

# Determinación de la inundación en tramos de ríos afectados por marea basada en la simulación continua de nivel

## *Evaluation of extreme inundation levels in tidal river reaches based on a continuous reconstruction methodology*

Sopelana, J.<sup>a</sup>, Cea, L.<sup>b</sup> y Ruano, S.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Aquática Ingeniería Civil S.L. Areal 42 2 d, 36201 Vigo. E-mail: jsopelana@aquaticaingenieria.com.

<sup>b</sup>Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidade da Coruña. E-mail: luis.ce@udc.es.

<sup>c</sup>Universidade da Coruña. Alumna de International Master in Water Engineering. Curso 2015-2016. E-mail: silda.ruano@gmail.com.

Recibido: 07/09/2017

Aceptado: 23/10/2017

Publicado: 31/10/2017

**Citar como:** Sopelana, J., Cea, L., Ruano, S. 2017. Evaluation of extreme inundation levels in tidal river reaches based on a continuous reconstruction methodology. *Ingeniería del agua*, 21(4), 231-246. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.8770>

## RESUMEN

Las desembocaduras, estuarios y tramos de ríos costeros son elementos hidrodinámicamente complejos debido a la interacción de varias dinámicas generadoras de inundación como la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje y el caudal del río, entre otras. La marea astronómica es una onda larga que se propaga aguas arriba llegando a afectar a tramos de río situados a decenas de kilómetros de la costa. En estos tramos de río, el mismo nivel del agua puede ser el resultado de diferentes combinaciones de las dinámicas mencionadas. Los estudios de peligrosidad y riesgo de inundación en tramos de ríos afectados por la marea se han basado hasta ahora en la aplicación de una condición de contorno de nivel de marea fijada de forma más o menos arbitraria. En España, la *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011), consciente de la complejidad de los procesos y en aras de simplificar, aconseja aplicar una condición de contorno de nivel correspondiente al mismo periodo de retorno que el de la avenida que se esté modelizando. Esta forma de proceder no tiene en cuenta la probabilidad de ocurrencia de varios eventos extremos al mismo tiempo. En este artículo se propone una metodología híbrida de simulación continua que combina la generación de series sintéticas a largo plazo de las variables implicadas, un modelado hidrodinámico bidimensional de alta resolución espacial de la zona de estudio, y técnicas estadísticas de muestreo de datos e interpolación de resultados. La metodología propuesta se ha aplicado a la ciudad costera de Betanzos (noroeste de España), localizada en la confluencia de dos ríos y en la cola de un estuario. Históricamente Betanzos ha tenido problemas de inundación por lo que está catalogada como un Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSI) fluvial y costera. Los resultados se han comparado con los obtenidos aplicando la propuesta de la *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011), observándose que estos últimos sobreestiman de forma considerable los niveles de inundación asociados a un determinado periodo de retorno.

**Palabras clave** | inundación fluvial; marea; régimen extremal; modelos de inundación.

## ABSTRACT

*The hydrodynamics of coastal river reaches is complex due to the interaction of several sources of flooding as the astronomical tide, surge, wave set-up and river discharge. The tidal level might affect several km of river reach. In those reaches, the same inundation water level can result from different combinations of the sea level and river discharge. At the present time, most flood inundation studies in tidal river reaches are based in the application of an arbitrary sea level at the downstream river boundary, without considering the*

*interaction and possible correlations between sea level and river discharge. In Spain, the Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011), recommends to consider the simultaneous occurrence of a sea level and river discharge associated to the same return period. This approach does not consider the probability of simultaneous occurrence of extreme sea level and river discharge. In order to improve this excessively simple and conservative approach, in this paper we propose a continuous simulation methodology that combines the generation of synthetic long-term time series of river discharge and sea level, 2D inundation modelling at a high spatial resolution and statistical sampling and interpolation techniques. The proposed methodology is applied to the coastal town of Betanzos (NW of Spain), which is classified as a high potential flood risk area by the regional authorities. The town is located at the confluence of two river reaches, in the inner part of Betanzos estuary. The inundation levels obtained with the proposed methodology are compared to those obtained with the standard methodology recommended by the Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). Results show that the standard methodology overestimates in a significant way the water levels for a given return period.*

**Key words** | fluvial inundation; tide; extreme flood; inundation models.

## INTRODUCCIÓN

Las inundaciones en los ríos costeros son el resultado de la interacción de diferentes eventos extremos, como caudales del río, oleaje, marea astronómica, marea meteorológica y aguaceros intensos de carácter local. La ocurrencia simultánea de dos o más de estos sucesos es a menudo la causante de las inundaciones en ciudades costeras. En estas zonas el mismo nivel de agua puede ser el resultado de diferentes combinaciones de las dinámicas involucradas, por lo que la probabilidad de ocurrencia de nivel debe ser determinada teniendo en cuenta la probabilidad de todas las posibles combinaciones (Acreman, 1994; Dastorani *et al.*, 2010; Zhong *et al.*, 2013).

El análisis conjunto de diversas causas de inundación en áreas costeras ha sido objeto de diferentes estudios desde los años 90. La mayoría de éstos centrados en la probabilidad conjunta de ocurrencia de nivel del mar y oleaje (Acreman, 1994; Hawkes *et al.*, 2002; Van Gelder *et al.*, 2004; Hawkes, 2008; Larson y Hanson, 2008; Zhong *et al.*, 2013). Otros autores como De Bruijn *et al.* (2014) se centran en el estudio del riesgo de inundación en deltas considerando la acción conjunta de la marea meteorológica y el caudal del río mediante el empleo de simulaciones de Monte Carlo. Algunos autores como Svensson y Jones, (2002) o Svensson y Jones, (2004) realizaron un análisis en la costa sur y oeste de Gran Bretaña sobre un total de 19 mareógrafos y 72 estaciones de aforo para relacionar el surge y el caudal de los ríos, concluyendo que existe cierta dependencia entre ambas variables en estuarios y ríos afectados por marea con cuencas expuestas a vientos del sur-oeste. También concluyeron que la dependencia entre las variables es a menudo mayor cuando se producen el mismo día, aunque también es fuerte cuando se desfasa un día el caudal.

En relación a la acción conjunta de nivel del mar y caudal del río, objetivo del presente artículo, los estudios publicados más relevantes son los de Van der Made, (1969), Acreman, (1994), Reed, (1999), Hawkes y Tawn, (2000), Svensson y Jones, (2002), Svensson y Jones, (2004), Zhong *et al.*, (2013) y Petroliaqkis *et al.*, (2016). La mayoría de los estudios de riesgo de inundación en áreas costeras no tienen en cuenta de forma correcta la probabilidad de ocurrencia conjunta de varios eventos extremos al mismo tiempo (Archetti *et al.*, 2011). En general, los eventos extremos se llegan a asumir como independientes o se usa algún tipo de combinación arbitraria de periodos de retorno (Teakle *et al.*, 2005; Webster *et al.*, 2014).

El denominado método de reconstrucción de la serie histórica (Acreman, 1994) determina la serie histórica de nivel de agua en un punto conocido en base a registros históricos simultáneos de las variables involucradas, mediante el empleo de las conocidas como funciones estructurales (*structure functions*) o la simulación numérica en continuo. Una vez se determina la serie de nivel, se realiza el pertinente análisis estadístico extremal de una única variable. La gran ventaja de este método es que no es necesario realizar un análisis de dependencia específico entre las variables consideradas. Sin embargo, este método no se emplea a menudo debido la carencia de series históricas coetáneas suficientemente largas de las variables involucradas. Además, el hecho de simular series temporales extensas puede llegar a ser inviable debido al elevado coste computacional en caso de emplear modelos numéricos complejos.

