



XESTIÓN
DO SOLO
DE GALICIA

PROYECTO DE INTERÉS AUTONÓMICO DEL PARQUE EMPRESARIAL DE PONTECESURES (PONTEVEDRA)

DOCUMENTO PARA APROBACIÓN INICIAL

MEMORIA JUSTIFICATIVA

Anexo VII. Estudio hidrológico



DOCUMENTO MEMORIA

ESTUDIO HIDROLÓGICO EN EL ÁMBITO DEL PARQUE EMPRESARIAL DE
PONTECESURES (PONTEVEDRA).
Número expediente: C-2386



JULIO 2021.

Javier Sopelana Peralta

Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.



Diligencia pola que se fai constar que o documento coidado co contido no expediente aprobado inicialmente o 09/06/2022
Xefe de Servizo de Planificación e Ordenación do Solo
Alberto Feijoo Rodríguez

INSTITUTO
GALEGO DA
VIVENDA E SOLO



CVE: elDociivq191
Verificación: <https://sede.xunta.gal/cve>



DOCUMENTO MEMORIA
ESTUDIO HIDROLÓGICO EN EL ÁMBITO DEL PARQUE EMPRESARIAL DE PONTECESURES
(PONTEVEDRA).

INDICE DEL ESTUDIO

1	INTRODUCCIÓN.....	5
1.1	ANTECEDENTES.....	5
1.2	OBJETIVOS.....	5
1.3	ESTRUCTURA DEL ESTUDIO.....	6
1.4	DATOS DE PARTIDA.....	6
2	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	7
2.1	LOCALIZACIÓN.....	7
2.2	DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE RÍO DE ESTUDIO.....	7
2.3	PARCELA DE XESTUR.....	9
3	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	10
3.1	INTRODUCCIÓN.....	10
3.2	ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	10
3.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO.....	12
3.4	APLICACIÓN AL VALGA.....	14
3.4.1	ESTUDIO HIDROLOGICO.....	14
3.4.2	ESTUDIO HIDRAULICO.....	14
4	ACTUALIZACION DE LOS DATOS EXISTENTES.....	15
4.1	OBRAS DE PASO.....	15
4.2	MODELO DIGITAL DEL TERRENO.....	17
4.3	ACTUALIZACION DEL MODELO HIDRÁULICO.....	18
4.4	DESCRIPCION DEL MODELO HIDRÁULICO 2D.....	19
4.4.1	INTRODUCCION.....	19
4.4.2	ECUACIONES HIDRODINÁMICAS.....	19
4.4.3	FRICCIÓN DE FONDO.....	20
4.4.4	TENSIONES EFECTIVAS.....	21
4.4.5	CONDICIONES DE CONTORNO HIDRODINÁMICAS.....	22
4.4.6	CONDICIONES DE CONTORNO INTERNAS.....	23
4.4.7	MÓDULO DE TURBULENCIA.....	24
5	MODELADO HIDRÁULICO DEL RÍO VALGA.....	25
5.1	INTRODUCCION.....	25
5.2	MALLA NUMÉRICA.....	25
5.3	CONDICIONES DE CONTORNO.....	28
5.3.1	CONDICIONES DE ENTRADA.....	28
5.3.2	CONDICIONES DE SALIDA.....	29
5.3.3	CONDICIONES INICIALES.....	29
5.4	CONDICIONES INTERNAS.....	29
5.4.1	PUENTES.....	29
5.5	RUGOSIDAD.....	30
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	32
6.1	RESULTADOS DE T500 AÑOS.....	32
6.2	COMPARATIVA Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	34
7	RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	36



DOCUMENTO MEMORIA

ESTUDIO HIDROLÓGICO EN EL ÁMBITO DEL PARQUE EMPRESARIAL DE PONTECESURES (PONTEVEDRA).

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de la parcela (rojo con contorno negro) sobre mancha de inundación de T500años (amarillo) y (rosa) ZFP del río Valga. Fuente: Augas de Galicia.	5
Figura 2.	Localización de la zona de estudio. Fuente: Google Earth	7
Figura 3.	Tramos del río Valga y río Soutiño objeto de estudio en el presente documento.	8
Figura 4.	Representación de la parcela sobre ortofoto de la zona de estudio.	9
Figura 5.	Ejemplo de serie de caudales sintéticos de un año de duración en el río Linares. Fuente: Aguas de Galicia 11	11
Figura 6.	Ejemplo de hidrograma de diseño en el río Sar para 100 años de período de retorno. Fuente: Aguas de Galicia 12	12
Figura 7.	ODT bajo la vía de FFCC y paso del río Soutiño. Fuente: Aquatica.	15
Figura 8.	ODT bajo la vía de FFCC. Estructura sobre el cauce del Río Soutiño. Fuente: Aquatica.....	15
Figura 9.	Situación de las nuevas ODT detectadas tras la visita de campo.....	16
Figura 10.	Relleno en la parcela objeto de estudio. Fuente: Aquatica.	17
Figura 11.	Comparativa de los modelos digitales del terreno proporcionado y actualizado con los datos de Xestur (arriba) y secciones transversales (abajo).	17
Figura 12.	Imagen del modelo hidráulico del río Valga y sección transversal de un puente. Fuente. Aguas de Galicia 18	18
Figura 13.	Tamaños de malla empleados en el modelo hidrodinámico. Fuente: Aquática Ingeniería.....	26
Figura 14.	Vista general de la malla numérica, con un total de 328108 elementos.	26
Figura 15.	Malla numérica en la zona del relleno en la parcela de estudio. Antes y después de aplicar elevaciones mediante el Modelo Digital del Terreno. Fuente: Aquática Ingeniería.....	27
Figura 16.	Malla numérica en la zona de paso bajo la PO-548. Antes y después de aplicar elevaciones mediante el Modelo Digital del Terreno. Fuente: Aquática Ingeniería	27
Figura 17.	Ubicación de las Condiciones de Contorno en el modelo hidráulico. Fuente: Aquática Ingeniería....	28
Figura 18.	Obra de paso bajo la PO-548, incluida en el modelo unidimensional del MAPRI 2.	30
Figura 19.	Obra de paso bajo la PO-548, modelada mediante IBER.....	30
Figura 20.	Mapa de rugosidad del suelo en modelo numérico de Aquática Ingeniería.	31
Figura 21.	Mapa de calados máximos para un periodo de retorno T=500 años.	32
Figura 22.	mapa de máxima elevación de la lámina de agua para un periodo de retorno de T=500 años.	33
Figura 23.	Afección de la avenida de periodo de retorno T=500 años sobre la parcela objeto de estudio.	33
Figura 24.	Comparativa afección de las manchas de inundación sobre la parcela, para un periodo de retorno de T=500 años	34
Figura 25.	Resultados de nivel para t=1200 sg y t=1400 sg.	34
Figura 26.	Resultados de nivel para t=2400 sg y t=5300 sg.	35
Figura 27.	Afección de la avenida de periodo de retorno T=500 años sobre la parcela objeto de estudio.	37



1 INTRODUCCIÓN.

1.1 ANTECEDENTES.

Xestión do solo de Galicia Xestur, S.A. (en adelante también “Xestur” o “cliente”) se encuentra en fase estudio de viabilidad para el desarrollo de un suelo industrial en la zona de Pontecesures.

Por otro lado, Aguas de Galicia, siguiendo las directrices impuestas por la Directiva 2007/60/CE relativa a la Evaluación y a la Gestión de Riesgos de Inundación, ha realizado la Fase 02 de dicha directiva donde se elaboran los mapas de peligrosidad de inundación y los mapas de riesgo de inundación (incorporación a la zona inundable de los usos del suelo en esa zona y de los principales daños esperados), en los tramos de río con riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI).

Parte de la parcela objeto de desarrollo se encuentra en la zona inundable del río Valga (ARPSI ES14-05-15-02-11), por lo que Xestur ha mantenido una primera reunión de consultas previas con el organismo de Aguas de Galicia.



Figura 1. Esquema de la parcela (rojo con contorno negro) sobre mancha de inundación de T500 años (amarillo) y (rosa) ZFP del río Valga. Fuente: Augas de Galicia.

Por ello Xestur se propone llevar a cabo un estudio hidráulico de detalle para evaluar la posible repercusión de la actuación sobre el riesgo de inundación.

1.2 OBJETIVOS.

En este contexto, Xestur se pone en contacto con Aquática para analizar la situación actual de la parcela desde el punto de vista de inundación.



1.3 ESTRUCTURA DEL ESTUDIO

Para alcanzar este objetivo el presente documento se ha estructurado de la siguiente forma.

- Apartado 1: Introducción, donde se definen los antecedentes del estudio, los objetivos a alcanzar y se estructura el documento.
- Apartado 2: Descripción de la zona de estudio, donde se localiza y caracteriza el entorno del Río Valga, y se describe la parcela de Xestur.
- Apartado 3: Descripción de la metodología es estudio. En este apartado se resume la metodología aplicada en el presente estudio, así como una descripción del modelo hidráulico empleado.
- Apartado 4: actualización de los datos existentes, donde se describen los trabajos llevados a cabo para actualizar los datos y modelos de partida para el estudio de inundación.
- Apartado 5: Modelado hidráulico del río Valga. En este capítulo se aplica la metodología al tramo del río afectadas por la ordenación del suelo de Xestur.
- Apartado 6: Análisis de resultados, donde se presentan los resultados del modelo hidráulico en el tramo de río objeto de estudio en su estado actual.
- Apartado 7: Resumen y conclusiones: se resume la metodología empleada y se extraen las conclusiones del estudio

1.4 DATOS DE PARTIDA.

Para la redacción del presente estudio se parte como principal fuente de información la donada por Aguas de Galicia a XESTUR relativa al Estudio de Aguas de Galicia en la *ARPSI - ES14-05-15-02-11 del río Valga*, que contiene:

- Topografía del cauce.
- MDT: Modelo Digital del terreno.
- Croquis de las estructuras de cauce
- Estudio hidrológico, donde se definen los caudales del río para cada periodo de retorno.
- Modelo Hidráulico HecRas del río Valga.

Además, el cliente ha proporcionado los siguientes datos:

- Plano en CAD de la parcela objeto de ordenación.
- Topografía de detalle de la parcela realizada entre los meses de abril y mayo de 2021.



2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 LOCALIZACIÓN.

El ámbito de estudio se localiza sobre el Concello de Valga, al sur del municipio de Pontecesures.



Figura 2. Localización de la zona de estudio. Fuente: Google Earth

El tramo del río Valga objeto de estudio abarca desde su desembocadura en el río Ulla hasta unos 500 metros aguas arriba de la parcela de Xestur, una distancia suficiente para poder definir correctamente los límites de las manchas de inundación asociadas a los diferentes periodos de retorno estudiados.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE RÍO DE ESTUDIO

El río Valga tiene una longitud total de 13.656 m, nace en la parroquia de Frades y transcurre en dirección Noreste-Suroeste hasta mediado su recorrido, donde gira bruscamente para continuar en dirección Suroeste-Noreste hasta la llegada a su desembocadura sobre el río Ulla, en las inmediaciones de Pontecesures.

El tramo objeto de estudio es el que se muestra en la siguiente imagen, donde además se aprecia el pequeño tramo correspondiente al cauce del río Soutiño, un pequeño afluente del río Valga en su tramo final.



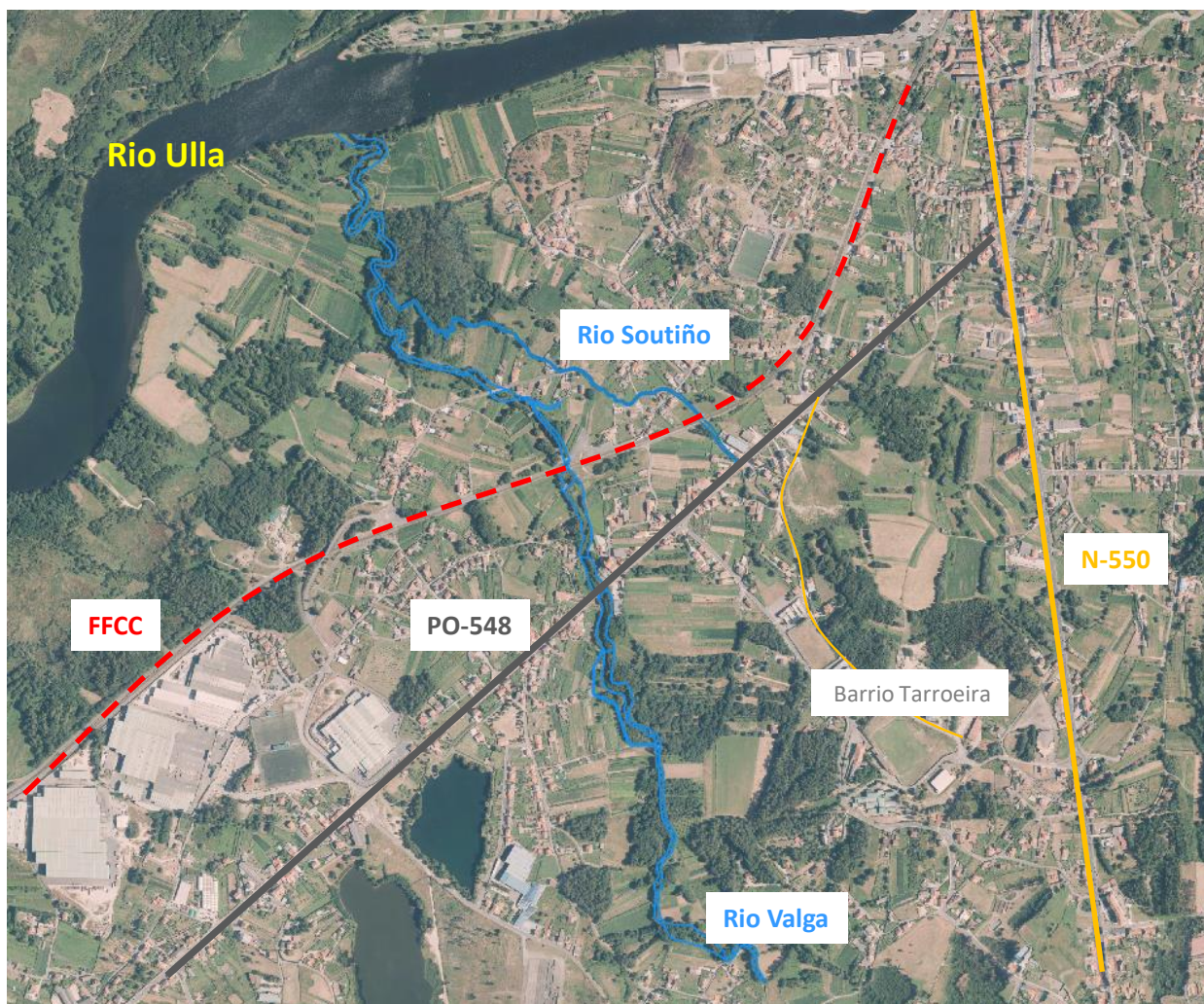


Figura 3. Tramos del río Valga y río Soutiño objeto de estudio en el presente documento.

