

# Trabajo Fin de Grado

Simulación 2D de la rotura de Presa de Malpasset  
con los modelos Iber y RiverFlow2D

(Malpasset Dam break flow numerical simulation  
with Iber and RiverFlow2D)

Autor/es

Alberto Benedicto Parrilla

Director/es

Pilar Brufau García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

# Resumen

---

Actualmente, las presas se construyen bajo estrictos criterios de seguridad; sin embargo, siguen existiendo roturas de las mismas que obligan a establecer un plan de emergencia por ley. En estos planes, la simulación hidráulica es una herramienta indispensable; ya que nos proporciona el tiempo de llegada de la onda producida por la rotura y la extensión máxima alcanzada. Para ello, es necesario disponer de modelos de simulación, de flujo de superficie libre, rápidos y precisos. En este trabajo se ha elegido como caso de validación de las herramientas numéricas, la rotura de la presa de Malpasset en Fréjus (Francia) en 1959 de la que se tienen datos reales observados y datos experimentales de un modelo a escala construido posteriormente. Se analizan dos softwares de simulación: Iber (libre) y Riverflow2D (comercial). Se busca analizar las ventajas e inconvenientes de estos dos programas aplicados a la simulación de roturas de presa 2D en cuanto a eficiencia, precisión, estabilidad, tiempos de cálculo, facilidad de manejo, preparación de datos, visualización de resultados, etc. Para ello, se parte de unos datos de terreno y condiciones iniciales y se simula la rotura de presa con los dos programas. Se comparan los resultados numéricos con los datos observados y medidos concluyendo que el modelo Riverflow2D ofrece mayor precisión y rapidez de cálculo. Ambos requieren de un trabajo previo de preparación de datos laborioso y en ambos se considera que las herramientas de visualización de resultados no son las óptimas y habría que mejorarlas.

# Abstract

---

Nowadays, dams are built under strict safety criteria; however, there exists still accidents that require by law an emergency plan. In these plans, hydraulic modelling is a useful tool, since it gives us the arrival time of the wave produced after a dam break as well as the maximum extent reached. Hence, it is necessary to use fast and accurate free surface flow numerical models. In this work, the Malpasset dam break occurred in 1959 in Fréjus (France) has been chosen for the validation of the numerical tools because observed data and experimental measurements are available. Two softwares are analyzed: Iber (free) and Riverflow2D (commercial). The aim is to analyze the advantages and disadvantages of these two programs applied to the simulation of 2D dam breaks in terms of efficiency, precision, stability, computational time, data preparation, visualization of results, etc. With this objective, the initial data are: a digital terrain model and initial conditions of constant depth at the reservoir. The numerical results are compared with the observed and measured data, concluding that the Riverflow2D model offers greater precision and speed of computation. Both require previous data preparation and the visualization tools offered are considered not optimal, so an effort must be made to improve them.

# ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN .....   | 7  |
| 2. MODELO DE ECUACIONES.....  | 13 |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: ROTURA DE LA PRESA DE MALPASSET .....           | 16 |
| 4. MODELOS DE SIMULACIÓN: IBER Y RIVERFLOW2D .....                                  | 21 |
| 4.1. IBER: .....  | 21 |
| 4.2. RIVERFLOW2D:.....  | 22 |
| 4.3. CARACTERÍSTICAS COMUNES.....   | 23 |
| 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON IBER Y RIVERFLOW2D .....                         | 24 |
| 5.1. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS .....   | 24 |
| 5.2. DATOS TOMADOS POR LA POLICÍA FRANCESA .....                                    | 25 |
| 5.3. DATOS DE LA MAQUETA .....  | 26 |
| 6. CONCLUSIONES .....   | 28 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA .....   | 31 |
| <br>  |    |
| Anexo A: METODOLOGÍA SEGUIDA PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN.....                       | 33 |
| A.1. PREPROCESO .....   | 33 |
| MDT (Modelo digital del terreno) .....  | 33 |
| Generación de la malla.....   | 38 |
| Condición inicial .....   | 41 |
| Rozamiento .....  | 43 |
| Puntos de observación .....   | 44 |
| A.2. CÁLCULO .....  | 45 |
| A.3. POSTPROCESO.....   | 48 |
| Evolución temporal del calado .....   | 50 |
| Evolución del módulo de la velocidad.....   | 55 |
| Anexo B: COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS CON IBER Y RIVERFLOW2D ..... | 59 |
| B.1. DATOS DE LOS TRANSFORMADORES .....   | 59 |
| B.2. DATOS DE LA POLICÍA FRANCESA.....  | 61 |
| B.3. DATOS DE LA MAQUETA .....  | 63 |

## Figuras:

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1: EJEMPLO DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....  | 7  |
| FIGURA 2: NÚMERO DE PRESAS CONSTRUIDAS CADA DÉCADA EN ESPAÑA .....  | 8  |
| FIGURA 3: EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PRESAS EN ESPAÑA .....  | 8  |
| FIGURA 4: RANKING DEL NÚMERO DE PRESAS POR PAÍS .....   | 9  |
| FIGURA 5: IMÁGENES DE LA CATÁSTROFE DE BANQIAO (IZDA) Y LA CATÁSTROFE DE VAIONT (DCHA).....   | 9  |
| FIGURA 6: REPRESENTACIÓN DEL CALADO (H) Y DE LA COTA DE LA SUPERFICIE LIBRE ( $H+Z_B$ ).....  | 13 |
| FIGURA 7: REGIÓN DE PROVENZA-ALPES-COSTA AZUL (IZDA) Y DEPARTAMENTO DE VAR (DCHA) .....   | 16 |
| FIGURA 8: TOPOGRAFÍA REAL DE LA CUENCA DEL RÍO REYRAN .....   | 16 |
| FIGURA 9: IMÁGENES DE LA PRESA DE MALPASSET ANTES (IZDA) Y DESPUÉS DE LA ROTURA (DCHA) .....  | 17 |
| FIGURA 10: VALORES DE COEFICIENTES DE ROZAMIENTO DE MANNING DEPENDIENDO DEL TIPO DE SUELO .....   | 18 |
| FIGURA 11: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN TOMADOS POR LA POLICÍA TRAS LA ROTURA DE LA PRESA .....  | 19 |
| FIGURA 12: REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS.....   | 20 |
| FIGURA 13: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS DE LA MAQUETA A ESCALA .....  | 20 |
| FIGURA 14: MÓDULOS DEL SOFTWARE IBER.....   | 21 |
| FIGURA 15: ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS PROGRAMAS IBER Y RIVERFLOW2D .....   | 23 |
| FIGURA 16: REPRESENTACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICO SOBRE EL DOMINIO DE CÁLCULO .....   | 33 |
| FIGURA 17: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES .....  | 35 |
| FIGURA 18: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES EN IBER Y RIVERFLOW2D .....   | 35 |
| FIGURA 19: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DE UNA SUPERFICIE CONTINUA .....   | 36 |
| FIGURA 20: REPRESENTACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO EN IBER Y RIVERFLOW2D .....  | 36 |
| FIGURA 21: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO.....  | 39 |
| FIGURA 22: REPRESENTACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO UTILIZADA EN IBER Y RIVERFLOW2D .....  | 39 |
| FIGURA 23: DETALLE DE LAS MALLAS DE CÁLCULO USADAS EN IBER Y RIVERFLOW2D.....   | 40 |
| FIGURA 24: PASOS SEGUIDOS PARA LA IMPOSICIÓN DE LA CONDICIÓN INICIAL .....  | 42 |
| FIGURA 25: REPRESENTACIÓN DE LA CONDICIÓN INICIAL EN IBER (IZDA) Y RIVERFLOW2D (DCHA).....  | 42 |
| FIGURA 26: PASOS SEGUIDOS PARA LA IMPOSICIÓN DE COEFICIENTE DE MANNING .....  | 43 |
| FIGURA 27: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DE PUNTOS DE OBSERVACIÓN.....  | 44 |
| FIGURA 28: PASOS SEGUIDOS PARA ESTABLECER LAS CONDICIONES DE CÁLCULO .....  | 46 |
| FIGURA 29: PASOS SEGUIDOS PARA VISUALIZAR UNA VARIABLE EN TODO EL DOMINIO .....   | 48 |
| FIGURA 30: PASOS SEGUIDOS PARA MODIFICAR LA LEYENDA .....   | 49 |
| FIGURA 31: RESULTADOS NUMÉRICOS DE LOS MAPAS DE EXTENSIÓN DE LA LÁMINA DE AGUA PARA LOS TIEMPOS (EN SEGUNDOS) $T=0$ , $T=61$ , $T=238$ , $T=432$ , $T=724$ , $T=1030$ , $T=1624$ , $T=2214$ , CALCULADOS CON IBER (IZDA) Y RIVERFLOW2D (DCHA) ..... | 53 |
| FIGURA 32: RESULTADOS NUMÉRICOS DEL MÓDULO DE LA VELOCIDAD DEL AGUA PARA LOS TIEMPOS (EN SEGUNDOS) $T=0$ , $T=61$ , $T=238$ , $T=432$ , $T=724$ , $T=1030$ , $T=1624$ , $T=2214$ , CALCULADOS CON IBER (IZDA) Y RIVERFLOW2D (DCHA).....             | 57 |
| FIGURA 33: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA COTA DE LA SUPERFICIE LIBRE (EN METROS) RESPECTO AL TIEMPO (EN SEGUNDOS) EN LA POSICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES A, B Y C .....   | 60 |

*FIGURA 34:EVOLUCIÓN TEMPORAL (EN SEGUNDOS) DE LA COTA DE LA LÁMINA DE AGUA (EN METROS) EN LOS PUNTOS P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 Y P17. .... 62*

*FIGURA 35: EVOLUCIÓN DE LA COTA DE LA LÁMINA DE AGUA (EN METROS) RESPECTO AL TIEMPO (EN SEGUNDOS) EN LOS PUNTOS S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13 Y S14 LOCALIZADOS EN LA MAQUETA.64*

# 1. INTRODUCCIÓN

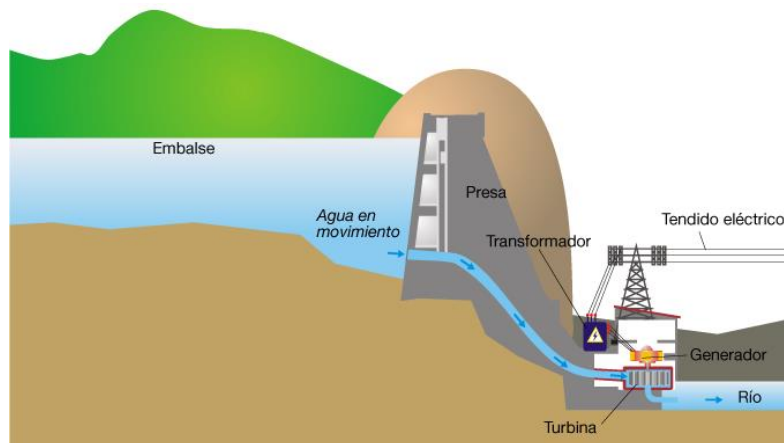
---

La utilización y manejo del agua por parte del ser humano ha estado presente desde siempre. Ya era evidente en las civilizaciones antiguas como la Sumeria (situada entre los ríos Tigris y Éufrates) o la Egipticia (asentada a lo largo del río Nilo) quienes dependían de ella para su evolución socio-económica.

A lo largo de los años, el uso del agua ha ido creciendo y se han ido desarrollando diferentes técnicas y mecanismos para manipularla: transporte, almacenaje, extracción, etc. Hoy en día su importancia sigue siendo incuestionable y las técnicas de almacenamiento del agua se hacen a gran escala por medio de las presas.

Una presa o represa se define como un muro artificial construido en el cauce de un río cuyo objetivo es el de embalsar agua.

La finalidad del embalsamiento de un gran volumen de agua es la de derivarla para diferentes usos o la de construir una central hidroeléctrica con el fin de aprovechar la energía potencial del agua y transformarla en energía eléctrica por medio de unas turbinas. (Art, Hughes, Bonnet, & Basson, 2007)



**FIGURA 1: EJEMPLO DE CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

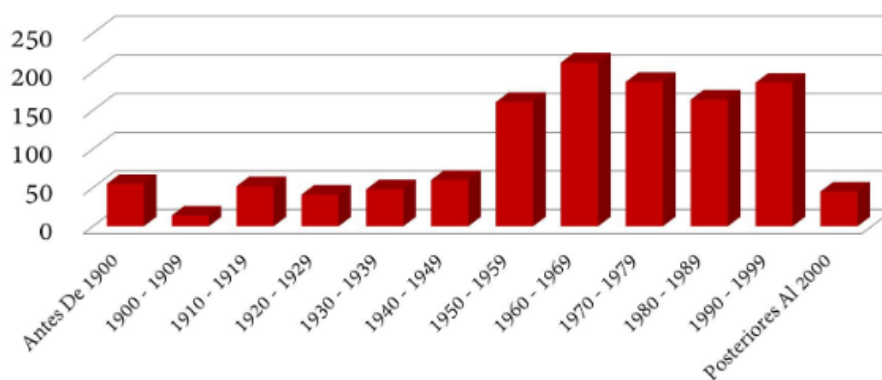
Estas infraestructuras son necesarias por dos factores esenciales: por una parte, para contrarrestar el efecto que el cambio climático ejerce sobre la irregularidad de los recursos hídricos (el hecho de que haya unos períodos de ausencia de precipitaciones combinado con otros de lluvias extremas, hace que se requiera una reserva constante de agua); y por otra, por el crecimiento demográfico mundial que ha conducido a un gran aumento de la demanda de agua para consumo, actividades agrícolas, industriales, etc.

La presencia de una presa también puede acarrear aspectos negativos como son los impactos ambientales, sociales y económicos. Algunos de los casos más importantes son el éxodo de la población residente en las zonas afectadas y la alteración del hábitat perjudicando la flora y fauna.(Declaración de ICOLD sobre las presas y el medio ambiente, 1997)

La construcción de presas se ha globalizado y perfeccionado hasta el punto de convertirse en auténticas obras de ingeniería como son el caso de la Presa Hoover (Estados Unidos), Presa de Itaipú (Paraguay-Brasil) o Presa de las Tres Gargantas (China).

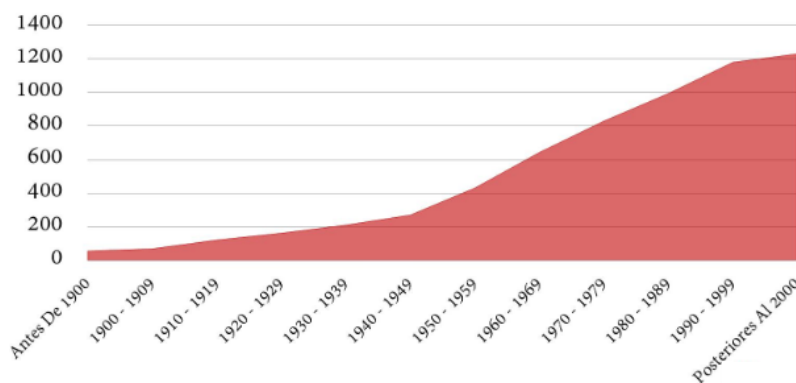
En España, el número de presas ha ido aumentando de gran manera a lo largo del siglo XX hasta alcanzar más de 1200 en el presente, como podemos ver en las figuras 2 y 3. (Iagua, 2017)

### PRESAS CONSTRUIDAS EN ESPAÑA



**FIGURA 2: NÚMERO DE PRESAS CONSTRUIDAS CADA DÉCADA EN ESPAÑA**

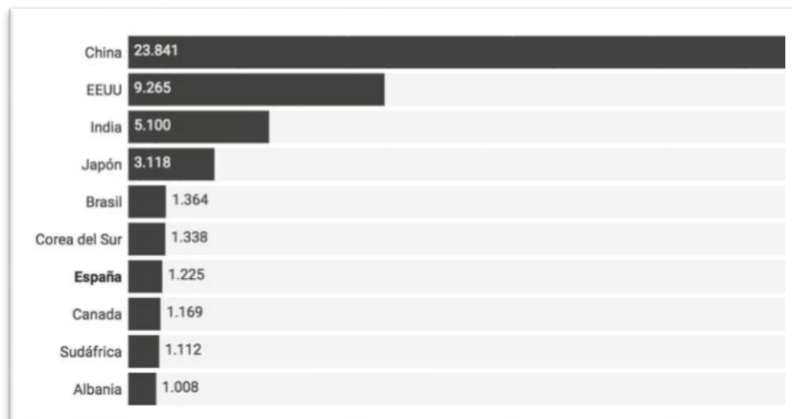
### PRESAS TOTALES EN ESPAÑA



**FIGURA 3: EVOLUCIÓN DEL NÚMERO DE PRESAS EN ESPAÑA**



Actualmente, en el ranking mundial de presas (ver figura 4), España es el séptimo país del mundo que más presas tiene: (Villarreal, 2018)



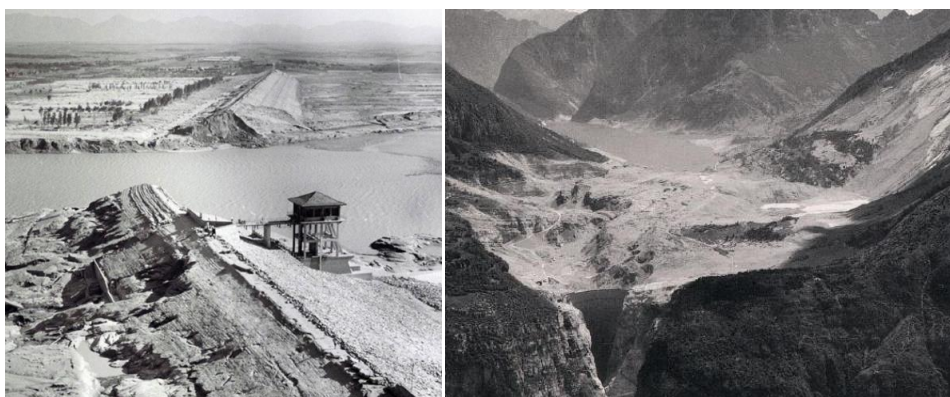
***FIGURA 4: RANKING DEL NÚMERO DE PRESAS POR PAÍS***

A pesar de que las presas se construyen bajo estrictos criterios de seguridad, éstas siguen fallando por diversas causas: diseño erróneo, inestabilidad geológica, lluvia extrema, falta de mantenimiento, etc.