En este artículo se plantea una nueva metodología para definir la peligrosidad por riesgo de inundación en estuarios y tramos de río afectados por la marea en los cuales la inundación viene definida fundamentalmente por la combinación de dos variables: el caudal del río y el nivel del mar. La metodología propuesta, descrita en el apartado 2, se basa conceptualmente en la descrita por Acreman (1994) de simulación en continuo, pero aplicando mejoras como es el empleo de un modelo hidrodinámico bidimensional de alta resolución espacial y de series de datos sintéticas de 500 años de duración. Para poder definir la serie histórica de nivel con tiempos de cálculo computacional razonables se ha adaptado la metodología híbrida de Camus *et al.* (2011a), según la cual se reconstruye una serie histórica de una variable objetivo (predictando) en base a los resultados del modelado numérico de unos casos característicos previamente seleccionados combinando las variables de partida (predictores). Así, la metodología propuesta se puede resumir en los siguientes pasos: 1) Definición de los predictores y la escala temporal; 2) Generación sintética de las series temporales históricas; 3) Selección de un número reducido de casos característicos; 4) *Downscaling* de los predictores en los casos seleccionados; 5) Simulación numérica mediante modelo bidimensional de los casos característicos; 6) Reconstrucción de la serie temporal del nivel de agua en base a los resultados del modelo numérico. Con esta metodología se puede implementar fácilmente el efecto del aumento del nivel medio del mar debido al cambio climático, así como estudiar posibles escenarios futuros.

La metodología propuesta se aplica en el apartado 3 al caso real de Betanzos (ARPSI costera ES014-CO-12-01-03-C, ARPSI fluvial ES014-CO-12-01-01). Betanzos es una ciudad histórica, ubicada en la confluencia del río Mendo con el Mandeo, en la cola del estuario de Betanzos. Betanzos ha sufrido inundaciones de forma frecuente, la mayoría de ellas asociadas a situaciones de mareas vivas.

## METODOLOGÍA

La metodología propuesta en el presente artículo se basa en la reconstrucción de la serie histórica de nivel del mar (predictando) en base a series históricas coetáneas de las principales variables involucradas en los procesos de inundación (predictores). En ríos costeros y estuarios con meso y macro mareas, los predictores más comunes son el caudal del río y el nivel del mar, compuesto por la suma de la marea astronómica y meteorológica. Además, en pequeñas cuencas, con tiempos de concentración rápidos, debe considerarse la variación diaria del nivel del mar y del caudal con el objetivo de caracterizar correctamente la probabilidad de ocurrencia simultánea del pico del hidrograma y de la pleamar (Hughes y Gorji-Bandpy, 2001). Por todo ello, a la hora de definir los predictores de inundación en zonas sometidas a diferentes dinámicas, es determinante conocer la escala temporal de las dinámicas y entender los procesos que dan lugar al desbordamiento del río y la consecuente inundación. En el norte de España con mareas vivas que pueden alcanzar los 4.50 m, la dinámica asociada a la marea astronómica es mucho más determinante que la marea meteorológica, con valores máximos de 0.50 m. Sin embargo, en el litoral mediterráneo puede ocurrir lo contrario.

La metodología propuesta se puede estructurar en los siguientes pasos (Figura 1):

1. Definición de los predictores a escala diaria. El caudal del río y el nivel del mar son dinámicas no estacionarias que pueden tener diferentes escalas temporales. El ciclo de marea astronómica en la mayoría de las zonas costeras es diurna o semidiurna, mientras que la duración del hidrograma de un río puede variar desde horas hasta varios días en función del tiempo de concentración de la cuenca vertiente. El primer paso de la metodología propuesta consiste en definir a escala diaria las series de datos de los diferentes predictores. Así, el caudal de río se puede definir como el caudal medio diario, coincidiendo con la forma de medir en los aforos de forma tradicional, o máximo diario. El nivel del mar se puede caracterizar mediante la carrera de marea astronómica. En cuanto al surge se puede suponer constante a lo largo del día e incorporarlo como el valor máximo o medio diario. Otras variables como el desfase temporal entre el caudal pico y la pleamar, dado que son independientes, se puede suponer un valor diario determinado de forma aleatoria.
2. Generación de series a largo plazo de los predictores. El segundo paso consiste en generar, mediante un método apropiado, series sintéticas diarias de caudal y carrera de marea en la zona de estudio. Es conveniente el empleo de metodologías capaces de reproducir el marcado carácter estacional de cada una de las dinámicas. Pueden existir relaciones de dependencia entre las variables, las cuales deberán ser tenidas en cuenta a la hora de definir las series sintéticas. Aunque el análisis del efecto del aumento del nivel medio del mar debido al cambio climático no se considera

en el presente artículo, su implementación en la metodología propuesta resultaría sencilla. Bastaría con generar una serie sintética de nivel medio del mar en base a las predicciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPPC en Inglés), según al capítulo 13 de Church, J.A. *et al.* (2013).

3. Selección de casos característicos. En base a las series sintéticas coetáneas de los predictores generados en el apartado anterior, se seleccionan un reducido número de casos capaces de caracterizar de forma significativa la totalidad de las combinaciones posibles de predictores. Empleando técnicas de minería de datos, se escogen un número de casos que son capaces de extraer la máxima información de las series de predictores. En la actualidad existen diferentes técnicas o algoritmos de selección de datos como el K-means, los mapas auto-organizados (SOM) o el algoritmo de máxima disimilitud (MDA). Estos algoritmos están descritos en detalle por Camus *et al.* (2011b).
4. *Downscaling* de los predictores en los casos característicos. Teniendo en cuenta que tanto el hidrograma del río como el nivel del mar varían a lo largo del día, para ser capaces de determinar el nivel máximo del agua en la zona de estudio, se hace necesario realizar un modelo numérico no estacionario con valores minutales. Una resolución temporal de 10 minutos es suficiente para modelar la variabilidad temporal de las dinámicas de nivel del mar y caudal del río. En el caso de la carrera de marea es sencillo establecer una serie de nivel del mar en base al análisis armónico de la marea. En cuanto al caudal del río, un hidrograma comúnmente empleado por su sencillez es el propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS), el cual únicamente depende de dos parámetros, el caudal pico ( $Q_p$ ) y el tiempo al tipo ( $T_p$ ). Existen en la literatura científica diversas formulaciones para determinar el tiempo al pico en función de diversos parámetros de cuenca, así como el caudal pico en base al caudal medio diario (Fuller, 1914; Ellis y Gray, 1966, Dastorani *et al.*, 2010).
5. Modelado numérico de los casos seleccionados. Los casos característicos definidos en el punto 3 son simulados con un modelo numérico hidrodinámico de alta resolución imponiendo como condiciones de contorno las variables diezminutales obtenidas en el paso 4. Es importante la elección de un modelo hidrodinámico capaz de simular de forma correcta la propagación de la onda de marea a lo largo del estuario, así como los procesos de desbordamiento e inundación en los tramos de río. El predictando analizado en este artículo es el nivel del agua en cada uno de los puntos de control. La metodología puede ser empleada para definir otro tipo de predictandos como puede ser la velocidad del agua, necesaria para definir riesgos de inundación, para dimensionar estructuras o estudios de erosión. En el caso de la velocidad el instante de marea más desfavorable es la media-marea saliente, momento en el que el caudal de río se suma al caudal generado por el vaciado del estuario. Sin embargo, desde el punto de vista de nivel, el momento crítico es la pleamar.
6. Reconstrucción de las series a largo plazo del predictando. En base a los resultados de nivel de los casos característicos ejecutados con un modelo numérico de alta resolución, y las series de largo plazo de los predictores, mediante técnicas de interpolación multiparamétricas se reconstruye la totalidad de la serie temporal del predictando (nivel del agua en este caso). En el presente artículo se ha empleado la técnica de funciones de base radial (*Radial Basis Function, RBF*).