En cuanto a la morfología del río Valga en el tramo objeto de estudio, se pueden diferenciar tres tramos:

- El primero de ellos, desde su desembocadura en el río Ulla hasta la unión del mismo con el río Soutiño, e incluso un poco más aguas arriba, destaca por su trazado sinuoso y con poca pendiente, circulando entre praderas y llanuras de inundación, sin edificaciones cercanas ni obstáculos en su recorrido.
- El segundo de ellos, desde la confluencia con el río Soutiño hasta el paso bajo la PO-548, destaca por un trazado confinado por el gran número de edificaciones cercanas al cauce, así como parcelas con muros de cierre sobre el cauce. En este tramo, el cauce del río Valga dispone de un tramo encauzado mediante muros de gaviones.
- El último de los tramos, aguas arriba del paso bajo la carretera PO-548, destaca nuevamente por discurrir en un tramo sin presencia cercanas de edificaciones u otros obstáculos en el cauce. Este tramo del río dispone de anchas llanuras de inundación.



2.3 PARCELA DE XESTUR.

En la actualidad el planeamiento y el proyecto de urbanización están en fase de licitación. El presente estudio se encuadra dentro de una serie de estudio previos orientados a definir los condicionantes de ordenación. En este contexto, uno de los objetivos de conocer con detalle las manchas de inundación para ordenar la misma en función de dichos resultados.

La parcela se ubica aguas arriba de la PO-548 en la margen derecha del río Vlaga a unos 500 metros del cauce, lindando al este con la carretera N-550 y al oeste con la carretera del Barrio Tarroeira que sale de la rotonda de la PO-548. El área total de la parcela asciende aproximadamente a unas 30 Hectáreas.



Figura 4. Representación de la parcela sobre ortofoto de la zona de estudio.



3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

3.1 INTRODUCCIÓN.

La metodología seguida para la realización del presente trabajo se ha ajustado en todo momento a la definida por Aguas de Galicia en los trabajos de “MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN DE LAS ÁREAS DE RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN FLUVIALES DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA GALICIA COSTA”.

A continuación, se incluye la descripción de dicha metodología llevado a cabo por Servicio de Planificación e Programación Hidrolóxica.

El análisis hidrológico – hidráulico se basa, en primer lugar, en el cálculo de los caudales fluyentes por los cauces en diferentes períodos de retorno (máxima crecida ordinaria y avenidas de 100 y 500 años) que serán representativos de los caudales que determinan el dominio público hidráulico y las avenidas de media y baja frecuencia de inundación.

La segunda fase de este enfoque se desarrolla a través de la modelización hidráulica mediante modelos de cálculo uni y bidimensional del cauce y el terreno colindante con las características de los caudales fluyentes calculados en la hidrología, así como las condiciones de contorno que proporcionan un resultado del comportamiento fluvial lo más parecido a la realidad.

3.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO.

La metodología seguida responde a las recomendaciones de la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, donde en primer lugar se establece que “en principio, los caudales de cálculo a emplear en la delimitación de las zonas inundables para el desarrollo del SNCZI deben basarse en los datos proporcionados por el mapa de caudales máximos CAUMAX (CEDEX 2009)”. Sin embargo, en las cuencas de la demarcación de Galicia Costa no se poseen resultados del CAUMAX por lo que se ha tenido que realizar un estudio hidrológico de las cuencas de Galicia Costa.

Galicia Costa tiene una red fluvial muy densa y sus cuencas, por lo general, tienden a ser alargadas, por lo tanto, el desagüe se puede realizar con una mayor fluidez que en las cuencas redondeadas o circulares. De forma general, se pueden distinguir dos tipos de cuencas, las cuencas de interior y las cuencas costeras. Las cuencas de interior son cuencas asociadas a ríos de mayo envergadura (Ulla, Tambre, etc...), mientras que por otro lado, las cuencas costeras son cuencas más pequeñas que vierten directamente al mar y de mayor torrencialidad.

En este contexto se ha considerado oportuno aplicar dos modelos hidrológicos diferentes en función de la entidad de la cuenca. Así para cuencas mayores de 10 Km² se ha aplicado modelo hidrológico basado en series sintéticas de caudales (método agregado basado en análisis estadístico) y para el caso de cuencas menores de 10 Km², se ha empleado el método racional.

El modelo hidrológico para generar series sintéticas de caudales instantáneos has sido desarrollado por el Instituto Hidráulico Ambiental IH Cantabria, bajo la asistencia técnica “CARACTERIZACIÓN DE HIDROGRAMAS ASOCIADOS A EVENTOS EXTREMOS EN DIVERSOS PUNTOS DE LA RED FLUVIAL DE GALICIA COSTA” y surge de un modelo similar pero de caudales diarios aplicado con éxito en el marco de Galicia Costa dentro de los trabajos de planificación hidrológica dentro de la asistencia técnica “ESTUDIO DEL RÉGIMEN DE CAUDALES ECOLÓGICOS DE LAS MASAS DE AGUA SUPERFICIALES DE LA CATEGORÍA RÍOS DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DE GALICIA-COSTA”.



A continuación, se resume dicha metodología:

En base a las series históricas disponibles (Red de Aforos de Galicia Costa y de pluviómetros y pluviógrafos de Meteogalicia) y las series sintéticas a escala mensual procedentes del modelo SIMPA del CEDEX, se ha calibrado un modelo de series temporales (modelo que depende fundamentalmente de los descriptores de las cuencas: área, pendiente media, tipo de suelo y precipitaciones extremas). Con el modelo de series temporales calibrado se generan series de caudales diarios suficientemente extensas (1000- 10000 años) para poder realizar ajustes extremales y determinar los caudales asociados a los diferentes períodos de retorno deseados (2.33-500 años).

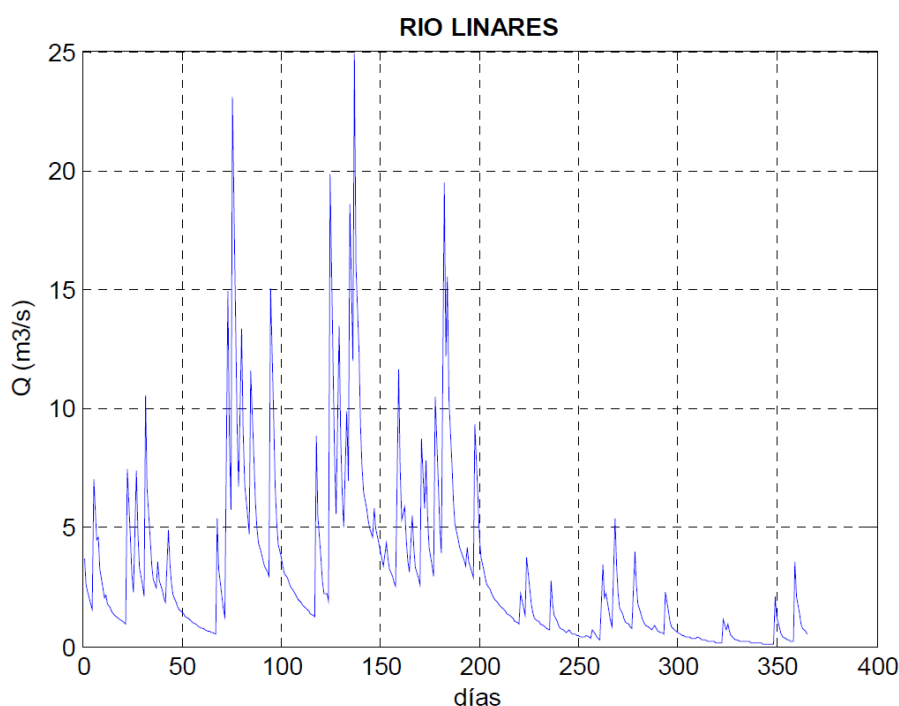


Figura 5. Ejemplo de serie de caudales sintéticos de un año de duración en el río Linares. Fuente: Aguas de Galicia

Para pasar de caudales diarios a caudales máximos instantáneos (10 minutos), se ha calibrado una expresión basándonos en los aforos disponibles y en fórmulas tomadas de la literatura. Aplicando esta expresión a los caudales diarios obtenidos, se determinan los caudales punta de los hidrogramas de diseño, tal y como se requiere en los modelos hidráulicos.

A efectos prácticos, la definición del hidrograma de avenida, con un cierto período de retorno, para un tramo de río, requiere definir dos parámetros básicos: el tiempo al pico y el caudal pico; conocidos ambos, la forma del hidrograma puede tomarse como una función estándar. De la misma forma se ha calibrado una expresión de tiempo al pico.



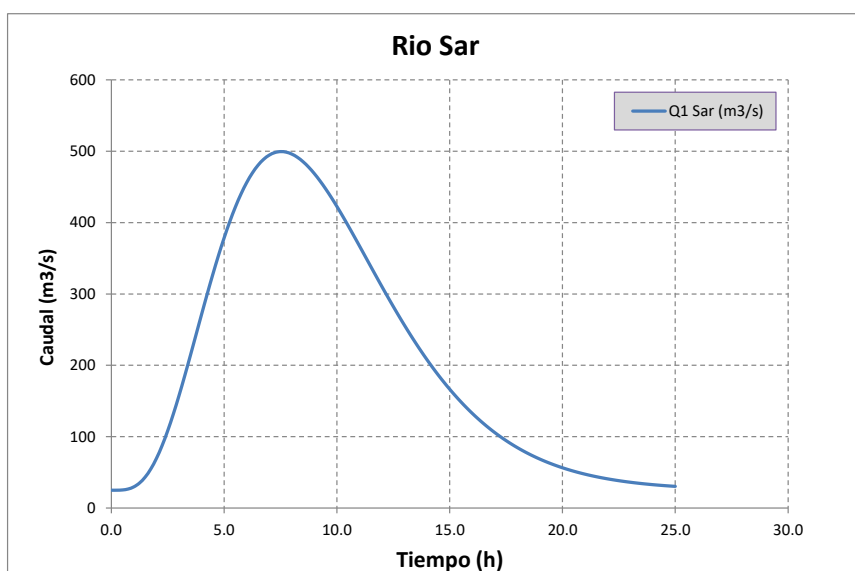


Figura 6. Ejemplo de hidrograma de diseño en el río Sar para 100 años de período de retorno. Fuente: Aguas de Galicia

El método hidrológico de series sintéticas, se ha aplicado en todos los tramos de río con un área vertiente mayor de 10 Km², a excepción de la cuenca baja del Ulla, donde debido a su envergadura (Área > 2.500 Km²) se sale del rango de aplicación de dicha metodología. En este caso se han aplicado caudales resultantes de métodos hidrológicos agregados convencionales (HechHms) y métodos foronómicos.

Por último, en el caso de aquellos tramos en régimen hidrológico alterado (presencia de estructuras de regulación aguas arriba) se han empleado los caudales alterados para los períodos de retorno de 100 y 500 años. Se descartaron el efecto laminador de las presas en aquellos casos en que se cumpliesen al menos una de las siguientes condiciones:

- El porcentaje de la cuenca controlada por el embalse es menor al 10% de la cuenca vertiente del estudio.
- El volumen útil del embalse es menor del 10% del volumen de avenida en la zona de estudio para un período de retorno de $T=10$ años.
- El grado de laminación de la presa inferior al 20% del volumen de avenida.

3.3 ANÁLISIS HIDRÁULICO

El análisis hidráulico tiene como objetivo obtener la extensión de la lámina de inundación, así como los valores de calados y velocidades en cualquier punto de la llanura de inundación del cauce a estudiar y para cada período de retorno.

