

## ESCO-ENSEMBLES: ENSEMBLES DE MODELOS HIDRODINÁMICOS APLICADOS EN ÁREAS ESTUARINAS Y COSTERAS

Isabel IGLESIAS<sup>1</sup>, José Luís PINHO<sup>2</sup>, Ana BIO<sup>1</sup>, Paulo AVILEZ-VALENTE<sup>1,3</sup>,  
Willian MELO<sup>2</sup>, Mariana CRUZ<sup>4</sup>, Ana GOMES<sup>2</sup>, José Manuel VIEIRA<sup>2</sup>, Luísa  
BASTOS<sup>1,5</sup>, Fernando VELOSO-GOMES<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Interdisciplinary Centre of Marine and Environmental Research  
(CIIMAR/CIMAR), University of Porto, Edifício do Terminal de Cruzeiros do Porto  
de Leixões, Avenida General Norton de Matos, S/N, 4450-208 Matosinhos,  
Portugal.*

<sup>2</sup>*Center of Territory, Environment and Construction, Department of Civil  
Engineering, University of Minho, Braga, Portugal.*

<sup>3</sup>*Faculty of Engineering, University of Porto, Porto, Portugal, Rua Dr. Roberto  
Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal.*

<sup>4</sup>*Faculty of Sciences, University of Minho, Braga, Portugal.*

<sup>5</sup>*Department of Geosciences, Environment and Spatial Plannings, Faculty of  
Sciences, University of Porto, Rua Campo Alegre 687, 4169 - 007 Porto, Portugal.*

[iiglesias@ciimar.up.pt](mailto:iiglesias@ciimar.up.pt), [jpinho@civil.uminho.pt](mailto:jpinho@civil.uminho.pt), [anabio@ciimar.up.pt](mailto:anabio@ciimar.up.pt),  
[pvalente@fe.up.pt](mailto:pvalente@fe.up.pt), [willianwm94@gmail.com](mailto:willianwm94@gmail.com), [marianarmcruz@gmail.com](mailto:marianarmcruz@gmail.com),  
[carolina\\_gomes@live.com](mailto:carolina_gomes@live.com), [jvieira@civil.uminho.pt](mailto:jvieira@civil.uminho.pt), [lcbastos@fc.up.pt](mailto:lcbastos@fc.up.pt),  
[vgomes@fe.up.pt](mailto:vgomes@fe.up.pt)

### RESUMEN

Los modelos numéricos son herramientas imprescindibles para simular la hidromorfodinámica de los sistemas acuáticos, permitiendo anticipar y prever los efectos de intervenciones antropogénicas, eventos extremos y alteraciones climáticas, y promoviendo una gestión costera eficaz e integrada. Sin embargo, los resultados de los modelos presentan incertidumbres relacionadas con errores e imprecisiones en el análisis de los resultados y en las condiciones iniciales y de forzamiento. Dada la necesidad de tener pronósticos precisos, es crucial implementar nuevas soluciones para evitar tales errores. El principal objetivo del proyecto *EsCo-Ensembles* es aplicar la técnica de *ensembles* para mejorar las previsiones en zonas estuarinas. Se escogieron dos modelos numéricos que simulaban la hidromorfodinámica de dos estuarios portugueses considerando diversas condiciones históricas. Los resultados de los modelos se combinaron utilizando una media ponderada, demostrando que los mejores resultados de previsión se obtuvieron para *ensembles* contruidos con técnicas que consideran las capacidades predictivas de los modelos individuales. La técnica de *ensembles* será aplicada para prever estados futuros asociados con la elevación del nivel del mar prevista y situaciones extremas. Resultados preliminares demuestran un agravamiento del nivel de inundación asociado con eventos extremos en el estuario del Duero debido a la configuración de la desembocadura, pero con poco efecto de la subida del mar. Sin embargo, en el estuario del Miño se ha observado un efecto claro de la subida del nivel del mar a lo largo del estuario, disminuyendo las velocidades y aumentando las zonas de inundación.