---

## CASO DE ESTUDIO

### Descripción de la zona de estudio

La metodología propuesta se ha aplicado a la ciudad costera de Betanzos, provincia de A Coruña (ver Figura 2). Esta ciudad histórica está ubicada en la confluencia de los ríos Mandeo y Mendo, justo en la cola del estuario de Betanzos. El río Mandeo tiene una longitud aproximada de 55 km y un área de cuenca de unos 456.9 km<sup>2</sup>. El principal tributario o afluente de este río es el Mendo, con una longitud de 32.8 km y un área de cuenca vertiente de 90.2 km<sup>2</sup>. El estuario de Betanzos tiene una longitud aproximada de 7 km y una anchura media en torno a 1 km. Se trata de un estuario meso y macro mareal, con carreras de marea que varían en magnitud desde 1.50 m en mareas muertas hasta los 4.50 metros en mareas vivas. Esto supone un prisma de marea medio de 6.75 millones de m<sup>3</sup>, llegando a alcanzar valores de 12.25 millones de m<sup>3</sup> en mareas vivas. El nivel del agua en la confluencia de los dos ríos está influenciado por la marea.

La ciudad de Betanzos ha sufrido problemas de inundaciones desde 1584, según el Plan Especial de Protección Civil, (PEPC 2002). La parte más baja del núcleo, que linda con las llanuras de inundación del río Mandeo, sufre eventos de desbordamiento del cauce casi todos los años en épocas de mareas vivas. Este riesgo de inundación ha sido potenciado durante el siglo XX debido a la canalización artificial del río aguas abajo de la confluencia, la construcción de una vía de tren que atraviesa de forma transversal la marisma y la ocupación de las marismas del río Mendo y su transformación en área industrial (ver Figura 3). Todas estas presiones sobre la desembocadura de los ríos Mendo y Mandeo han propiciado un aumento de la vulnerabilidad y de la peligrosidad. Así, combinando la elevada exposición natural de la zona, con el comentado aumento antrópico de la vulnerabilidad y la peligrosidad, hacen que se trate de una zona con un elevado riesgo de inundación, además de una zona especialmente sensible a la elevación del nivel medio del mar debido a los efectos del cambio climático.

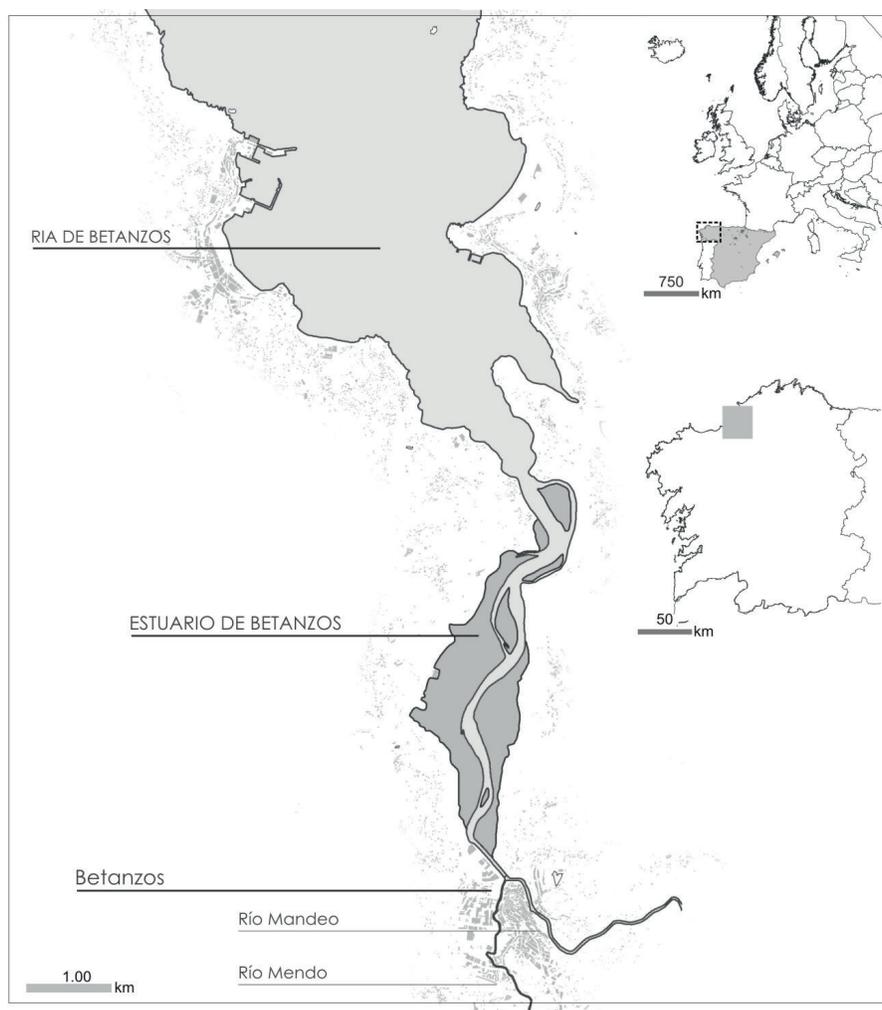


Figura 1 | Esquema conceptual de la metodología propuesta.

## Datos disponibles

El Puerto de A Coruña, ubicado cerca de la ciudad de Betanzos, dispone de un mareógrafo que registra datos de nivel del mar desde el año 1992. Dicho mareógrafo pertenece a la red REDMAR del Organismo Público Puertos del Estado (OPPE). En el presente artículo se han empleado las componentes armónicas de la marea astronómica y el residuo meteorológico extraído de un análisis llevado a cabo por Pérez (2014).

En cuanto a los caudales de los ríos, existen 2 estaciones de aforo. La primera se localiza en el río Mandeo, a unos 30 km de la ciudad de Betanzos, cubriendo una superficie de cuenca de 248.2 km<sup>2</sup>. Dicho aforo dispone de una longitud de registro de caudal diario de 31 años (1985-2016), de los cuales, en los últimos 8 años existen valores de caudal instantáneo. Además, el río Mendo dispone de una estación de aforo a 10 km de la ciudad de Betanzos, con un área de cuenca de 83.33 km<sup>2</sup>. En este caso solo se dispone de una longitud de registro de 8 años de caudal instantáneo (2008-2016).



**Figura 2** | Localización de la zona de estudio.

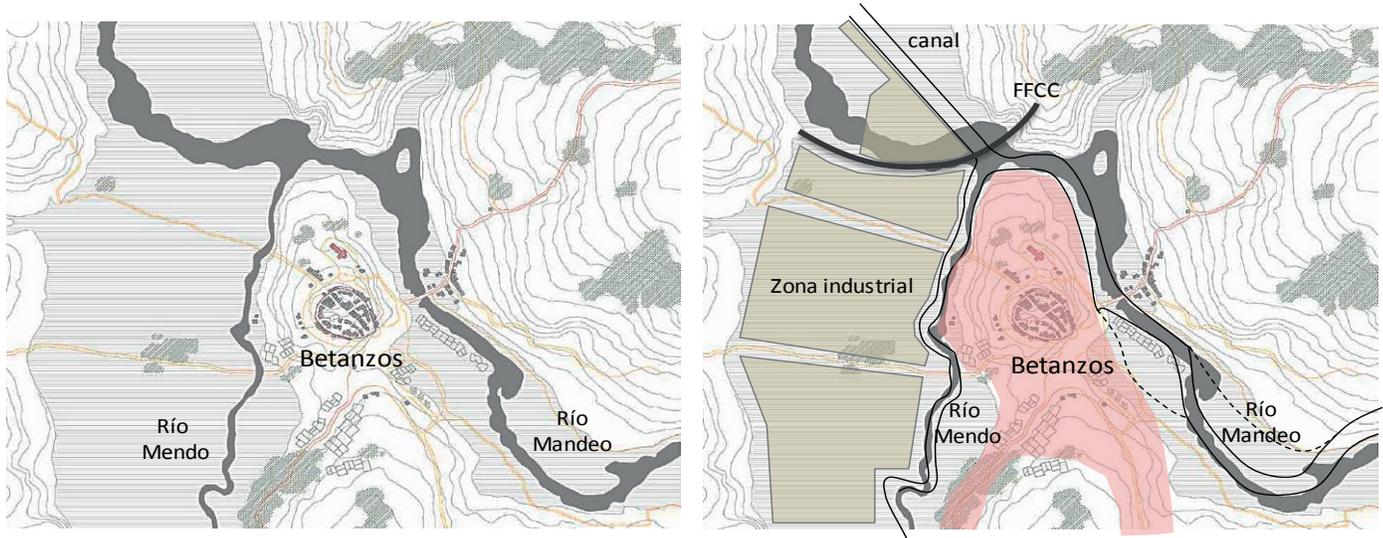


Figura 3 | Ciudad de Betanzos en el Siglo XIV, Colón (2012) y esquema conceptual de la situación actual en 2017.