El correcto modelado hidráulico, y por consiguiente los resultados obtenidos, depende fundamentalmente de una serie de condicionantes, los cuales se enumeran a continuación:

- Caudales: El caudal punta y el tiempo al pico definen los parámetros básicos para poder calcular el hidrograma de la avenida. Estos parámetros se definen en el estudio hidrológico.
- Terreno: Una correcta definición de la topografía tanto del cauce como de las llanuras de inundación del río son cruciales para la correcta simulación hidráulica del tramo de río objeto de estudio. En este contexto, se ha realizado una extensa labor de trabajo de campo con el objetivo de definir el cauce de aguas bajas del río. Esta topografía de detalle se ha integrado dentro del LIDAR proporcionado por el IET para generar los MDTs siguiendo las directrices de la "Guía



Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables”, definiendo el MDT Natural y el MDT Actual.

- Usos del suelo: El uso del suelo define el tipo de terreno y por tanto la rugosidad del mismo, lo cual es necesario para conocer la fricción dentro del modelo hidráulico. En este caso los datos empleados provienen del CORINE y del SIOSE (Sistema de Información de Ocupación de Suelo en España), aunque en zonas donde ha sido necesario más detalle para lo cual se han empleado Ortofotos.
- Estructuras: Dentro de los trabajos de campo llevados a cabo se han realizado croquis de obstáculos (puentes y azudes) localizados sobre el cauce o en la llanura de inundación susceptibles de afectar el flujo del río.
- Información adicional: Conocimiento del terreno in situ, mediante visitas de campo y observación de fotos de los cauces a estudiar.
- Información sobre elementos aguas abajo y aguas arriba de los tramos en estudio que permitan definir las condiciones de contorno del modelo: (curva de gasto, niveles de embalse, calado crítico, azudes, aforos,...).

El correcto modelado hidráulico de las zonas inundables es uno de los mayores retos de la ingeniería fluvial, y se puede realizar desde distintas aproximaciones, que dependen fundamentalmente de la importancia del río, de la geomorfología del mismo y de los datos de los que el técnico disponga para enfrentarse al problema

Así, en primer lugar, los resultados del análisis geomorfológico-hidráulico así como en análisis del LIDAR, ayudan al primer enfoque hidráulico puesto que sirven para determinar cómo afrontar la elaboración del modelaje (dónde están los flujos principales, cuales son las líneas de flujo, detección de zonas de expansión, delimitación del cauce de aguas bajas en ocasiones difuso, etc.). Por tanto, para el modelo hidráulico se han tenido presentes las características observadas en la geomorfología del cauce.

Es evidente que los flujos dentro de los ríos son tridimensionales en la realidad. Aun así, a la hora de realizar una simulación numérica del comportamiento de un río, debemos plantearnos la idoneidad de utilizar un modelo unidimensional o acudir a un modelo bidimensional integrado en la profundidad de la lámina de agua, ya que la simulación numérica en 3D es extremadamente compleja y está circunscrita hoy en día a trabajos de investigación y desarrollo.

El resultado de los modelos hidráulicos proporciona los datos geográficos de **extensión de la inundación, calados y velocidades** para las avenidas de máxima crecida ordinaria (determinante del dominio público hidráulico) y de las avenidas de 100 y 500 años de período de retorno.

También se ha delimitado la Zona de Flujo Preferente según el punto 5.2 del RD 9/2008, se define como la envolvente de zona de inundación peligrosa del T100 y la Vía de Intenso Desagüe.

- La zona de inundación peligrosa (ZIP) se define como la zona donde se puedan producir graves daños sobre las personas y los bienes para la avenida de 100 años de período de retorno, y está limitada a:
 - calado $> 1\text{ m}$
 - velocidad $> 1\text{ m/s}$
 - producto de ambas $> 0.5\text{ m}^2/\text{s}$

Estas áreas se determinan a partir de las herramientas GIS, a partir de los resultados del modelo hidráulico.



- La vía de intenso desagüe (VID), zona donde se concentra preferentemente el flujo durante las avenidas. Se determina por la zona que pasaría la avenida de 100 años sin producir una sobreelevación mayor de 0,3m, respecto a la cota de la lámina de agua que se produciría con esa misma avenida considerando toda la llanura de inundación existente.

En el caso de la resolución mediante un modelo bidimensional, debido al propio concepto unidimensional de la VID, se podrían alcanzar infinitas soluciones teóricamente correctas. En este contexto se han realizado varias iteraciones en el modelo 2D con distintas geometrías de la VID hasta alcanzar un resultado satisfactorio y lo más realista posible.

De todas formas no hay que olvidar que el propósito de la VID es definir la ZFP, que es una envolvente, de tal forma que si partimos de la zona peligroso del T100 y comprobamos que la sobreelevación es menor de 0.30 la VID siempre estará incluida dentro de dicha zona, y por tanto no influirá a la hora de definir la ZFP.

3.4 APLICACIÓN AL VALGA.

El presente informe sigue en todo momento las prescripciones y criterio definidos por Aguas de Galicia en los trabajos de "MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN DE LAS ÁREAS DE RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN FLUVIALES DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA GALICIA COSTA".

3.4.1 ESTUDIO HIDROLOGICO

En cuanto al estudio hidrológico, se han empleado los valores de Caudal definidos por Aguas de Galicia en la *ES14-05-15-02-11*.

	T100	T500
Río Valga	41.20 m ³ /s	51.16 m ³ /s
Río Soutiño	7.50 m ³ /s	11.30 m ³ /s

3.4.2 ESTUDIO HIDRAULICO.

Se ha llevado a cabo una actualización del modelo hidráulico que se describe en el siguiente apartado.

Comentar que únicamente se ha cambiado el modelo, se han mantenido las mismas condiciones de modelado.



4 ACTUALIZACION DE LOS DATOS EXISTENTES.

4.1 OBRAS DE PASO.

El día 25 de junio de 2021 se realiza una visita a la zona de estudio, con la finalidad de actualizar los datos topográficos de partida de las obras de paso, estructuras sobre el cauce y otros elementos singulares que pudieran apreciarse en dicha visita.

Como resultado de la visita, se detectan dos nuevas obras de paso bajo la vía de ferrocarril, una ODT y el paso sobre el río Soutiño, no incluidas en el modelo anterior:



Figura 7. ODT bajo la vía de FFCC y paso del río Soutiño. Fuente: Aquatica.

En la siguiente imagen se puede observar la entidad de la infraestructura lineal que representa la línea de FFCC sobre el paso del río Soutiño y la elevación sobre la llanura de inundación de río.



Figura 8. ODT bajo la vía de FFCC. Estructura sobre el cauce del Río Soutiño. Fuente: Aquatica.



Estas ODT se sitúan de la siguiente manera:

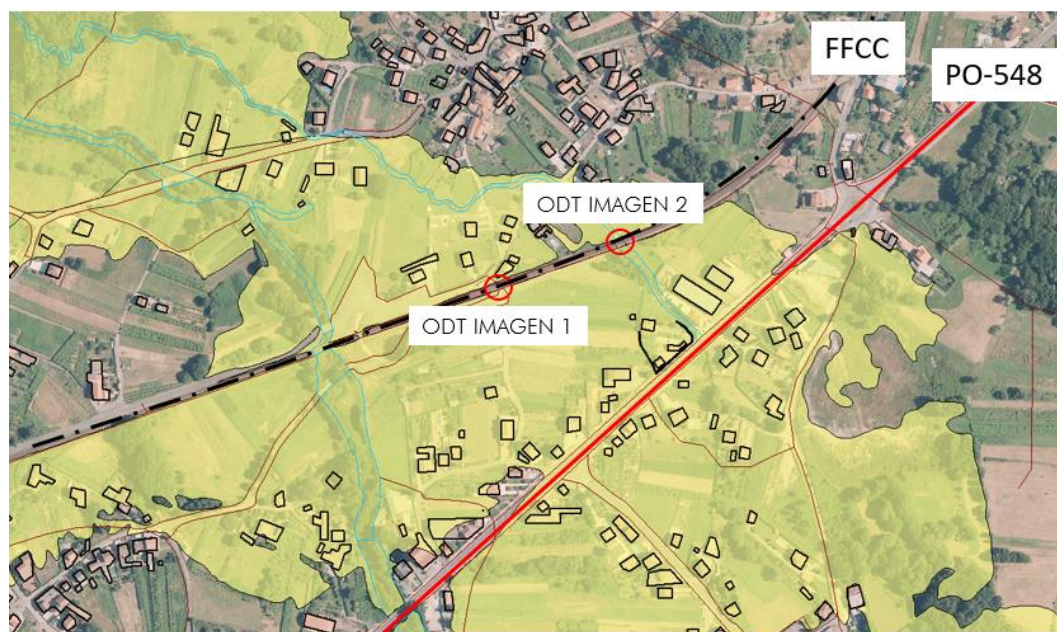


Figura 9. Situación de las nuevas ODT detectadas tras la visita de campo.



4.2 MODELO DIGITAL DEL TERRENO.

Además, en la visita también se pudo observar el relleno efectuado en la parcela objeto de estudio, y que se plasma en el Modelo Digital del Terreno proporcionado por Xestur.



Figura 10. Relleno en la parcela objeto de estudio. Fuente: Aquática.

En la siguiente comparativa de MDTs (MDT proporcionado y actualizado) se detecta con claridad el relleno.

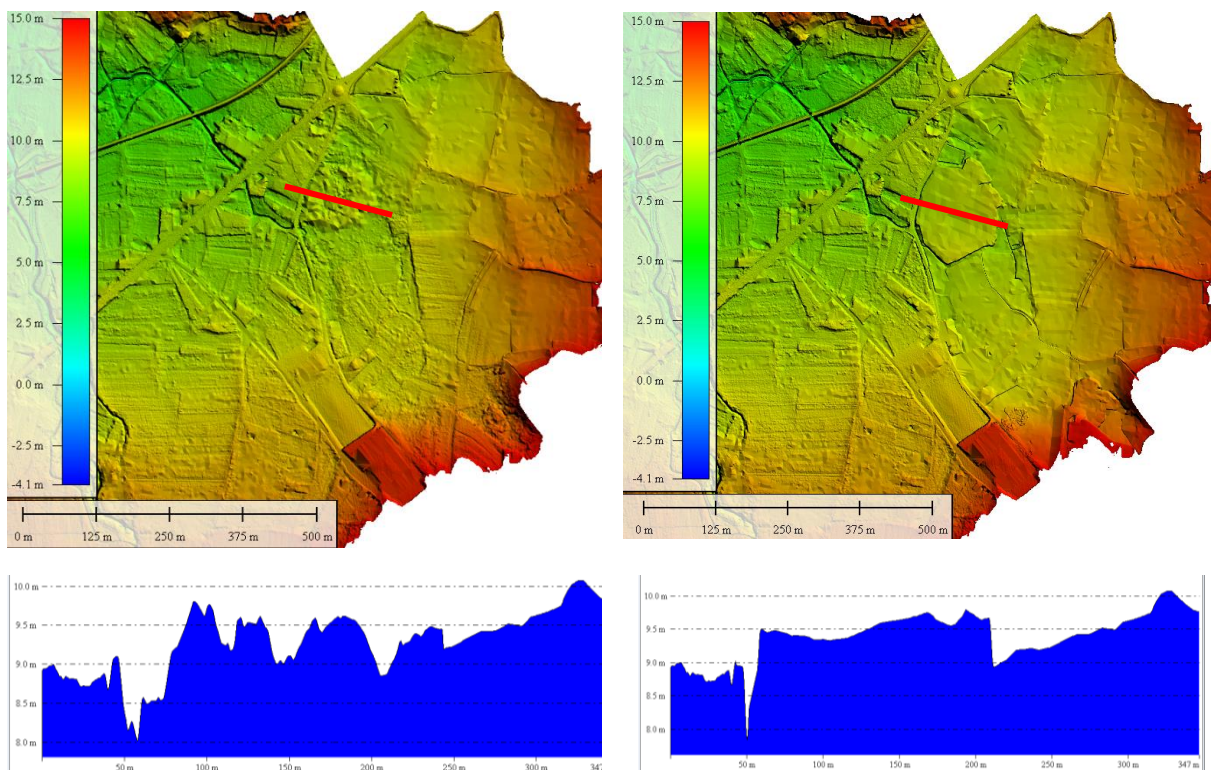


Figura 11. Comparativa de los modelos digitales del terreno proporcionado y actualizado con los datos de Xestur (arriba) y secciones transversales (abajo).

4.3 ACTUALIZACION DEL MODELO HIDRÁULICO.

El modelo hidráulico facilitado por Aguas de Galicia en un HecRas, modelo que resuelve la hidráulica de forma unidimensional. Los modelos de simulación numérica unidimensionales consideran que la velocidad es paralela a la dirección del flujo, dirección que evidentemente puede cambiar sección a sección. Esta simplificación se puede asumir en determinadas situaciones, pero no en todos los casos.