Son muchos los casos en los que se ha roto una presa provocando numerosas víctimas y daños materiales en el mundo. Algunos ejemplos son:

- Presa de Banqiao: se produjo en 1975 por lluvias extremas provocando alrededor de 86.000 víctimas mortales. Es el peor desastre de rotura de presa hasta el momento (ver figura 5). (Fernández, 2016)

-Presa de Vaiont: sucedió en 1963 dejando un total de 2600 fallecidos. La estructura no se llegó a romper, pero el deslizamiento de una de las laderas contiguas al embalse provocó un desplazamiento de agua y la creación de una ola por encima de la presa como está inmortalizado en la figura 5. (Williamson, 2014)



***FIGURA 5: IMÁGENES DE LA CATÁSTROFE DE BANQIAO (IZDA) Y LA CATÁSTROFE DE VAIONT (DCHA)***

En España también se han producido catástrofes de este tipo. En los últimos años podemos destacar:

- Presa de Vega de Tera: en 1959 arrasando la localidad de Ribadelago (Zamora) dejando 144 víctimas mortales. Fue causada por una mala construcción y mantenimiento. (Brunat, 2019)
- Presa de Torrejón: en 1965 en la confluencia de los ríos Tajo y Tiétar (Cáceres) con un total de 54 fallecidos. La causa fue el fallo por resistencia durante una prueba en la que se llevó el embalse al límite. (El Periódico Extremadura, 2016)
- Presa de Tous: en 1982 en los municipios de Tous y Millares (Valencia). Fue causado por las lluvias torrenciales combinado con una serie de acontecimientos desafortunados provocando la muerte de 12 personas. (Cerro, 2007)

Para minimizar este tipo de daños es indispensable que existan planes de emergencia por ley desde 1994. Dichos planes deben contener una serie de información como: los tiempos de llegada de la onda de agua que se produce tras la rotura de una presa, el área total que abarcará y la altura máxima que alcanzará. Con estos datos se pueden elaborar unos mapas de peligrosidad que activarán protocolos de emergencia en caso de que sean necesarios. Para la obtención de esta información se requiere de la simulación hidráulica. La simulación hidráulica consiste en modelizar el flujo de agua gobernado por un sistema de ecuaciones que describen el comportamiento del mismo, mediante un método numérico que resuelve las variables de interés (altura de agua, velocidades, etc.) en puntos del espacio a lo largo del tiempo.

Debido a las diferentes necesidades y posibilidades de simulación numérica, se utiliza un gran número de métodos distintos de resolución. En primer lugar, si se tiene en cuenta la dimensionalidad del problema, se hace una primera clasificación entre modelos 1D, 2D y 3D. En el caso que nos ocupa, es decir, la simulación del flujo de agua tras una rotura de presa sobre una geometría arbitraria, los modelos que se usan son los 2D; ya que la dimensión vertical es pequeña comparada con las dimensiones horizontales y por tanto la aproximación 2D es la más adecuada. (Brufau P. , Conceptos básicos de hidrología superficial, 2001)

En segundo lugar, podemos optar por métodos numéricos de resolución en diferencias, volúmenes o elementos finitos. En este caso, vamos a usar métodos de resolución en volúmenes finitos por ser los que nos dan los valores del flujo más cercanos a las variables físicas. Los métodos en diferencias finitas son más apropiados al resolver aproximaciones 1D y los volúmenes o elementos finitos se usan tanto para aproximaciones 2D como 3D.

En cuanto a la discretización temporal, podemos optar por métodos explícitos e implícitos. Los primeros evalúan las variables en cada punto espacial conocidas las mismas variables en esos puntos en el tiempo anterior; mientras que los segundos necesitan resolver todas las variables en todos los puntos a tiempo futuro y por tanto es necesario invertir matrices en su resolución. Los métodos explícitos requieren un criterio de estabilidad para que la solución sea aceptable, aunque a veces hacen que el cálculo se ralentice; mientras que los implícitos son métodos incondicionalmente estables, lo que significa que pueden usar cualquier paso temporal y por tanto calculan más rápidamente. En nuestro caso optaremos por el grupo de métodos

explícitos; ya que la arquitectura de ordenadores ha avanzado mucho durante los últimos años y podemos aplicar técnicas de alto rendimiento de cálculo. En este caso, se hace uso de las tarjetas gráficas, usadas habitualmente en el desarrollo de videojuegos, para acelerar el cálculo. De esta forma se consigue ganar rapidez de cálculo con los métodos explícitos y poder competir e incluso superar a los métodos implícitos. (Lacasta, Juez, Murillo, & García-Navarro, 2015) (Lacasta, Murillo, Morales-Hernández, & García-Navarro, 2015)

Por último, se puede escoger entre diferentes órdenes en la resolución espacial. En este caso nos quedaremos con primer orden; ya que los altos órdenes son necesarios si se requiere representar el detalle del flujo (véase la turbulencia); pero no son necesarios para tener la estimación de altura y tiempo de llegada de la onda producida tras la rotura de una presa.(Brufau & García-Navarro, 2000)

La mayoría de los programas comerciales que se usan en la actualidad (HEC-RAS, MIKE-11, DAMBRK) utilizan el método numérico 1D implícito de diferencias finitas de primer orden de Preissmann ya que su objetivo es calcular lo más rápidamente posible. Otros programas están ganando aceptación en las consultoras, gracias al avance de los ordenadores, usando aproximaciones 2D explícitas en volúmenes finitos que proporcionan una resolución mucho mejor que los 1D. Dentro de este grupo nos encontramos con RiverFlow2D e Iber 2D; que son los dos modelos usados en este trabajo.

Perteneciendo ambos al mismo grupo de modelos de simulación, también existen diferencias entre ambos. En este trabajo se ha buscado su comparación en la simulación de roturas de presa para discernir sus puntos en común y sus diferencias; y evaluar si estos programas sirven para desarrollar los planes de emergencia que por ley las presas necesitan. Se ha elegido un caso base para realizar la comparación de estos dos programas donde se conozcan datos y medidas para poder calibrarlos, como la rotura de la presa de Malpasset; donde no sólo contamos con medidas de tiempos reales de cierre de centrales eléctricas (debido a la llegada de la onda de agua) sino que también contamos con medidas de altura de agua en algunos puntos recogidos por la policía durante el suceso, en las orillas de la inundación provocada. Además, se cuenta con resultados medidos en puntos del cauce en una maqueta a escala construida en un laboratorio de ENEL (empresa hidroeléctrica en Italia).

Por último, para finalizar la introducción, a continuación se exponen los objetivos específicos de este trabajo:

- Comparar la precisión de los resultados numéricos de la simulación de una rotura de presa con un programa de software libre (Iber) y un programa comercial (RiverFlow2D). Para ello se usarán las medidas reales tomadas tras la rotura de la presa de Malpasset en 1959 y las medidas experimentales realizadas en una maqueta a escala.
- Reproducir visualmente la evolución del movimiento del agua desde la rotura de la presa hasta que el nivel del agua se estabiliza.

- Analizar las ventajas y desventajas de ambos softwares en cuanto a facilidad de manejo, comodidad en la interfaz, visualización de resultados, versatilidad de explotar datos, etc.
- Mostrar la eficiencia de los programas en cuanto a tiempos de cálculo, error y estabilidad a la hora de elaborar un plan de emergencia.

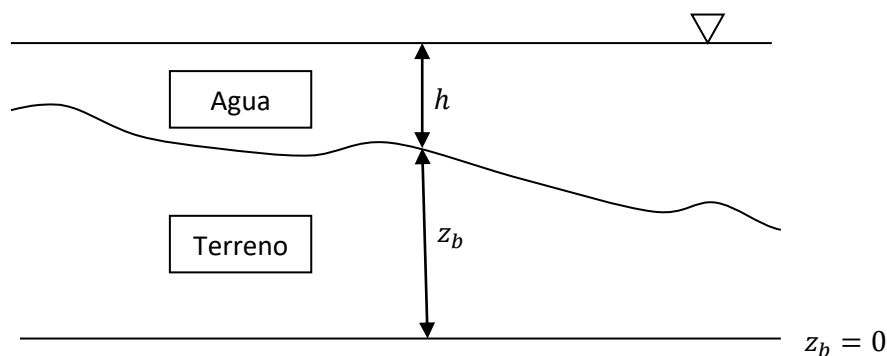
## 2. MODELO DE ECUACIONES

---

Como ya se ha mencionado en la introducción, tanto Iber como RiverFlow2D se van a utilizar con el propósito de simular una rotura de presa. El flujo que se produce tras la rotura de una presa de forma instantánea, que es la condición más desfavorable de rotura, y por tanto la que se adopta en la elaboración de los planes de emergencia, viene gobernado por las ecuaciones de Saint-Venant o modelo de aguas poco profundas, que se apoya en las siguientes hipótesis:

- La distribución de presiones en la vertical se considera invariable, o lo que es equivalente, la aceleración en la vertical es pequeña; y se puede considerar la presión hidrostática.
- Las pérdidas de energía por fricción del flujo con el terreno en estado transitorio no difieren mucho de las mismas pérdidas en flujo estacionario.
- La pendiente promedio del fondo del cauce es tan pequeña que la tangente puede ser aproximada por el ángulo y las medidas en el fondo son equivalentes a las medidas en el plano horizontal.

Llegados a este punto, es importante saber diferenciar dos variables fundamentales: la cota a la que se encuentra la superficie libre del flujo y el calado o altura total de agua. El calado ( $h$ ) es la altura de agua que hay desde la superficie del terreno hasta la superficie libre del fluido, mientras que la cota ( $h+z_b$ ) es la distancia que hay desde la referencia tomada arbitrariamente ( $z_b=0$ ) hasta la superficie libre del fluido (en este estudio se va a referenciar el valor de cota nulo con el nivel del mar). Ambas variables se representan en la figura 6.



**FIGURA 6: REPRESENTACIÓN DEL CALADO ( $h$ ) Y DE LA COTA DE LA SUPERFICIE LIBRE ( $h+z_b$ )**

Una vez se tienen en cuenta todas las hipótesis del modelo de flujo, ya es posible definir el sistema de ecuaciones simplificado de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobierna el movimiento del agua y que contiene la ecuación de continuidad (1) que nos da la evolución temporal del calado en función de los caudales unitarios en cada una de las direcciones coordenadas (x,y) y las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento en cada una de las direcciones coordenadas (2) y (3)(Henderson, 1966).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (3)$$

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x} \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (4)$$

$$S_{fx} = -\frac{c_f u \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \quad S_{fy} = -\frac{c_f v \sqrt{u^2 + v^2}}{gh} \quad (5)$$

Donde  $h$  es el calado (ver figura 6),  $u$  y  $v$  son las velocidades horizontales promediadas en profundidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $z_b$  la elevación de la cota del terreno (ver figura 6) y  $c_f$  un coeficiente relacionado con la fricción.(Chow, 1959)(Brufau P. , 2001)

La ecuación de continuidad expresa de forma matemática el principio de conservación de la masa de un volumen fluido, mientras que la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento representa la segunda ley de Newton aplicada a un fluido y nos dice que la variación de la cantidad de movimiento del volumen fluido ha de ser igual a las fuerzas superficiales que actúan (presión y rozamiento) y volumétricas (gravedad) que actúan sobre él. (Brufau P. , 2015) El flujo se va a mover bajo la acción de la gravedad, representado por los términos de pendiente del terreno (ecuación 4); y va a ser frenado por la fricción con el terreno (ecuación 5).

Respecto al coeficiente  $c_f$  que aparece en la ecuación (5), llamado coeficiente de Chézy, representa la pérdida de energía por turbulencia y viscosidad. En hidráulica, es habitual expresarlo en términos del coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ), coeficiente equivalente al factor de fricción de pérdida de energía en flujo en tuberías ( $f$ )(Brufau P. , 2015):

$$c_f u \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (6)$$

$$c_f v \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (7)$$

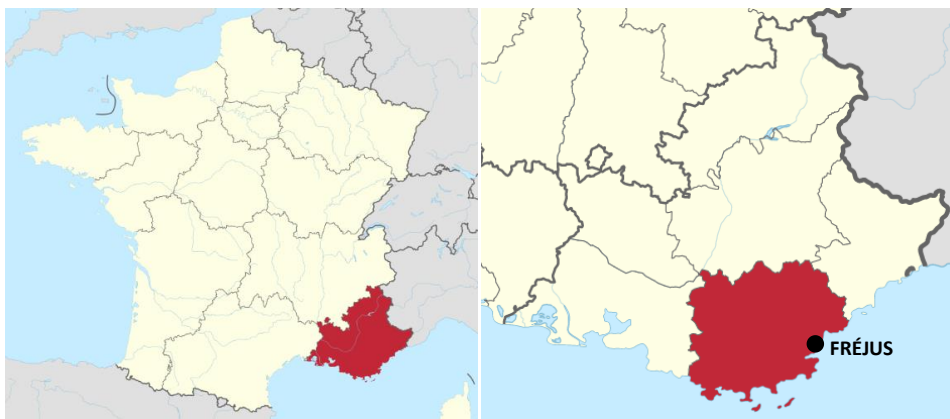
Este coeficiente de rozamiento de Manning se determina a partir de medidas experimentales o se estima a partir de valores que ya han sido almacenados en tablas y pueden consultarse en la literatura (Chow 1959).

En casos reales, la geometría a través de la pendiente del terreno y la resistencia de fricción al movimiento del flujo controlan la propagación de las ondas hacia aguas arriba y hacia aguas abajo. Por ello, en la práctica es obligada una representación 2D del fenómeno. Una vez establecidas las ecuaciones del modelo que va a representar la dinámica del flujo de agua tras la rotura de una presa de forma instantánea, a continuación hay que resolver estas ecuaciones eligiendo un método numérico adecuado. La existencia de ondas de choque (ondas de propagación aguas abajo) y rarefacción (ondas de propagación aguas arriba) que se producen tras la rotura de una presa, requiere implementar esquemas de discretización espacial con muy baja difusión numérica, que garanticen la conservación de los flujos a nivel local y además garanticen la estabilidad de la solución numérica, en especial en la captura de la onda de choque. En estos casos se ha encontrado que los mejores esquemas numéricos de volúmenes finitos para resolver esta problemática son los descentrados (upwind) de primer orden basados en la aproximación de Roe (Toro & Fraccarollo, 1995) (Brufau & García-Navarro, 2003). Posteriormente se han mejorado añadiéndoles la posibilidad de avance del frente de agua sobre fondo seco (Brufau & García-Navarro, 2000) que constituía una inestabilidad numérica y el control numérico de los frentes seco-mojado (Brufau, Vázquez-Cendon, & García-Navarro, 2004). Los dos programas que se han utilizado en este trabajo resuelven las mismas ecuaciones bajo el mismo método numérico con las características anteriormente descritas.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO: ROTURA DE LA PRESA DE MALPASSET

---

Malpasset fue una presa situada en el río Reyran (Francia). Su construcción terminó en 1954, aproximadamente a 7 km al norte de Fréjus en el departamento de Var (Provence-Alpes-Costa Azul) (ver figuras 7 y 8). Se derrumbó el 2 de diciembre de 1959 provocando 421 víctimas mortales y diversos daños por valor de 68 millones de dólares.



***FIGURA 7: REGIÓN DE PROVENZA-ALPES-COSTA AZUL (IZDA) Y DEPARTAMENTO DE VAR (DCHA)***

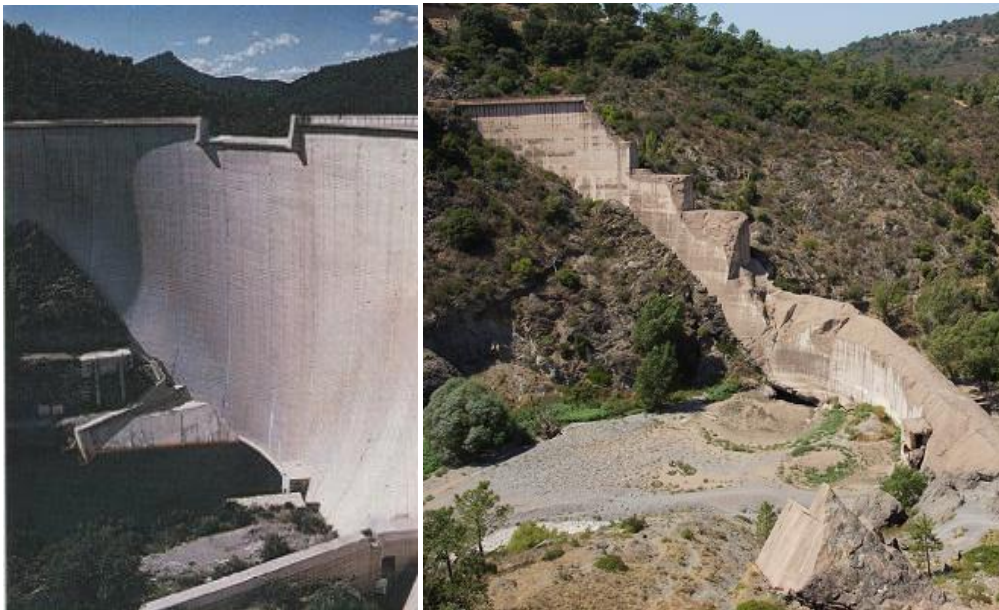


***FIGURA 8: TOPOGRAFÍA REAL DE LA CUENCA DEL RÍO REYRAN***



La presa de Malpasset era de tipo arco de doble curva (ver figura 9), de radio variable, y estaba hecha de hormigón. Tenía 66 metros de altura y una longitud de 222 metros, con capacidad para almacenar hasta  $49 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de agua. El objetivo de controlar el caudal del río era satisfacer las necesidades de riego de las tierras agrícolas que rodean la población de Fréjus. Mientras que el flujo de agua en el río era notablemente escaso en los meses de verano, las lluvias constantes en invierno eran una amenaza ante un posible desborde e inundación. (Williamson, 2014)(Kaiser-Abbott, 2018)

La causa de la rotura no se sabe con exactitud a día de hoy, pero se cree que fue debida a una falla tectónica con la ayuda de las fuertes lluvias en el momento de la catástrofe.