### Generación de series sintéticas a largo plazo

Una de las principales limitaciones de la metodología de simulación continua de nivel, tal y como se explicó en la introducción, es la disponibilidad de series de datos lo suficientemente largas como para que sean estadísticamente representativas desde el punto de vista de análisis de extremos. Por ello, para el presente trabajo se han generado series sintéticas diarias de caudal y marea durante 500 años, con el objetivo de poder realizar un adecuado análisis extremal.

La marea astronómica tiene un carácter determinista y es independiente del caudal del río, de tal forma que la serie temporal se puede determinar únicamente en base a sus componentes armónicos. Así, la serie de marea astronómica se ha generado en base a las componentes armónicas del mareógrafo de A Coruña, con una resolución temporal de 10 minutos. En base a dicha serie se ha calculado la serie diaria del predictor empleado, la carrera de marea diaria, restando cada día el valor máximo y mínimo de nivel del mar.

En cuanto a la marea meteorológica, se puede asumir que en Galicia es independiente de la marea astronómica o surge. Sin embargo, puede tener cierta dependencia con el caudal del río. Por ello, se ha realizado un análisis de los valores diarios coetáneos de marea meteorológica y caudal del río entre los años 1993 y 2014. Se ha observado cierta estacionalidad tanto en el valor medio del surge, como en su variabilidad y en los caudales. Además, se ha observado que los máximos caudales diarios anuales siempre tienen asociados valores de surge positivo y mayor de 20 cm. Este efecto se comparó con los valores de caudal teniendo en cuenta un retraso de 1 día entre el surge y al caudal máximo por efecto de los procesos de transformación lluvia - escorrentía. Se encontró que la dependencia entre el caudal máximo anual y el surge asociado es mayor cuando ambos ocurren el mismo día, coincidiendo con las conclusiones de Svensson y Jones (2004).

Para generar la serie sintética de surge se ha tenido en cuenta la comentada estacionalidad, de tal forma que se ha generado una serie aleatoria de 500 años en base a las distribuciones medias gaussianas de cada mes, obtenidas a partir de los 21 años de datos disponibles. Además, se le ha incluido una cierta correlación entre los caudales máximos anuales y el surge mediante una función de ajuste obtenida en base a datos históricos.

La serie de caudal de los ríos se ha definido de forma sintética con un modelo capaz de reproducir series diarias sintéticas de caudal en los ríos de la Demarcación Hidrográfica de Galicia Costa en base a parámetros de lluvia y de cuenca. El modelo completo ha sido desarrollado por IH Cantabria (2014) y aplicado en los trabajos de Riesgo de Inundación en la Demarcación Hidrográfica de Galicia Costa siguiendo la Directiva Europea 2007/60/CE. El modelo se ha validado con 18 estaciones de aforo, con series de más de 10 años de duración distribuidas a lo largo de toda la Demarcación Hidrográfica de Galicia Costa. Los parámetros que definen

el modelo dependen de los siguientes descriptores físicos de la cuenca: precipitación media anual, área de cuenca, pendiente media y número de curva. Para generar una serie de caudal coetánea entre el río Mendo y Mandeo se tuvo en cuenta que las cuencas de ambos ríos son vecinas, sometidas a aguaceros similares, y por tanto no se pueden considerar independientes. De hecho, se puede considerar el Mendo como un afluente del Mandeo. Por todo ello, en base a los 8 años de series históricas de caudal se ha establecido una relación entre los caudales del Mendo y del Mandeo. De esta forma la serie sintética de caudal del río Mendo,  $Q_{Mendo}$ , se determina aplicando esta función de transferencia a la serie sintética del río Mandeo,  $Q_{Mandeo}$ , añadiéndole una función aleatoria de ruido,  $\xi$ , para suavizar la dependencia entre ambas:

$$Q_{Mendo} = 0.4695 \cdot Q_{Mandeo}^{0.7148} + \xi \quad (1)$$

Teniendo en cuenta la escala de variabilidad espacial y temporal de las dinámicas involucradas, otro parámetro que puede influir en la probabilidad de inundación de este tipo de tramos de río es el desfase entre el pico del hidrograma y el momento en el que se produce la pleamar. Se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre la importancia relativa de este desfase temporal. Para ello, con el modelo hidrodinámico 2D se han ejecutado varios casos para un mismo evento de caudal - marea, variando únicamente el desfase entre los instantes en los que se produce el pico de caudal y la pleamar. Se han encontrado en los resultados diferencias de nivel superiores a 0.50 m para un caso de caudal extremo con mareas vivas. Para definir la serie sintética del predictor desfase entre tiempo pico y pleamar, se ha generado una serie aleatoria entre 0 y 12.42 horas, que es el período del armónico principal de la marea.

## Selección de casos característicos

Para seleccionar los casos característicos a partir de la serie diaria de 500 años se ha empleado al algoritmo de máxima disimilitud o MaxDiss (*Maximum Dissimilarity selection algorithm*), que permite la identificación del subconjunto M con la mayor diversidad posible del total de la base de N datos (Camus et al., 2011a). El algoritmo es capaz de seleccionar los N casos, combinación de los predictores, más diferentes entre ellos. El algoritmo se ha aplicado a las series diarias de predictores seleccionados: caudal medio diario, carrera de marea y desfase entre caudal pico y pleamar. Cada uno de los casos seleccionados se corresponde con un día de la serie sintética de los 500 años. Para el caso de estudio presentado en este artículo se han seleccionado 40 casos característicos.

## Downscaling de los predictores

Una vez seleccionados los casos característicos, estos deben modelizarse numéricamente. Sin embargo, los valores diarios extraídos de las series sintéticas resultan insuficientes para definir de forma apropiada las inundaciones costeras dado que tienen una escala temporal mucho menor. Por ello, se debe realizar un *downscaling* de las variables de entrada al modelo, de tal forma que, para definir las condiciones de contorno del modelo hidrodinámico 2D de alta resolución se pasa de la escala temporal diaria a escala minatural. De esta forma se consigue modelizar los 40 casos con una alta resolución espacial y temporal.

En el caso del caudal, se ha pasado de caudal medio diario a caudal máximo diario y aplicado el hidrograma unitario del SCS. Para definir el hidrograma sintético del SCS es necesario disponer del caudal pico y del tiempo al pico. La relación entre el caudal medio diario y el caudal máximo diario se ha obtenido de una función de regresión exponencial obtenida en base al registro de 8 años en el aforo. Para la obtención del tiempo al pico se ha realizado una comparativa de las formulaciones de Svensson y Jones (2004), Téméz (1991) y Kirpich (1940), con datos de eventos reales obtenidos en la estación de aforo. El hidrograma sintético así generado ha sido comparado con eventos reales extraídos de la estación de aforo mostrando un buen ajuste, especialmente en la curva de ascenso.

En el caso del nivel del mar, bajar la escala temporal a minutos es más sencillo. En base a la amplitud de la carrera de marea se ha generado una serie de nivel con una amplitud igual a la mitad de la carrera de marea y una frecuencia de 12.42 horas, correspondiente a la componente armónica principal en esta región costera. A esta serie se la ha sumado el nivel correspondiente a la marea meteorológica del caso seleccionado, la cual se asume constante a lo largo del día.

La Figura 4 muestra el *downscaling* de un ejemplo de caso característico, definido por un caudal diario del río Mandeo y Mendo 189 y 19 m<sup>3</sup>/s respectivamente, lo que supone caudales pico de 351 y 33 m<sup>3</sup>/s, una carrera de marea de 1.28 metros y un desfase entre pico de hidrograma y pleamar de 11 horas.