**Palabras clave:** Estuarios, hidrodinámica, modelos numéricos, eventos extremos, cambio climático.

## **ABSTRACT**

Numerical models are essential tools for simulating the hydromorphodynamics of aquatic systems, making it possible to anticipate and predict the effects of anthropogenic interventions, extreme events and climatic changes, and promoting effective and integrated coastal management. However, the results of the models present uncertainties related to errors and inaccuracies in the analysis of the results and in the initial and forcing conditions. Given the need to have accurate forecasts, it is crucial to implement new solutions to avoid such errors. The main objective of the *EsCo-Ensembles* project is to apply the *ensemble* technique to improve forecasts in estuarine areas. Two numerical models were chosen to represent the hydromorphodynamics of two Portuguese estuaries considering various historical scenarios. The models' results were combined using a weighted average, showing that the best forecast results were obtained for ensembles built with techniques that consider the predictive capacities of the individual models. The *ensemble* technique will be applied to predict future states associated with predicted sea level rise and extreme situations. Preliminary results show an aggravation of the flood level associated with extreme events in the Duero estuary due to the configuration of the mouth, but with little effect of the sea level rise. However, in the Miño estuary, a clear effect of the sea level rise along the estuary has been observed, with a reduction in velocities and increased flood areas.

**Key words:** Estuaries, hydrodynamics, numerical models, extreme events, climatic change.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los estuarios son sistemas costeros particularmente dinámicos, con fuertes variaciones de salinidad, corrientes, estratificación y calidad del agua. Están sujetos a la influencia de fenómenos meteorológicos, oceanográficos y geomorfológicos como viento, mareas, oleaje, corrientes, caudal, transporte de sedimentos, erosión y acreción. Poseen ecosistemas altamente productivos, sirviendo de hábitat para numerosas especies. Así, estas áreas tienen una importancia estratégica desde el punto de vista ambiental, económico y social. Proporcionan múltiples servicios ecosistémicos, como pesca y otros recursos alimentarios, ocio, turismo, energía, agua y materias primas, lo que hace que sean densamente poblados y altamente urbanizados. Esta intensificación urbana y de las actividades económicas asociadas, junto con la artificialización de las zonas circundantes, hace que los estuarios sean regiones altamente vulnerables a los efectos de eventos extremos, alteraciones climáticas e intervenciones antrópicas. En el contexto actual de cambio climático se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos (IPCC, 2012),

con graves consecuencias para la sociedad y el medio ambiente, y con impactos en poblaciones, infraestructuras, hábitats y servicios ecosistémicos.

Por lo tanto, existe una necesidad urgente de producir información científica y técnica precisa para apoyar una gestión costera sostenible, reducir la exposición y la vulnerabilidad de las áreas estuarinas, mitigar los riesgos asociados con diferentes escenarios climáticos y promover la adaptación y la resiliencia de las comunidades a potenciales impactos adversos. Los modelos numéricos son herramientas valiosas que permiten obtener esta información, permitiendo una comprensión detallada de los procesos y fenómenos que tienen lugar en estas áreas. La simulación numérica de procesos hidrodinámicos en sistemas estuarinos es esencial para evaluar los efectos de las componentes que fuerzan los modelos, de las condiciones de contorno seleccionadas, de las características topográficas y batimétricas consideradas o de la presencia de estructuras antrópicas. Sin embargo, cada modelo presenta sus propios pros y contras, y sus resultados, incertidumbres y eventuales errores dependen de muchos factores. La necesidad de pronósticos precisos, donde se minimicen los errores de este tipo, resalta la importancia de encontrar e implementar nuevas soluciones para obtener mejores resultados numéricos. Una de las técnicas que puede ser utilizada es la técnica de *ensembles*, que puede minimizar la incertidumbre combinada en los datos de entrada, los parámetros del modelo y la estructura del modelo (Mohan Das et al., 2017).

Dado que la técnica de *ensembles* no ha sido completamente implementada con modelos numéricos hidrodinámicos en regiones estuarinas, el objetivo principal de este estudio es demostrar si esta técnica es eficaz para mejorar los pronósticos hidrodinámicos y reducir la incertidumbre de los resultados. Para cumplir este objetivo se eligieron varias simulaciones (verano, invierno y evento extremo) y dos estuarios diferentes (Duero y Miño), considerando diversas técnicas estadísticas para la construcción del *ensemble*.