**FIGURA 9: IMÁGENES DE LA PRESA DE MALPASSET ANTES (IZDA) Y DESPUÉS DE LA ROTURA (DCHA)**

La zona del embalse tenía una cota de agua ( $h+z_b$ ) de 100 metros en el instante en el que se produjo la rotura, por lo tanto se establece como condición inicial que la superficie del embalse tenga una cota libre inicial de dicha medida. Además, en este estudio se va a referenciar el momento de la rotura como el instante inicial  $t=0$  s; que representa la rotura instantánea de la misma y como el flujo de agua en ese momento en el cauce era muy bajo se va a suponer que es cero, representando el frente de avance de la onda provocada por la rotura de la presa sobre fondo seco; condición extrema para los modelos de simulación que si no contienen una correcta definición de los promedios de las variables en esta situación se desestabilizan numéricamente. De esta forma probaremos cómo resuelven la condición de avance sobre seco ambos programas de simulación.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es el rozamiento que hay entre la superficie del terreno y el agua, es decir, la fuerza de fricción que el terreno va a ejercer sobre el fluido en movimiento y que afecta a los tiempos de llegada de la onda de propagación aguas abajo.

La rugosidad del terreno, como hemos comentado anteriormente, reside en el coeficiente de rugosidad o de Manning ( $n$ ), el cual presenta un valor mayor cuanto más rugosidad presenta la superficie de contacto. En este trabajo se ha asignado a todo el terreno un coeficiente de Manning constante de  $n=0.03$  equivalente a una corriente natural circulando sobre un terreno natural con poca vegetación, tal y como era la cuenca del Río Reyran y siguiendo los valores que nos marca la bibliografía (ver figura 10). (Chow, 1959)

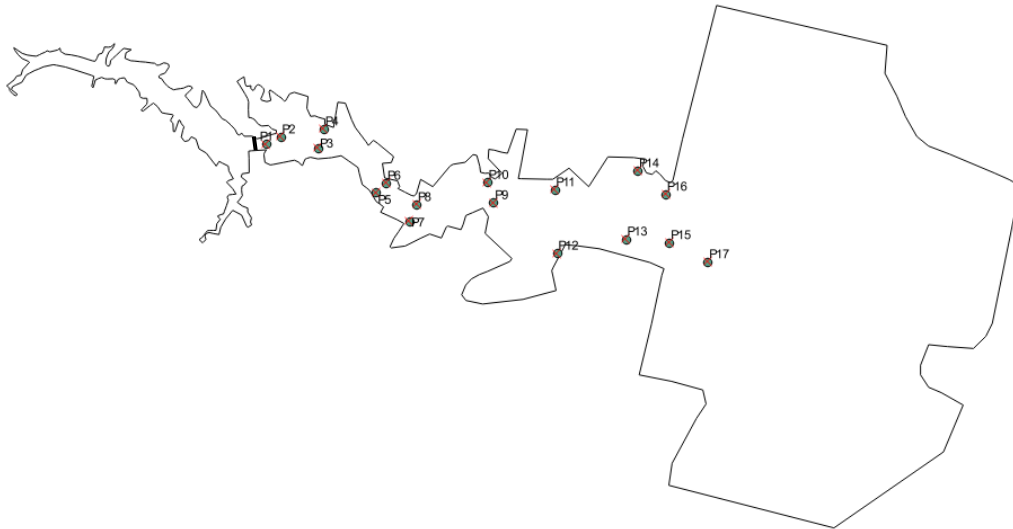
Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad  $n$  (continuación)  
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

| Tipo de canal y descripción   | Mínimo | Normal       | Máximo |
|---|--------|--------------|--------|
| <b>C. Excavado o dragado</b>  |        |              |        |
| <b>a. En tierra, recto y uniforme</b>   |        |              |        |
| 1. Limpio, recientemente terminado  | 0.016  | <b>0.018</b> | 0.020  |
| 2. Limpio, después de exposición a la intemperie  | 0.018  | <b>0.022</b> | 0.025  |
| 3. Con gravas, sección uniforme, limpio   | 0.022  | 0.025        | 0.030  |
| 4. Con pastos cortos, algunas malezas   | 0.022  | 0.027        | 0.033  |
| <b>b. En tierra, serpenteante y lento</b>   |        |              |        |
| 1. Sin vegetación   | 0.023  | 0.025        | 0.030  |
| 2. Pastos, algunas malezas  | 0.025  | 0.030        | 0.033  |
| 3. Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos  | 0.030  | 0.035        | 0.040  |
| 4. Fondo en tierra con lados en piedra  | 0.028  | 0.030        | 0.035  |
| 5. Fondo pedregoso y bancas con malezas   | 0.025  | 0.035        | 0.040  |
| 6. Fondo en cantos rodados y lados limpios  | 0.030  | 0.040        | 0.050  |
| <b>c. Excavado con pala o dragado</b>   |        |              |        |
| 1. Sin vegetación   | 0.025  | 0.028        | 0.033  |
| 2. Matorrales ligeros en las bancas   | 0.035  | 0.050        | 0.060  |
| <b>d. Cortes en roca</b>  |        |              |        |
| 1. Lisos y uniformes  | 0.025  | 0.035        | 0.040  |
| 2. Afilados e irregulares   | 0.035  | 0.040        | 0.050  |
| <b>e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar</b>  |        |              |        |
| 1. Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo   | 0.050  | 0.080        | 0.120  |
| 2. Fondo limpio, matorrales en los lados  | 0.040  | 0.050        | 0.080  |
| 3. Igual, nivel máximo de flujo   | 0.045  | 0.070        | 0.110  |
| 4. Matorrales densos, nivel alto  | 0.080  | 0.100        | 0.140  |
| <b>D. Corrientes naturales</b>  |        |              |        |
| <b>D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente &lt; 100 pies)</b>                           |        |              |        |
| <b>a. Corrientes en planicies</b>   |        |              |        |
| 1. Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos   | 0.025  | <b>0.030</b> | 0.033  |
| 2. Igual al anterior, pero con más piedras y malezas  | 0.030  | 0.035        | 0.040  |
| 3. Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena  | 0.033  | 0.040        | 0.045  |
| 4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras   | 0.035  | 0.045        | 0.050  |
| 5. Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes                                  | 0.040  | 0.048        | 0.055  |
| 6. Igual al 4, pero con más piedras   | 0.045  | 0.050        | 0.060  |
| 7. Tramos lentos, con malezas y pozos profundos   | 0.050  | 0.070        | 0.080  |
| 8. Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos | 0.075  | 0.100        | 0.150  |

**FIGURA 10: VALORES DE COEFICIENTES DE ROZAMIENTO DE MANNING DEPENDIENDO DEL TIPO DE SUELO**

La información de la que se dispone para poder calibrar los resultados numéricos que se obtienen de la simulación de la rotura de la presa de Malpasset proviene de dos fuentes: en primer lugar, de datos reales del momento de la rotura y en segundo lugar, de datos obtenidos de la simulación del mismo caso en una maqueta a escala.

Durante y tras la catástrofe, la policía francesa tomó datos de las cotas a las que había llegado el agua en 17 puntos diferentes alejados del cauce (ver figura 11); observando la marca que el agua dejaba en algunas casas, naves, postes, etc. Para referenciar estos puntos se les va a insertar delante la letra *P*, es decir, se les va a llamar P1, P2,..., P17.

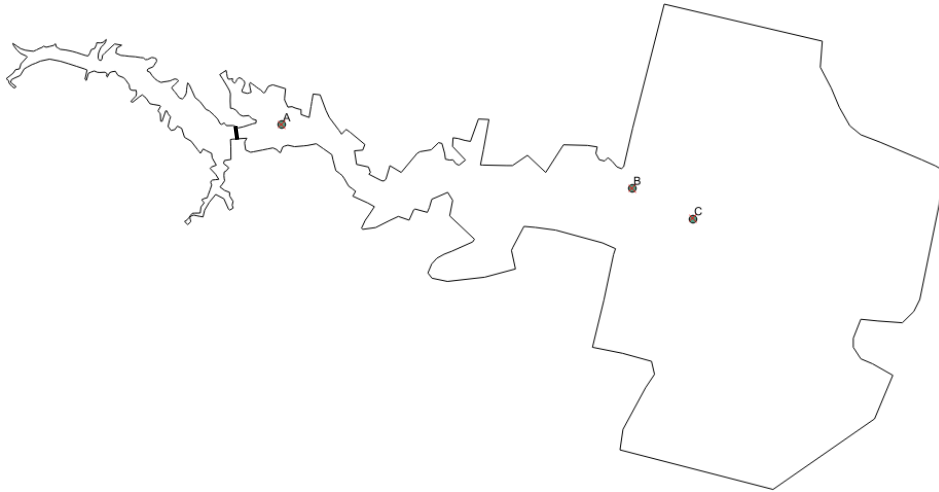


**FIGURA 11: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS DE OBSERVACIÓN TOMADOS POR LA POLICÍA TRAS LA ROTURA DE LA PRESA**

Además, en la zona había tres transformadores eléctricos (ver figura 12) que se desconectaron en el momento en el que la onda de agua les alcanzó. Se tienen los datos del instante en el que se apagó cada transformador. A los transformadores se les va a referenciar con las letras A, B y C.

Por último, se tienen también datos de 9 puntos (ver figura 13), diferentes a los tomados por la policía francesa, de una maqueta hecha a escala para la simulación de la rotura de la presa. La referencia de estos puntos consiste en insertar una *S* delante, de tal forma que se identifican como S6, S7,..., S14.

En este caso se cuenta tanto con los valores de la cota máxima de agua alcanzada en estos puntos como con los valores del tiempo de llegada de la onda de agua a los mismos.



**FIGURA 12: REPRESENTACIÓN DE LA POSICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS**



**FIGURA 13: REPRESENTACIÓN DE LOS PUNTOS DE LA MAQUETA A ESCALA**

Si se comparan las figuras 11 y 13 se observa cómo los datos tomados por la policía (P) están situados a ambos márgenes del cauce mientras que los datos obtenidos de la maqueta (S) se sitúan en el centro del mismo.

El hecho de que en la maqueta no escogieran los mismos puntos para medir que los puntos observados por la policía francesa, se debe a que en la rotura real sólo fue posible recopilar datos de las zonas alejadas al cauce debido a la fuerte corriente. Por esa razón se construyó una maqueta y así poder obtener datos con la información en el centro del cauce. De esta forma las medidas son complementarias; ya que se cuenta con medidas en el cauce (maqueta), con medidas en zonas más alejadas al cauce (policía) y tiempos de llegada de la onda de choque (corte de los transformadores).

## 4. MODELOS DE SIMULACIÓN: IBER Y RIVERFLOW2D

A continuación se van a dar los detalles específicos de los dos programas de simulación con los que se ha trabajado para representar el flujo tras la rotura de la presa de Malpasset. Recordemos que el objetivo de este trabajo consiste en la comparación de estos dos programas en la simulación de roturas de presa para discernir sus puntos en común y sus diferencias; y evaluar si estos programas sirven para desarrollar los planes de emergencia que por ley las presas necesitan.

### 4.1. IBER:

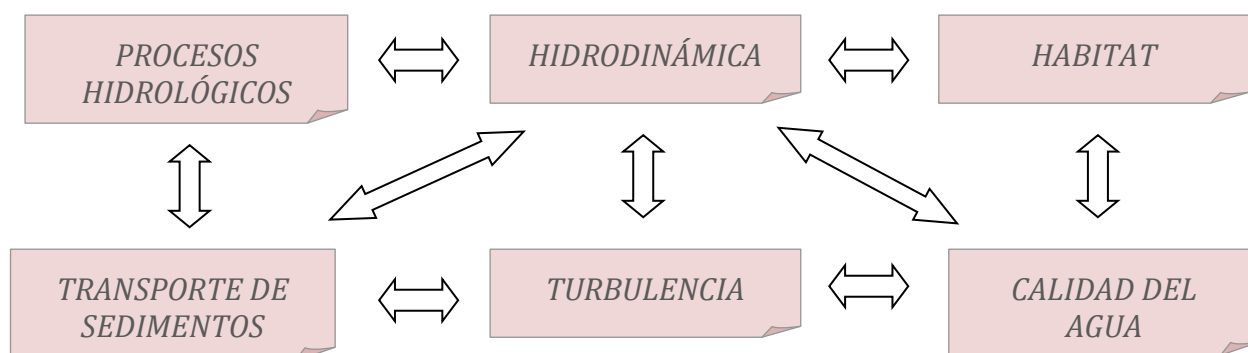


Iber es un software libre bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios mediante volúmenes finitos.

Ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente GEAMA (Universidad de A Coruña) y el Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña, UPC y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE).

El rango de aplicación de Iber abarca campos como flujos de aguas poco profundas, modelado de ruptura de presa, simulación de corrientes de marea, estructuras hidráulicas, procesos hidrológicos, flujos turbulentos, transporte de sedimentos o contaminantes, etc.

El programa está estructurado en seis módulos diferentes (ver figura 14):



**FIGURA 14: MÓDULOS DEL SOFTWARE IBER**

#### **4.2. RIVERFLOW2D:**



RiverFlow2D es un software comercial bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios mediante volúmenes finitos.

Es comercializado por la empresa Hydronia (consultora de ingeniería de recursos hídricos con sede en EEUU, [www.hydronia.com](http://www.hydronia.com)) y ha sido desarrollado por el grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza ([www.ghc.unizar.es](http://www.ghc.unizar.es)).

Las aplicaciones de RiverFlow2D son las siguientes: Hidrodinámica en ríos y estuarios, inundaciones urbanas, impacto hidráulico de puentes y otras estructuras, rotura de presas, etc.

Además cuenta con tres módulos adicionales como son el de transporte de sedimentos, transporte de contaminantes y flujo de escombros y lodo.

A diferencia de Iber, RiverFlow2D cuenta con la opción de ser ejecutado por medio de una GPU (unidad de procesamiento gráfico) con el resultado de una simulación mucho más rápida de la que se hace comúnmente con CPU (unidad central de procesamiento). Esto se debe a que mientras la CPU es un procesador de propósito general para toda la computadora, la GPU es un procesador que se especifica para la tarea a la que lo encomiendas.

### **4.3. CARACTERÍSTICAS COMUNES**

La razón de que tanto Iber como RiverFlow2D trabajen con modelos bidimensionales (2D) es que mientras que los modelos unidimensionales (1D) no aportan la información suficiente, pues las velocidades cambian de dirección a lo largo del movimiento del flujo, los modelos tridimensionales (3D) aumentarían en gran medida el coste computacional innecesario, como se ha comentado en la introducción; y además sólo en el instante de rotura de presa es importante la variación que puedan tener las variables en la componente vertical del flujo. Por ello, está comúnmente aceptado que la aproximación óptima en estos casos es la bidimensional.

La estructura de ambos programas es similar y se podría dividir en tres grandes etapas (ver figura 15):



**FIGURA 15: ESTRUCTURA DE FUNCIONAMIENTO DE LOS PROGRAMAS IBER Y RIVERFLOW2D**

- Preproceso: en esta primera fase es donde se definen las características del modelo. Se carga el modelo digital de terreno, se especifica el dominio de cálculo, se genera la malla de cálculo, se establecen las condiciones de contorno y/o iniciales, se asigna el valor de rugosidad al terreno, etc.
- Cálculo: esta etapa se encarga de resolver el sistema del modelo de ecuaciones para proporcionar valores de las variables (h,u,v) en cada celda en cada paso de tiempo. Previamente se han establecido las opciones de cálculo como el tiempo de simulación, el intervalo de almacenamiento de resultados que no tiene que coincidir con los pasos temporales, uso de GPU/CPU, etc.
- Postproceso: es la última parte del proceso en la que se analizan y visualizan los resultados obtenidos pudiendo obtener tablas, gráficas, animaciones de la simulación, etc.

## 5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN CON IBER Y RIVERFLOW2D

En este apartado del trabajo se comparan los valores de los puntos de observación definidos en la simulación con ambos programas (los pasos seguidos para la simulación [preproceso, cálculo y postproceso] se encuentran en el en Anexo A) con las medidas recogidas (datos reales y datos de la maqueta a escala).

Asimismo se va a representar de manera visual la evolución temporal del calado y módulo de la velocidad (Anexo A.3); y de forma gráfica la evolución temporal de la cota de la superficie libre ( $h+z_b$ ) en estos puntos de observación (Anexo B).

### 5.1. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

En la tabla 1 se muestra la comparación del tiempo de llegada de la onda producida por la rotura de presa a los puntos A, B y C (ver figura 12). En la primera columna se tiene la medida real del tiempo de corte del transformador, en la segunda el tiempo en el que la onda llega a ese punto calculado con el programa Iber, en la tercera el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8), en la cuarta el tiempo en el que la onda llega a ese punto calculado con el programa Riverflow2D, y en la última el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8). (La expresión (8) se encuentra en el Anexo B)

|                  | Tiempo real (s) | Tiempo Iber (s) | % Error Iber | Tiempo RiverFlow2D (s) | % Error RiverFlow2D |
|------------------|-----------------|-----------------|--------------|------------------------|---------------------|
| A (5550 , 4400)  | 100             | 61              | 39           | 100,8                  | 0,8                 |
| B (11900 , 3250) | 1240            | 878             | 29,2         | 1364,4                 | 10                  |
| C (13000 , 2700) | 1420            | 1001            | 29,5         | 1540,8                 | 8,5                 |
|                  |                 | Media Error:    | 32,5         | Media Error:           | 6,4                 |

**TABLA 1: COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE LLEGADA DE LA ONDA PRODUCIDA POR LA ROTURA DE PRESA A LOS TRANSFORMADORES OBTENIDO CON LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN CON EL DATO REAL Y PORCENTAJES DE ERROR.**

Aunque los resultados numéricos obtenidos de la simulación con RiverFlow2D sobre-estiman ligeramente el tiempo de llegada de la onda de la rotura de presa respecto a los valores de tiempos observados; podemos ver que se comete un error menor que realizando la simulación con el programa Iber, el cual supone tiempos menores que los reales. (Ver gráficos de los puntos de los transformadores en el Anexo B.1.)