## Modelado numérico

Los casos seleccionados han sido modelados con el software Iber (Bladé *et al.*, 2014), el cual resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales, también conocidas como ecuaciones de St. Venant 2D. Los algoritmos implementados en el modelo han sido validados y aplicados por diversos autores en diferentes estudios hidrodinámicos y de inundación en ríos, estuarios y zonas urbanas (Bermúdez *et al.*, 2017; Bodoque *et al.*, 2016; Cea y Bladé, 2015; Cea y French, 2012; Fraga *et al.*, 2016).

En la Figura 5 se puede observar el dominio espacial que cubre el modelo. Aunque el tramo de río objeto de estudio es de 1.3 km de longitud, con el objeto de reproducir correctamente la propagación de la onda de marea desde mar abierto y la totalidad del prisma de marea se ha construido un modelo numérico de 10 km de extensión. El dominio está formado por un total de 126.266 elementos con un tamaño medio de 11.5 metros, con un mallado en detalle de la zona urbana, llegando a tamaños de elemento del orden de 1 m.

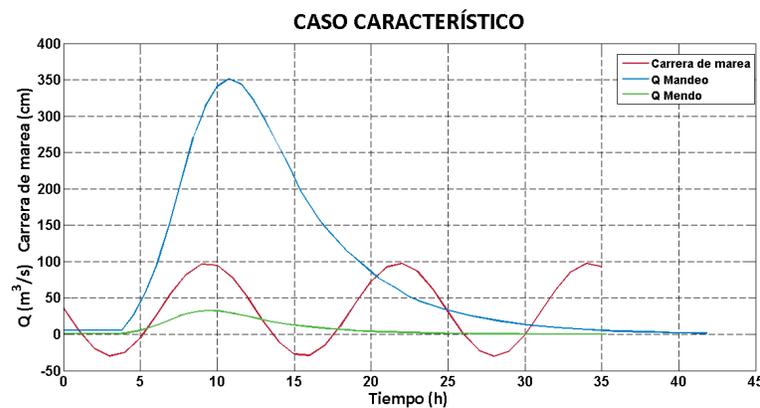


Figura 4 | Ejemplo de *downscaling* del caso característico ID30.

El modelo digital del terreno (MDT) empleado se ha obtenido de la integración de datos LIDAR con trabajos de topobatimetría de los ríos y del estuario. En cuanto a la rugosidad del terreno, se han empleado seis valores del coeficiente de Manning en función del uso del suelo, desde 0.025 en el río hasta 0.15 en zonas residenciales.

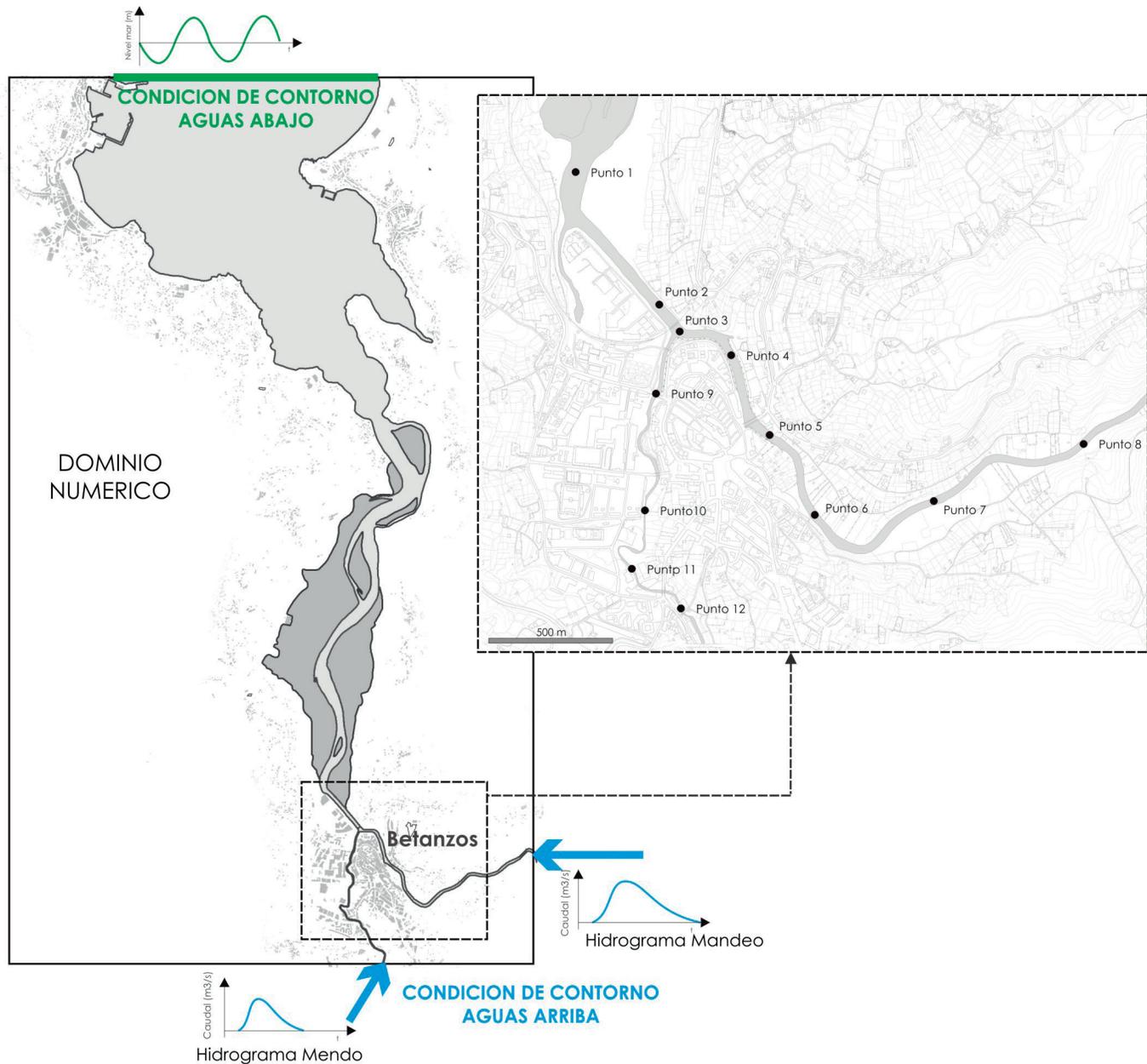
El modelo se ha ejecutado en los 40 casos característicos, introduciendo como condiciones de contorno aguas abajo el nivel del mar (resultado de la suma de la marea astronómica y la marea meteorológica), y aguas arriba los hidrogramas de los ríos Mendo y Mandeo, todos ellos con una resolución temporal diezminutal. Se ha aplicado en cada caso el desfase temporal entre el pico del hidrograma y la pleamar correspondiente.

## Reconstrucción de la serie de nivel de agua

Una vez ejecutados los casos característicos, se extraen los resultados de nivel en cada uno de los puntos de control definidos a lo largo de la traza del río (ver Figura 6). La reconstrucción de la serie de nivel máximo diario en cada punto de control se ha realizado mediante técnicas de interpolación en base a los resultados del modelo hidrodinámicos de los casos seleccionados. En este caso, la técnica de interpolación empleada es la técnica basada en funciones de base radial (*Radial Basis Function - RBF*), muy adecuada para datos con una alta dimensionalidad y no distribuidos uniformemente (Franke, 1982). Con la serie de nivel a largo plazo reconstruida se ha realizado un análisis estadístico de extremos y se ha determinado el nivel para diferentes periodos de retorno.