### **1.1. La técnica de *ensembles***

La técnica de *ensembles* consiste en combinar varias simulaciones de modelos numéricos utilizando métodos estadísticos. Los resultados obtenidos se sintetizan en un solo resultado que presenta menor sesgo y varianza que las soluciones individuales, mejorando así la precisión, confiabilidad y consistencia de la predicción final (Iglesias et al. 2022). Esta técnica es habitual en ciencias atmosféricas y climáticas para la predicción meteorológica, estacional, interanual y de cambio climático (WMO, 2012; IPCC, 2021). En hidrodinámica estuarina esta técnica no ha sido adaptada por completo, con pocos trabajos realizados en esta área (Mohan Das et al., 2017; Iglesias et al., 2019a; Iglesias et al., 2022).

Podemos distinguir dos clases principales de *ensembles*, los que utilizan los resultados de un único modelo y los que se calculan con múltiples modelos. Los conjuntos compuestos por un solo modelo combinan varias simulaciones que consideran diferentes condiciones iniciales y/o de contorno. El *ensemble* multimodelo utiliza varios modelos numéricos con diferentes complejidades y estructuras que se ejecutan utilizando condiciones iniciales y de contorno similares (Iglesias et al., 2019a). Un *superensemble* es un *ensemble* multimodelo que utiliza múltiples condiciones iniciales para cada uno de los modelos considerados. Las ventajas del *superensemble*

es que consigue reducir al mismo tiempo la componente aleatoria en los errores del modelo y la incertidumbre de las condiciones iniciales.

### **1.2. Características de las áreas de estudio**

Los estuarios seleccionados para este estudio fueron los estuarios de los ríos Miño y Duero, localizados en el norte de Portugal (Figura 1) porque presentan dinámicas y condiciones ambientales muy diferentes, además de diferencias en los caudales medios y máximos, morfología, batimetría, configuración de sus márgenes y nivel de urbanización.

El río Miño desemboca en el océano Atlántico entre A Guarda (España) y Caminha (Portugal). Es un estuario poco profundo (profundidad media de 4 m referido al NMM - nivel medio del mar, Figura 1) de 40 km de extensión. La entrada de agua dulce está controlada por la presa de Frieira, localizada 80 km aguas arriba de la desembocadura. Sus caudales medios hacen que el tiempo de residencia medio del agua sea de 1,5 días. Este largo tiempo de residencia, junto con la pequeña área del estuario y los volúmenes de agua relativamente bajos, hacen que los contaminantes puedan permanecer más tiempo, poniendo en peligro su gran diversidad de hábitats. Es un estuario parcialmente mixto, donde puede ocurrir estratificación vertical debido a la generación de cuñas salinas. Su dinámica está fuertemente influenciada por la marea, con un efecto directo sobre el transporte de sedimentos. La parte baja del estuario presenta un ensanchamiento que se traduce en una disminución de la velocidad de la corriente, creando condiciones favorables para la deposición de sedimentos, lo que ha provocado restricciones a la navegación y la aparición de islas y bancos de arena durante la marea baja. Esto es más notorio en condiciones primaverales de mareas bajas, cuando la conexión entre la ría y el mar se restringe a dos canales poco profundos (Iglesias et al., 2019b).

El río Duero desemboca en el océano Atlántico a través de un estuario rodeado por dos grandes ciudades: Oporto y Vila Nova de Gaia. Es un estuario estrecho y altamente dinámico, con regímenes torrenciales que producen fuertes corrientes e inundaciones recurrentes (Bastos et al., 2012). Tiene una configuración batimétrica irregular, con profundidades entre 0 y 10 m, y algunas regiones más profundas que pueden ir hasta los 28 m de profundidad. Su dinámica está condicionada por el caudal del río, siendo muy dependiente tanto de las condiciones naturales como de los horarios de generación hidroeléctrica en la presa de Crestuma-Lever. Esta presa limita la extensión del estuario a 21 km de longitud. En la margen sur de la desembocadura existe un humedal y una lengua de arena que obstruye parcialmente la entrada y protege el estuario. Esta lengua de arena está condicionada por procesos naturales (viento, lluvia, caudales de ríos, oleaje, mareas y tormentas) y antrópicos (construcción de escolleras y presas, extracción de arena y dragado). Para estabilizarla, se hicieron intervenciones en la desembocadura del estuario, construyendo un nuevo dique y extendiendo el ya existente. Estas estructuras, terminadas en 2008, han interferido con los patrones hidromorfodinámicos, colmatando el humedal y aumentando significativamente el área y el volumen de la lengua de arena en un período relativamente corto (10 años) (Bastos et al., 2012). Su configuración actual reduce la probabilidad de ruptura durante eventos extremos con

valores altos de caudal, por lo que se esperan efectos más severos durante las inundaciones (Iglesias et al., 2019a).