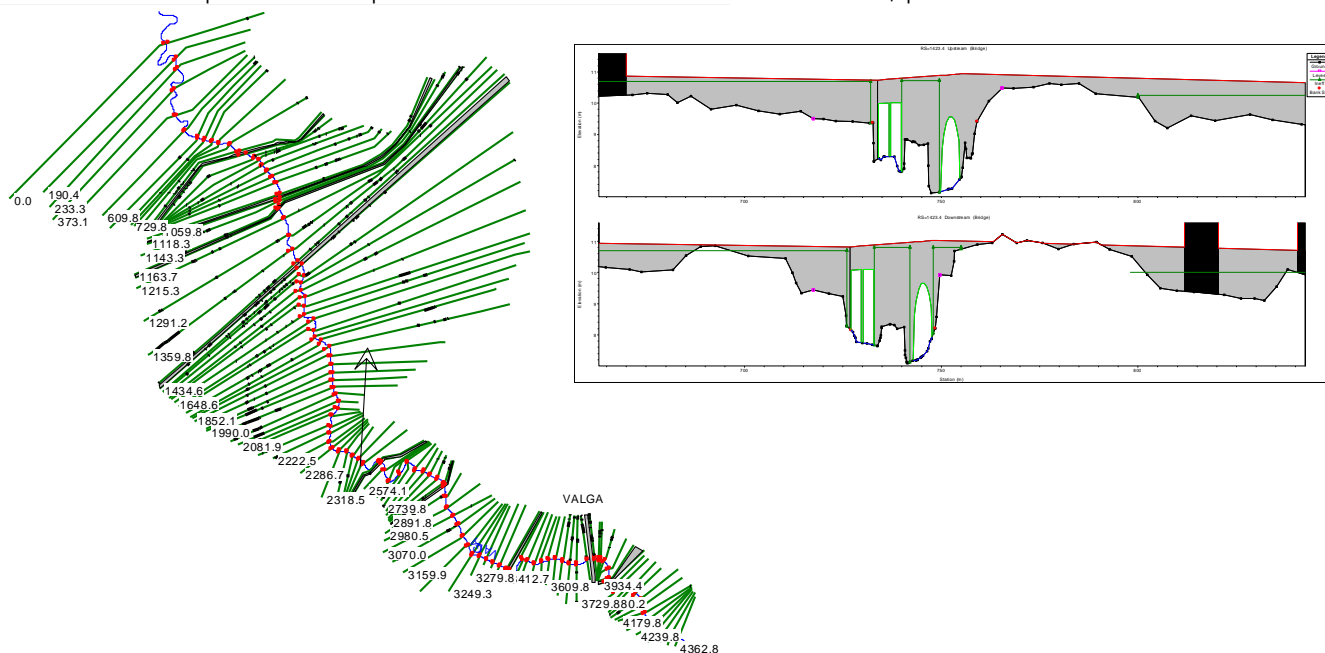


Figura 12. Imagen del modelo hidráulico del río Valga y sección transversal de un puente. Fuente. Aguas de Galicia

No es posible establecer con precisión cuándo es necesaria la simulación con modelos unidimensionales o bidimensionales. En cambio, hay una serie de circunstancias en las cuales es imprescindible la consideración de modelos bidimensionales para una correcta definición del flujo:

1. Cuando el flujo es bidimensional, esto es, el flujo se separa y puede circular por dos direcciones diferentes, como puede ocurrir en grandes llanuras de inundación.
2. Cuando la velocidad en las llanuras de inundación es mucho menor que la velocidad en el cauce principal. En estos casos, los calados obtenidos por los modelos unidimensionales serán menores que los acaecidos en la realidad. Afortunadamente se han desarrollado modelos unidimensionales que tienen en cuenta, de una manera razonablemente buena, la no uniformidad en la distribución transversal de la velocidad longitudinal en función del coeficiente de rugosidad de cada parte de la sección transversal.
3. Cuando las llanuras de inundación son grandes, como puede suceder en ciertas zonas de desembocadura.
4. Cuando hay separación del flujo en tramos en los cuales este no circula en línea recta. Esta separación se puede producir por la presencia de islas, derivaciones importantes, puentes de varios tramos.
5. Cuando el río circula por una curva con una velocidad suficientemente importante como para movilizar el lecho significativamente. En estos casos la erosión del lecho computada a partir de la velocidad media en la sección será menor que la que realmente se producirá.



En este caso, nos encontramos en una zona del río cercana a su desembocadura, o unión con el río Ulla, donde el río dispone de una pendiente baja con meandros, y tal y como se observa en las manchas de inundación posee unas llanuras de inundación anchas.

A esto, hay que unir el efecto de embalsamiento que produce sobre el flujo desbordado las dos infraestructuras lineales existentes; la línea de FFCC y la carretera PO 548.

Por todo ello se va a llevar a cabo una actualización del modelo, con la construcción de un modelo bidimensional Iber en su versión 2.6. Este modelo ha sido empleado por Aguas de Galicia en la fase 2 del MAPRI.

4.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO 2D.

4.4.1 INTRODUCCIÓN

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Asimismo, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales o a cunas salinas. En estos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible repercusión en los resultados del modelo. En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de aguas someras bidimensionales son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables, y cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes.

4.4.2 ECUACIONES HIDRODINÁMICAS

En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

en donde h es el calado, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, Z_s es la elevación de la lámina libre, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo, ρ es la densidad del agua, Ω es la velocidad angular de rotación de la tierra, λ es la latitud del punto considerado, τ_{xx}^e , τ_{xy}^e , τ_{yy}^e son las tensiones tangenciales efectivas horizontales, y M_s , M_x , M_y son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.



Se incluyen los siguientes términos fuente en las ecuaciones hidrodinámicas:

- Presión hidrostática.
- Pendiente del fondo.
- Tensiones tangenciales viscosas y turbulentas.
- Rozamiento del fondo.
- Rozamiento superficial por viento.
- Precipitación.
- Infiltración.

Se modelan asimismo los frentes seco-mojado, tanto estacionarios como no estacionarios, que puedan aparecer en el dominio. Dichos frentes son fundamentales en la modelización de zonas inundables en ríos, así como en estuarios. De esta forma se introduce la posibilidad de evaluar la extensión de zonas inundables en ríos, así como el movimiento del frente de marea en estuarios y zonas costeras.

4.4.3 FRICCIÓN DE FONDO.

El fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que es equivalente al rozamiento con una pared, con la particularidad de que, en general, en ingeniería hidráulica la rugosidad del fondo es elevada, como ocurre en ríos y estuarios.

La fricción del fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo. Por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia. Ambos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de fricción u_f , que no es más que una forma de expresar la tensión tangencial de fondo con unidades de velocidad:

$$u_f = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$$

donde τ_b es el módulo de la fuerza de fricción de fondo, y ρ es la densidad del agua.

En los modelos promediados en profundidad no es posible calcular la velocidad de fricción por medio de funciones de pared estándar, tal y como se hace en los contornos tipo pared, ya que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical. Por lo tanto, es necesario relacionar la velocidad de fricción u_f con la velocidad media promediada en profundidad mediante un coeficiente de fricción. La tensión de fondo se puede expresar como

$$\tau_b = \rho u_f^2 = \rho C_f |U|^2$$

en donde C_f es el coeficiente de fricción de fondo. Existen diferentes expresiones que permiten aproximar el coeficiente de fricción C_f . La mayor parte de ellas asumen flujo uniforme en canal con un perfil logarítmico de velocidad en profundidad.

A diferencia de los modelos 1D, en los modelos 2D el radio hidráulico deja de definirse como área de la sección mojada entre perímetro mojado, ya que en 2D no tiene sentido el definir una sección transversal. Tomando una columna de fluido de anchura Δx y calado h , el radio hidráulico se calcularía como:



$$R_h = \frac{A}{P_m} = \frac{h \Delta x}{\Delta x} = h$$

Por lo tanto, en los modelos 2D es lo mismo hablar de radio hidráulico y de calado.

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning n como parámetro. La fórmula de Manning utiliza el siguiente coeficiente de rugosidad:

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}}$$

4.4.4 TENSIONES EFECTIVAS

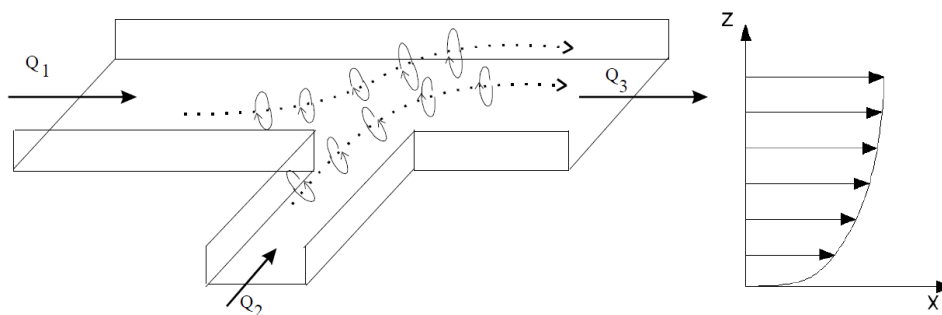
Las tensiones efectivas horizontales que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas incluyen los efectos de las tensiones viscosas, de las tensiones turbulentas y los términos de dispersión debido a la no homogeneidad en profundidad del perfil de velocidad

$$\tau_{ij}^e = \tau_{ij}^v - \overline{u'_i u'_j} + D_{ij}$$

en donde τ_{ij}^v son las tensiones viscosas, $\overline{u'_i u'_j}$ son las tensiones turbulentas (también llamadas tensiones de Reynolds), y D_{ij} son los términos de dispersión lateral:

$$D_{ij} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^{z_s} (U_i - \bar{u}_i)(U_j - \bar{u}_j) dz$$

Los términos de dispersión se desprecian en las ecuaciones 2D-SWE (hipótesis de perfil de velocidad uniforme en profundidad), debido a la imposibilidad de calcularlos de forma general con un modelo promediado en profundidad. Su importancia será mayor cuanto menos uniforme sea el perfil de velocidad en profundidad. Una situación típica en la que estos términos pueden cobrar importancia es en canales con codos o radios de curvatura pequeños, así como en la confluencia de canales.



Flujos secundarios (izquierda) y perfil vertical de velocidad (derecha). Principales causas de los términos de dispersión

Las tensiones viscosas se calculan a partir de la viscosidad cinemática del fluido (ν) como

$$\tau_{ij}^v = \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$



En general, excepto cerca de las paredes, y excepto en flujo laminar, el orden de magnitud de las tensiones viscosas es mucho menor que el del resto de los términos que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas.

Las tensiones turbulentas son varios órdenes de magnitud mayores que las tensiones viscosas, especialmente en zonas de recirculación, en donde la producción de turbulencia es elevada. En el caso de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales las tensiones turbulentas constituyen 3 nuevas incógnitas a calcular, que sumadas al calado y a las velocidades U_x , U_y producen un total de 6 incógnitas. Esto es lo que se conoce como problema de cierre de la turbulencia, porque es necesario resolver un conjunto de 3 ecuaciones con 6 incógnitas. Debido a ello, es necesario utilizar un modelo de turbulencia que permita calcular dichas tensiones turbulentas. La mayoría de los modelos de turbulencia calculan los términos de difusión turbulenta a partir de la siguiente expresión

$$-\frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

donde ν_t , es la viscosidad turbulenta, que se calcula mediante el modelo de turbulencia. El problema radica en que no existe un modelo de turbulencia universal, que permita calcular de forma precisa las tensiones turbulentas, por lo que a lo largo del tiempo se han ido desarrollando diferentes modelos de mayor o menor complejidad. La formulación de Boussinesq es utilizada por todos los modelos de turbulencia incluidos en Iber.

4.4.5 CONDICIONES DE CONTORNO HIDRODINÁMICAS

En un problema bidimensional es necesario distinguir entre dos tipos de contornos: abiertos y cerrados. Los contornos cerrados, también llamados contornos de tipo pared, son impermeables, no permitiendo el paso del fluido a través de ellos.

4.4.5.1 CONTORNOS CERRADOS

La presencia del contorno tipo pared genera una fuerza de rozamiento lateral en el fluido, de manera similar a la fricción ejercida por el rozamiento del fondo. Se pueden imponer las siguientes condiciones de contorno tipo pared:

- Condición de deslizamiento libre (tensión tangencial nula)
- Condición de fricción de pared (funciones de pared)

La condición de deslizamiento libre equivale a despreciar la tensión de rozamiento generada por los contornos tipo pared sobre el fluido. En general en ingeniería hidráulica, y especialmente en ingeniería fluvial, la superficie de contacto con los contornos laterales es mucho menor que la superficie de contacto con el fondo debido a la separación entre escalas horizontal y vertical, por lo que la fuerza de rozamiento en los contornos de pared se puede despreciar. En este caso se impondría una condición de deslizamiento libre en los contornos cerrados.

En problemas en los que la dimensión horizontal y vertical son similares (canales de sección muy estrecha) esta fuerza de rozamiento puede tener cierta importancia en el desarrollo del flujo, aunque en general la influencia es pequeña. Si se quiere tener en cuenta el efecto del rozamiento lateral se puede introducir una condición de contorno tipo fricción, que consiste en imponer una fuerza tangencial en dirección opuesta al flujo en el contorno. En este caso en Iber se distingue entre régimen turbulento liso y régimen turbulento rugoso en función de la rugosidad de la pared y de la velocidad del flujo en las proximidades de la pared.



4.4.5.2 CONTORNOS ABIERTOS

En los contornos abiertos se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno. Para que las ecuaciones de aguas someras bidimensionales estén bien planteadas desde el punto de vista matemático, el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno (rápido/lento).

En un contorno de entrada es necesario imponer 3 condiciones de contorno si el régimen es supercrítico (una para cada una de las tres ecuaciones de St.Venant), mientras que si se produce régimen suscritico es suficiente con imponer 2 condiciones. En un contorno de salida es suficiente con imponer una única condición si el régimen es suscritico, mientras que no es necesario imponer ninguna condición si el régimen es supercrítico. Si el usuario impone menos condiciones de las necesarias desde un punto de vista matemático las ecuaciones estarán indeterminadas y no se obtendrá una solución correcta. Las condiciones concretas a imponer pueden ser el calado, las componentes de la velocidad, o una combinación de ambos. En Iber se consideran diferentes opciones para imponer las condiciones de contorno, las cuales se recogen en la Tabla 2.