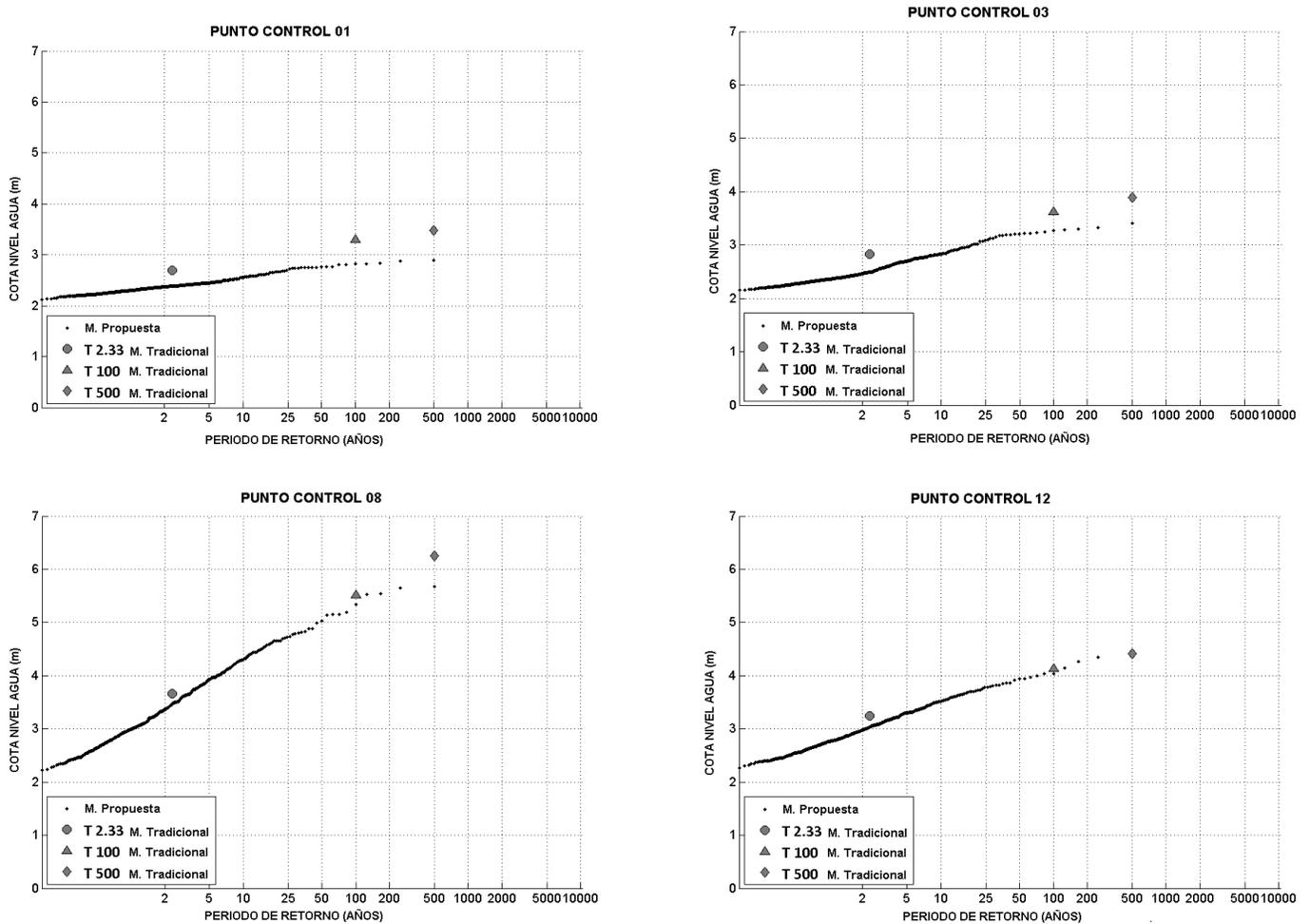
## RESULTADOS

Los resultados obtenidos con la metodología propuesta se han comparado con la metodología que tradicionalmente se viene empelando en ingeniería fluvial y recomendada por la *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011). Esta metodología, que denominaremos “tradicional” o “estándar”, aconseja aplicar una condición de contorno de nivel correspondiente al mismo periodo de retorno que el de la avenida que se esté modelizando. Se han determinado los valores de nivel de inundación para tres periodos de retorno (2.33 años, 100 años y 500 años), siguiendo la metodología estándar. Como cabría esperar, para un determinado periodo de retorno los niveles de agua calculados con la metodología estándar son sensiblemente mayores a los obtenidos con la metodología propuesta (Figura 6).



**Figura 5** | Dominio Numérico y condiciones de contorno (izquierda). Puntos de control (derecha).

En la Figura 6 se muestran los resultados en 4 puntos de control. Estos resultados se han analizado de dos formas: 1) se han comparado los resultados de nivel para el mismo periodo de retorno y 2) se han contrastado los periodos de retorno para el mismo resultado de nivel, estableciendo de esta forma un periodo de retorno equivalente.



**Figura 6** | Resultados de nivel de agua para diferentes periodos de retorno en los puntos de control 1, 3, 8 y 12 con la metodología propuesta. Comparativa con los periodos de retorno de 2.33, 100 y 500 años determinados con la metodología tradicional.

En la Tabla 1 se muestran las diferencias de nivel encontradas a lo largo de todos los puntos de control para cada uno de los periodos de retorno. Se observa como en los puntos de control 1 y 2 se producen mayores diferencias que en el resto. Además, las diferencias entre metodologías disminuyen hacia aguas arriba. Esto se debe a que la influencia de la marea disminuye según nos alejamos del mar. Según va desapareciendo la influencia de la marea, el nivel del agua se vuelve dependiente únicamente del caudal del río, y por tanto la metodología estándar y la tradicional convergen (ver Figura 7).

**Tabla 1** | Resultados de comparativa de nivel entre la metodología tradicional y la propuesta. Se muestran los resultados en 12 puntos de control (CP1 a CP12 en la Figura 5) distribuidos en los ríos Mandeo y Mendo, en el canal de desembocadura a la ría y en la confluencia de ambos ríos (Y).

Metodología estándar (años)	Diferencia nivel metodología propuesta (m)											
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
	Canal		Y	Río Mandeo					Río Mendo			
2.33	0.317	0.332	0.368	0.353	0.297	0.288	0.285	0.295	0.365	0.351	0.342	0.264
100	0.478	0.385	0.301	0.368	0.321	0.254	0.193	0.175	0.335	0.232	0.111	0.136
500	0.586	0.439	0.481	0.592	0.715	0.771	0.732	0.586	0.476	0.381	0.283	0.076

En el punto de control 1 el nivel del agua para el periodo de retorno de 2.33 años es de 2.70 metros siguiendo la metodología tradicional (Figura 6). El período de retorno asociado a este mismo nivel aplicando la metodología propuesta sería de 25 años. Se puede decir por tanto que en el punto 1 el periodo de retorno equivalente al nivel de 2.33 años de la metodología tradicional es de 25 años. La Tabla 2 muestra los resultados de este periodo de retorno equivalente en cada punto de control. Se observa que es diferente en cada punto y que disminuye según nos movemos hacia aguas arriba, debido a la disminución de la influencia de la marea, tal y como se apuntó anteriormente. Además, se observa que el periodo de retorno equivalente se dispara para valores de periodo de retorno alto, 100 y 500 años, debido a que la probabilidad de ocurrencia de dos o tres eventos extremos simultáneos, caudal de 100 años con mareas vivas y coincidiendo el pico del hidrograma con la pleamar, es altamente improbable.

**Tabla 2** | Relación entre los periodos de retorno de la metodología estándar aplicando la metodología propuesta. Se muestran los resultados en 12 puntos de control (CP1 a CP12 en la Figura 5) distribuidos en los ríos Mandeo y Mendo, en el canal de desembocadura a la ría y en la confluencia de ambos ríos (Y).

