroxeradores son unha fonte importante de enerxía renovable, xa que non emiten gases de efecto invernadoiro nin outros contaminantes durante a produción de electricidade. Ademais, o vento é unha fonte de enerxía ilimitada e non suxeita a fluctuacións de prezos no mercado enerxético, o que fai dos aeroxeradores unha opción atractiva para a produción de enerxía sustentable.

Falando dos aeroxeradores, pódense diferenciar dous tipos: os aeroxeradores con eixo vertical e horizontal:

- Os de eixo horizontal son os máis comúns que se poden ver hoxe en día. O seu eixo xira paralelo ó chan tendo unha gran altura de buxe e un mecanismo de rotor cuxo obxectivo é orientar o

aerogenerador para poder seguir os cambios de dirección do vento. Estes modelos normalmente adoptan un modelo de tres palas, por ser o máis eficiente (figura 1).

- Os de eixo vertical, caracterízanse por estar os seus bordes orientados cara ó vento e non precisan dunha gran altura para aproveitar a súa potencia. Dentro de estes diferéncianse catro tipos (figura 2):

- Savonius: poden ter diferentes formas de pas e eixos de transmisión diferenciais.
- Darrieus: con pas curvas e xiro sobre o seu eixo.
- Turbina Mixta: con mistura dos modelos anteriores.
- Giromill: os cales teñen pas verticais unidas ó eixo polos brazos horizontais.



Figura 1. Aerogenerador de eixo horizontal



Figura 2. Aerogeneradores de eixo vertical. De esquerda a dereita e de arriba a abaixo, Savonius, Darrieus, Turbina mixta e Giromill.

O ser humano leva desde o ano 5000 a.C. empregando a enerxía producida polo vento no seu propio beneficio e dende o ano 1887, como método para obter electricidade. O precursor da idea foi o estadounidense Charles F. Brush, quen deseñou o que se considera como a primeira turbina eólica para a produción de electricidade, coas inmensas dimensións equivalentes a un campo de fútbol de lonxitude falando das aspas.

Máis adiante, Poul la Cour descubriu que as turbinas eólicas cun número reducido de pas de rotor son moito máis eficientes para a produción de electricidade cas turbinas de pas múltiples do modelo de Brush. Este novo deseño é considerado como o primeiro xerador eólico moderno.

As bases teóricas do aproveitamento da enerxía eólica co fin de producir electricidade desenvolvéronse en Alemaña na segunda década do século XX e débese principalmente a Albert Betz, físico alemán de profesión quen no ano 1919 enunciou a Lei do Límite de Betz. Dita lei consiste en que non se pode superar o 59% de rendemento na

transformación de enerxía eólica en mecánica.

O maior desenvolvemento dos aerogeradores tivo lugar en Dinamarca, onde foi creado no primeiro terzo do século XX un sistema de descentralización da electrificación do país, pero non foi ata 1941 cando Palmer Cosslett Putnam instalou a primeira turbina cunha potencia superior a 1 MW. Esta foi fabricada nos Estados Unidos, no estado de Vermont, e funcionou durante a exitosa cifra de 1000 horas. Con dita potencia, fabricando unha plantación de 20 de estes aerogeradores, poderíase proporcionar electricidade a unha cidade das dimensións de Liverpool.

A seguinte innovación viría da man da empresa Siemens Gamesa, a cal lanzou turbinas de 5,8 MW de potencia con dúas variantes de rotor de 155 e 170 metros de diámetro, conseguindo aumentar a produción anual de enerxía nun 20% e un 32%, respectivamente, en comparación co modelo anterior.

Na figura 3 amósase un esquema coa evolución seguida polos aerogeradores.

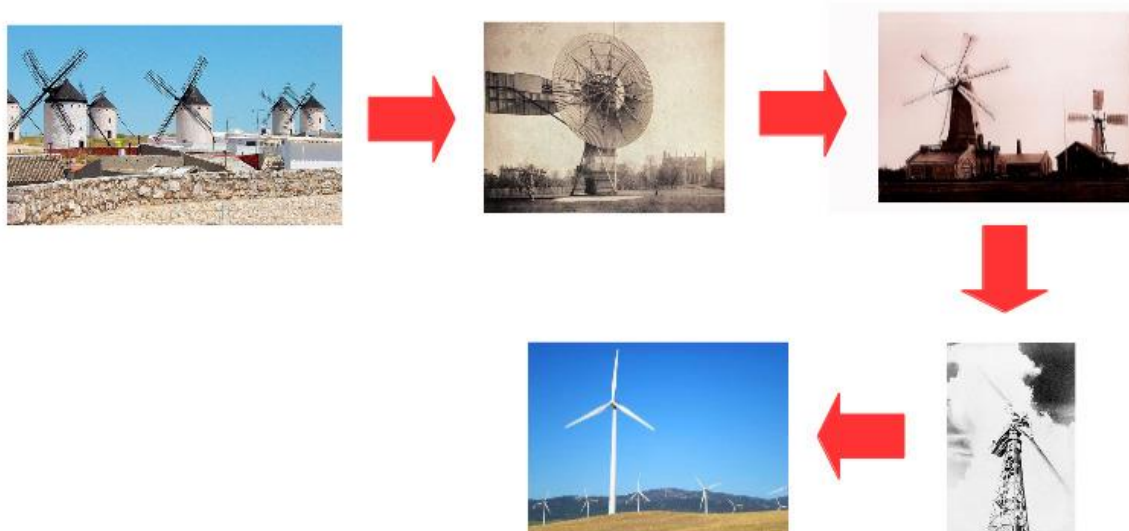


Figura 3. Evolución histórica dos aerogeradores.



O proxecto que se presenta neste documento consiste na construción dun modelo escalado dun aeroxerador, un dispositivo, que como se comentou anteriormente, ten como obxectivo a obtención de electricidade a partir da enerxía do vento, e que se compón dunha serie de pas e diversos mecanismos.