Contorno	Régimen	Condiciones impuestas
Entrada	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno
		Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Supercrítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua
Salida	Subcrítico	a) Calado b) Cota de agua c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga) d) Curva de gasto
		No es necesario imponer ninguna condición
	Supercrítico / Crítico	

4.4.6 CONDICIONES DE CONTORNO INTERNAS

Las condiciones de contorno internas se utilizan para modelar estructuras hidráulicas tipo compuertas, vertederos o puentes que entran en carga.

La condición de contorno interna implementada en Iber se puede utilizar para modelar las siguientes condiciones de flujo:

- Flujo bajo compuerta
- Flujo sobre vertedero en lámina libre
- Combinación de compuerta y vertedero
- Perdida localizada

En el presente estudio se han realizado numerosos modelos para simular todas las combinaciones posibles según las distintas condiciones de entrada (avenidas correspondientes a distintos períodos de retorno) y estado de la compuerta (abierta, cerrada y semiabierta). Esto lleva a que los casos de compuerta cerrada se simulen con una condición interna tipo vertedero (flujo sólo sobre la compuerta) y los de compuerta abierta como un caso de combinación de compuerta y vertedero ya que el flujo puede circular tanto por debajo (tipo compuerta) como por encima (tipo vertedero).



4.4.7 MÓDULO DE TURBULENCIA

Una de las principales características de Iber es la inclusión de diversos modelos de turbulencia tipo RANS, los cuales se resuelven en el módulo de turbulencia. Se incluyen los siguientes modelos de turbulencia para aguas someras, por orden creciente de complejidad:

- Viscosidad turbulenta constante.
- Modelo parabólico.
- Modelo de longitud de mezcla.
- Modelo k-ε de Rastogi y Rodi (Rastogi y Rodi, 1978).

La inclusión de modelos de turbulencia de diferente complejidad permite seleccionar el más adecuado en cada caso de estudio, teniendo en cuenta la complejidad del flujo y del modelo. En general el modelo de longitud de mezcla proporciona resultados satisfactorios en ríos y estuarios, pudiendo incluso llegar a no ser necesario utilizar ningún modelo de turbulencia en dichos casos. En estructuras hidráulicas como canales en lámina libre con codos pronunciados y zonas de recirculación, suele ser necesario utilizar por lo menos un modelo de longitud de mezcla, pudiendo ser necesario utilizar un modelo k-ε. La elección del modelo de turbulencia que mejor se adecua a cada caso se realiza en base a la experiencia del usuario, teniendo siempre en cuenta que cuanto más complejo es el modelo mayor es el tiempo de cálculo y más compleja la resolución de las ecuaciones.

El objetivo de los modelos de turbulencia es calcular las tensiones de Reynolds. En los modelos basados en la hipótesis de Boussinesq (todos los utilizados en Iber), las tensiones de Reynolds se evalúan a partir de la expresión

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

El modelo de turbulencia proporciona la viscosidad turbulenta para utilizarla en la expresión anterior.



5 MODELADO HIDRÁULICO DEL RÍO VALGA.

5.1 INTRODUCCION.

El modelo hidrodinámico bidimensional se ha construido siguiendo la metodología descrita anteriormente, pero tomando como datos de partida las mismas condiciones de contorno aplicadas en el modelo unidimensional anterior, correspondiente al MAPRI 2. Así mismo, se han aplicado las actualizaciones en las estructuras y obras de paso que se han detectado tras la visita de campo.

5.2 MALLA NUMÉRICA.

Para la elaboración de la malla numérica se ha optado por establecer elementos de tipo no estructurado en la totalidad de la malla, buscando una buena adaptación a las irregularidades del terreno en la zona de estudio.

Con la finalidad de obtener unos resultados lo más fidedignos posibles con un tiempo computacional adecuado se establecen diferentes tamaños de malla, mediante un proceso iterativo de refinado progresivo en los que establecen tamaños de malla más pequeños en aquellas zonas más susceptibles de inundación y en aquellas zonas en las que por su complejidad se requiera un mayor grado de detalle. Esto da lugar a diferentes tamaños de malla:

- Tamaño de malla de 1 m: zonas del cauce donde están presentes estructuras u obras de paso que requieren un grado alto de detalle. También parte de la vía de FFCC y la carretera PO-548, por su elevado impacto sobre el modelo hidrodinámico al ejercer un efecto presa sobre la lámina de agua.
- Tamaño de malla de 2 m: resto del cauce del río Valga y río Soutiño, así como zonas donde se requiera también un elevado detalle.
- Tamaño de malla de 5 m: zonas especialmente susceptibles a inundación.
- Tamaño de malla de 10 m: zonas susceptibles a inundación, pero sin gran influencia sobre la parcela objeto de estudio.
- Tamaño de malla de 15 m: zonas donde no se requiere un alto grado de detalle.

Además, y con el objetivo de ahorrar tiempo computacional y evitar inestabilidades numéricas, se ha optado por eliminar las edificaciones de la malla numérica.

En la siguiente, se observan los diferentes tamaños de malla empleados en el modelo hidrodinámico:



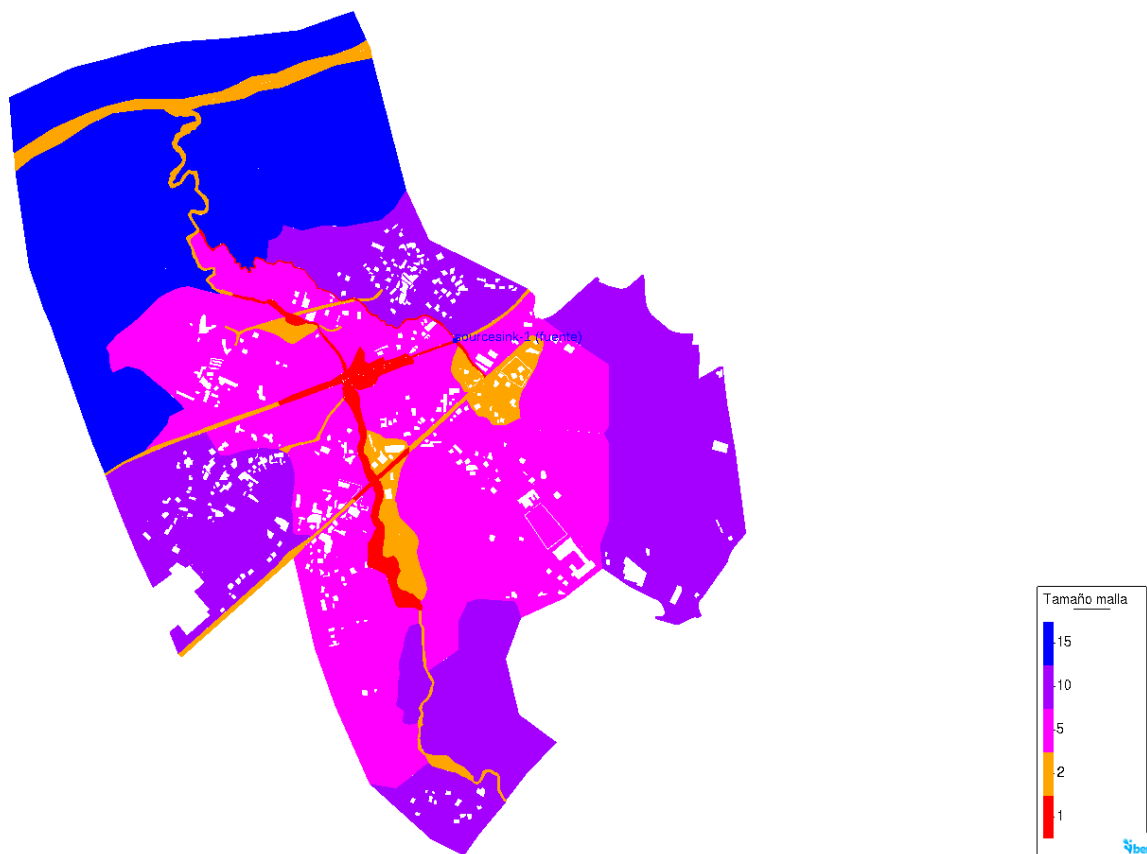


Figura 13. Tamaños de malla empleados en el modelo hidrodinámico. Fuente: Aquática Ingeniería.

En las siguientes imágenes se muestran vistas generales y de detalle de la malla numérica en diferentes zonas del modelo:

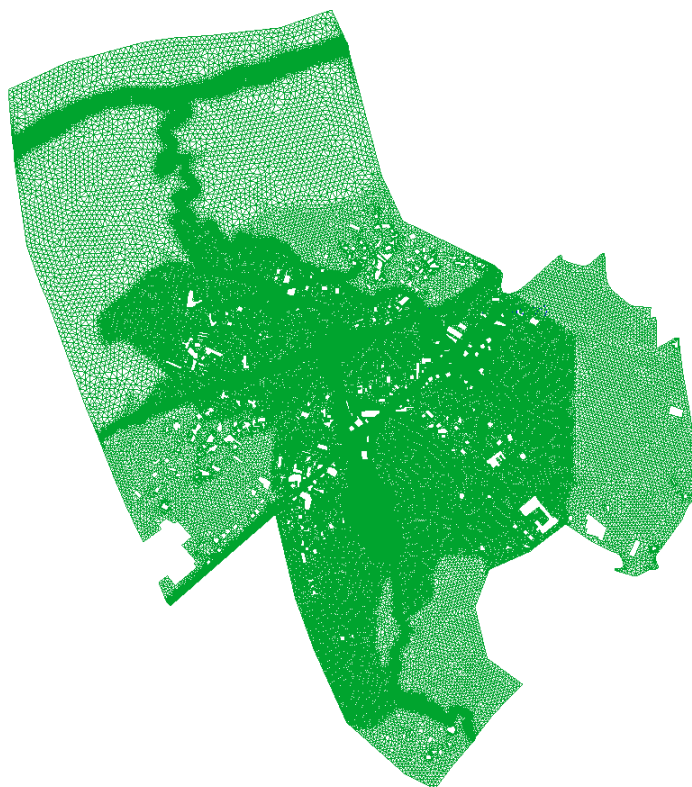


Figura 14. Vista general de la malla numérica, con un total de 328108 elementos.



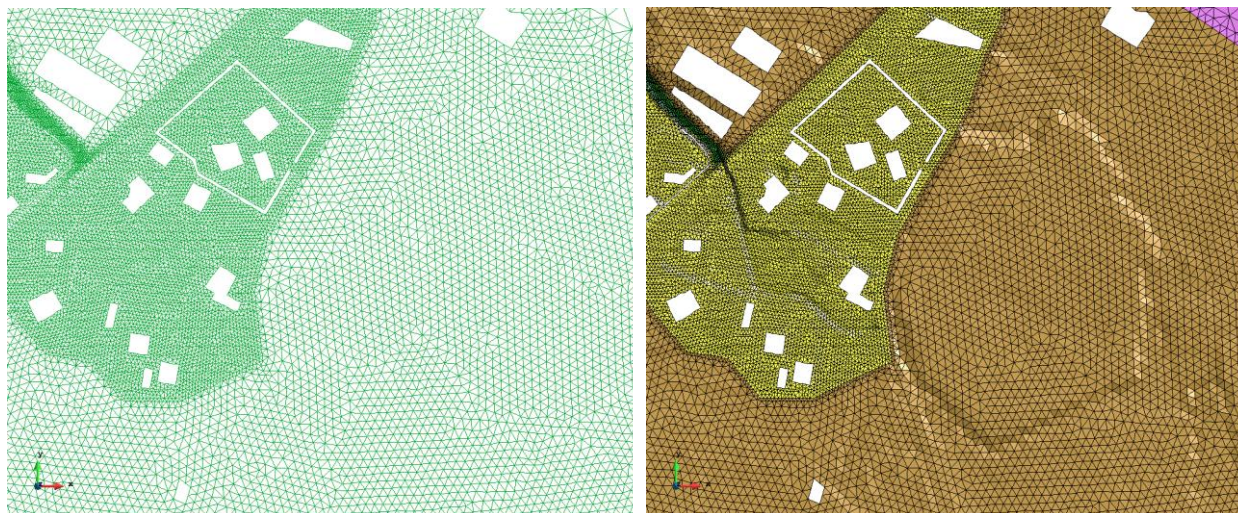


Figura 15. Malla numérica en la zona del relleno en la parcela de estudio. Antes y después de aplicar elevaciones mediante el Modelo Digital del Terreno. Fuente: Aquática Ingeniería

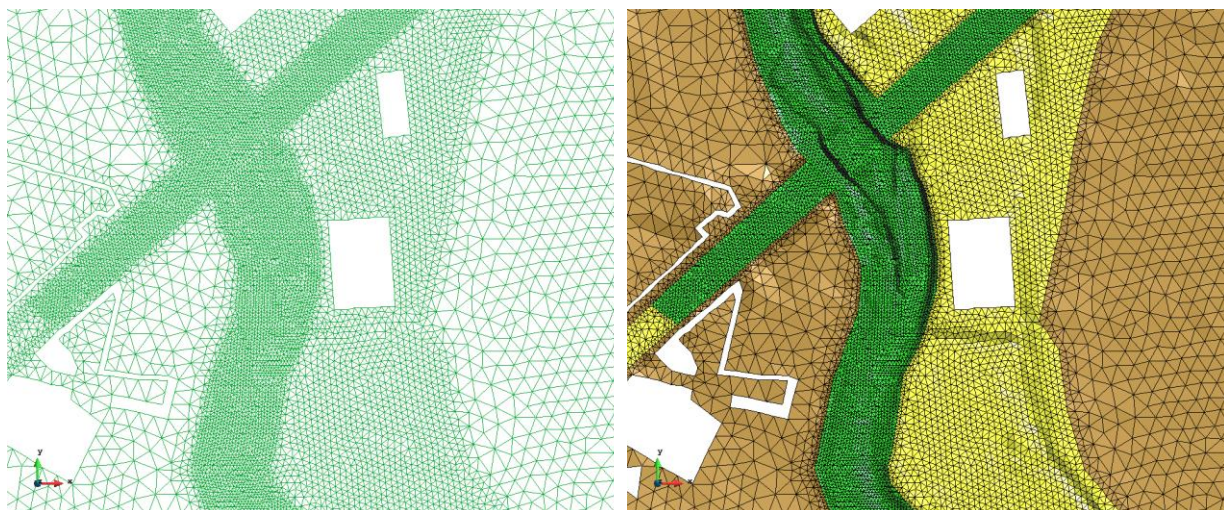


Figura 16. Malla numérica en la zona de paso bajo la PO-548. Antes y después de aplicar elevaciones mediante el Modelo Digital del Terreno. Fuente: Aquática Ingeniería

En la imagen anterior se observa como gracias a emplear un tamaño reducido de malla en las zonas más delicadas, se consigue una correcta representación de las estructuras de paso presentes en el cauce del río.