Metodología estándar (años)	Metodología propuesta (años)											
	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5	CP 6	CP 7	CP 8	CP 9	CP 10	CP 11	CP 12
	Canal		Y	Río Mandeo					Río Mendo			
2.33	25	15	10	6	4	3.5	3.5	3.5	10	6	6	4
100	>10000	>10000	5000	1500	700	500	300	200	6000	1000	400	120
500	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000	>10000	10000	3000	>10000	>10000	6000	600

Un aspecto interesante que se ha detectado con la metodología propuesta es que, gracias al empleo de un modelo hidrodinámico de alta precisión, es capaz de detectar automáticamente la extensión de la influencia de la propagación de la onda de marea, y por tanto la importancia de la interacción entre el nivel del mar y el caudal del río en los niveles de inundación. La Figura 7 muestra un perfil longitudinal de los resultados de nivel determinados con ambas metodologías. Se observa, además del efecto comentado de pérdida de la influencia de la marea aguas arriba, que la metodología propuesta es capaz de detectar fenómenos locales como la variación de la lámina de agua en el estrechamiento del río, cuando los dos ríos confluyen en el canal.

Por último, es importante remarcar que, sin la técnica de interpolación o reconstrucción de series, ejecutar un modelo numérico 2D en continuo durante 500 años (4.38 millones de horas), a día de hoy resulta inviable desde el punto de vista computacional. Por ello, la metodología propuesta combina técnicas estadísticas de interpolación multiparamétricas, como la RBF, con modelado hidrodinámico de alta resolución (tamaños menores del orden de 1 metro en dominios de 10 km) de un reducido número de casos característicos. Por tanto, los resultados están influenciados por la precisión de la técnica de reconstrucción de la serie. Con el objetivo de validar la técnica de reconstrucción utilizada en este artículo, se han seleccionado al azar 20 casos de las series sintéticas de partida, y se ha realizado una comparativa entre los resultados de modelizar numéricamente estos casos y los resultados de la serie reconstruida esos mismos días mediante el método de RBF. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste, con valores de  $R^2$  que varían entre 0.91 y 0.98 (Figura 8).

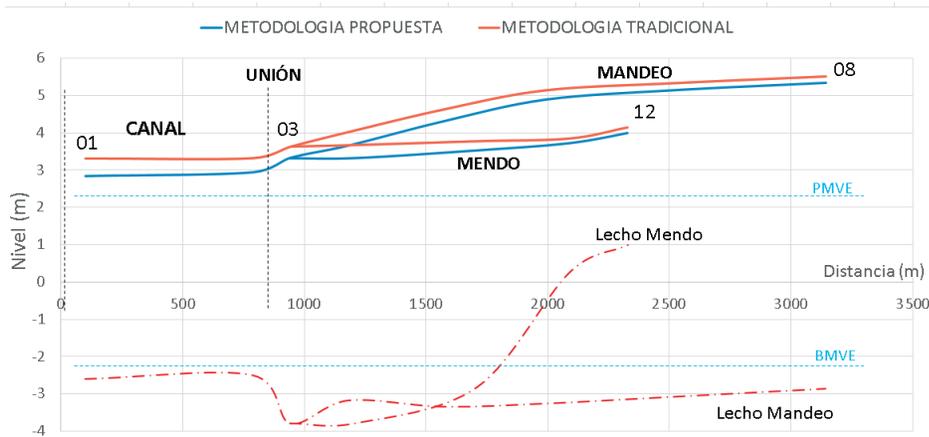


Figura 7 | Perfil longitudinal de resultados de nivel para os 100 años de periodo de retorno determinados con la metodología tradicional y la metodología propuesta.

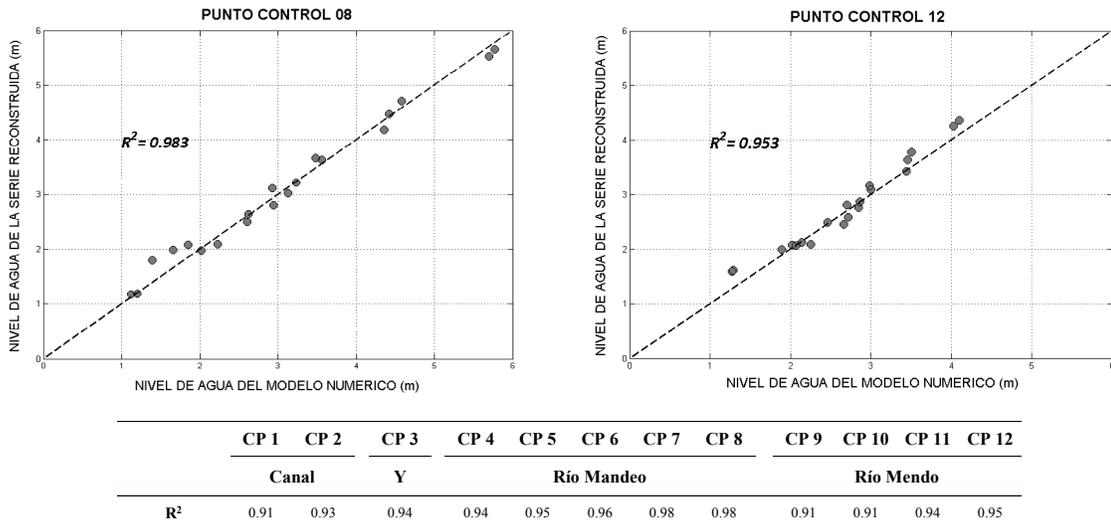


Figura 8 | Resultados de la comparación entre los valores de nivel de la serie reconstruida usando RBF y del modelo numérico en los puntos CP8 (izquierda) y CP12 (derecha).

## CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado una metodología para determinar inundaciones extremas en estuarios y tramos de río afectados por meso y macro mareas. La metodología propuesta combina el modelado numérico no estacionario y bidimensional de alta resolución con técnicas estadísticas de interpolación multivariable. Esta metodología es aplicable a tamaños de cuenca medio-bajos con tiempos de concentración del orden de horas, dado que la escala temporal definida es la diaria. En el caso de tamaños de cuenca mayores o menores (cuencas torrenciales) la escala temporal de las variables implicadas deben ser adaptadas de forma adecuada. La metodología presentada depende en gran medida de la capacidad del modelador de crear series sintéticas de los predictores lo más realistas posibles, teniendo en cuenta la posible correlación entre variables. También tiene relevancia la capacidad de escoger correctamente dichos predictores, así como realizar un correcto *downscaling*.

El empleo de un modelo bidimensional de alta resolución resulta un aspecto fundamental de la metodología para ser capaces de reproducir de forma fidedigna la interacción entre las diferentes causas de inundación, en nuestro caso caudal del río y nivel de marea, así como los procesos de desbordamiento. No obstante, el coste computacional requerido por este tipo de modelos hace necesario el empleo de técnicas de reconstrucción en base a algoritmos de interpolación, para determinar la serie de nivel a largo plazo (500 años).

La metodología propuesta aplicada a un caso real, la ciudad de Betanzos, se ha comparado con la metodología recomendada por la *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables* (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011), que consiste en aplicar una condición de contorno de nivel correspondiente al mismo periodo de retorno que el de la avenida que se esté modelizando. La comparación muestra que la metodología tradicional tiende a sobreestimar el nivel de inundación, detectando que dicho efecto disminuye hacia aguas arriba, debido a que se reduce la influencia de la marea. Al resultado de nivel de la metodología tradicional, asociado a un periodo de retorno, se le ha asignado el periodo de retorno real, entendiendo como tal el resultante de aplicar la metodología tradicional a dicho nivel. Se observa que el periodo de retorno de 500 años definido según la metodología tradicional equivale a periodo de retorno superior a 10000 años empleando la metodología propuesta.

Por todo ello, se puede afirmar que la metodología propuesta produce resultados coherentes y más realistas que las metodologías que se han usado de forma tradicional en los estudios de riesgo de inundación, que consideran la ocurrencia simultánea de nivel del marea y caudal asociados a periodos de retorno asignados de forma arbitraria.

---

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su gratitud al departamento de Planificación Hidráulica de Aguas de Galicia, perteneciente a la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Xunta de Galicia, por los datos suministrados de los aforos, MDT y así como la serie sintética de caudales de la ARPSI fluvial ES014-CO-12-01. Además, agradecer al área de medio físico del Ente Público de Puertos del Estado, por los datos del mareógrafo del puerto de A Coruña.