A idea principal era situar o aeroxerador na parte superior do módulo de bioconstrución que se construíu no IES As Lagoas de Ourense, para poder ir

obtendo datos e analizando o seu funcionamento. Estes datos serían comparados cos proporcionados por MeteoGalicia co obxectivo de obter información relevante. Inicialmente, construímos un aeroxerador utilizando o electroventilador do radiador dun coche unídoo así a unha barra de metal con dous rodamentos, montado todo sobre unha base alongada de metal (figura 4). Posteriormente, decidimos simplificar o proxecto para crear un aeroxerador máis básico, como caso de exemplo, que puidera acender un L.E.D.



Figura 4. Prototipo de aeroxerador a escala construído utilizando o electroventilador do radiador dun coche.

## 2. Construción do aeroxerador

O funcionamento do xerador eólico consiste na transmisión dunha rotación horizontal desde o eixo das hélices á caixa do motor, situada esta última a 6,5 cm debaixo do primeiro. O motor, ao xirar, produce unha corrente eléctrica continua de aproximadamente 3V, a cal é suficiente para acender un dispositivo L.E.D. Para poder conseguir isto, a saída do motor foi conectada a unha placa protoboard cunha serie de compoñentes con diferentes funcións que se detallarán ao longo do texto.

Para realizar a construción comezamos obtendo unha base, que xa contaba cunhas hélices confeccionadas e unha veleta para a orientación respecto ao vento. A lonxitude das pas é de 17 cm e o seu ancho de 12 cm, o que axuda a aumentar a superficie de captación do vento e, por tanto, a eficiencia do aeroxerador. A superficie do catavento é de 13 cm x 16 cm, o que garante a súa estabilidade e bo funcionamento en condicións de vento variable. Ademais, a lonxitude da polea do aspa é de 20 cm, o que permite o seu correcto movemento e transmisión de enerxía. A distancia desde o inicio do catavento ata o aspa é de 31 cm, o que axuda a xerar

un movemente constante e uniforme. A lonxitude total do sistema é de 46 cm, mentres que a distancia entre eixos é de 14,5 cm.

Seguidamente instalamos unha polea de 3 cm de radio no eixo superior. Conectando coas hélices, esta polea conta con diferentes dentes para que se poida compenetrar perfectamente cunha correa tensada e así transmitir de maneira óptima o xiro ao motor.

Respecto á realización do dispositivo, empregamos dous engranaxes, asociados aos dous eixos, diferentes. Estas poleas contan con distintos radios e polo tanto cunha relación de transmisión específica. Cabe destacar que o tamaño da polea coa que conta o eixo superior (o das aspas) é lixeiramente superior á polea inferior (a do motor).

A relación de transmisión é unha medida que indica como se relacionan as velocidades de rotación de dous elementos dunha transmisión mecánica. Na nosa transmisión mecánica, a enerxía mecánica transfírese desde o eixo das aspas a través dun sistema de engranaxes, poleas ou correas a un eixo de saída, que é utilizado para impulsar o motor e producir electricidade. A relación de transmisión describe a

relación entre a velocidade de rotación do eixo de entrada e a velocidade de rotación do eixo de saída ( $i = W_s / W_e$ ), aínda que tamén se pode calcular dividindo o número de dentes das rodas condutoras polo número de dentes das poleas ( $i = Z_e / Z_s$ ). En xeral, a relación de transmisión exprésase como a relación entre o número de dentes dos engranaxes de entrada e de saída.

Tras o primeiro paso e despois da correcta disposición do primeiro eixo, procedemos a instalar o motor na parte inferior, suxeitándoo firmemente con bridas e axustando o ángulo de desvío do eixo cun taco de madeira. A separación do motor co eixo é de 4,5 cm, o que permite un bo axuste e transmisión de enerxía.

Para o proxecto empregamos un motor Husillo / Spindle 775-80W con rodamentos de bolas. Este é un motor de corrente continua que está deseñado para obter unha forza xiratoria ao proporcionarlle electricidade. Sen embargo, estes motores son reversíbeis e dende unha rotación poden xerar electricidade.

Nas figuras 5 e 6 móstranse as diferentes partes do aeroxerador.

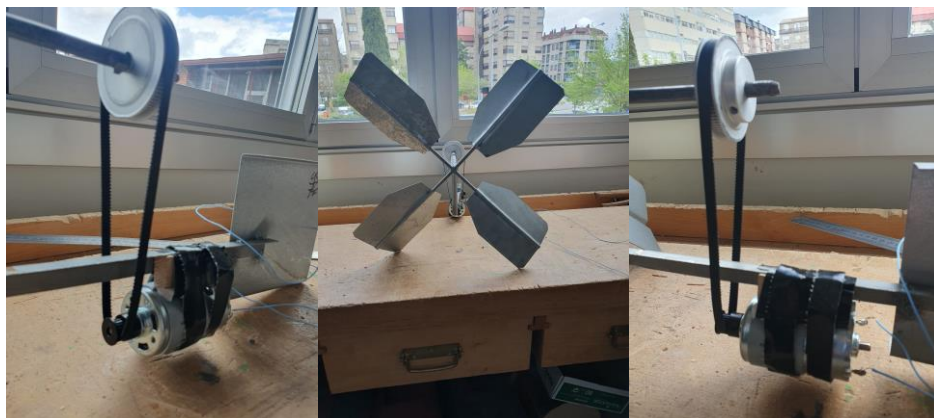


Figura 5. Partes do aeroxerador a escala construído. De esquerda a dereita: as aspas, a polea conectada no eixo superior con correa de transmisión e o motor Husillo / Spindle 775-80W con rodamentos de bolas.

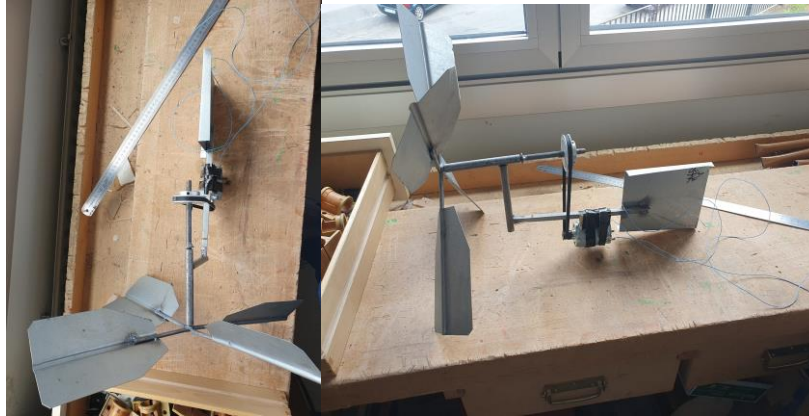


Figura 6. Diferentes vistas do aerogenerador a escala construído.