## **5.2. DATOS TOMADOS POR LA POLICÍA FRANCESA**

En la tabla 2 se muestra la comparación del valor máximo de cota de la superficie libre alcanzado en los puntos P1,..., P17 (ver figura 11). En la primera columna se tiene la medida tomada por la policía de este valor, en la segunda el valor calculado con el programa Iber, en la tercera el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8), en la cuarta el valor calculado con el programa Riverflow2D, y en la última el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8).

|                           | <b>Cota de agua real (m)</b> | <b>Cota de agua Iber (m)</b> | <b>% Error Iber</b> | <b>Cota de agua RiverFlow2D (m)</b> | <b>% Error RiverFlow2D</b> |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| <b>P1 (4913 , 4244)</b>   | 79,15                        | 73,6                         | 7                   | 76,956                              | 2,8                        |
| <b>P2 (5160 , 4370)</b>   | 87,2                         | 72,7                         | 16,6                | 85,401                              | 2,1                        |
| <b>P3 (5791 , 4178)</b>   | 54,9                         | 56,9                         | 3,6                 | 53,674                              | 2,2                        |
| <b>P4 (5887 , 4504)</b>   | 64,7                         | 62,4                         | 3,6                 | 59,917                              | 7,4                        |
| <b>P5 (6763 , 3430)</b>   | 51,1                         | 52,17                        | 2,1                 | 48,33                               | 5,4                        |
| <b>P6 (6930 , 3592)</b>   | 43,75                        | 45,64                        | 4,3                 | 46,672                              | 6,7                        |
| <b>P7 (7326 , 2949)</b>   | 44,35                        | 43,4                         | 2,1                 | 39,706                              | 10,5                       |
| <b>P8 (7441 , 3232)</b>   | 38,6                         | 36,6                         | 5,2                 | 34,497                              | 10,6                       |
| <b>P9 (8736 , 3265)</b>   | 31,9                         | 31,4                         | 1,6                 | 32,656                              | 2,4                        |
| <b>P10 (8629 , 3605)</b>  | 40,75                        | 37                           | 9,2                 | 37,779                              | 7,3                        |
| <b>P11 (9761 , 3480)</b>  | 24,15                        | 24,4                         | 1                   | 24,583                              | 1,8                        |
| <b>P12 (9800 , 2415)</b>  | 24,9                         | 26,4                         | 6                   | 25,597                              | 2,8                        |
| <b>P13 (10953 , 2652)</b> | 17,25                        | 23                           | 33,3                | 20,532                              | 19                         |
| <b>P14 (11157 , 3801)</b> | 20,7                         | 20,9                         | 1                   | 20,705                              | 0                          |
| <b>P15 (11689 , 2592)</b> | 18,6                         | 18,3                         | 1,6                 | 18,507                              | 0,5                        |
| <b>P16 (11626 , 3407)</b> | 17,25                        | 19,5                         | 13                  | 18,156                              | 5,3                        |
| <b>P17 (12334 , 2270)</b> | 14                           | 14,4                         | 2,9                 | 15,766                              | 12,6                       |
|                           |                              | <b>Media Error:</b>          | <b>6,7</b>          | <b>Media Error:</b>                 | <b>5,8</b>                 |

**TABLA 2: COMPARACIÓN DE LA COTA DE LA LÁMINA LIBRE MÁXIMA ALCANZADA MEDIDA POR LA POLICÍA Y CALCULADA CON LOS DOS PROGRAMAS; Y PORCENTAJES DE ERROR.**

Para el caso de la cota máxima alcanzada en los puntos tomados por la policía, los resultados están más ajustados a los vistos anteriormente en los transformadores, especialmente en el caso de Iber. Prueba de ello es que el valor de los errores ha disminuido una media de 25,8 para el software Iber, mientras que para RiverFlow2D está prácticamente igual de preciso en ambos casos.

En los puntos cercanos a la presa (P1 y P2), los resultados que presenta Iber están lejos de ser próximos ya que existen diferencias de hasta 14 metros de altura. En los puntos P13, P14 y P17 a los cuales no les llega la onda de agua, su error se debe íntegramente a la interpolación de la altura de la cota del terreno ( $z_b$ ).

Con respecto al resto de puntos, la aproximación con la realidad es aceptable por parte de ambos softwares. Ninguno de ellos tiene una tendencia clara a sobre-estimar o sub-estimar los resultados con respecto a los valores reales. (Ver gráficos de los puntos tomados por la policía en el Anexo B.2.)

### **5.3. DATOS DE LA MAQUETA**

En la tabla 3 se muestra la comparación del valor máximo de cota de la superficie libre alcanzado en los puntos S6,... S14 (ver figura 13). En la primera columna se tiene la medida registrada en la maqueta en cada punto, en la segunda el valor calculado con el programa Iber, en la tercera el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8), en la cuarta el valor calculado con el programa Riverflow2D, y en la última el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8).

|                           | <b>Cota de agua maqueta (m)</b> | <b>Cota agua Iber (m)</b> | <b>% Error Iber</b> | <b>Cota de agua RiverFlow2D (m)</b> | <b>% Error RiverFlow2D</b> |
|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| <b>S6 (4947 , 4290)</b>   | 84,2                            | 70                        | 16,9                | 84,905                              | 0,8                        |
| <b>S7 (5717 , 4408)</b>   | 49,1                            | 57                        | 16,1                | 55,028                              | 12,1                       |
| <b>S8 (6775 , 3869)</b>   | 54                              | 59                        | 9,3                 | 53,398                              | 1,1                        |
| <b>S9 (7128 , 3162)</b>   | 40,2                            | 43,2                      | 7,5                 | 47,108                              | 17,2                       |
| <b>S10 (8585 , 3443)</b>  | 34,9                            | 35,1                      | 0,6                 | 35,968                              | 3,1                        |
| <b>S11 (9675 , 3086)</b>  | 27,4                            | 25,4                      | 7,3                 | 23,939                              | 12,6                       |
| <b>S12 (10939 , 3045)</b> | 21,5                            | 18,6                      | 13,5                | 17,906                              | 16,7                       |
| <b>S13 (11724 , 2810)</b> | 16,1                            | 17,5                      | 8,7                 | 18,054                              | 12,1                       |
| <b>S14 (12724 , 2485)</b> | 12,9                            | 12,8                      | 0,8                 | 12,894                              | 0                          |
|                           |                                 | <b>Media Error:</b>       | <b>8,9</b>          | <b>Media Error:</b>                 | <b>8,4</b>                 |

**TABLA 3: COMPARACIÓN DE LA COTA DE LA LÁMINA LIBRE MÁXIMA ALCANZADA MEDIDA EN LA MAQUETA Y CALCULADA CON LOS DOS PROGRAMAS; Y PORCENTAJES DE ERROR.**

Respecto a la comparación de los resultados de la cota máxima alcanzada en los puntos de la maqueta localizados en el centro del cauce, los resultados numéricos que arrojan las simulaciones son bastante aproximados a las medidas registradas en esos mismos puntos en la maqueta, aunque si se cotejan con el caso anterior, el error medio crece un poco.

Un caso puntual vuelve a ser el programa Iber en la zona inmediata a la presa (S6) en donde se vuelven a cometer errores de hasta 14 metros. En este caso tampoco se observa ninguna tendencia clara de sobre-estimación o sub-estimación de los valores con respecto a los de la maqueta.

En la siguiente tabla (tabla 4) se muestra la comparación del tiempo de llegada de la onda de choque a los puntos S6,... S14 (ver figura 13); ya que estos datos también fueron registrados en el experimento. En la primera columna se tiene este tiempo registrado en la maqueta en cada punto, en la segunda el valor calculado con el programa Iber, en la tercera el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8), en la cuarta el valor calculado con el programa Riverflow2D, y en la última el porcentaje de error cometido calculado con la expresión (8).

|                           | Tiempo maqueta (s) | Tiempo Iber (s)     | % Error Iber | Tiempo RiverFlow2D (s) | % Error RiverFlow2D |
|---------------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------------|---------------------|
| <b>S6 (4947 , 4290)</b>   | 10,2               | 7                   | 31,4         | 7,2                    | 29,9                |
| <b>S7 (5717 , 4408)</b>   | 102                | 65                  | 36,3         | 104,4                  | 2,4                 |
| <b>S8 (6775 , 3869)</b>   | 182                | 130                 | 28,6         | 262,8                  | 44,4                |
| <b>S9 (7128 , 3162)</b>   | 263                | 205                 | 22,1         | 374,4                  | 42,4                |
| <b>S10 (8585 , 3443)</b>  | 404                | 338                 | 16,3         | 579,6                  | 43,5                |
| <b>S11 (9675 , 3086)</b>  | 600                | 472                 | 21,3         | 802,8                  | 33,8                |
| <b>S12 (10939 , 3045)</b> | 845                | 662                 | 21,7         | 1072,8                 | 27                  |
| <b>S13 (11724 , 2810)</b> | 972                | 796                 | 18,1         | 1252,8                 | 28,9                |
| <b>S14 (12724 , 2485)</b> | 1139               | 997                 | 12,5         | 1522,8                 | 33,7                |
|                           |                    | <b>Media Error:</b> | <b>23,1</b>  | <b>Media Error:</b>    | <b>31,7</b>         |

**TABLA 4: COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE LLEGADA DEL FRENTE DE ONDA TRAS LA ROTURA DE PRESA A LOS PUNTOS LOCALIZADOS LA MAQUETA Y CALCULADA CON LOS DOS PROGRAMAS; Y PORCENTAJES DE ERROR.**

Para el caso del tiempo que tarda en alcanzar la onda de agua los diferentes puntos de referencia en la maqueta, se obtiene un error bastante alto por parte de ambos softwares. Se vuelve a reflejar, como pasaba en la comparación de tiempos de llegada de la onda a los transformadores, que los valores de RiverFlow2D sobre-estiman los datos de referencia mientras que los valores de Iber sub-estiman dichos datos.

El hecho de que el error respecto a Iber haya disminuido y el de RiverFlow2D haya aumentado con respecto a los datos de los transformadores A, B y C; y teniendo en cuenta lo nombrado en el anterior párrafo, se puede afirmar que la velocidad simulada de la onda de agua en la maqueta es menor que la velocidad de la onda real que se produjo en la cuenca del río Reyran.

Fijándonos en los errores de todas las tablas, es posible afirmar que tanto Iber como RiverFlow2D cometen errores pequeños a la hora de modelizar la altura de agua; mientras que a la hora de simular la velocidad de avance del flujo, y por consiguiente los tiempos de llegada de la onda de agua, estos errores se hacen mayores. Como hemos dicho, el valor del coeficiente de rozamiento de Manning es quien controla el tiempo de llegada del frente; quizás se podría ajustar mejor este valor para que los resultados numéricos se parezcan más a la realidad; pero habría que hacerlo en ambos programas; con lo cual en nuestro objetivo de comparar los modelos este parámetro no sería relevante porque habría que ajustarlo en los dos y en los dos mejoraría el resultado. (Ver gráficos de los puntos de la maqueta en el Anexo B.3.)

## 6. CONCLUSIONES

---

En este trabajo se han comparado dos programas de simulación del flujo producido tras la rotura de una presa, usados por las consultoras de ingeniería para elaborar los planes de emergencia de las presas. Se han analizado sus puntos en común y sus diferencias eligiendo un caso en el cual disponemos de medidas reales: la rotura de presa de Malpasset.

Bajo las mismas condiciones de cálculo (CPU), hemos visto que RiverFlow2D es capaz de calcular tres veces más rápido que Iber. Además, si se usa un cálculo más avanzado (GPU) queda patente la gran diferencia de tiempo de cálculo que se ahorra, ya que se multiplica por más de tres la velocidad de obtención de resultados. Este resultado es de gran interés práctico.

En cuanto a la precisión de resultados se han comparado los tiempos de llegada del frente de onda a tres transformadores, resultando que el programa Riverflow2D da tiempos más cortos que Iber. También se ha analizado la cota máxima alcanzada en puntos alejados del cauce, resultando que Riverflow2D arroja valores más altos que Iber. Y por último se ha analizado el tiempo de llegada y la cota máxima alcanzada en puntos situados en el centro del cauce; en los que Iber da tiempos más cortos y cotas máximas menores. Se han comparado todos estos resultados numéricos con las medidas observadas y se ha podido concluir que tanto Iber como RiverFlow2D cometen errores pequeños a la hora de modelizar la altura máxima de la lámina de agua; mientras que a la hora de simular la velocidad de avance del flujo, y por consiguiente los tiempos de llegada del frente de onda, estos errores son mayores.

Por otro lado, se ha comparado la extensión de la lámina de agua sobre el dominio calculada con ambos modelos y los valores del módulo de la velocidad observando grandes diferencias entre ellos. Sería bueno poder tener fotografías aéreas de esta catástrofe para poder validar mejor uno u otro programa pero lamentablemente no disponemos de esta información. El coeficiente de rozamiento de Manning es quien controla el tiempo de llegada del frente; quizás se podría ajustar mejor este valor para que los resultados numéricos se parecieran más a la realidad; pero habría que hacerlo en ambos programas; con lo cual en nuestro objetivo de comparar los modelos este parámetro no sería relevante porque habría que ajustarlo en los dos y también en los dos mejoraría el resultado. Sin embargo, al comparar la evolución temporal de la lámina de agua en los puntos localizados en el centro del cauce observamos que la tendencia del punto cercano a la rotura de la presa se resuelve de forma diferente. Iber no es capaz de reproducir la forma de la onda de choque. Creemos que puede ser debido al tratamiento del frente de seco-mojado, que en Riverflow2D se realiza conservando siempre el volumen de agua mientras que en el caso de Iber los manuales no explicitan cómo se realiza. No se ha podido comparar el error de masa cometido por ambos programas, ya que Iber no facilita este dato, aunque Riverflow2D si lo hace. También puede ocurrir que el método numérico de Iber contenga algún término de difusión numérica como viscosidad turbulenta. En el manual no se especifica este hecho; pero si fuera así no se consideraría un buen modelo de simulación para roturas de presa, ya que este tipo de términos estropean la captura discontinua de la onda de choque.

Me gustaría destacar que, aunque se han tratado de establecer unas condiciones lo más semejantes posible entre los softwares, y la rotura real de la presa de Malpasset, los resultados obtenidos con cada programa dependen de muchos factores que afectan directamente al valor de los mismos: la forma de interpolar los puntos importados (MDE) para generar la superficie o la calidad de la malla.

En cuanto a las ventajas y desventajas de cada software, puedo hacer una valoración personal, y por lo tanto algo subjetiva, lo que conlleva que no todo el mundo comparta esta opinión acerca de Iber y RiverFlow2D. En primer lugar, centrándonos en el preproceso: mientras que la operación de importar datos es idéntica para cada programa, la interfaz resulta mucho más cómoda e intuitiva en el caso de RiverFlow2D (apoyada en el programa QGIS, que es un software libre muy potente de gestión de información geográfica). En el módulo de cálculo, el software RiverFlow2D está notoriamente más desarrollado que Iber; no sólo por la mayor velocidad de cálculo bajo unas mismas condiciones de procesador CPU sino también por el hecho de que exista la opción de calcular los resultados con un procesador GPU, lo que resulta fundamental para el cómputo de grandes dimensiones. Asimismo, RiverFlow2D permite ver la evolución de la simulación a tiempo real a medida que está calculando, en oposición a Iber que no muestra resultados a la vez que calcula. En el postproceso, Iber posee algunas ventajas como la de ser capaz de examinar globalmente en todo el dominio la evolución de cualquier variable en el tiempo y además, seleccionar cualquier punto concreto del dominio para obtener su evolución temporal en forma de tablas y/o gráficas. Este mismo proceso es algo más tedioso con RiverFlow2D, puesto que se requiere cargar cada instante de tiempo por separado, siendo poco efectivo en los casos en los que se desea examinar muchos instantes de tiempo. Por el contrario, el hecho de que en RiverFlow2D exista la opción de elegir Puntos de Observación y se exporten directamente generando un nuevo archivo de datos, resulta muy útil y versátil de cara a utilizarlos posteriormente. No obstante, fue necesario un período de aprendizaje bastante largo, con la ayuda de manuales y tutoriales, para ser capaz de manejarlos con fluidez. Por otra parte, el hecho de aprender a utilizar dos softwares que se utilizan para un mismo fin, hace que el conocimiento de uno sea extrapolable al otro y viceversa.

Con respecto al tema de que el software sea libre o comercial, el software comercial tiene la clara desventaja de que no es gratuito; en cambio posee una clara superioridad en cuanto a soporte técnico y atención personal mucho más eficiente que para el caso de los softwares libres.

A continuación se presenta una tabla-resumen de las características de ambos softwares con el objetivo de tener una idea general de las prestaciones que ofrece cada uno. Se ha calificado cada característica de uno a tres rombos, de tal manera que un número mayor de rombos indica una mayor calidad de esa propiedad.

| <b>Características de los softwares</b> | <b>Iber</b> | <b>RiverFlow2D</b> |
|---|-------------|--------------------|
| Módulos de cálculo                      | ♦♦          | ♦♦♦                |
| Comodidad de la interfaz                | ♦           | ♦♦                 |
| Tiempo de cálculo                       | ♦           | ♦♦♦                |
| Precisión de los resultados             | ♦           | ♦♦                 |
| Visión de los resultados                | ♦♦♦         | ♦♦                 |
| Exportar datos                          | ♦♦          | ♦♦♦                |
| Soporte técnico                         | ♦           | ♦♦♦                |
| Precio del software                     | ♦♦♦         | ♦                  |

**TABLA 5: CALIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE IBER Y RIVERFLOW2D**

# 7. BIBLIOGRAFÍA

---

- Art, M., Hughes, M., Bonnet, M., & Basson, M. (2007). *Las presas y el agua en el mundo*. Francia: Comisión Internacional de Grandes Presas GIGB / ICOLD.
- Brufau, P. (2001). *Conceptos básicos de hidrología superficial*. Zaragoza: Copycenter.
- Brufau, P. (2015). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*. Zaragoza.
- Brufau, P., & García-Navarro, P. (2000). Two-dimensional dam break flow simulation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 35-57.
- Brufau, P., & García-Navarro, P. (2003). Unsteady free surface flow simulation over complex topography with a multidimensional upwind technique. *Journal of Computational Physics*, 503-526.
- Brufau, P., Vázquez-Cendon, M., & García-Navarro, P. (2004). A numerical model for the flooding and drying of irregular domains. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 247-275.
- Brunat, D. (10 de enero de 2019). *El confidencial*. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de Quince minutos de gritos y terror: [https://www.elconfidencial.com/espana/2019-01-10/franco-pantanos-tragedia-ribadelago-lago-sanabria\\_1749014/](https://www.elconfidencial.com/espana/2019-01-10/franco-pantanos-tragedia-ribadelago-lago-sanabria_1749014/)
- Cerro, J. P. (18 de junio de 2007). *Asociación cultural Alicante Vivo*. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de Desastre en la Presa de Tous: <http://www.alicantevivo.org/2007/06/desastre-en-la-presa-de-tous.html>
- Chow, V. T. (1959). *Open Channel Hydraulics*. McGraw Hill.
- (1997). *Declaración de ICOLD sobre las presas y el medio ambiente*. Francia: Comité nacional español de grandes presas.
- El Periódico Extremadura*. (19 de octubre de 2016). Recuperado el 26 de mayo de 2019, de 51 años de la tragedia de la presa de Torrejón: [https://www.elperiodicoextremadura.com/noticias/extremadura/51-anos-tragedia-presa-torrejón\\_969858.html](https://www.elperiodicoextremadura.com/noticias/extremadura/51-anos-tragedia-presa-torrejón_969858.html)
- Fernández, A. R. (22 de abril de 2016). *El desastre de la presa de Banquiao y Shimantan*. Recuperado el 24 de mayo de 2019, de eadic: <https://www.eadic.com/el-desastre-de-la-presa-de-banquiao-y-shimantan/>
- Galarraga, N. (7 de mayo de 2019). *El País*. Recuperado el 2019 de junio de 1, de [https://elpais.com/internacional/2019/05/04/actualidad/1556925352\\_146651.html](https://elpais.com/internacional/2019/05/04/actualidad/1556925352_146651.html)
- Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. Prentice Hall.