5.3 CONDICIONES DE CONTORNO.

5.3.1 CONDICIONES DE ENTRADA

Las condiciones de entrada del modelo han sido extraídas del estudio hidrológico realizado por Aguas de Galicia dentro de la asistencia técnica “MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN DE LAS ÁREAS DE RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN FLUVIALES DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA GALICIA COSTA” (MAPRI 2).

Con el objetivo de realizar una comparativa realista con el modelo unidimensional de referencia, se han empleado exactamente los mismos datos de caudal que el modelo MAPRI, estableciendo dos puntos de entrada de caudal en el modelo:

- Río Valga
- Río Soutiño

En la siguiente imagen se muestra los puntos de entrada sobre el modelo hidrodinámico:

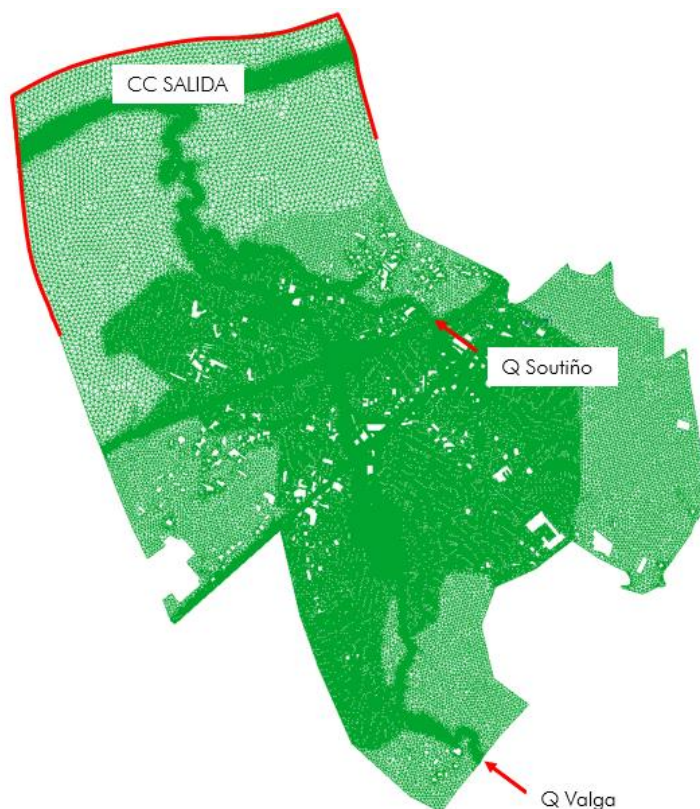


Figura 17. Ubicación de las Condiciones de Contorno en el modelo hidráulico. Fuente: Aquática Ingeniería.

Los caudales, que fueron introducidos en el modelo como régimen estacionario, con hidrograma constante, son los siguientes:

	T100	T500
Río Valga	41.20 m ³ /s	51.16 m ³ /s
Río Soutiño	7.50 m ³ /s	11.30 m ³ /s



5.3.2 CONDICIONES DE SALIDA.

La condición de contorno de salida se ha empleado la misma que en el modelo HecRas facilitado por Aguas de Galicia. Para simular de forma hidráulica una cota constante a lo largo del tiempo en la desembocadura del río Valga se ha impuesto una condición de salida de tipo de flujo subcrítico, modelado como un vertedero con la cota de nivel del agua deseada. Esta cota de nivel varía en función del periodo de retorno estudiado, siguiendo las condiciones de modelado definidas en el MAPRI.

El contorno de la condición de salida puede observarse en el Fig18.

	T100	T500
Nivel Río Ulla	2.88 m	2.94 m

5.3.3 CONDICIONES INICIALES

Como condición inicial, y para todo el modelo, se ha establecido una cota de lámina de agua igual a la cota del vertedero impuesta en la condición de salida, con el fin de modelar correctamente desde el instante inicial el comportamiento del Río Ulla aguas debajo de la zona de estudio.

5.4 CONDICIONES INTERNAS

A lo largo de los tramos de los cauces del río Valga y el río Soutiño objeto de análisis existen una serie de estructuras que se han modelado como condiciones internas en el modelo numérico. Estas estructuras consisten en varios puentes y obras de paso bajo las obras lineales presentes en la zona (FFCC y PO-548).

5.4.1 PUENTES

Para la definición de las estructuras más características presentes en el modelo se ha empleado el estudio hidrológico realizado por Aguas de Galicia dentro de la asistencia técnica "MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN DE LAS ÁREAS DE RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN FLUVIALES DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA GALICIA COSTA" (MAPRI 2), donde se definen con gran precisión estas obras de paso.

En este caso, los datos geométricos de cada uno de los puentes (cotas, estribos, tablero, etc.), se han extraído del modelo hidráulico, con el objetivo de tener en cuenta las mismas condiciones internas en el modelado. Las principales estructuras presentes en el cauce del río Valga son:

1. PK 0+870. Puente de hormigón en dos tramos.
2. PK 0+930. Pasarela metálica.
3. PK 1+090. Puente losa de piedra.
4. PK 1+118.3. Puente de hormigón bajo vía de FFCC.
5. PK 1+167.7 (izquierda). Puente de piedra.
6. PK 1+167.7 (derecha). Pasarela de madera.
7. PK 1+300. Pasarela de madera
8. PK 1+423 (izquierda). Puente de hormigón bajo carretera PO-548
9. PK 1+423 (derecha). Puente en arco de hormigón bajo carretera PO-548
10. PK 2+532. Puente losa de hormigón.



Además, también se incluyen en el modelo las obras de paso detectadas y tipografiadas en la visita de campo previa al estudio.

En las siguientes imágenes se muestran las estructuras de paso bajo la PO-548, modeladas en el modelo unidimensional del MAPRI 2, y modeladas mediante el software bidimensional IBER.

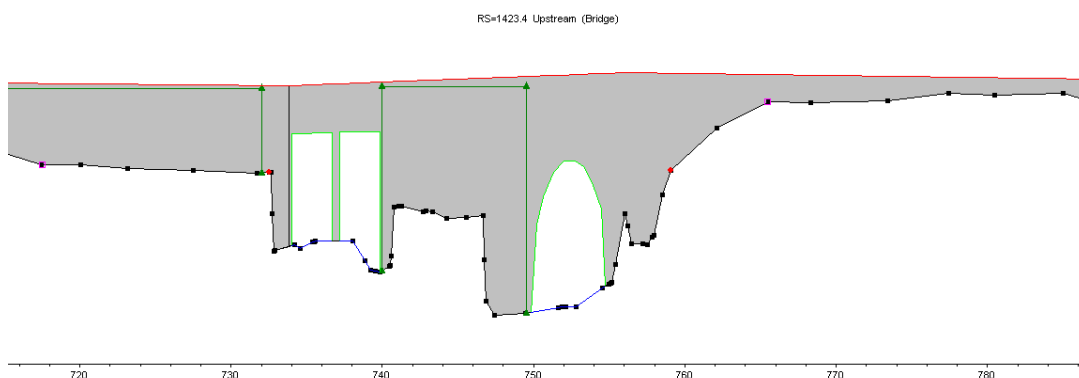


Figura 18. Obra de paso bajo la PO-548, incluida en el modelo unidimensional del MAPRI 2.

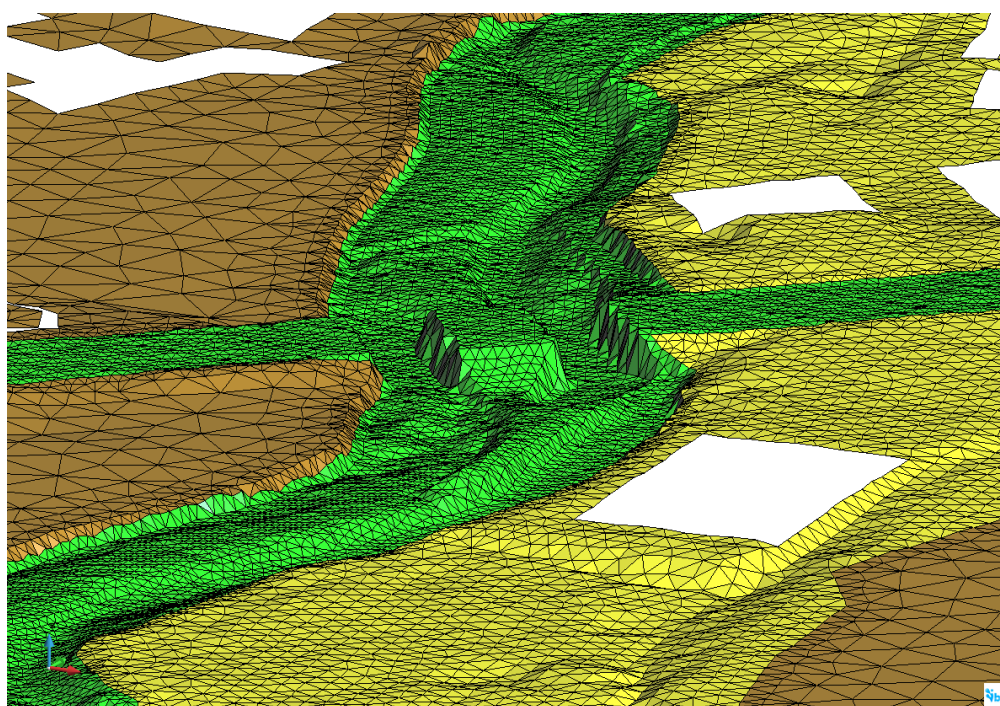


Figura 19. Obra de paso bajo la PO-548, modelada mediante IBER.

5.5 RUGOSIDAD

Para la asignación de valores de rugosidad en función del uso de suelo, se ha empleado la cartografía disponible en el Catastro, que, tras analizar minuciosamente, proporciona unos valores de uso de suelo con alto grado de detalle espacial.

Los valores de rugosidad asignado a cada uso han sido los empleados por Aguas de Galicia.

A continuación, se muestra el contorno de la malla numérica empleada en el modelo hidrodinámico, con los diferentes valores de rugosidad asignados.



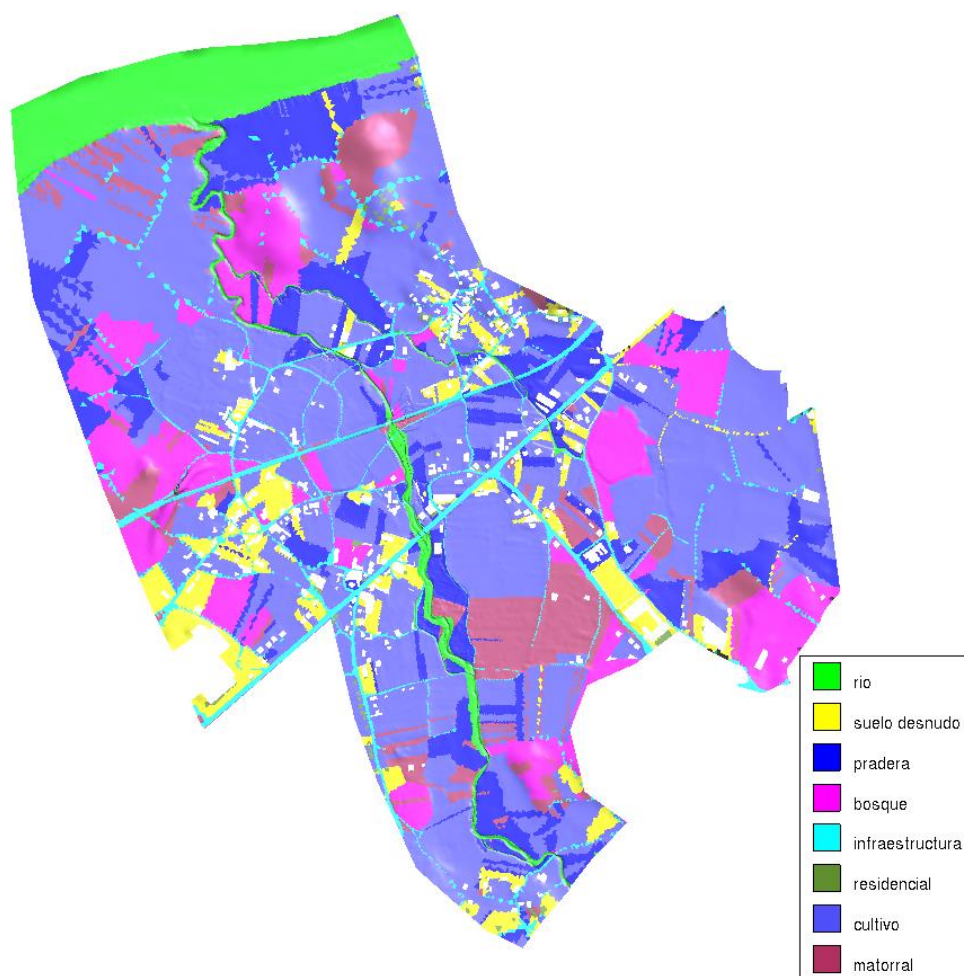


Figura 20. Mapa de rugosidad del suelo en modelo numérico de Aquática Ingeniería.