O motor, ao xirar, produce unha corrente eléctrica continua capaz de acender un dispositivo L.E.D. Para poder conseguir isto, como se comentou anteriormente, a saída do motor é conectada a unha placa protoboard. Así, na placa protoboard fixemos dous tipos de circuítos con diferentes funcións. O primeiro consta dun condensador e un L.E.D. situados en paralelo, polo que a enerxía que non é consumida por este díodo é almacenada no condensador de maneira eficiente (figura 7). Sen embargo, o segundo, presenta un circuítio corrector confeccionado con catro díodos, para evitar que unha rotación en sentido contrario por parte da hélice poida fundir algúns compoñentes internos do motor (figura 8).

De xeito específico, o circuítio empregado está composto por un L.E.D., que se ilumina ao recibir electricidade. En paralelo a este compoñente atopamos un condensador, que é o encargado de almacenar a electricidade excedente da iluminación do L.E.D. O conxunto dos compoñentes instalámoslos nunha placa de protoboard,

deseñada para conectar cables dunha maneira sinxela e rápida.

Un circuítio de 4 díodos rectificadores, tamén coñecido como unha ponte de díodos, emprégase para converter a corrente alterna (AC) en corrente continua (DC). Este circuítio consta de catro díodos conectados nunha ponte que permite que a corrente transite nunha dirección única. Cando se aplica un sinal de AC á ponte de díodos, dous dos díodos conducen mentres que os outros dous están en inversa, permitindo que a corrente flúa nunha dirección. Cando a polaridade da sinal AC invítese, os outros dous díodos comezan a conducir e os outros dous quedan en inversa, o que fai que a corrente siga fluíndo na mesma dirección. No caso dun aerogenerador que pode cambiar o sentido de xiro, o circuítio de 4 díodos rectificadores garante que a corrente xerada polo aerogenerador convértase en corrente continua, independentemente da dirección do xiro do aerogenerador.

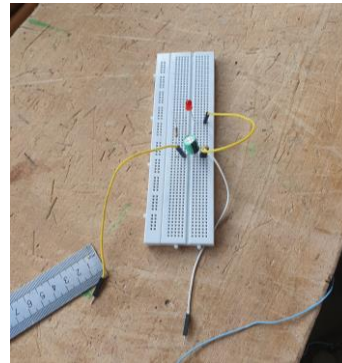
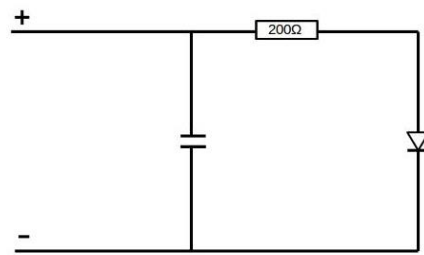


Figura 7. Esquema do circuío (esquerda) e placa protoboard (dereita), dun condensador e un L.E.D. situados en paralelo para que a enerxía que non é consumida por este díodo sexa almacenada no condensador de maneira eficiente.

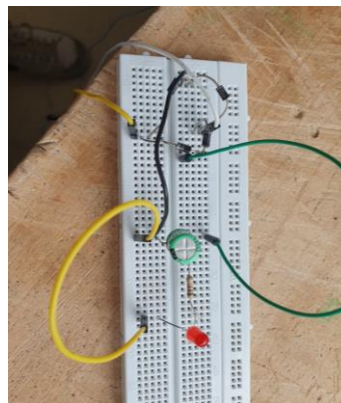
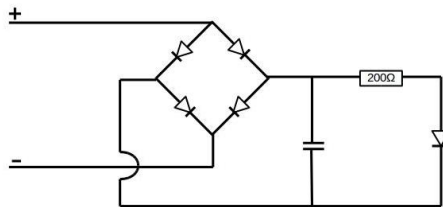


Figura 8. Esquema do circuío (esquerda) e placa protoboard (dereita) do circuío corrector confeccionado con 4 díodos para evitar que o sentido de xiro non teña relevancia respecto á obtención de electricidade.

### 3. Resultados e conclusións

Escolleuse levar a cabo este aerogenerador porque dende un punto de vista medioambiental hai unha grande necesidade de que exista un desenvolvemento tecnolóxico en enerxías renovables. Ademais, considerouse que o proxecto presentaba unha serie de retos de carácter técnico moi interesantes. O obxectivo principal deste traballo foi facer un prototipo dunha posible fonte de enerxía para a casa bioconstruída do IES As Lagoas de Ourense, para os meses de inverno, cando os días soleados son escasos, xa que a propia casa dotarase, ademais, de doutras fontes de enerxía renovables, como por exemplo, paneis solares.

Debido á falta de tempo e de algúns problemas técnicos, optamos por realizar a creación dun prototipo, presentado ao longo do documento, debido ao escaso tempo do que dispoñíamos para facer unha instalación máis operativa que nos permitira tomar algúns datos para analizar o funcionamento efectivo. Outro problema sería que precisaríamos dun aerogenerador con aspas de dimensións moi grandes debido á alta dependencia de fortes rachas de vento, moi imprevisibles e escasas.

A pesar de ter que conformarnos con crear un prototipo acorde as nosas posibilidades, o que nos imposibilitou tomar medidas do seu funcionamento, estamos moi satisfeitos co resultado obtido. O aerogenerador é funcional e



ademais presenta un deseño moi agradable á vista, posto que se asemella a un cataventos.

Nun futuro, que agardamos non sexa moi lexano, plantexámonos rematar o proxecto retomando a construción do modelo inicial, o cal tería a capacidade de producir a electricidade necesaria para o funcionamento óptimo en termos de electricidade da bioconstrución en calquera época do ano, servindo o modelo presentado aquí como unha base para facer as innovacións futuras.