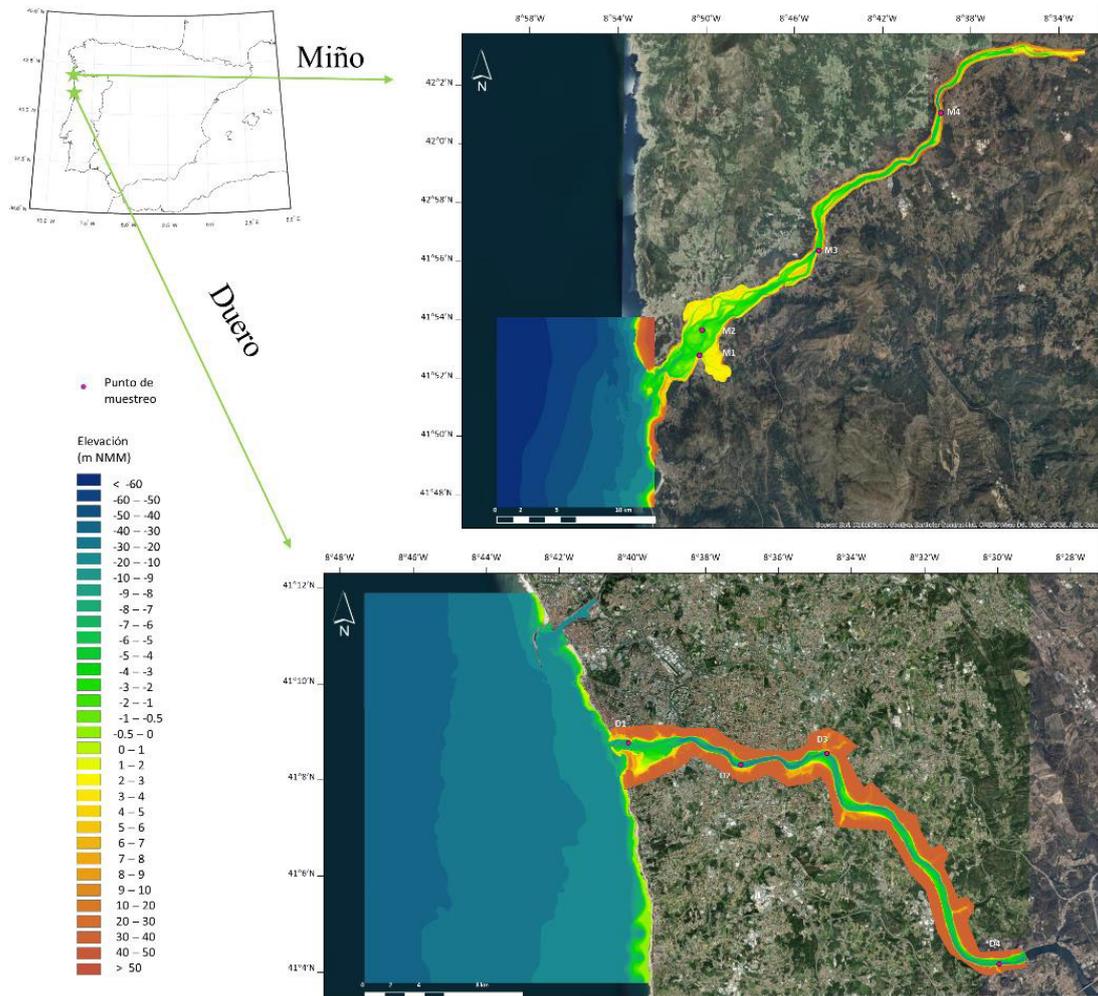


Fig. 1: Localización, topografía y batimetría de los estuarios del Miño (arriba) y del Duero (abajo).

## 2. MÉTODOS

Los modelos numéricos seleccionados son el TELEMAC-MASCARET (OTM; <http://www.opentelemac.org/>) y el Delft3D (D3D; <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>) debido a su capacidad de reproducir el comportamiento hidrodinámico de áreas estuarinas. Los dos modelos ya fueron previamente aplicados y calibrados para los dos estuarios considerando condiciones normales y eventos extremos (Iglesias et al., 2019a, 2021; Melo et al., 2020; Melo et al., 2022).