- Iagua. (11 de Julio de 2017). *Las infraestructuras del agua españolas en números*. Recuperado el 14 de junio de 2019, de MAPAMA: <https://www.iagua.es/noticias/espana/locken/17/07/11/infraestructuras-agua-espanolas-numeros>
- Kauser-Abbott, C. (29 de Agosto de 2018). *Una visita a Fréjus para comprender la tragedia de la Presa de Malpasset*. Recuperado el 21 de Junio de 2019, de <https://perfectlyprovence.co/visit-frejus-malpasset-dam-tragedy/>
- Lacasta, A., Juez, C., Murillo, J., & García-Navarro, P. (2015). An efficient solution for hazardous geophysical flows simulation using GPUs. *Computers & Geosciences*, 63-72.
- Lacasta, A., Murillo, J., Morales-Hernández, M., & García-Navarro, P. (2015). GPU implementation of the 2D shallow water equations for the simulation of rainfall/runoff events. *Environmental Earth Sciences*, 7295-7305.
- Toro, E. F., & Fraccarollo, L. (1995). Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems. *Journal of Hydraulic Research*, 843-864.
- Villarreal, A. (6 de mayo de 2018). *MAPAMA*. Recuperado el 10 de mayo de 2019, de El confidencial: [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2018-04-27/exceso-pantanos-demolicion-naturaleza-cauce\\_1555632/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/ciencia/2018-04-27/exceso-pantanos-demolicion-naturaleza-cauce_1555632/)
- Williamson, T. (2014). *Hystoric dam failures and recent incidents*.



# Anexo A: METODOLOGÍA SEGUIDA PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN

---

En este apartado se explica paso a paso el procedimiento que se ha seguido con cada programa para lograr la simulación de la presa de Malpasset.

Como se comenta en la sección 4, a la hora de llevar a cabo la simulación de un caso, estos softwares se dividen en tres módulos claramente diferenciados: preproceso, cálculo y postproceso. El procedimiento general de cada una de estas partes es básicamente el mismo para ambos softwares, sin embargo, hay pequeños matices que son los que facilitan o dificultan la simulación y son de gran importancia a la hora de anteponer uno a otro; y que forman parte de uno de los objetivos específicos que se buscan en este trabajo.

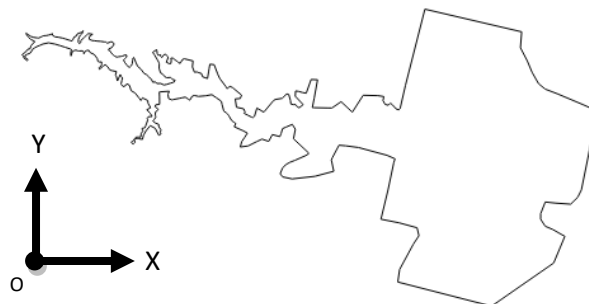
## **A.1. PREPROCESO**

### **MDT (Modelo digital del terreno)**

El MDT consiste en una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa continua. En nuestro caso esa variable representa la cota del terreno ( $z_b$ ) en base a una referencia, también llamado Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

El caso parte de unos datos numéricos ( $x, y, z$ ) que representan las coordenadas de los puntos que forman parte de la topografía de la cuenca del río Reyran; desde la zona donde estaba la presa hasta el pueblo de Fréjus.

La coordenada “y” indica la longitud mientras que la coordenada “x” la latitud cambiada de signo. La orientación del sistema de coordenadas geográfico está representada en la figura 16.



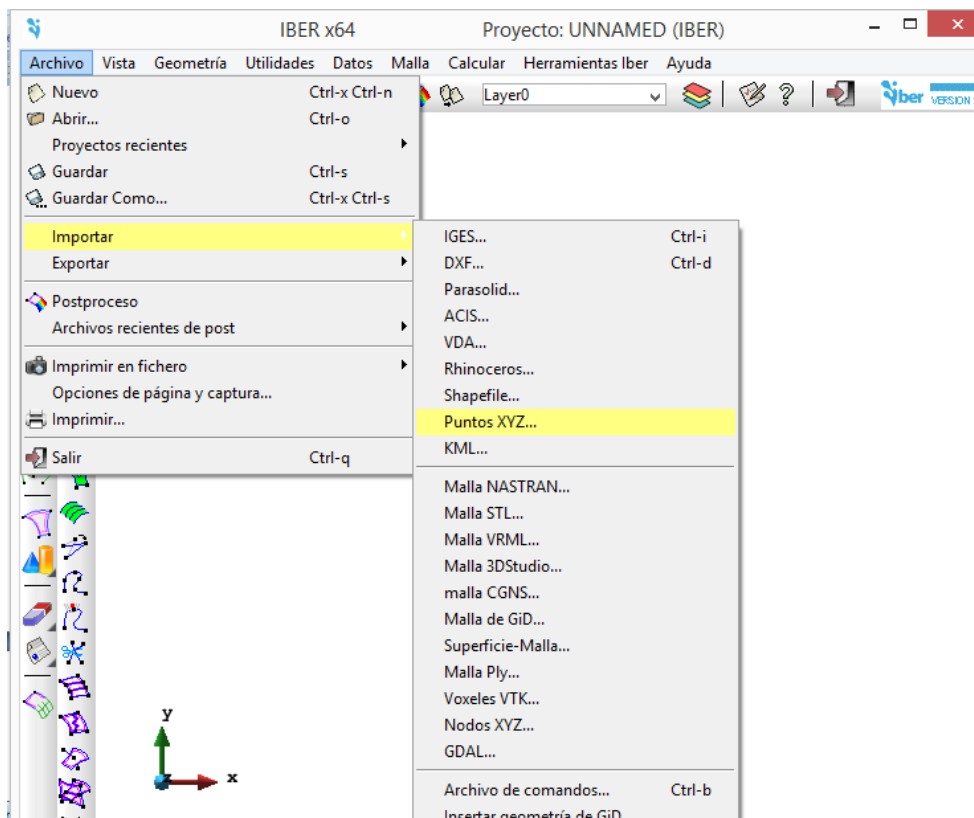
**FIGURA 16: REPRESENTACIÓN DE LA ORIENTACIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS GEOGRÁFICO SOBRE EL DOMINIO DE CÁLCULO**

La coordenada z, indica la altura del terreno (corresponde a  $z_b$  definido en el modelo de ecuaciones) y tiene como origen el nivel del mar. Esta forma de dar las coordenadas de los puntos que constituyen el terreno se denomina formato vectorial, ya que (longitud, latitud y cota) vienen almacenadas en forma de vector; frente al almacenamiento de ráster en el que sólo se almacena la cota al suponer una estructura cuadrada de datos de espaciado constante.

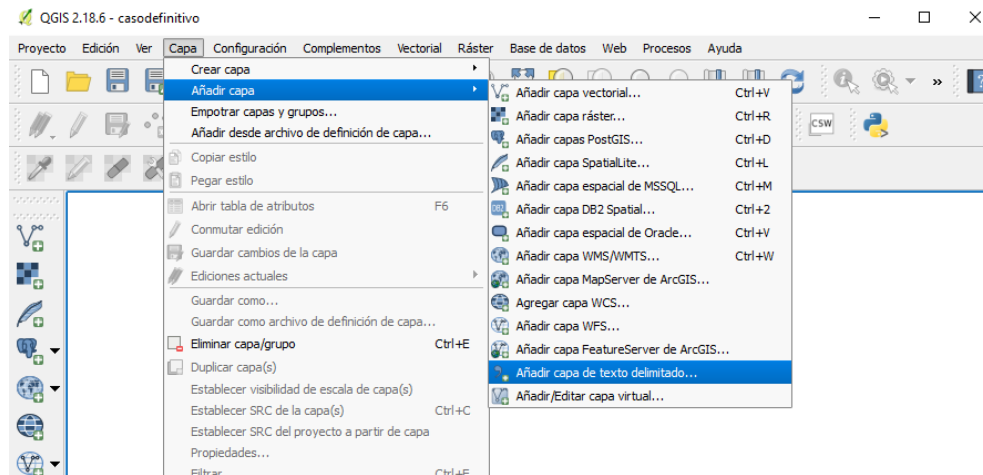
Estos datos (MDT) son importados desde un archivo .txt, en el que la primera, segunda y tercera columna son las coordenadas (x, y,  $z_b$ ) respectivamente. Como resultado, en el programa de simulación, se creará una nube de puntos representando todas las coordenadas introducidas. Los pasos a seguir por cada programa para cargar el MDT son:

| SOFTWARE    | PASOS PARA CREAR NUBE DE PUNTOS   |
|-------------|---|
| Iber        | Archivo → Importar → Puntos XYZ → nombre_archivo.txt                      |
| RiverFlow2D | Capa → Añadir capa → Añadir capa de texto delimitado → nombre_archivo.txt |

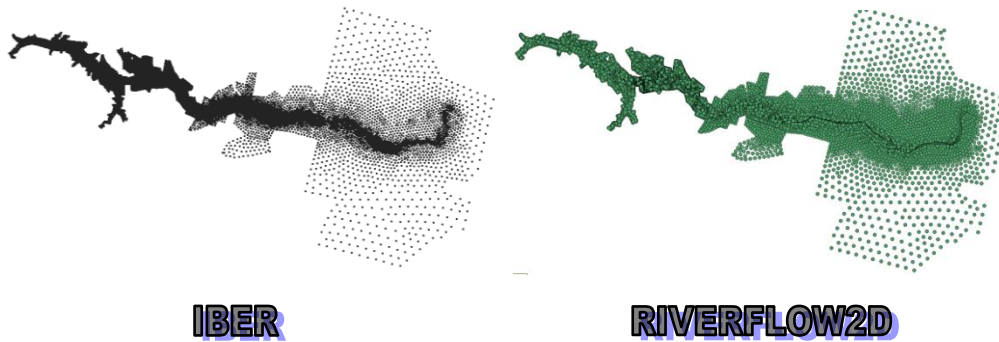
### Iber



## RiverFlow2D



***FIGURA 17: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES***

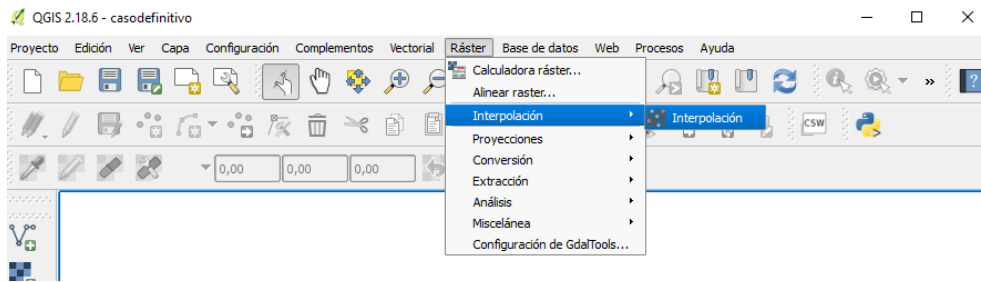


***FIGURA 18: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES EN IBER Y RIVERFLOW2D***

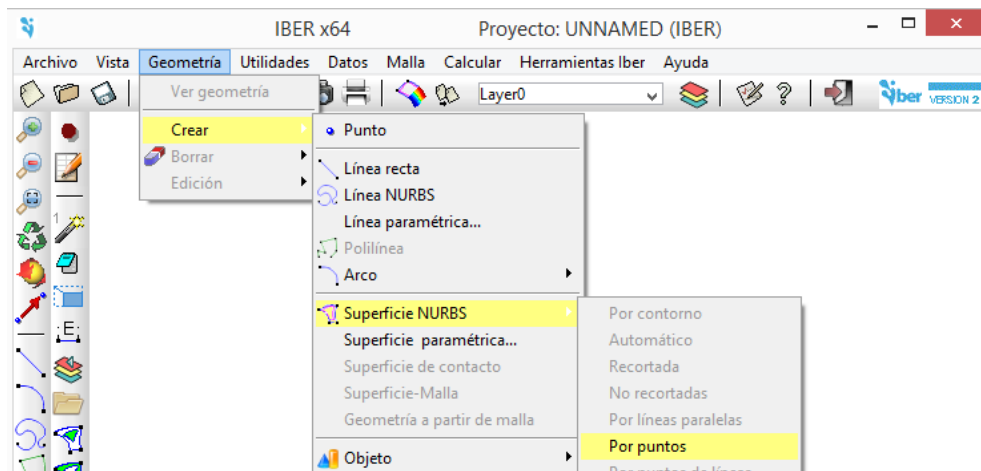
A partir de los puntos  $(x, y, z_b)$  discretos se realiza una interpolación numérica para crear una superficie continua.

| SOFTWARE    | PASOS PARA CREAR UNA SUPERFICIE Continua  |
|-------------|---|
| Iber        | Geometría → Crear → Superficie NURBS → Por puntos → seleccionar puntos → Geometría → Crear → Superficie NURBS → Recortada (se recorta la superficie que se quiera estudiar) |
| RiverFlow2D | Ráster → Interpolación → Interpolación  |

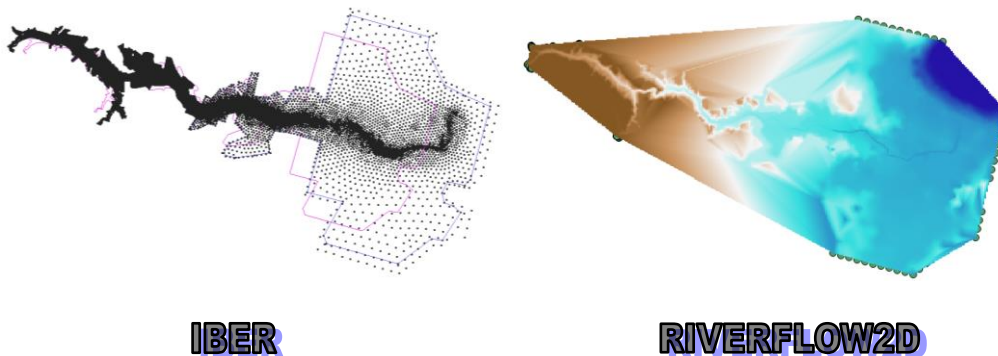
## Iber



## RiverFlow2D



**FIGURA 19: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DE UNA SUPERFICIE CONTINUA**



**FIGURA 20: REPRESENTACIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TERRENO EN IBER Y RIVERFLOW2D**

Para el caso de RiverFlow2D esta superficie continua se denomina ráster y al generarla se crea un archivo nuevo con la información de la interpolación. En la imagen aparece un espectro de colores que representa la cota de del terreno. La zona marrón indica que el terreno tiene una cota elevada (de hasta 100 metros) mientras que la zona azul denota cotas inferiores. La zona coloreada en azul oscuro es el mar y está representada por cotas negativas (de hasta -20 metros). Observamos que el programa interpola también datos fuera de lo que será el dominio de cálculo; pero como habrá que definir éste a posteriori, estos datos no se usarán.

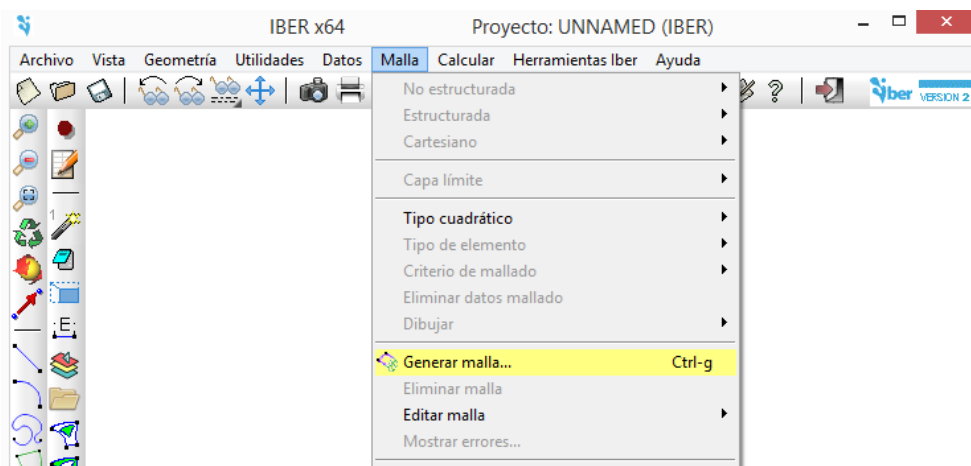
En Iber, la superficie que se genera se representa mediante un polígono auxiliar más pequeño con la forma del dominio del estudio. En este caso no se crea ningún archivo adicional como ocurre en RiverFlow2D, ni se puede ver la superficie con los valores de las cotas en una escala de colores.