#### 4. Bibliografía

- <https://www.siemensgamesa.com/es-es/descubrir/revista/2019/11/siemens-gamesa-inventors-day>
- <https://www.bbvaopenmind.com/tecnologia/innovacion/historia-energia-eolica-origen-ii-guerra-mundial/>
- <http://xn—drmstre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/betzpro.htm>
- <https://www.redalyc.org/journal/467/46759491003/html/>
- <https://www.siemensgamesa.com/es-es/products-and-services/onshore/aerogenerador-sg-5-8-170>
- <https://www.vectorenrenewables.com/es/recursos/blog/tipos-de-aerogeneradores-cual-genera-mas-energia>
- <https://www.neoenergia.com/es-es/sala-de-comunicacion/noticias/PublishingImages/Historia-de-la-energia-eolica.pdf>
- <https://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador>

## Análise da degradación da madeira tratada ao exterior

C. Rodríguez Pinchete, S. Casto Rúa, N. Fernández Fernández

*IES As Lagoas, Rúa Blanco Amor 2, 32004 Ourense*

### RESUMO

A madeira é un dos materiais, sen intervención humana, con características máis interesantes para a bioconstrución. Sen embargo, como material biodegradable, sofre un proceso de envellecemento debido aos fenómenos ambientais, e polo tanto precisa de tratamentos para diminuír o seu deterioro. Así mesmo os tratamentos escollidos deben cumprir con criterios orgánicos e ecolóxicos. O obxectivo deste traballo é analizar o impacto que poderían ter os diferentes factores atmosféricos na descomposición de madeiras, tendo tamén en conta a aplicación de distintos produtos protectores. Para poder realizar este proxecto fíxose un panel de ensaio cunha selección de seis tipos de madeiras diferentes ás cales aplicóuselles unha serie de “lasures” e aceites. Posteriormente, colocouse o panel de madeiras á intemperie e periodicamente realizáronse fotografías para observar o seu deterioro. Para elo analizáronse os cambios da cor en cada un dos tipos de madeira segundo o verniz que estas tiñan, e como cada tipo de verniz afectara á degradación das diferentes madeiras. Os principais resultados acadados foron que as madeiras como o piñeiro, o lidueiro e o castiñeiro, sen ter en conta o “lasur” aplicado neles, son moito máis resistentes aos condicionantes atmosféricos que, por exemplo, o bidueiro. Ademais, as madeiras sen ningún tipo de tratamento sofren un cambio radical no seu aspecto mostrando incluso restos de moho e humidades que produciron roturas en certos tipos de madeiras. As madeiras tratadas con calquera tipo de “lasur” degrádanse moito menos sendo os aceites intemperie, en especial para mobles, os que proporcionan maior estabilidade a madeira.

*Palabras Clave:* Madeira, “lasur”, aceites, factores atmosféricos, bioconstrución.

---

### 1. Introducción

A madeira é unha das partes fundamentais das árbores. Está composta en máis dun 50% de fibras de celulosa (polisacárido estrutural das plantas) unidas con lignina (polímero das plantas creado pola natureza que ven formado por alcohois e ácidos fenilpropílicos). A madeira ten moitos usos dependendo do seu tratamento

posterior á tala, sendo un dos materiais, sen intervención humana, máis resistentes. Ten unha serie de características que a fan moi interesante para a construción de obxectos do noso día a día como: a capacidade de illar térmica e electricamente; a súa ductilidade, maleabilidade e tenacidade; o seu carácter natural e biodegradable, que non produce ningún dano ao medio ambiente e a xa nomeada gran

resistencia. Por suposto todas estas características varían segundo o tipo de madeira, pero todas elas as comparten. Neste curso 2022/2023 no STEMBach do IES As Lagoas de Ourense, decidiuse mostrar a importancia das madeiras e os produtos derivados delas nas edificacións feitas con criterios de bioconstrución. A madeira, como material biodegradable, sofre un proceso de envellecemento debido aos fenómenos ambientais e polo tanto precisa de tratamentos para diminuír o deterioro. Do mesmo xeito os tratamentos escollidos deben cumprir con criterios orgánicos e ecolóxicos.

O obxectivo deste traballo é analizar o impacto que poderían ter os diferentes factores climáticos na descomposición de madeiras, tendo en conta a aplicación de distintos protectores decorativos (“lasures”) e aceites. Para poder realizar este proxecto fíxose unha selección de seis tipos de madeiras diferentes ás cales aplicóuselles unha serie de “lasures” e aceites.

## 2. Metodoloxía

### 2.1. Construción do panel de ensaio

O panel de ensaio está formado por seis tipos de madeiras: cerdeira, castiñeiro, piñeiro, bidueiro, faia, e lidueiro (ou lodoeiro). Cada unha das madeiras foron pintadas con vernices e aceites como: “vennilux aqua”, “lasur” nogueira marrón, aceite intemperie e aceite mobles.

Para levar a cabo o proxecto, seguíronse os seguintes pasos:

En primeiro lugar cortáronse as madeiras en 6 táboas de 12 x 110 cm (figura 1).



Figura 1. Proceso de corte das madeiras.

Despois, colocáronse as 6 táboas horizontalmente e uníronse por detrás con restos doutras madeiras colocándoas perpendicularmente para poder suxeitalas con parafusos (figura 2).



Figura 2. Proceso da unión das táboas.

Máis tarde dividiuse o panel de ensaio en 5x6 zonas, para obter 30 sub-paneis tal e como se mostra na figura 3.

A continuación aplicáronse os vernices e os aceites por columnas: á primeira columna non se lle aplicou nada (número 1 na figura 3), á segunda e á terceira aplicáronse “lasures” (2 e 3 da figura

3) e á cuarta e quinta aplicáronselles aceites (4 e 5 da figura 3).



Figura 3. Proceso vernizado e secado.

A continuación descríbense os distintos “lasures”:

*Vinilux aqua*: pintura esmaltada para interiores, que se pode diluír en auga. Resistente e repelente á auga, fabricada con materias primas naturais. Ten boa adherencia e unha alta cobertura.