Las simulaciones fueron programadas para construir un *superensemble*, maximizando el número de miembros que lo forman. Los modelos se ejecutaron para condiciones históricas, lo que permitirá calibrar el *superensemble* con mediciones *in situ* de la elevación del agua en varios puntos de muestreo (M1 a M4 para el Miño y D1 a D4 para el Duero, Figura 1). Se consideraron tres tipos de simulaciones con condiciones

diferentes de caudal: verano, invierno y evento extremo, que ocurrieron durante el 2006 (Tabla 1). Las simulaciones realizadas consideraron un período de 24 horas con condiciones constantes de elevación y de caudal en la frontera oceánica y del río, respectivamente, precedidos por un período de *spin up* donde los valores son introducidos con una rampa para evitar inestabilidades numéricas. Dada la dirección predominante del viento, el pequeño tamaño de los estuarios y la configuración cerrada de sus desembocaduras, se despreciaron los forzamientos atmosféricos (viento y presión a nivel del mar) y de oleaje.

	Miño			Duero		
	Verano	Inverno	Evento extremo	Verano	Inverno	Evento extremo
Fecha	25/08/2006	23/02/2006	08/12/2006	17/08/2006	19/12/2006	25/11/2006
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	42	495	2476	49	1205	7795
Desviación típica (m <sup>3</sup> /s)	61	528	-	201	979	-

Tabla 1: Caudal considerado para cada simulación y la desviación típica del mes simulado (Fuente: SNIRH - Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos y EDP – Energias de Portugal).

Para construir el *superensemble*, se consideraron simulaciones que combinaron distintos valores de caudal y de elevación. El caudal se incluyó como: (a) valor registrado, (b) valor registrado más la desviación típica del mes simulado, y (c) valor registrado menos la desviación típica del mes simulado (Tabla 1). Las desviaciones típicas se calcularon utilizando los caudales medios diarios medidos en Foz do Mouro (1973–2020), para el estuario del Miño, y los caudales medios horarios en Crestuma-Lever (1998–2020), para el estuario del Duero. La elevación introducida en la frontera oceánica consideró diversos valores: (a) niveles de marea máximos y (b) mínimos registrados el día de la simulación, así como (c) la marea anual más alta, (d) la marea viva más alta, (e) la marea muerta más alta, (f) la marea anual más baja, (g) la marea viva más baja y (h) la marea muerta más baja (Tabla 2). Para el evento extremo no se tuvo en cuenta la desviación típica del caudal, pero se incluyó una elevación adicional de 1,10 m asociada con una marea de tempestad.

Después de ejecutar los modelos, los *ensembles* se construyen utilizando técnicas estadísticas que reúnen las diversas salidas en una única previsión. Hay muchos métodos posibles, lo que implica que se tengan que hacer experimentos para escoger cual es el que mejor se adapta para cada problema. La técnica más simple es usar la mediana o la media aritmética de las salidas de los modelos, que generalmente se selecciona cuando no existen observaciones *in situ* para comparar. Sin embargo, diferentes modelos numéricos a menudo tienen diferentes capacidades de simulación, y una variable puede estar mejor representada por un modelo y peor por otro. Considerar la capacidad predictiva de cada modelo individual puede mejorar la previsión. Esto puede hacerse a través de las medias ponderadas, asignando un coeficiente de ponderación o peso a cada modelo según su desempeño. Este peso se

calcula comparando los resultados numéricos de los modelos individuales con observaciones *in situ*. En este caso se escogieron el error absoluto (MP-EA) y el error cuadrático (MP-EC) como coeficientes de ponderación.

Para evaluar los resultados finales del *ensemble*, estos fueron comparados con los datos *in situ* utilizando el error absoluto (EA).

Niveles considerados	Miño	Duero
	Elevación (m)	Elevación (m)
Nivel de marea máximo verano	1.39	0.78
Nivel de marea mínimo verano	-1.30	-0.76
Nivel de marea máximo invierno	0.79	1.06
Nivel de marea mínimo invierno	-0.64	-1.05
Nivel de marea máximo evento extremo	1.32	1.20
Nivel de marea mínimo evento extremo	-1.18	-1.07
Marea anual más alta	1.84	1.86
Marea viva más alta	1.47	1.48
Marea muerta más alta	0.66	0.66
Marea anual más baja	-1.8	-1.79
Marea viva más baja	-1.47	-1.48
Marea muerta más baja	-0.67	-0.65

Tabla 2: Niveles de elevación considerados en la frontera oceánica.