6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el objetivo de analizar las afecciones sobre la parcela de estudio, para definir correctamente su ordenación, se presentan los resultados obtenidos mediante el modelo hidrodinámico bidimensional.

Se ha simulado, en una primera aproximación, el periodo de retorno de 500 años, por ser el más desfavorable.

6.1 RESULTADOS DE T500 AÑOS

Tal y como se puede observar en las siguientes imágenes, la lámina de agua correspondiente a la avenida con periodo de retorno $T=500$ años, solamente afecta a la parcela de Xestur en el margen izquierdo.

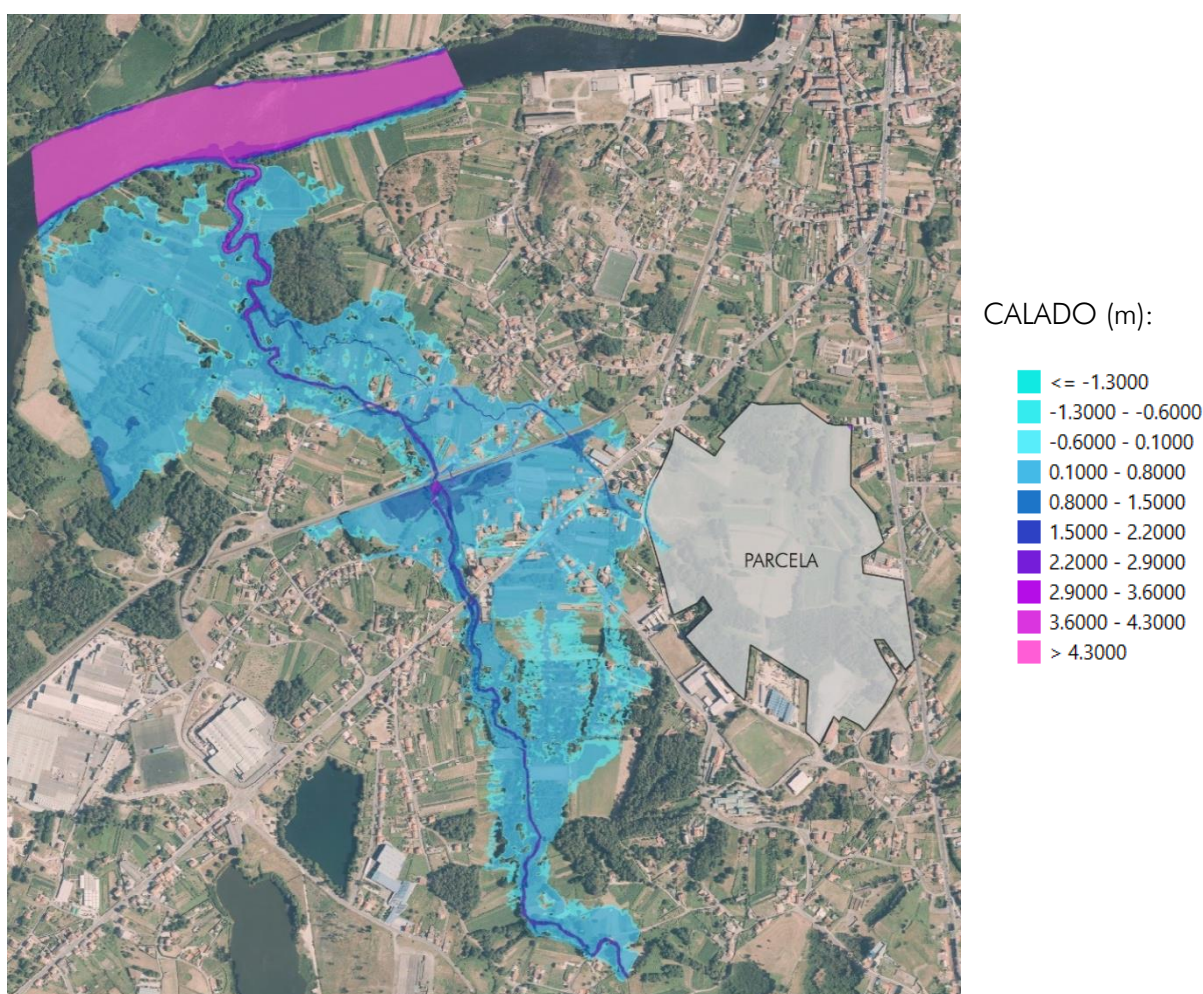


Figura 21. Mapa de calados máximos para un periodo de retorno $T=500$ años.



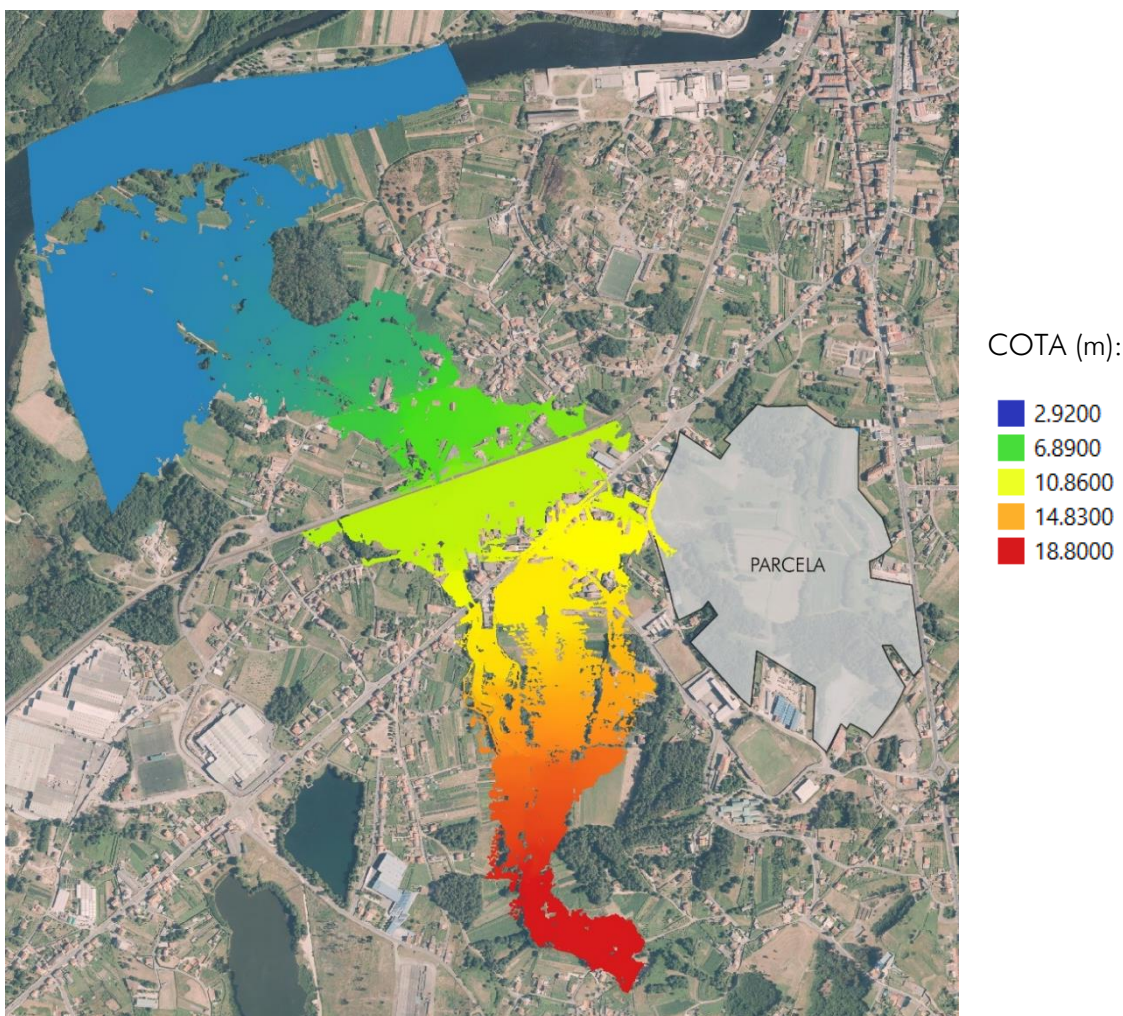


Figura 22. mapa de máxima elevación de la lámina de agua para un periodo de retorno de $T=500$ años.

En la siguiente imagen se muestra la afección a la parcela objeto de estudio de detalle, donde se aprecia con claridad lo expuesto en este apartado.

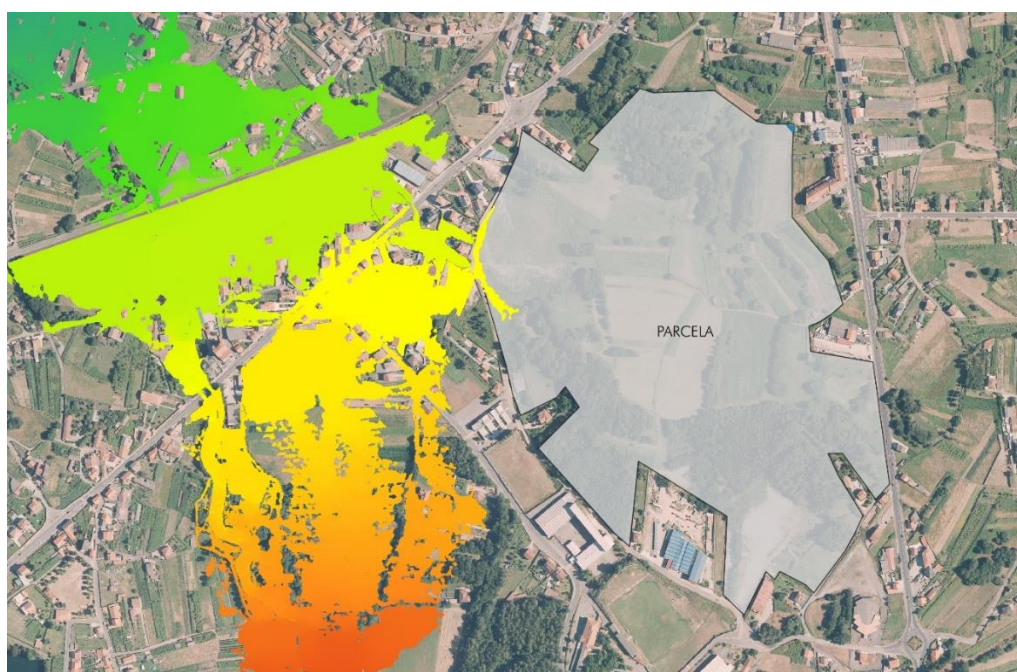


Figura 23. Afección de la avenida de periodo de retorno $T=500$ años sobre la parcela objeto de estudio.



6.2 COMPARATIVA Y DISCUSION DE RESULTADOS.

En este apartado se comparan los resultados obtenidos en el presente estudio, mediante el uso de un modelo hidrodinámico bidimensional con las manchas de inundación de referencia del MAPRI fase 2.

Se observa como la afectación a la parcela es mucho menor en el caso de la mancha de inundación obtenida mediante el nuevo modelo actualizado.