“*Lasur*” *nogueira marrón*: verniz mate-sedoso, de poro aberto, sedoso e resistente á intemperie. Proporciona unha película elástica, transparente, hidrófuga e repelente á sucidade.

*Aceite de intemperie*: aceite de resina natural transparente para superficies de madeira desgastadas en exteriores. Resalta a estrutura natural da madeira, protexe contra a humidade e retrasa o envellecemento típico das madeiras á intemperie.

*Aceite para mobles*: é unha mestura especial de aceites naturais, resinas, cera de abellas e cera de “carnauba”.

Por último colócase o panel de madeiras á intemperie. Periodicamente realizáronse fotografías para poder observar o deterioro.

## 2.2. Construción do sistema de iluminación e cámara

Para a iluminación do panel de ensaio e a colocación da cámara foi necesaria a construción dun carro equipado cun soporte para a cámara, coa marca da posición desta, e con catro lámpadas led (figura 4). As lámpadas escolléronse cunhas determinadas características que nos permitiran un entorno estable de iluminación, polo tanto con un Índice de Reprodución Cromática (IRC) de 97; unha luz moi parecida ao espectro de luz solar natural, libre de parpadeo e cunha iluminación superficialmente homoxénea. Desta maneira creáronse as condicións idóneas para sacar as fotografías.

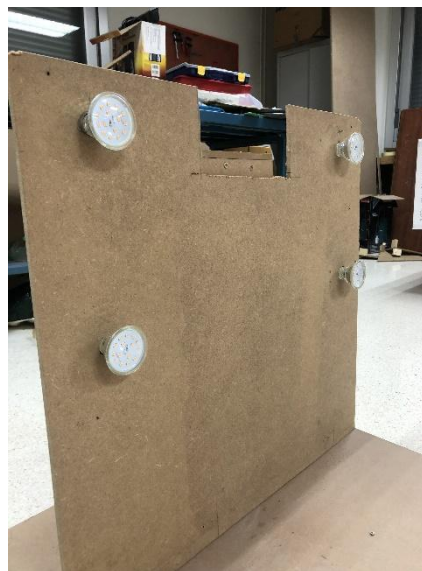


Figura 4. Sistema de iluminación (catro lámpadas led) e cámara.

## 2.3. Técnica de fotografado

Para a realización das fotografías optouse por levar os paneis a unha sala totalmente escura. Desesta maneira poderíanse tomar fotografías coa luz regulada manualmente.

A primeira fotografía tomouse sen exposición aos factores ambientais (sol e chuvia) o 21 de decembro de 2022. Tres semanas despois recolléronse as



madeiras do lugar escollido para a exposición á intemperie e fotografáronse. Este procedemento repetiuse un total de catro veces cun período de dúas semanas entre fotografías.

Para a realización das fotografías utilizouse a cámara fotográfica Nikon D50 de 6 Mpx. Esta foi configurada totalmente en modo manual cuns parámetros que non variaron durante todo o proceso, para así manter as mesmas condicións en cada toma:

- Enfoque manual a 2,2m.
- Diafragma f / 5,6 s.
- Tempo de exposición: 1 / 15 s.
- Temperatura de color en superficie branca: 3000K.
- Capturas en formato: RAW e JPG.

#### *2.4. Técnica de medición do deterioro*

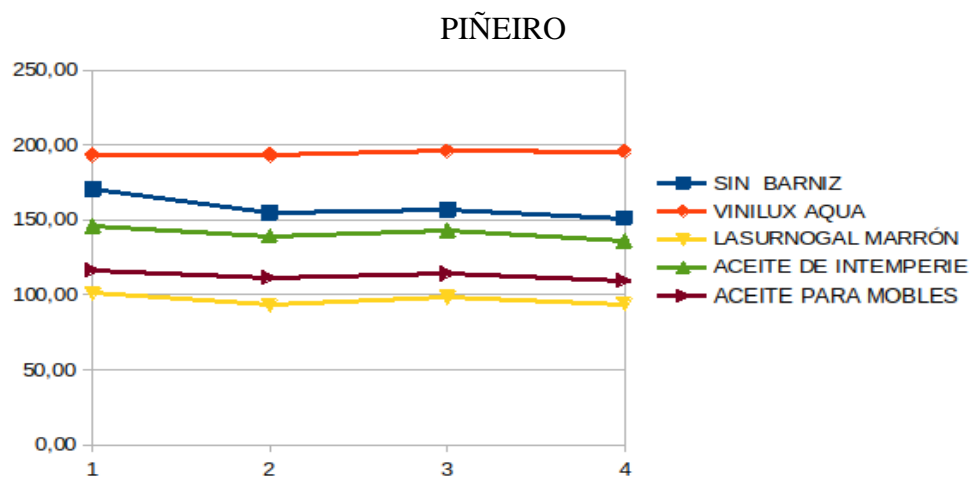
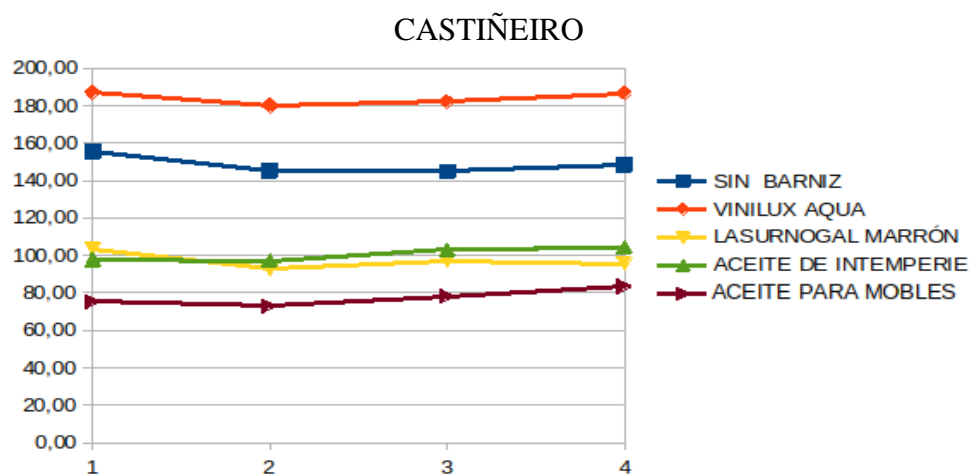
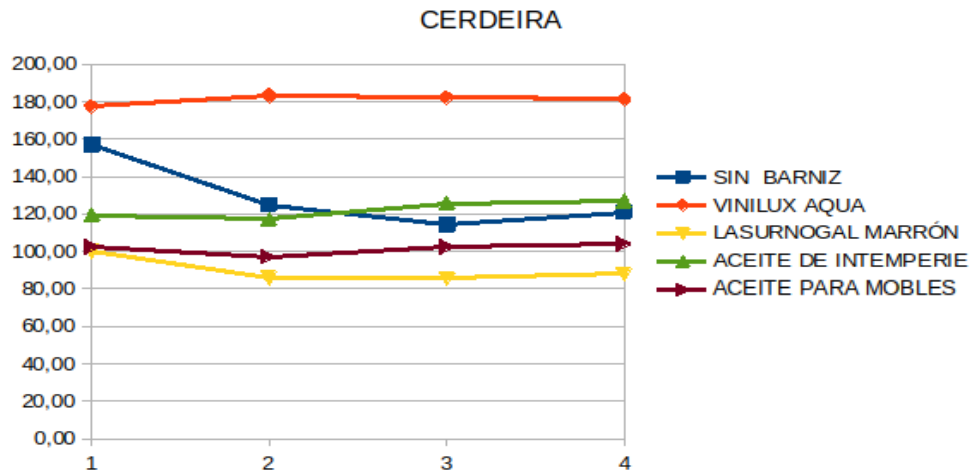
As fotografías tomadas pasaron por un proceso de análise nun ordenador a través do programa GIMP 2.10. Escolléronse cadrados de 60 píxeles de lado sempre medido na mesma posición onde tomamos os valores RGB de cada mostra. Desesha forma conseguiuase a recolección de datos en relación ás unidades de color de cada un dos paneis, conseguindo datos dos tons vermellos, verdes e azuis.