Además de las simulaciones para demostrar la validez del *superensemble*, fueron definidas otras simulaciones que pretenden representar el efecto conjunto de las mareas y el aumento del nivel del mar con parámetros asociados con eventos extremos como caudales de inundación, sobreelevación meteorológica y ondulación extrema. Estas simulaciones consideraron caudales máximos de inundación de los dos ríos para los períodos de retorno de 100 y 1000 años. Para el cálculo se asumió que los valores siguen el comportamiento de la ley de Gumbel. Los valores del nivel del mar fueron extraídos del trabajo de Vousdoukas et al. (2017) para la localización de cada estuario, considerando los valores medios de elevación para los RCPs 4.5 y 8.5 en 2100. Las simulaciones se resumen en la Tabla 3.

	Periodo retorno (años)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)		Simulación	Elevación (m)
		Miño	Duero		
S1	100	6038	19814	Histórico	4,0
S2				RCP 4.5 2100	4,5
S3				RCP 8.5 2100	4,8
S4	1000	8262	27962	Histórico	4,3
S5				RCP 4.5 2100	4,8
S6				RCP 8.5 2100	5,0

Tabla 3: Simulaciones para proyecciones futuras

### 3. RESULTADOS

Las simulaciones realizadas muestran que, globalmente, los errores del OTM son inferiores a los errores del D3D (Tabla 4). La media del error mínimo del OTM es 0,299 m, mientras que la del D3D es 0,383 m. Esta diferencia no se mantiene igual para todos los casos considerados. En las simulaciones de invierno y eventos extremos, OTM superó a D3D con errores mínimos promedio de 0,093 m y 0,145 m,

para invierno, y 0,444 m y 0,649 m, para eventos extremos. Sin embargo, para la simulación de verano, los errores de los dos modelos son similares, con un error mínimo promedio de 0,388 m y 0,389 m para OTM y D3D, respectivamente. Si analizamos los estuarios representados, el estuario del Miño presentó soluciones más precisas, con un error mínimo medio global de 0,153 m y 0,191 m, para OTM y D3D, respectivamente. Los errores mínimos promedio globales para el Duero fueron 0,420 m (OTM) y 0,543 m (D3D). Las diferencias entre los errores podrían estar relacionadas con la malla numérica implementada para cada uno de los modelos. D3D utiliza una malla regular curvilínea y OTM una irregular no estructurada de elementos triangulares, la cual puede adaptarse mejor a la forma de los estuarios, proporcionando mejores resultados.

Los errores mínimos más altos fueron obtenidos para la simulación de evento extremo en D3 (Tabla 4). Los eventos extremos pueden ser difíciles de modelar debido a la complejidad de su dinámica, los fuertes procesos erosivos y las inundaciones, que presentan un comportamiento hidrodinámico distinto al del cauce principal. Se asumió que los datos medidos representan la realidad. Sin embargo, no se puede descartar que estas grandes diferencias entre los niveles de agua medidos y simulados puedan estar relacionadas con errores en las campañas de campo o imprecisiones en los modelos numéricos para esas ubicaciones específicas.

En la Tabla 4 también se muestran la técnica de construcción del *superensemble* que da los mejores resultados para cada simulación, estuario y punto de muestreo. La técnica estadística de construcción del *superensemble* que sobresale es aquella que considera las medias ponderadas. Por lo tanto, es importante seleccionar un método que considere el comportamiento de los modelos de forma individual. MP-EC se destacó como la mejor técnica para las simulaciones con caudales altos (invierno y eventos extremos) mientras que MP-EA funcionó mejor en situaciones de caudal bajo (verano). Estos resultados son independientes del punto de muestreo y del estuario seleccionado. Notar que algunos resultados dan un error absoluto de 0, es decir, por debajo de 1 mm, pudiendo considerar la previsión como perfecta. Para casi todas las simulaciones el *superensemble* obtuvo errores absolutos inferiores a los obtenidos por los modelos individuales, demostrando que los *superensembles* son capaces de mejorar la previsión obtenida con modelos hidrodinámicos aplicados en estuarios.