## Generación de la malla

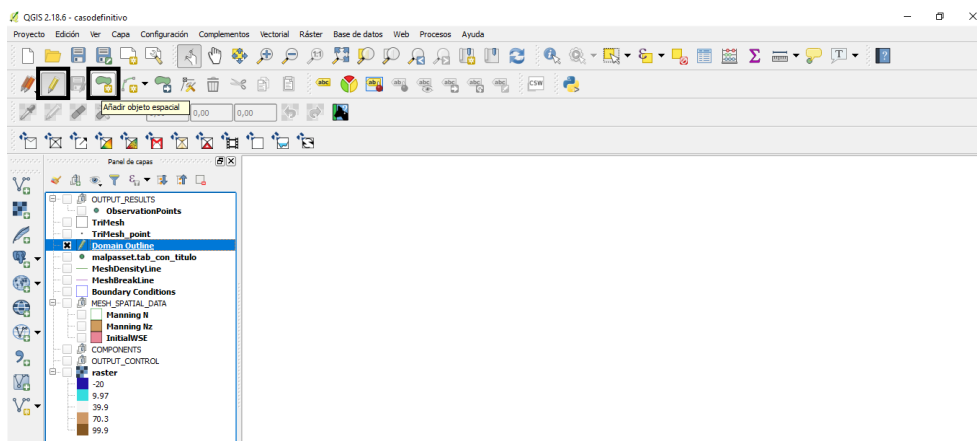
A continuación se genera una malla triangular no estructurada; es decir, una malla hecha a partir de elementos triangulares a los que no se les impone ninguna condición de orden para que se adapten mejor a las irregularidades de la superficie; que es la óptima para este tipo de simulaciones, ya que no presenta direcciones privilegiadas que pueden afectar al cálculo del flujo. Los pasos seguidos en los dos programas se detallan a continuación.

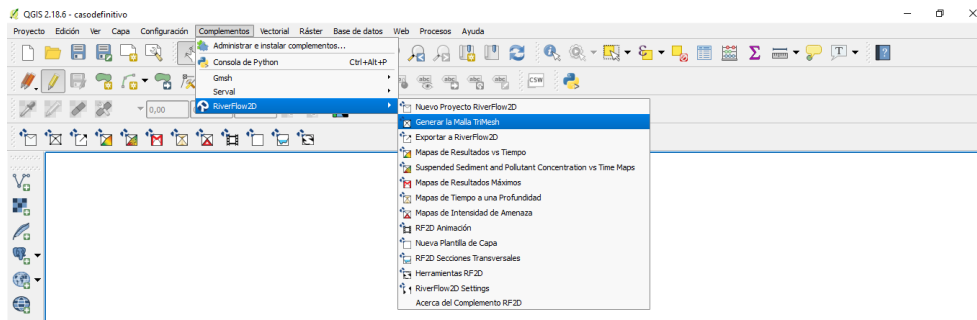
| SOFTWARE    | PASOS PARA CREAR LA MALLA DE CÁLCULO   |
|-------------|--|
| Iber        | Malla → Generar malla  |
| RiverFlow2D | Capa DomainOutlain → Conmutar edición → Añadir objeto espacial (se selecciona la superficie que se desea mallar) → Complementos → RiverFlow2D → Generar la malla Trimesh |

### Iber



### RiverFlow2D





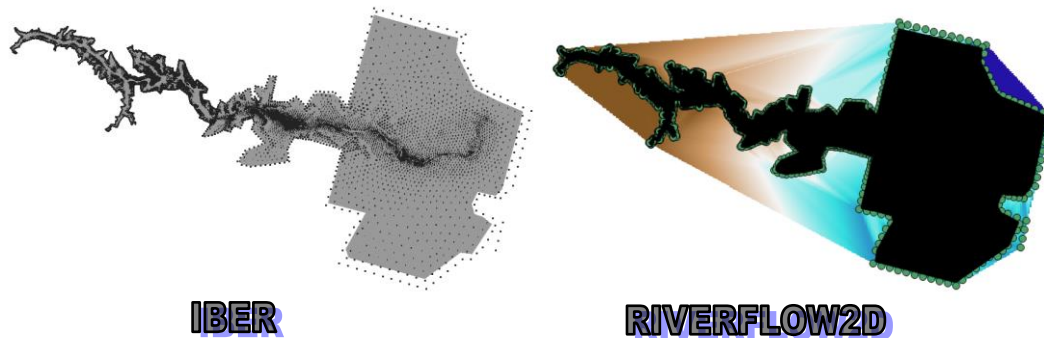
**FIGURA 21: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO**

Hay que destacar que cuanto mayor número de elementos (celdas) contenga la malla, más preciso será el resultado final pero al mismo tiempo el cálculo tendrá mayor carga computacional.

El número de elementos totales en la malla ha de ser similar en ambos programas para que los resultados obtenidos estén bajo las mismas condiciones de preproceso.

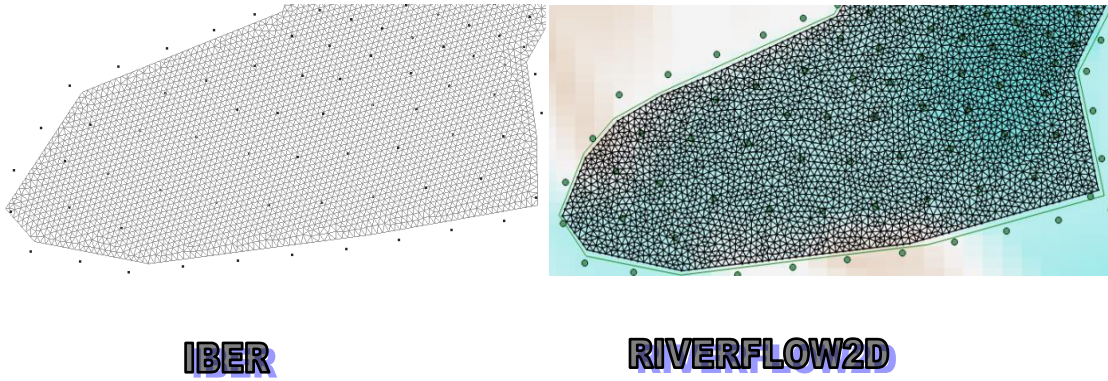
Concretamente para este trabajo se ha usado:

| SOFTWARE    | NÚMERO DE ELEMENTOS EN LA MALLA |
|-------------|---------------------------------|
| Iber        | 350437                          |
| RiverFlow2D | 350975                          |



**FIGURA 22: REPRESENTACIÓN DE LA MALLA DE CÁLCULO UTILIZADA EN IBER Y RIVERFLOW2D**

En la figura 22 no se puede ver bien cómo es la malla debido al gran número de celdas; por tanto, a continuación en la figura 23 se muestran éstas en detalle en una zona para poder ver las similitudes y/o diferencias entre ellas.



**FIGURA 23: DETALLE DE LAS MALLAS DE CÁLCULO USADAS EN IBER Y RIVERFLOW2D**

En la figura 23 se observa cómo el tamaño de los elementos es similar para ambos programas, mucho más estructurado en el caso de Iber y totalmente no estructurado en el caso de Riverflow2D. Cuanto más estructurada es la malla, más fácil es que el flujo siga caminos definidos por estas celdas; mientras que la no estructuración de la malla permite capturar mejor la dirección del flujo como este sea, con independencia de la malla. Por tanto, la opción que nos ofrece Riverflow2D sería mejor.

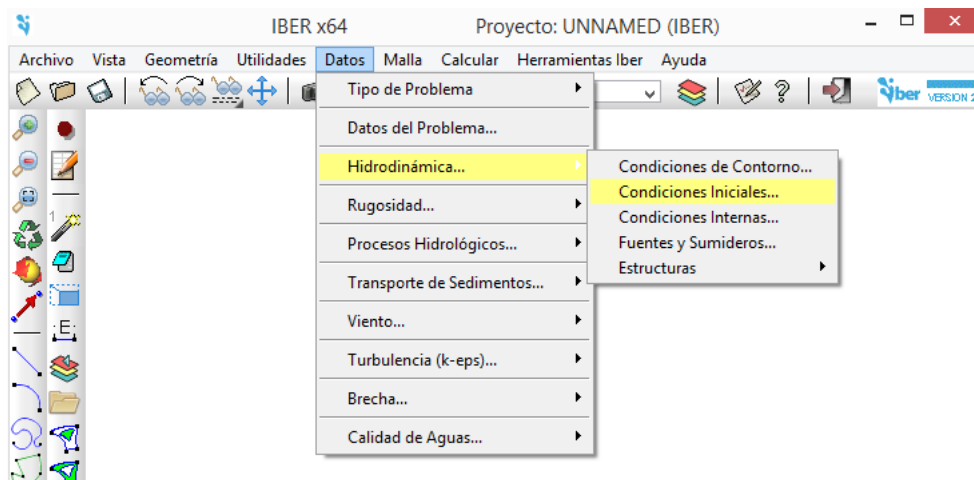


## Condición inicial

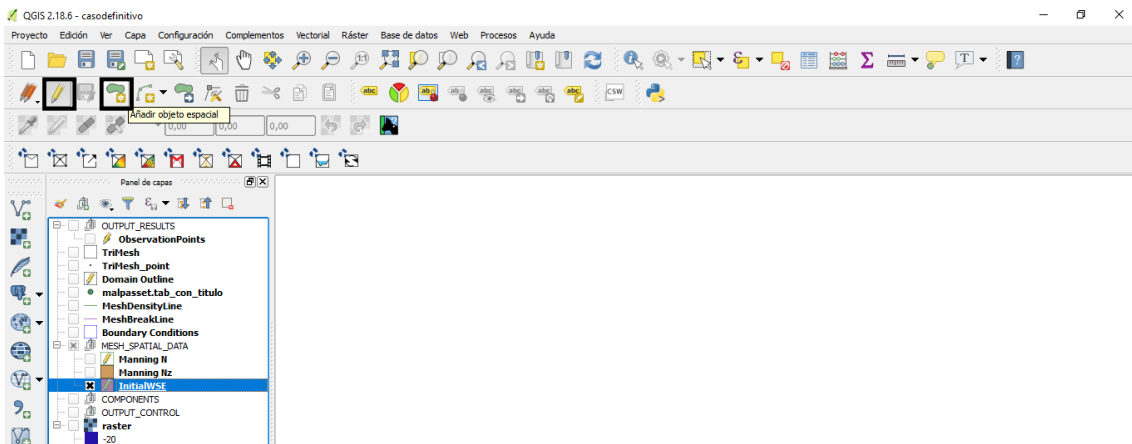
El siguiente paso es establecer una cota inicial de superficie de agua constante de 100 metros en la zona del embalse antes de la presa; mientras que en el resto del dominio se establece que la cota de agua esté con  $h=0$ , es decir, seco en todo el dominio del río y alrededores, excepto en la zona de costa cuya cota de terreno se encuentra por debajo de 0, con valores negativos, que para alcanzar una altura 0, hay zonas que llegan a tener hasta 20 m de agua. Con esta condición, en las únicas zonas en las que inicialmente hay agua son: el embalse (cota de la superficie libre a 100 m) y la zona de mar (cota de la superficie libre situada a 0 m).

| SOFTWARE    | IMPOSICIÓN DE LA CONDICIÓN INICIAL   |
|-------------|--|
| Iber        | Datos → Hidrodinámica → Condiciones iniciales → asignar cota/calado a una superficie previamente creada  |
| RiverFlow2D | Capa Initial WSE → Conmutar edición → Añadir objeto espacial (se selecciona la superficie en la que se desea poner una cota inicial) → asignar cota/calado |

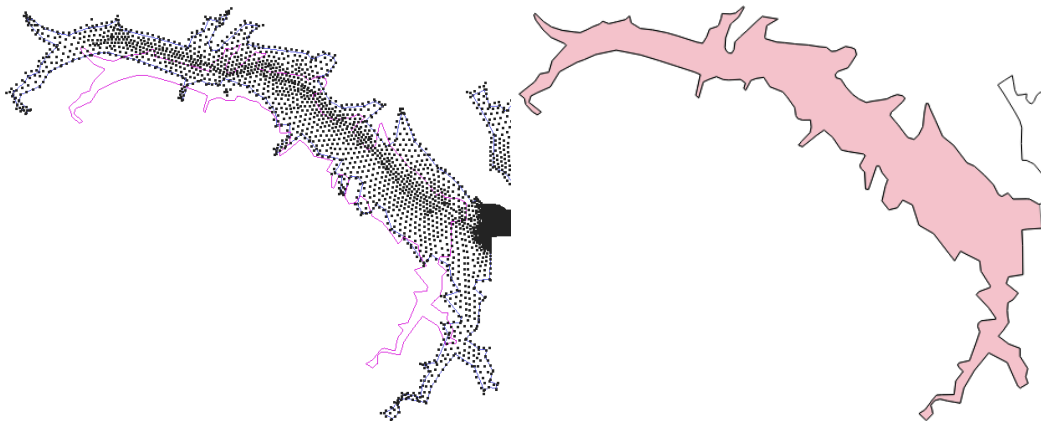
### Iber



## RiverFlow2D



***FIGURA 24: PASOS SEGUIDOS PARA LA IMPOSICIÓN DE LA CONDICIÓN INICIAL***



***FIGURA 25: REPRESENTACIÓN DE LA CONDICIÓN INICIAL EN IBER (IZDA) Y RIVERFLOW2D (DCHA)***

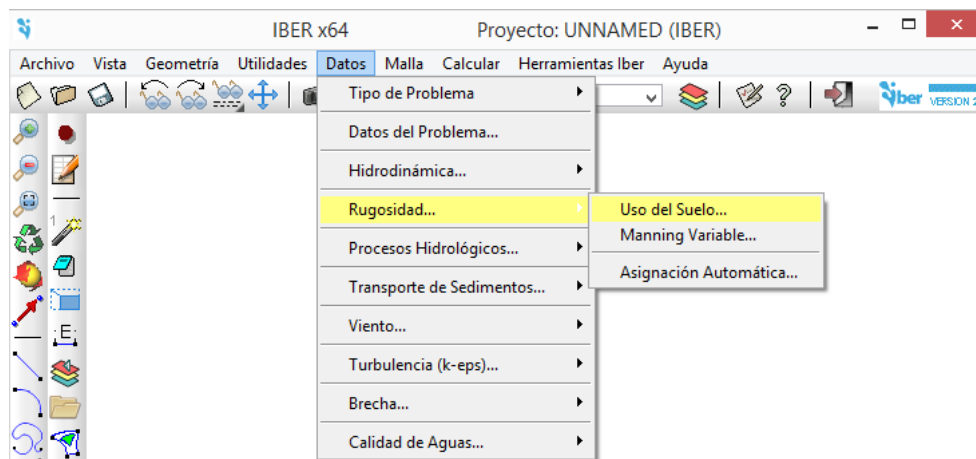
## Rozamiento

El último paso del preproceso es establecer un coeficiente de rozamiento de Manning a toda la superficie del dominio de cálculo, que tenga en cuenta los usos del suelo.

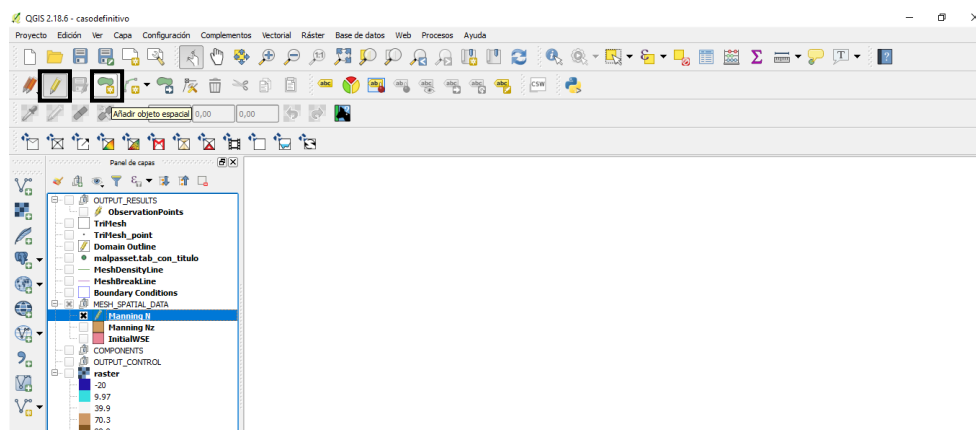
El valor de dicho coeficiente ya hemos comentado en la sección 4 que va a ser  $n=0,03$ .

| SOFTWARE    | IMPOSICIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING   |
|-------------|---|
| Iber        | Datos → Rugosidad → Uso del suelo → asignar un coeficiente de Manning a los elementos de la malla   |
| RiverFlow2D | Capa Manning N → Añadir objeto espacial (se selecciona la superficie en la que se desea poner un coeficiente de Manning) → asignar coeficiente de Manning |

### Iber



### RiverFlow2D



**FIGURA 26: PASOS SEGUIDOS PARA LA IMPOSICIÓN DE COEFICIENTE DE MANNING**

No se presenta figura representativa de esta parte, ya que sólo sería el dominio de cálculo con un valor constante de rozamiento exactamente igual en ambos casos.

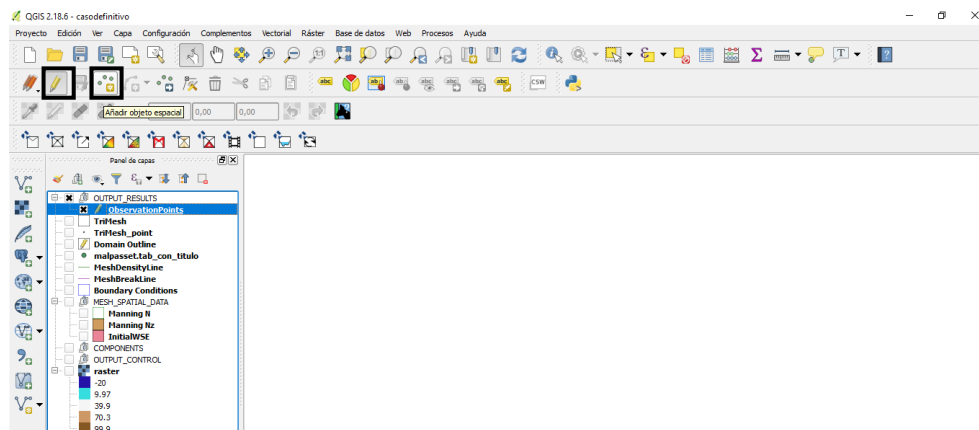
## Puntos de observación

En RiverFlow2D existe la opción de seleccionar puntos en los que se quiera conocer la evolución de las variables en el tiempo. Por cada punto se genera un archivo .txt en el que se almacenan los resultados calculados de las variables.