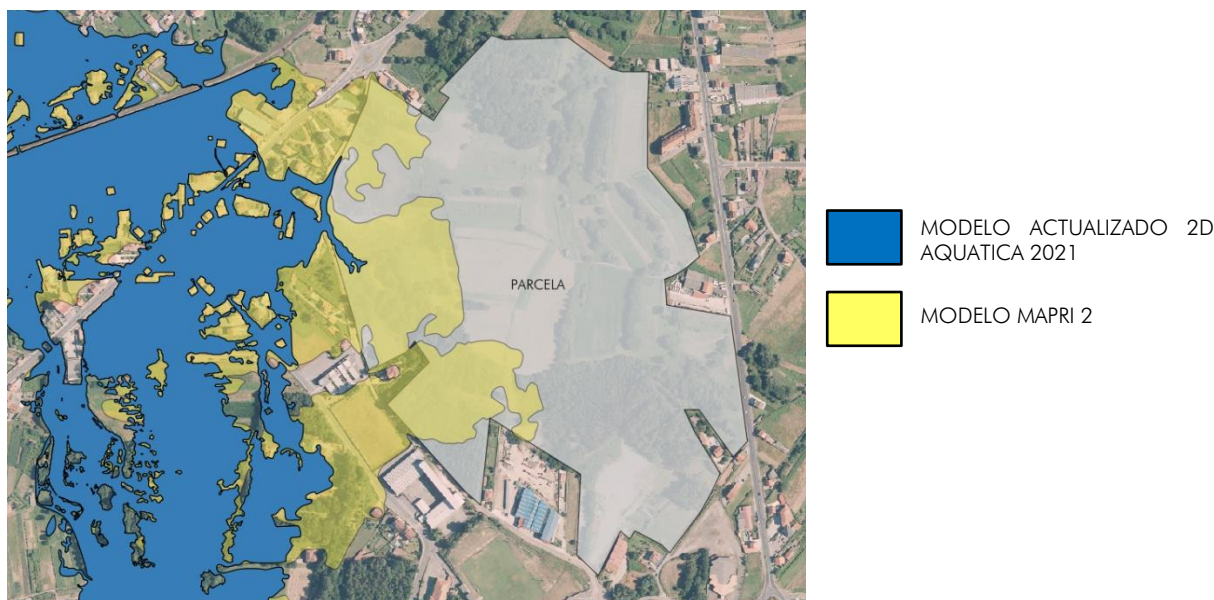


Figura 24. Comparativa afectación de las manchas de inundación sobre la parcela, para un periodo de retorno de $T=500$ años

Esto tiene sentido dado que, si bien en los resultados se muestra el resultado final de la simulación, si se analiza la misma a lo largo del tiempo, se pueden observar el comportamiento 2D del río. A continuación, se muestran cuatro instantes de la simulación: En la imagen 25 izquierda se observa como el río Valga comienza a desbordarse aguas arriba de la zona canalizada, desbordado por la margen derecha del cauce. Este flujo desbordado fluye de forma libre por la llanura derecha (ver imagen 25 derecha) ocupando la misma. También se observa la falta de capacidad hidráulica del puente de paso sobre la línea de FFCC y como aguas arriba comienza a ocupar las llanuras de forma perpendicular al cauce.

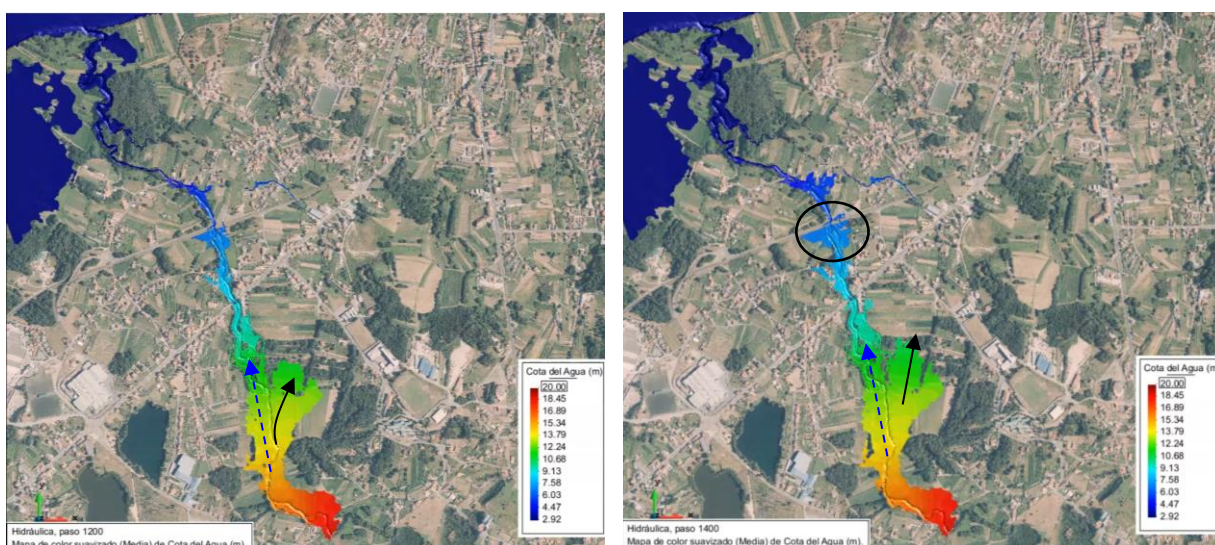


Figura 25. Resultados de nivel para $t=1200$ sg y $t=1400$ sg.



En la figura 26 se muestra la evolución de la inundación: Aguas de arriba de la PO-548 el flujo desbordado por la margen derecha sigue su curso (independiente del cauce) hasta que se encuentra con la PO-548 que hace desviar el flujo hacia el oeste inundando el perímetro de la parcela de estudio. Desde el punto de vista meramente hidráulico se trata de un proceso claramente bidimensional, dado que el flujo desbordado fluye de forma independiente del flujo del cauce y en otra dirección. El mismo efecto se observa aguas abajo con la línea de ferrocarril, el flujo que no es capaz de desaguar el puente y las obras de paso del FFCC queda retenido aguas arriba, efecto embalse, y fluye hacia el oeste de forma independiente del flujo del cauce.

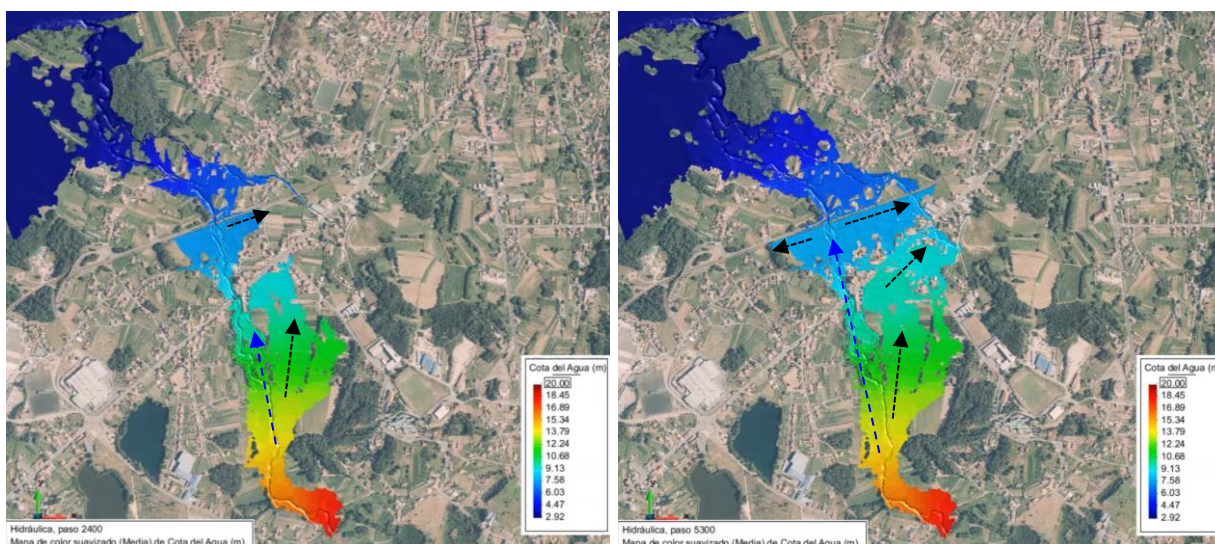


Figura 26. Resultados de nivel para $t=2400$ sg y $t=5300$ sg.

Con estas imágenes se observa la importancia que tienen las estructuras lineales (línea de FFCC y carretera PO-548), sobre la evolución del flujo desbordado en las llanuras y la forma final de las manchas de inundaciones.

En base a este análisis de resultados se afirma que el modelo hidráulico actualizado en este estudio modeliza de forma más real los procesos de desbordamiento e inundación del río Valga, y por tanto, entendemos que la mancha de inundación del T500 obtenida resulta más fidedigna.



7 RESUMEN Y CONCLUSIONES.

Se ha realizado un estudio hidráulico detallado del río Valga en las inmediaciones de las localidades de Valga y Pontecesures, tramo integrado en la ARSPI catalogada como ES14-05-15-02-11, con el objetivo de analizar los efectos de las avenidas sobre el ámbito del futuro Parque empresarial de Pontecesures.

Para ello se ha seguido la metodología y los criterios definidos por de Aguas de Galicia establecidos dentro de la asistencia "MAPAS DE PELIGROSIDAD Y RIESGO DE INUNDACIÓN DE LAS ÁREAS DE RIESGO POTENCIAL SIGNIFICATIVO DE INUNDACIÓN FLUVIALES DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA GALICIA COSTA del CICLO 2021-2027", también conocido como MAPRI ciclo 2.

Los datos de partida para la realización del presente estudio han sido facilitados por Aguas de Galicia. Así mismo, también se han empleado datos topográficos y cartográficos de la parcela objeto de estudio suministrados por Xestur.

Los trabajos llevados a cabo se pueden resumir en:

- Trabajos de campo: Se ha llevado a cabo una visita a la zona de estudio con la finalidad de actualizar los datos topográficos de las obras de paso bajo las estructuras lineales presentes (FFCC y carretera PO-548) fundamentales en la definición de las manchas de inundación de este tramo de río.
- Modelado hidrológico: Se ha empleado los mismos caudales que Aguas e Galicia en la determinación de los mapas de Inundación del MAPRI ciclo 2.
- Modelo Digital del Terreno: Xestur ha realizado una topografía de detalle de su parcela el pasado mes de abril - mayo de 2021. Estos datos han sido integrados dentro del MDT suministrado por Aguas de Galicia. Se ha detectado un relleno dentro de la parcela de Xestur.
- Modelado hidráulico: Se ha realizado un nuevo modelo hidrodinámico. Se trata de un modelo bidimensional de detalle mediante el software IBER. Se han incluido las mismas condiciones de contorno y condiciones iniciales que el modelo suministrado por Aguas de Galicia (MAPRI 2).
- Comparativa de resultados: se ha llevado a cabo un análisis comparativo y una discusión sobre los resultados de las manchas de inundación obtenidas con ambos modelos.



Como conclusión se puede afirmar que, el modelo hidrodinámico actualizado simula de forma más real los procesos de desbordamiento e inundación, (sobre todo en las zonas cercanas a las infraestructuras lineales), así como las afecciones producidas sobre la parcela edificable de Xestur. Esta afección se muestra en la siguiente imagen y se reduce al perímetro oeste de la parcela.

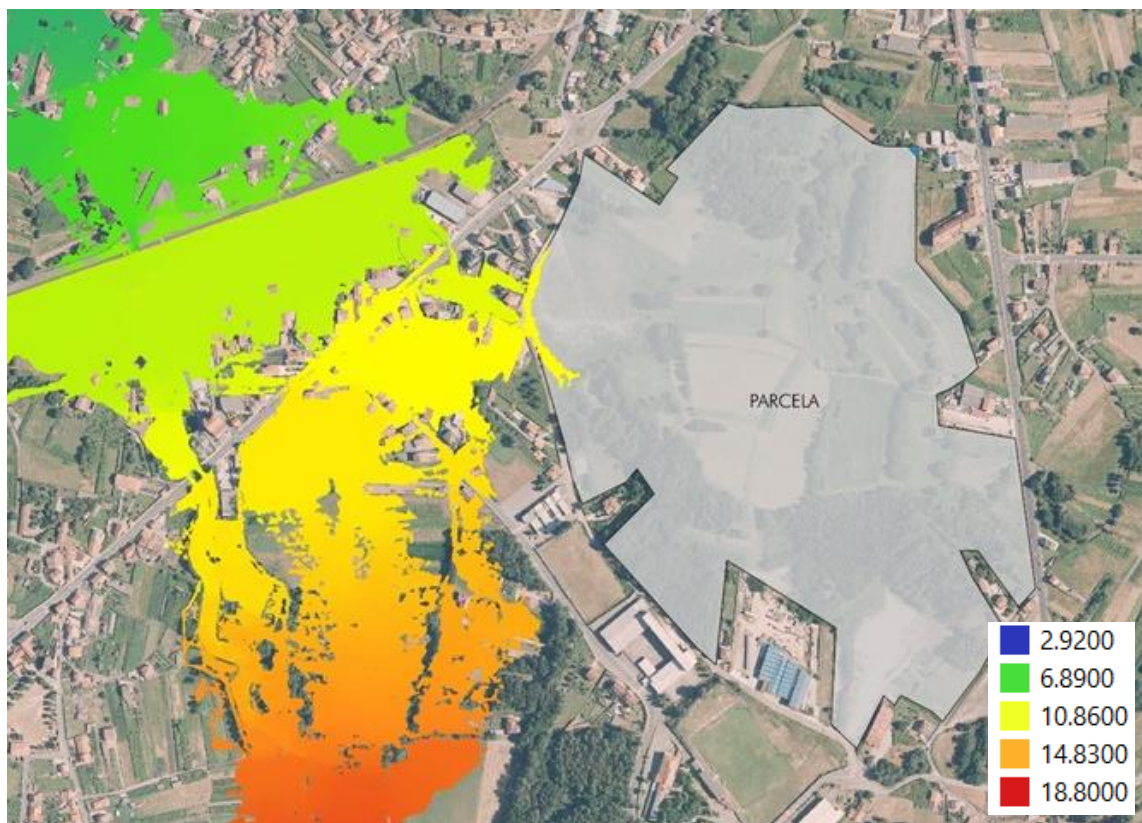


Figura 27. Afección de la avenida de periodo de retorno $T=500$ años sobre la parcela objeto de estudio.

En este contexto y teniendo en cuenta que el modelo va a servir de base para futuras simulaciones, se hace entrega del presente informe, así como del modelo hidrodinámico realizado para su aprobación por parte de Aguas de Galicia.

En Vigo, a 3 de agosto de 2021

Javier Sopelana Peralta
Ingeniero de Caminos Canales y Puertos