A continuación estes datos foron trasladados a unha folla de cálculo onde se realizaron medias aritméticas de cada un dos compoñentes tonais para obter o valor medio dividíndoos en tipos de madeira e “lasur”. Obtivéronse uns valores que representan o cambio óptico debido á degradación da madeira. Desta maneira, con todos estes valores, puidéronse realizar unhas gráficas posteriores. Fixéronse un total de 11 gráficas diferentes, 6 delas analizando os cambios de color en cada un dos tipos de madeira segundo o verniz que estas tiñan e outras 5 que analizaban como cada tipo de verniz afectara á degradación das diferentes madeiras.

### **3. Resultados**

En primeiro lugar móstrase, na figura 5, o cambio óptico debido á degradación da madeira fronte ao “lasur“ e aceite empregado para os 6 tipos de madeira utilizada.

En segundo lugar móstrase, na figura 6, o cambio óptico debido á degradación da madeira fronte á madeira empregada para os distintos tipos de “lasur“ e aceites empregados.



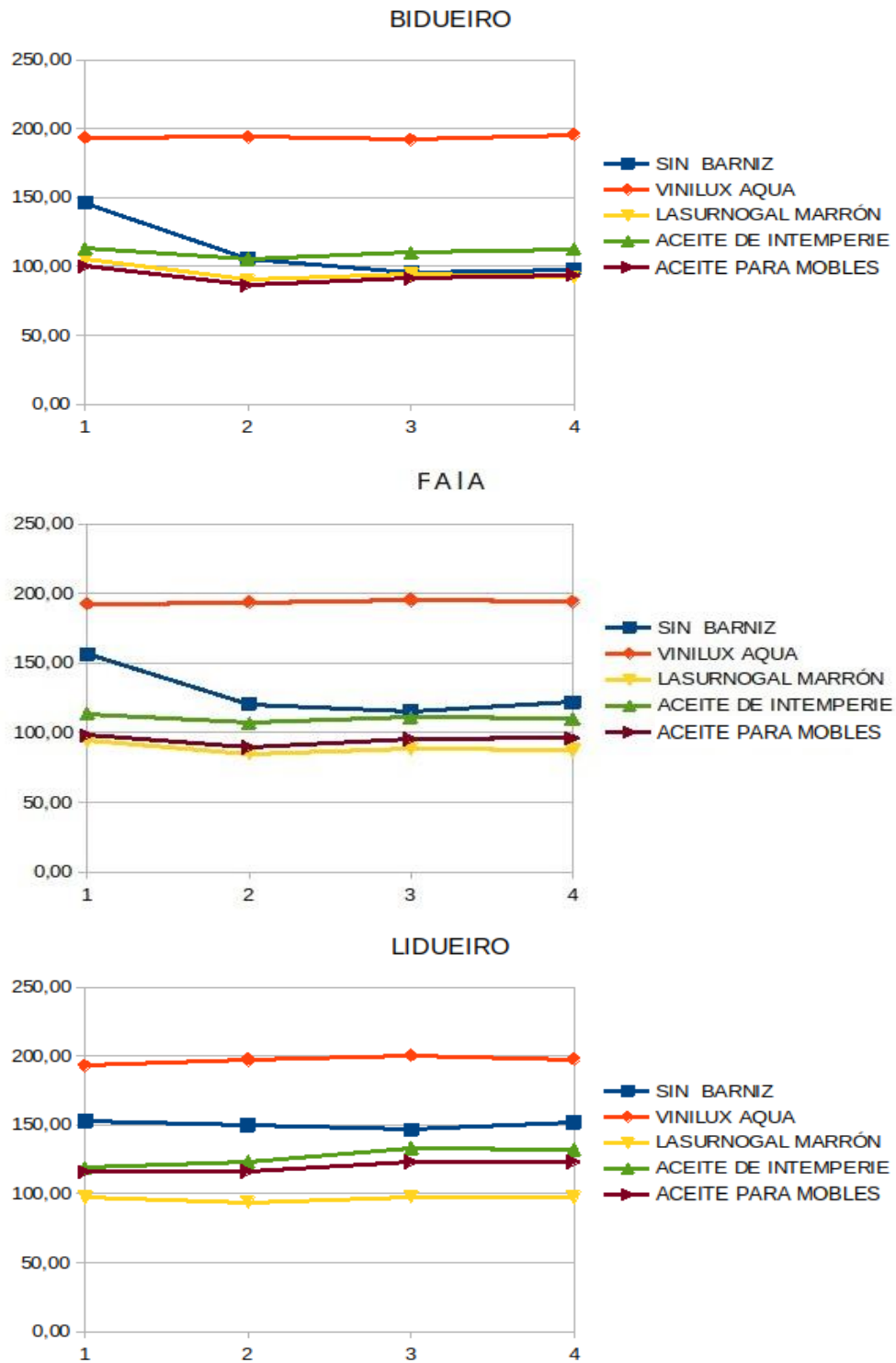
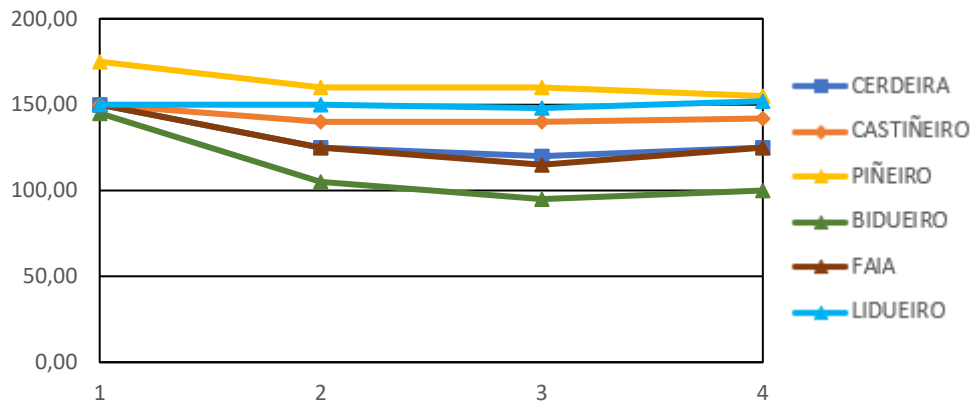
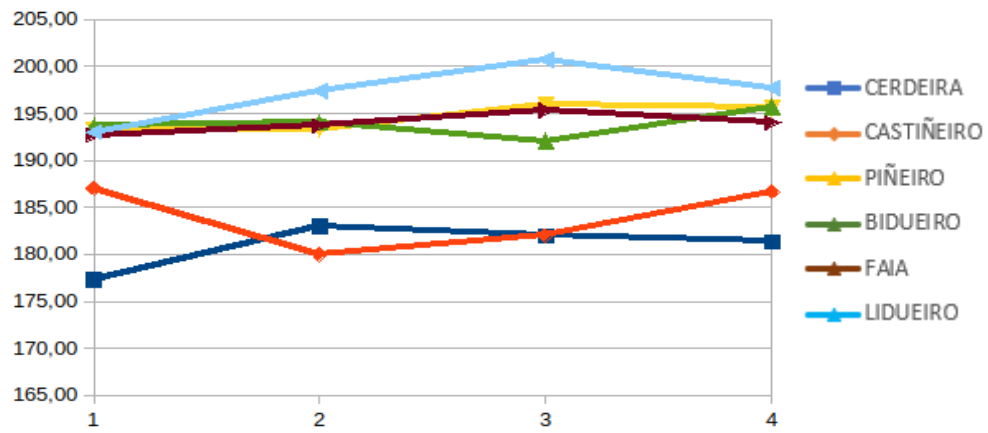


Figura 5. Cambio óptico debido á degradación da madeira fronte ao “lasur“ e aceite empregado para os 6 tipos de madeira escollidos.