Las simulaciones que incluyen proyecciones del IPCC parecen demostrar que en el estuario del Miño existe una diferencia en los patrones hidrodinámicos cuando comparamos las simulaciones que consideraron diferentes elevaciones. Este efecto es más evidente en la parte baja del estuario, y puede estar relacionado con menores caudales, con la morfología estuarina y con el ensanchamiento del estuario aguas arriba de su desembocadura. En la parte superior del estuario del Miño (kilómetro 10) ya se nota una dependencia con el caudal (Figura 2). Las simulaciones en el estuario del Duero demuestran que la elevación en el interior del estuario es independiente de la elevación introducida en la frontera oceánica, siendo altamente dependiente del caudal impuesto (Figura 2).

Estuario	Simulación	Punto	EA mínimo (m)		Técnica <i>ensemble</i>	EA <i>ensemble</i> (m)
			D3D	OTM		
Miño	Verano	M1	0.492	0.469	MP-EA	0
		M3	0.291	0.302	MP-EA	0
		M4	0.303	0.303	MP-EA	0
	Invierno	M1	0.001	0.004	MP-EC	0.001
		M2	0.074	0.015	MP-EC	0.009
		M3	0.082	0.253	MP-EC	0.009
		M4	0.116	0.053	MP-EC	0.004
	Evento extremo	M1	0.162	0.081	Media	0.037
		M3	0.053	0.016	MP-EC	0.002
		M4	0.334	0.035	MP-EC	0.028
Duero	Verano	D1	0.376	0.375	MP-EA	0
		D2	0.431	0.438	MP-EA	0
		D3	0.430	0.429	MP-EA	0
		D4	0.402	0.397	Media	0.024
	Invierno	D1	0.505	0.286	MP-EA	0
		D2	0.123	0.065	MP-EA	0
		D3	0.249	0.028	MP-EC	0.013
		D4	0.011	0.040	MP-EC	0.008
	Evento extremo	D1	0.096	0.609	MP-EC	0.012
		D2	1.679	0.592	MP-EC	1.390
		D3	2.036	1.737	MP-EC	2.506
		D4	0.182	0.041	MP-EC	0

Tabla 4: Mínimos EAs obtenidos con cada modelo para cada simulación y punto de muestreo, técnica de construcción del superensemble que proporciona los mejores resultados y EAs del superensemble construido con dicha técnica.

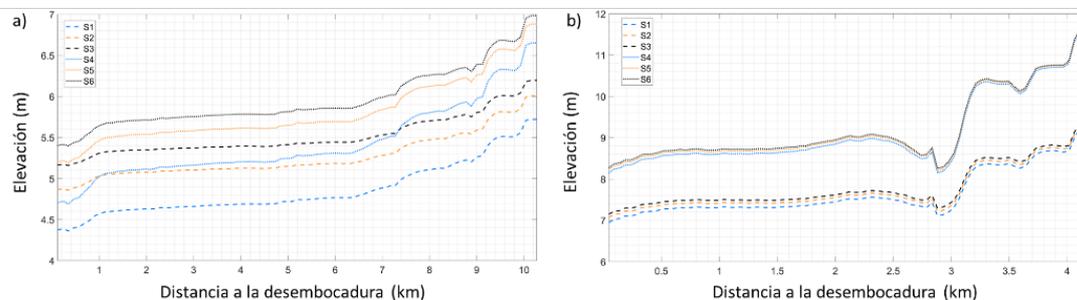


Fig. 2: Elevación de la superficie libre (m) obtenida con el OTM para un perfil longitudinal entre la desembocadura del estuario y a) 1 km aguas arriba de la ilha da Boega (estuario del Miño) y b) Ponte D. Luiz (estuario del Duero). El cero equivale a la desembocadura.

#### 4. DISCUSIÓN

Este trabajo ha demostrado que la técnica de *ensembles* consigue mejorar la previsión de los modelos hidrodinámicos en estuarios. Esto fue efectivo para dos estuarios diferentes (Miño y Duero), tres tipos de simulaciones (verano, invierno y evento extremo) y en diversos puntos en cada estuario. Así, los *ensembles* consiguen contornar las imprecisiones de los modelos y producir mejores resultados que los modelos individuales, con soluciones más próximas de la realidad. Esto funciona incluso para las simulaciones que presentan más dificultad e inexactitud, como las de

eventos extremos. Las técnicas estadísticas de construcción del *ensemble* que demostraron ser más efectivas son aquellas que consideraron, por medio de medias ponderadas, las capacidades de cada modelo individual en reproducir la dinámica estuarina. No se encontraron diferencias relevantes entre los dos estuarios ni asociadas con la ubicación de las mediciones de campo, lo que demuestra que esta técnica puede aplicarse ampliamente a cualquier estuario. Así, se ha demostrado que el uso combinado de diferentes modelos reduce la incertidumbre en los resultados obtenidos y aumenta la capacidad, la confianza y la consistencia de los pronósticos.