---

## REFERENCIAS

- Acreman, M.C. 1994. Assessing the joint probability of fluvial and tidal floods in the river-rodging. *Journal Institution Water Environmental Management*, 8, 490-496. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.1994.tb01140.x>
- Archetti, R., Bolognesi, A., Casadio, A., Maglionico, M. 2011. Development of flood probability charts for urban drainage network in coastal areas through a simplified joint assessment approach. *Hydrology Earth System Science*, 15, 3115–3122. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3115-2011>
- Bermúdez, M., Neal, J.C., Bates, P.D., Coxon, G., Freer, J.E., Cea, L., Puertas, J. 2017. Quantifying local rainfall dynamics and uncertain boundary conditions into a nested regional-local flood modelling system. *Water Resources Research*, 53, 2770-2785. <https://doi.org/10.1002/2016WR019903>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bodoque, J.M., Amérigo, M., Díez-Herrero, A., García, J.A., Cortés, B., Ballesteros-Cánovas, J.A., Olcina, J. 2016. Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology*, 541, 665-676. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.005>
- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R. 2011a. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58(9), 851-862. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.05.007>

- Camus, P., Mendez, F.J., Medina, R., Cofiño, A.S. 2011b. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58, 453-462. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.003>
- Cea, L., Blade, E. 2015. A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resources Research*, 51(7), 5464–5486. <https://doi.org/10.1002/2014WR016547>
- Cea, L., French, J.R. 2012. Bathymetric error estimation for the calibration and validation of estuarine hydrodynamic models. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 100, 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.01.004>
- Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D., Unnikrishnan, A.S. 2013. Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Colón, M. 2012. Transformaciones Históricas en el convento de San Francisco de Betanzos. Siglos XIV al XX”. *PhD thesis dissertation. Departamento de Representación e Teoría Arquitectónicas. Universidade da Coruña.*
- Dastorani, M.T., Afkhami H., Sharifidarani H., Dastorani M. 2010. Application of ANN and ANFIS Models on Dryland Precipitation Prediction (Case Study: Yazd in Central Iran). *Journal of Applied Sciences*, 10, 2387-2394. <https://doi.org/10.3923/jas.2010.2387.2394>
- De Bruijn, K. M., Diermanse, F. L. M., and Beckers, J. V. L. 2014: An advanced method for flood risk analysis in river deltas, applied to societal flood fatality risk in the Netherlands, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2767–2781, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2767-2014>
- Dottori, F., Kalas, M., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Feyen, L. 2017. An operational procedure for rapid flood risk assessment in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 17. 1111-1126. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1111-2017>
- Duarte, P., Alvarez-Salgado, X.A., Fernández-Reiriz, M.J., Piedra, S., Labarta, U. 2014. A modeling study on the hydrodynamics of a coastal embayment occupied by mussel farms (Ria de Ares-Betanzos, NW Iberian Peninsula). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 147, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.05.021>
- Ellis, W.H., Gray, D.M. 1966. Interrelationships between the peak instantaneous and average daily discharges of small prairie streams. *Canadian Agricultural Engineering*.
- Fraga, I., Cea, L., Puertas, J., Suárez, J., Jiménez, V., Jácome, A. 2016. Global sensitivity and GLUE-based uncertainty analysis of a 2D-1D dual urban drainage model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(5), 04016004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001335](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001335)
- Franke, R. 1982. Scattered data interpolation: tests of some methods. *Mathematics of Computation*, 38, 181-200. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1982-0637296-4>
- Fuller, W.E. 1914. Flood Flows. *Trans. American Society of Civil Engineers*, 77: 564- 617.
- Hawkes, P.J., Tawn, J.A. 2000. Joint probability of waves and water levels: JOIN-SEA: A rigorous but practical new approach. *Internal Document No. SR 537, HR Wallingford with Lancaster University, UK.*
- Hawkes, P.J., Gouldby, B.P., Tawn, J.A., Owen, M.W. 2002. The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. *Journal Hydraulic Research*, 40, 241–251. <https://doi.org/10.1080/00221680209499940>
- Hawkes, P.J. 2008. Joint probability analysis for estimation of extremes. *Journal of Hydraulic Research*, 46:S2, 246-256. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521958>
- Hughes, T.G., Gorji-Bandpy, M. 2001. A new Joint Probability appraisal of flood risk. *Proc. Instn. Civ. Engrs. Water, Maritime and Energy, Discussion*, 148, 215-216.

- IH Cantabria. 2014. Caracterización de hidrogramas asociados a eventos extremos en diversos puntos de la red fluvial de Galicia Costa. Departamento de planificación hidrológica de Aguas de Galicia. Xunta de Galicia.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- Larson, M., Hanson, H. 2008. Implications of extreme waves and water levels in the southern Baltic Sea. *Journal of Hydraulic Research*, 46 (SUPPL. 2), 292-302. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521962>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011. *Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, España. ISBN: 978-84-491-1136-5.
- Pérez, B. 2014. Design and implementation of an operational sea level monitoring and forecasting system for the Spanish coast. PhD Thesis, *University of Cantabria*.
- Petroliaqkis, T.I., Voukouvalas, E., Disperati, J., Bildot, J. 2016. Joint Probabilities of Storm Surge, Significant Wave Height and River Discharge Components of Coastal Flooding Events. *JRC Technical Reports, EUR 27824 EN*. <https://doi.org/10.2788/677778>
- Reed, D.W. 1999. Flood Estimation Handbook, Vol. 1: Overview. *Institute of Hydrology, Wallingford, UK*.
- Rippa, S. 1999. An algorithm for selecting a good value for the parameter  $c$  in radial basis function interpolation. *Advances in Computational Mathematics*. Volume 11, Issue 2–3, 193–210. <https://doi.org/10.1023/A:1018975909870>
- Rueda, A., Camus, P., Mendez, F.J., Tomas, A., Luceno, A. 2016. An extreme value model for maximum wave heights based on weather types. *Journal. Geophys. Research. Oceans*, 121, <https://doi.org/10.1002/2015JC010952>
- Svensson, C., Jones, D.A. 2002. Dependence between extreme sea surge, river flow and precipitation in eastern Britain. *International Journal Climatology*, 22, 1149-1168. <https://doi.org/10.1002/joc.794>
- Svensson, C., Jones, D.A. 2004. Dependence between sea surge, river flow & precipitation in south & west Britain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 973–992. <https://doi.org/10.5194/hess-8-973-2004>
- Teakle, I., Gildas, C., Khondker, R., Breen, M., McGarry, D. 2005. Boundary conditions for estuarine flood modelling using joint probability analysis. *Proc. of Coasts and Ports: Coastal Living – Living Coast*, Australasian Conference, 613–619.
- Témez, J.R. 1991. Extended and improved Rational Method. *Proc. XXIV Congress of IAHR, Madrid, España*. Vol. A, 33-40.
- Van Gelder, P.H.A.J.M., Vrijling, J.K., Van Haarden, D.H. 2004. Joint probability distribution for wave height, wind setup and wind speed. *29th Int. Coastal Engineering*, Lisbon, 1032-1046.
- Van der Made, J.W. 1969. Design levels in the transition zone between the tidal reach and the river regime reach. *Hydrology of Deltas, Vol. 2 of Proceedings of the Bucharest Symposium*, May, 1969, 246–257.
- Webster, T., McGuigan, K., Collins, K., MacDonald, C. 2014. Integrated River and Coastal Hydrodynamic Flood Risk Mapping of the LaHave River Estuary and Town of Bridgewater, Nova Scotia, Canada. *Water*, 6, 517-546. <https://doi.org/10.3390/w6030517>
- Zhong, H., Van Overloop, P.J., Van Gelder, P.H.A.J.M. 2013. A joint probability approach using a 1-D hydrodynamic model for estimating high water level frequencies in the Lower Rhine Delta. *Natural Hazards Earth System Science*, 13, 1841–1852. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1841-2013>