Esta fase se ha utilizado para introducir los puntos tomados por la policía francesa junto con los puntos del modelo a escala. Las coordenadas de estos puntos también se tienen en formato (x, y, z).

| SOFTWARE    | ESTABLECIMIENTO DE PUNTOS DE OBSERVACIÓN   |
|-------------|--|
| Iber        | No aplicable   |
| RiverFlow2D | Capa Observationpoints → Conmutar edición → Elegir objeto espacial → seleccionar los puntos de observación |

## RiverFlow2D



***FIGURA 27: PASOS SEGUIDOS PARA LA CREACIÓN DE PUNTOS DE OBSERVACIÓN***

En Iber esta opción no existe, y la información de los puntos que se deseen conocer se obtiene directamente en el postproceso.

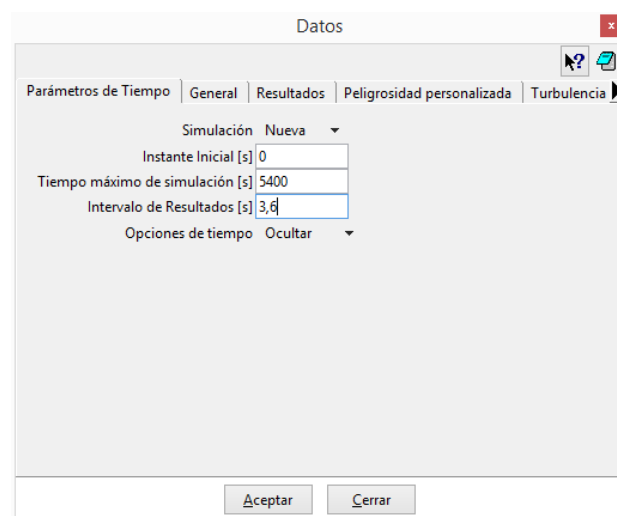
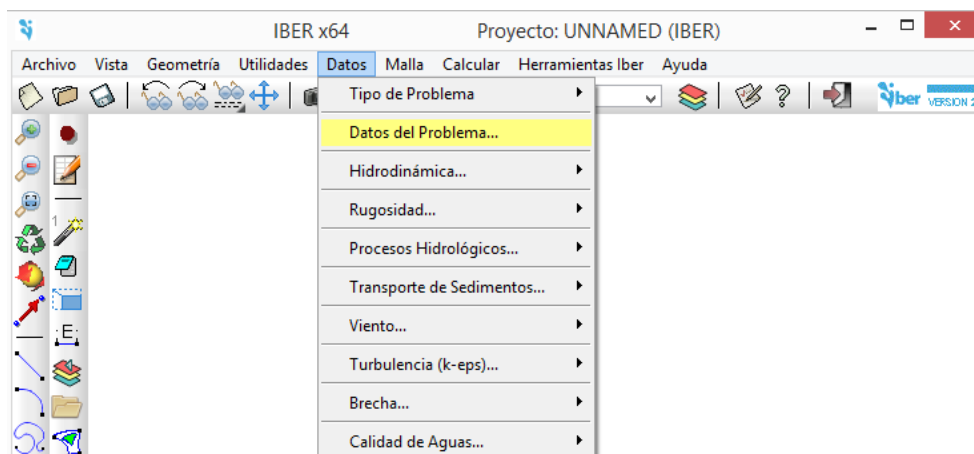
## A.2. CÁLCULO

### Tiempo de simulación

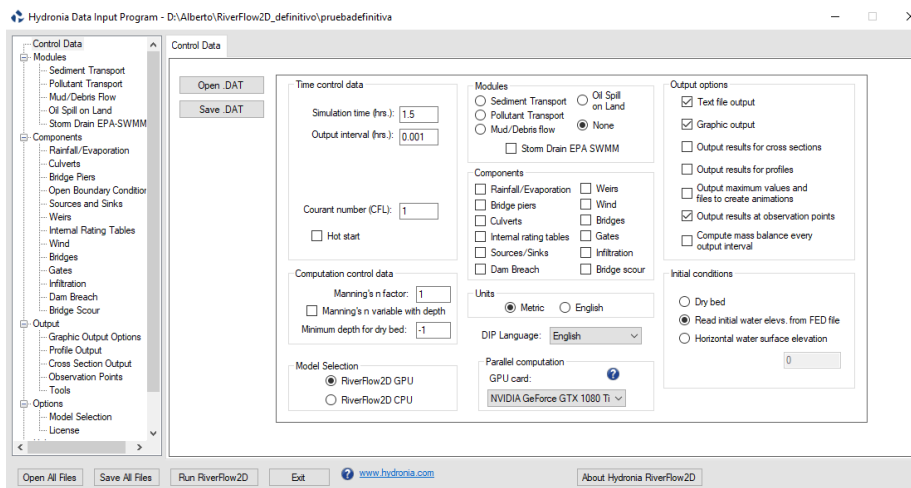
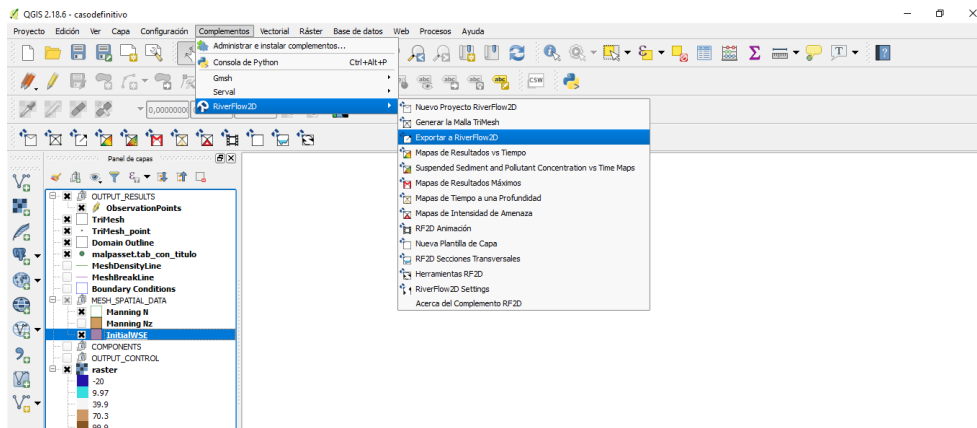
En ambos programas se ha impuesto un tiempo de simulación de 1,5 h (5400 s) con almacenamiento de resultados en ficheros cada 3,6 s.

| SOFTWARE    | ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE CÁLCULO  |
|-------------|--|
| Iber        | Datos → Datos del problema → Establecer las condiciones de simulación deseados → Calcular → Calcular                         |
| RiverFlow2D | Exportar a RiverFlow2D → Establecer las condiciones de simulación deseados → Complementos → RiverFlow2D → Correr RiverFlow2D |

### Iber



## RiverFlow2D



**FIGURA 28: PASOS SEGUIDOS PARA ESTABLECER LAS CONDICIONES DE CÁLCULO**

En esta etapa es importante el tiempo computacional que requieren los programas para realizar la simulación, teniendo en cuenta la relación entre el número de elementos (celdas) dentro de la malla generada del caso a calcular, y la capacidad computacional del programa (y también de la computadora que se utilice), dado que un gran número de elementos en la malla puede suponer una gran carga computacional y por lo tanto mayor tiempo de cálculo, y un bajo número de elementos en la malla puede suponer una insuficiente precisión de los resultados del problema.

Como se ha nombrado anteriormente, RiverFlow2D tiene la opción de calcular con CPU y con GPU mientras que Iber solamente cuenta con la opción de CPU. A continuación se muestra una tabla con el tiempo que le ha costado a Iber en CPU, Riverflow2D en CPU y Riverflow2D en GPU llevar a cabo esta simulación.

| SOFTWARE        | TIEMPO DE CÁLCULO |
|-----------------|-------------------|
| Iber CPU        | 3 h 41 min        |
| RiverFlow2D CPU | 1 h 15 min        |
| RiverFlow2D GPU | 22 min            |

Bajo las mismas condiciones de cálculo (CPU), vemos que RiverFlow2D es capaz de calcular tres veces más rápido que Iber. No obstante, usando un procedimiento más potente (GPU) queda patente la gran diferencia de tiempo de cálculo que se ahorra, ya que se multiplica por más de tres la velocidad de obtención de resultados. Este resultado es de gran interés para las consultoras de ingeniería que son las que elaboran los planes de emergencia de las presas; ya que tienen que realizar un gran número de planes (uno por cada presa) ahorrándoles mucho tiempo e incluso posibilitando tener los informes en un corto plazo de tiempo.

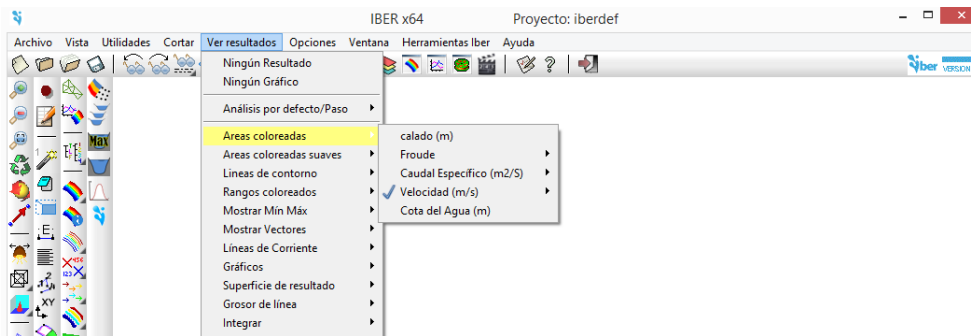
### **A.3. POSTPROCESO**

Tras la etapa de cálculo ya es posible ver y analizar los resultados de la simulación de la rotura de la presa de Malpasset.

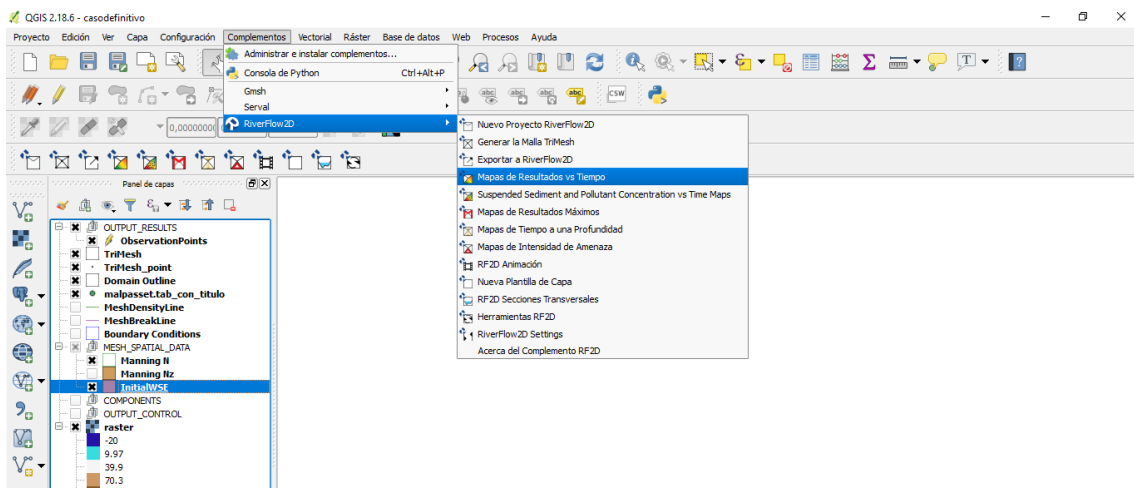
En primer lugar se puede obtener una visión general de la variable deseada en todo el dominio simulado. En este caso las dos variables que nos interesan son: el calado en cada instante y la velocidad (en módulo) del agua durante la simulación.

| SOFTWARE           | VISUALIZACIÓN DE UNA VARIABLE EN TODO EL DOMINIO   |
|--------------------|--|
| <b>Iber</b>        | Ver resultados → Áreas coloreadas → Escoger la variable que se quiera ver su evolución temporal                          |
| <b>RiverFlow2D</b> | Complementos → RiverFlow2D → Mapas de resultados vs tiempo → Escoger la variable que se quiera ver su evolución temporal |

#### **Iber**



#### **RiverFlow2D**



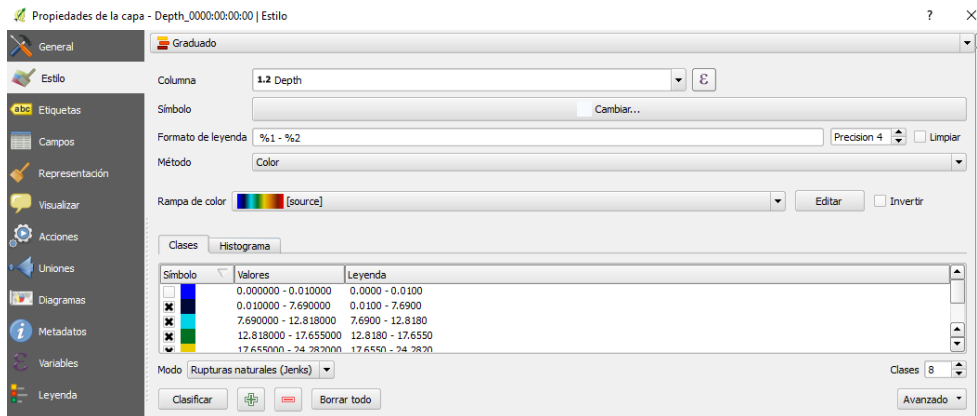
***FIGURA 29: PASOS SEGUIDOS PARA VISUALIZAR UNA VARIABLE EN TODO EL DOMINIO***



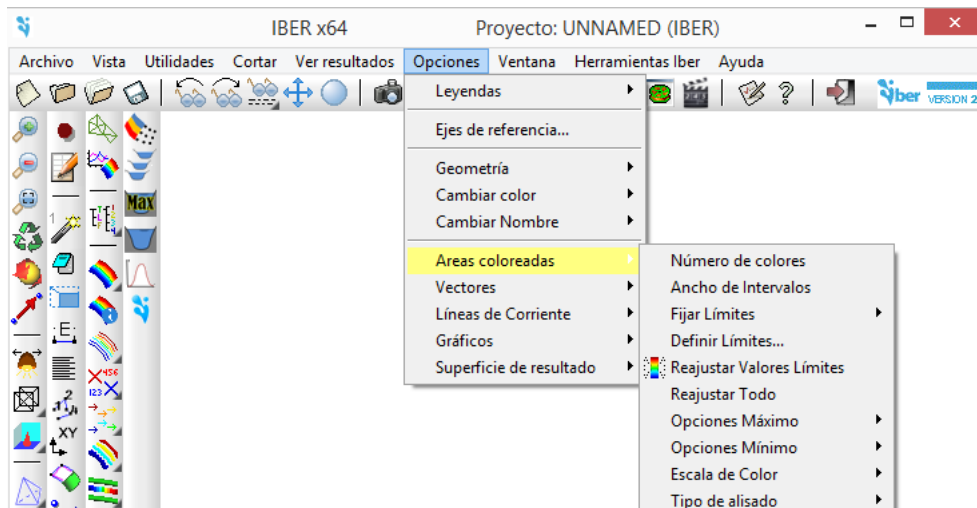
Para poder tener una buena visión general de la variable seleccionada, es importante un correcto manejo de la leyenda.

| SOFTWARE    | MODIFICAR OPCIONES DE LA LEYENDA |
|-------------|----------------------------------|
| Iber        | Opciones → Áreas coloreadas      |
| RiverFlow2D | Propiedades → Estilo             |

### Iber



### RiverFlow2D



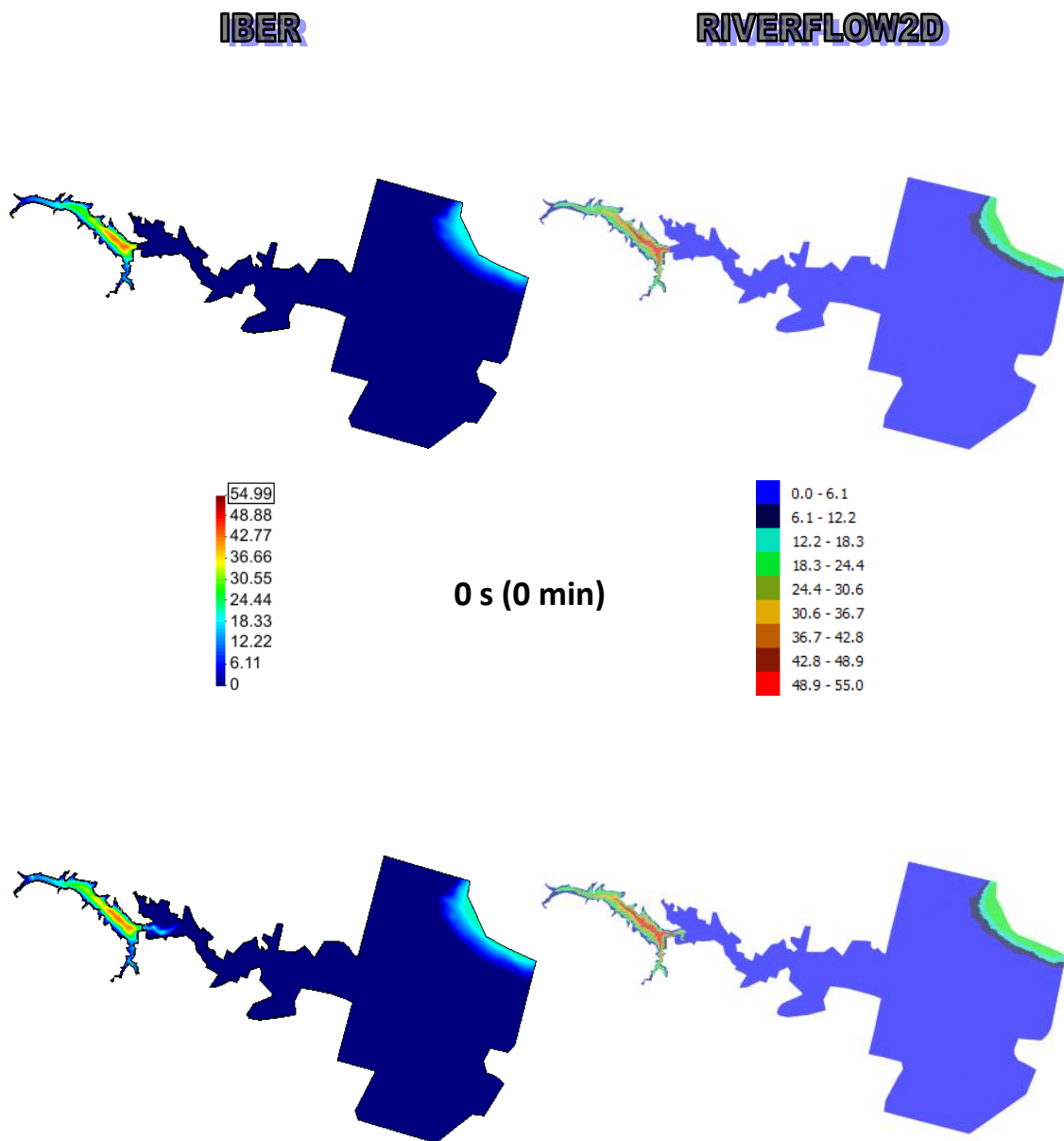
**FIGURA 30: PASOS SEGUIDOS PARA MODIFICAR LA LEYENDA**

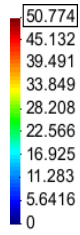
Con el objetivo de ver de manera global la evolución temporal del calado y módulo de la velocidad, se han escogido ciertos instantes de tiempo (los mismos en los dos programas) en los que se han almacenado los resultados, y así poder compararlos de una forma visual. Además, se ha seleccionado una leyenda de colores similar para una mejor y más fácil apreciación de los resultados.