Las simulaciones que consideraron condiciones de eventos extremos y elevación del nivel del mar demuestran que los dos sistemas considerados (Miño y Duero) son muy diferentes, y que la subida del nivel del mar no va a tener la misma influencia en cada uno de ellos, reforzando la necesidad de realizar estudios locales para caracterizar completamente cada estuario y evaluar las tendencias futuras eliminando los riesgos de inundaciones. El siguiente paso será la construcción de un *ensemble* que permita predecir, de forma más precisa, los efectos de la subida del nivel del mar esperados dentro de las áreas estuarinas.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Esta investigación fue financiada por el Fondo Estratégico UIDB/04423/2020 y UIDP/04423/2020 a través de fondos nacionales de la FCT—Fundação para a Ciência e a Tecnologia y del Fondo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER). También ha sido bastosfinanciado por el proyecto EsCo-Ensembles (PTDC/ECIEGC/30877/2017), FCT, NORTE 2020, Portugal 2020 y la UE (FEDER).

#### **REFERENCIAS**

- Bastos, L., Bio, A., Pinho, J.L., Granja, H., & da Silva, A.J. (2012). Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 109, 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.05.017>
- Iglesias, I, Venâncio, S., Pinho, J.L., Avilez-Valente, P., Vieira, J. (2019a). Two Models Solutions for the Douro Estuary: Flood Risk Assessment and Breakwater Effects. *Estuaries and Coasts*, 42(2), 348–364. <https://doi.org/10.1007/s12237-018-0477-5>
- Iglesias, I, Avilez-Valente, P., Bio, A., Bastos, L. (2019b). Modelling the Main Hydrodynamic Patterns in Shallow Water Estuaries: The Minho Case Study. *Water*, 11(5), 1040. <https://doi.org/10.3390/w11051040>
- Iglesias, I, Bio, A., Bastos, L., & Avilez-Valente, P. (2021). Estuarine hydrodynamic patterns and hydrokinetic energy production: The Douro estuary case study. *Energy*, 222, 119972. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119972>
- Iglesias, I., Pinho, J.L., Avilez-Valente, P., Melo, W., Bio, A., Gomes, A., Vieira, J., Bastos, L., Veloso-Gomes, F. (2022). Improving Estuarine Hydrodynamic Forecasts Through Numerical Model Ensembles. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.812255>

- IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Summary for Policymakers. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Melo, W., Pinho, J., Iglesias, I., Bio, A., Avilez-Valente, P., Vieira, J., Bastos, L., Veloso-Gomes, F. (2020). Hydro- and Morphodynamic Impacts of Sea Level Rise: The Minho Estuary Case Study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(6), 441. <https://doi.org/10.3390/jmse8060441>
- Melo, W., Pinho, J.L., Iglesias, I., Bio, A., Avilez-Valente, P., Vieira, J., Bastos, L., Veloso-Gomes, F. (2022). Flood Risk Assessment at the Douro River Estuary. In S. Kolathayar, A. Mondal, S.C. Chian (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 37–49). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5501-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5501-2_4)
- Mohan Das, D., Singh, R., Kumar, A., Mailapalli, D.R., Mishra, A., Chatterjee, C. (2017). A Multi-Model Ensemble Approach for Stream Flow Simulation. In *Modeling Methods and Practices in Soil and Water Engineering* (pp. 71–102). Oakville, ON; Waretown, NJ: Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/b19987-5>
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi, L., Feyen, L., Voukouvalas, E. (2017). Earth's Future Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. *Earth's Future*, 1–20. <https://doi.org/10.1002/ef2.192>
- WMO. (2012). Guidelines on Ensemble Prediction Systems and Forecasting. World Meteorological Organization, Geneva. Retrieved from [http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091\\_en.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/www/Documents/1091_en.pdf)