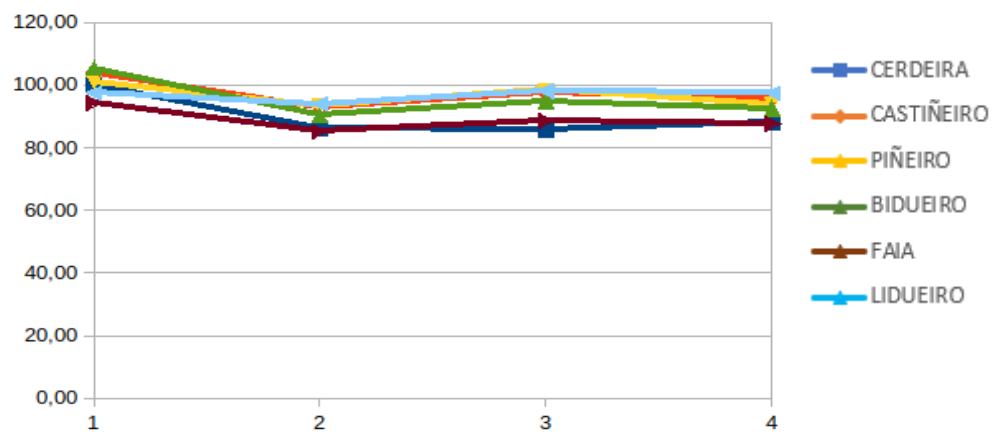
SIN BARNIZ



VINILUX AQUA



LASURNOGAL MARRÓN





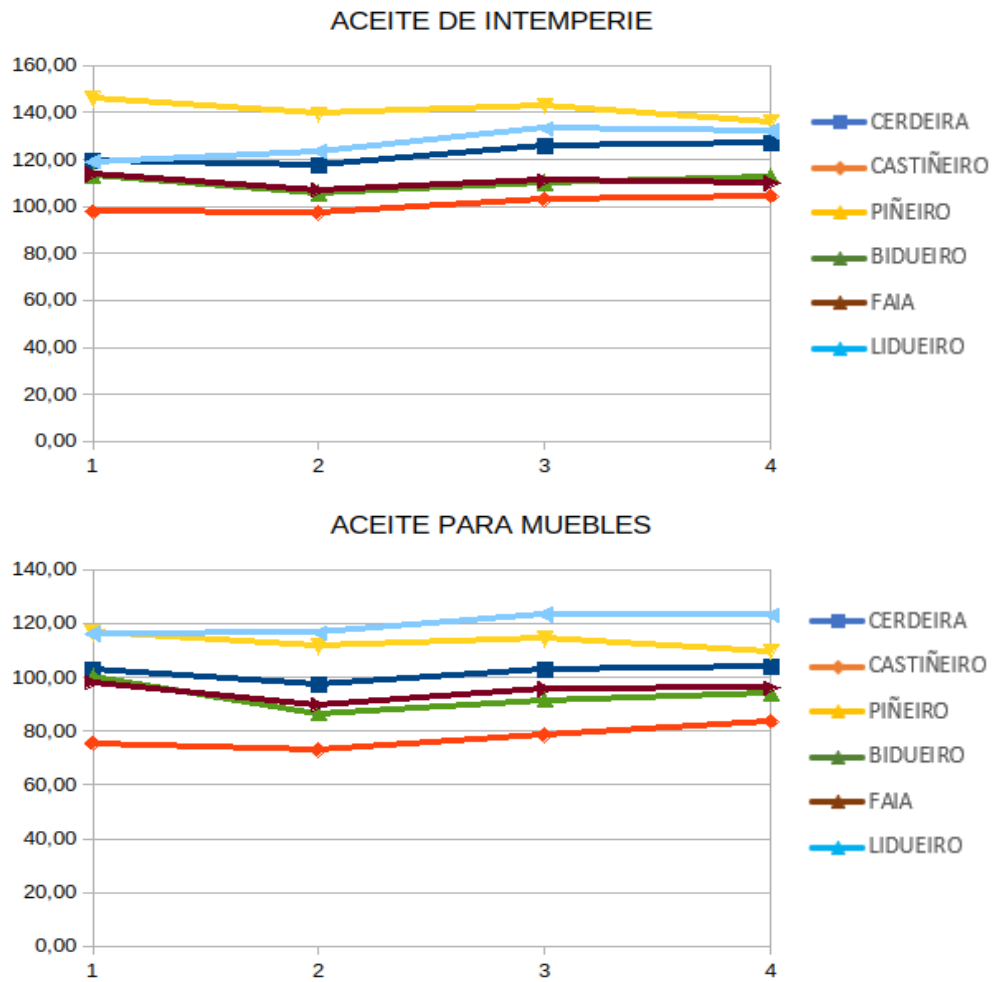


Figura 6. Cambio óptico debido á degradación da madeira fronte á madeira empregada para os distintos tipos de “lasur“ e aceites empregados.

#### 4. Conclusións

Segundo as gráficas pódense observar unha serie de cambios máis ou menos significativos segundo o verniz e a madeira utilizada en cada caso.

No caso do tipo de madeira percíbese un maior cambio na súa degradación na cerdeira, no bidueiro e na faia (sempre tendo en conta que varían segundo o “lasur” aplicado nelas). Por contra, as madeiras cuxa degradación foi ínfima son o piñeiro, o lidueiro e o castiñeiro (en orde de maior a menor degradación). Con estes datos é posible afirmar que as madeiras como o piñeiro ou o castiñeiro, sen ter en conta o “lasur” aplicado neles, son moito máis resistentes aos condicionantes atmosféricos que, por exemplo, o bidueiro.

Por outro lado, a observación da degradación das madeiras segundo os “lasures” aplicados nelas leva á afirmación que certos “lasures” son máis eficientes ca outros. En primeiro lugar débese destacar a degradación das madeiras sen ningún tipo de tratamento. Estas madeiras sofren un cambio radical no seu aspecto mostrando incluso restos de mofo e humidades que produciron roturas en certos tipos de madeiras. De outro modo, as madeiras tratadas con calquera tipo de “lasur” sufrirían unha menor degradación.

Obsérvase que ambos aceites (intemperie e especial para mobles) son os que proporcionan maior estabilidade da madeira. Isto débese ao seu aspecto aceitoso que repele a auga

(condicionante ao que principalmente se expuxo o panel de ensaio). Ademais o “lasur” nogueira marrón, a pesar de non ser de carácter aceitoso, proporciona un bo illamento da madeira fronte aos factores atmosféricos. Por último obsérvase que o “lasur” denominado Vinilux Aqua, a pesar de protexer bastante a madeira, sofre lixeiros cambios na súa tonalidade. Isto podería deberse por mor da súa cor branca orixinal que é moito máis susceptible aos cambios visuais.

Con todos estes resultados chégase a unha conclusión final, que parece indicar que algunhas madeiras, coma o piñeiro, o lidueiro e o castiñeiro, son máis resistentes que as outras analizadas. Tamén que certos “lasures” (nogueira marrón) e aceites (intemperie e especial para mobles) son máis fiables á hora de protexer a madeira.

#### 5. Bibliografía

- <https://www.majofesa.com/maderas-tipos-y-caracteristicas/>
- [https://biofa.es/es/lasures-y-lacas/57-100-vernlux-aqua-laca-interior-blanca.html#/73-litros-1\\_1](https://biofa.es/es/lasures-y-lacas/57-100-vernlux-aqua-laca-interior-blanca.html#/73-litros-1_1)
- [https://biofa.es/es/lasures-y-lacas/55-276-lasur-color-1001.html#/79-litros-075\\_1/91-color\\_estandar-68\\_pino](https://biofa.es/es/lasures-y-lacas/55-276-lasur-color-1001.html#/79-litros-075_1/91-color_estandar-68_pino)
- [https://biofa.es/es/aceites-para-exterior/29-64-aceite-protector-intemperie.html#/73-litros-1\\_1](https://biofa.es/es/aceites-para-exterior/29-64-aceite-protector-intemperie.html#/73-litros-1_1)
- [https://biofa.es/es/aceites-para-interior/58-102-aceite-para-muebles-2049-sin-disolventes.html#/81-litros-0150\\_1](https://biofa.es/es/aceites-para-interior/58-102-aceite-para-muebles-2049-sin-disolventes.html#/81-litros-0150_1)