### Evolución temporal del calado

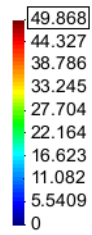
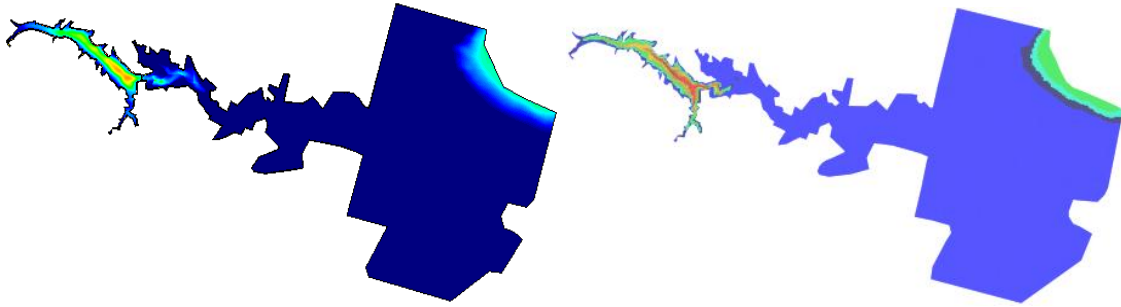
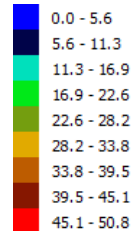
La magnitud del calado (altura de agua por encima de la superficie) se indica con la leyenda correspondiente a cada imagen y los valores están en metros. El rango de valores coincide en Iber y RiverFlow2D para un mismo instante de tiempo pero varía para los diferentes instantes de tiempo, ya que la profundidad máxima va disminuyendo a medida que la presa se vacía.

La columna de imágenes de la izquierda pertenece a los resultados numéricos obtenidos con el programa Iber mientras que la columna de la derecha son los respectivos calculados con el programa RiverFlow2D.

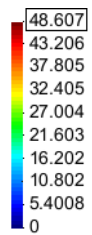
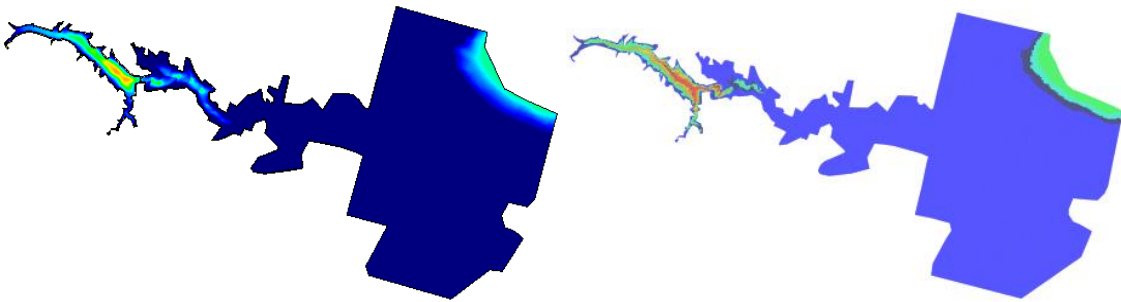
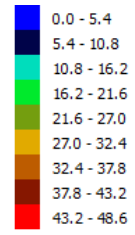




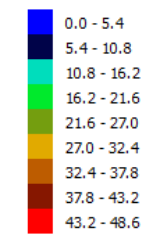
**61 s (1 min 01 s)**

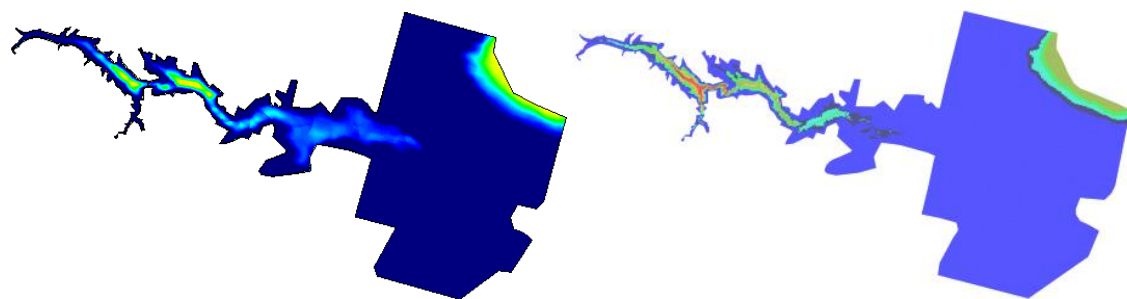
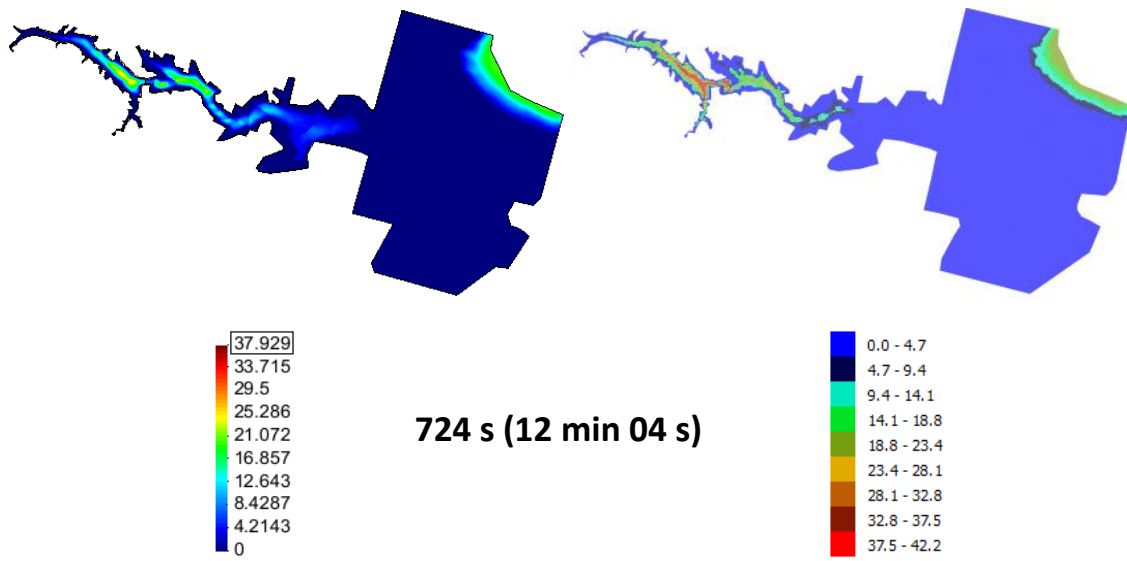
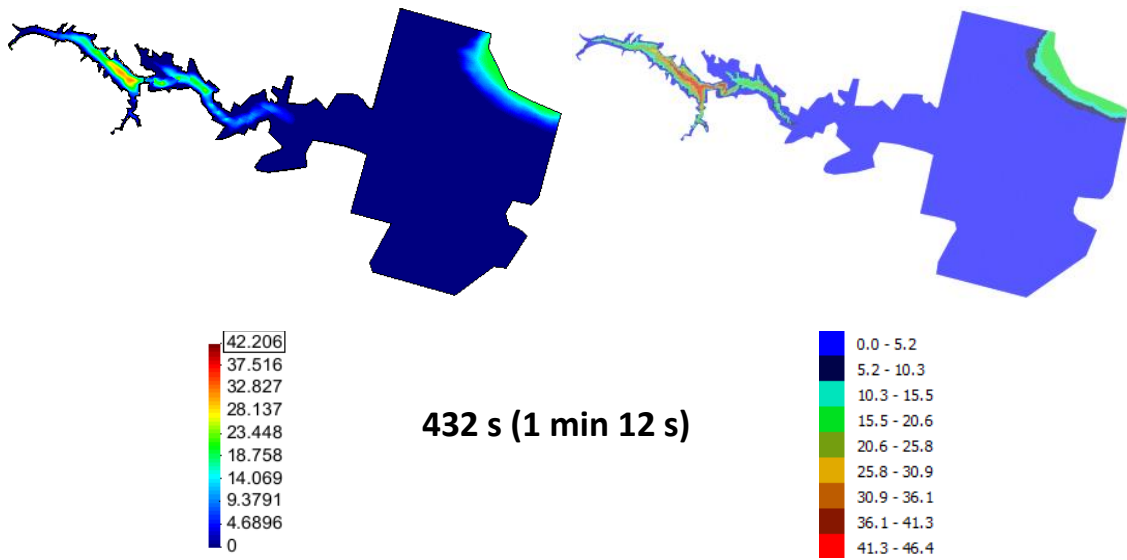


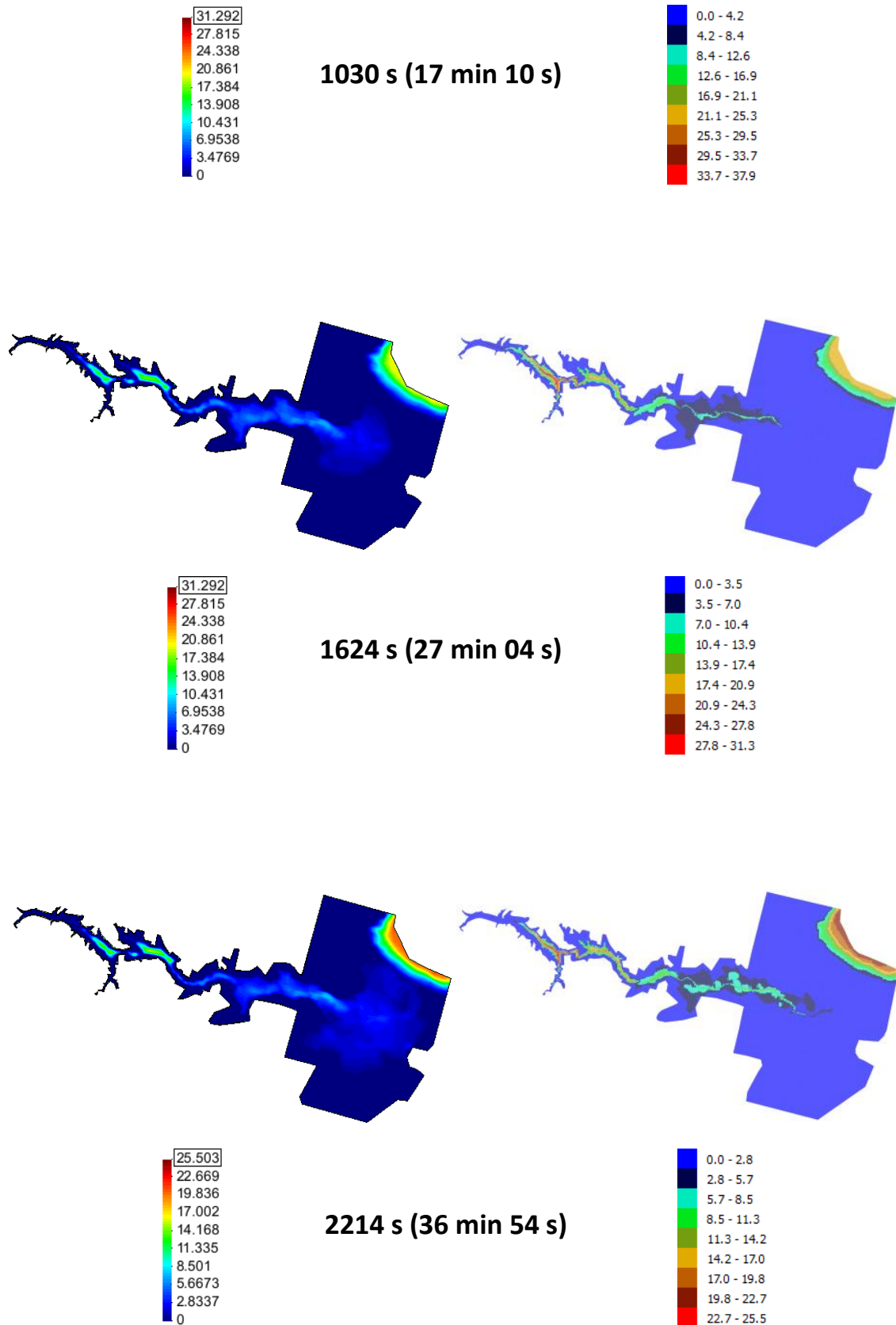
**126 s (2 min 06 s)**



**238 s (3 min 58 s)**







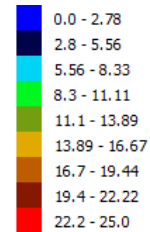
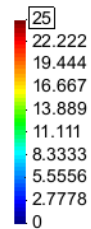
**FIGURA 31: RESULTADOS NUMÉRICOS DE LOS MAPAS DE EXTENSIÓN DE LA LÁMINA DE AGUA PARA LOS TIEMPOS (EN SEGUNDOS)  $T=0$ ,  $T=61$ ,  $T=238$ ,  $T=432$ ,  $T=724$ ,  $T=1030$ ,  $T=1624$ ,  $T=2214$ , CALCULADOS CON IBER (IZDA) Y RIVERFLOW2D (DCHA)**

Inicialmente ( $t=0$ ) sólo hay dos espacios con calado no nulo, y corresponden con la zona del embalse y la zona de la costa donde se encuentra el mar, que es la condición inicial de la que partíamos. Una vez se rompe la presa de forma instantánea, el agua contenida en el embalse comienza a moverse desde las cotas más altas hacia las cotas más bajas en donde está la población de Fréjus.

En las imágenes de la evolución del calado respecto al tiempo se observa que el frente de onda de agua ocasionada por la rotura es más rápido en el caso de Iber que en el de RiverFlow2D. Más adelante lo veremos también cuando comparemos resultados cuantitativos con medidas. Esto conlleva que el calado máximo en toda la simulación se va a presentar mayor con Riverflow2D. También es posible vislumbrar el cauce natural del río Reyran en las imágenes con los tiempos más avanzados; sobre todo para el caso de RiverFlow2D. Vemos que en los tiempos finales, la mancha de inundación que se obtiene con ambos programas es bien distinta. Sería bueno poder tener fotografías aéreas de esta catástrofe para poder validar mejor uno u otro programa pero lamentablemente no disponemos de esta información.

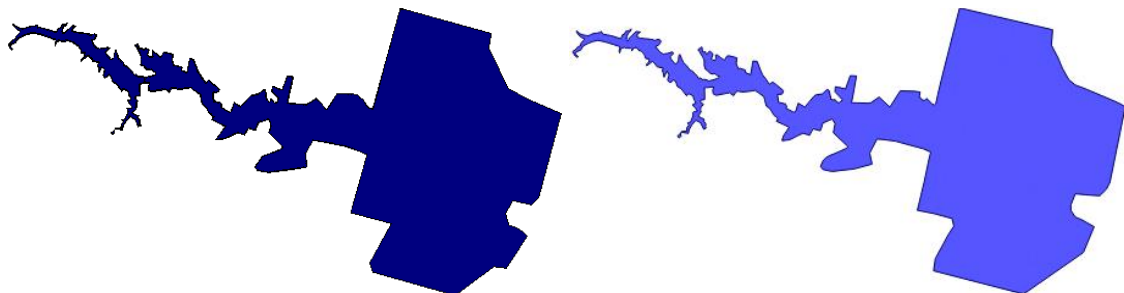
## Evolución del módulo de la velocidad

Para el caso del módulo de la velocidad, los valores de la leyenda se han fijado iguales para todos los instantes de tiempo capturados con los dos programas. Las unidades de velocidad están expresadas en m/s.

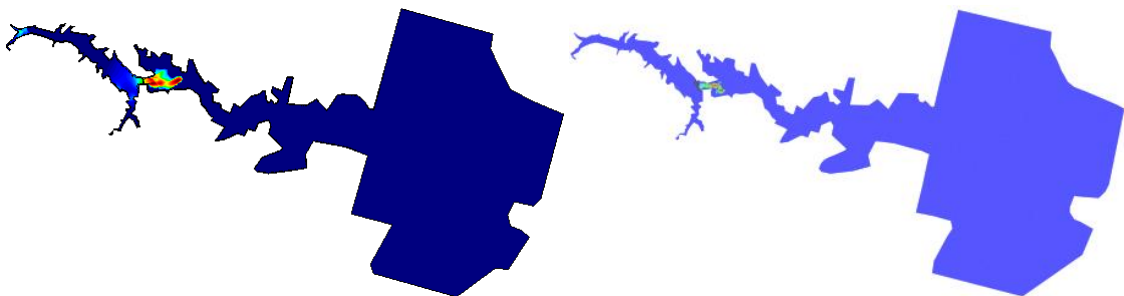


**IBER**

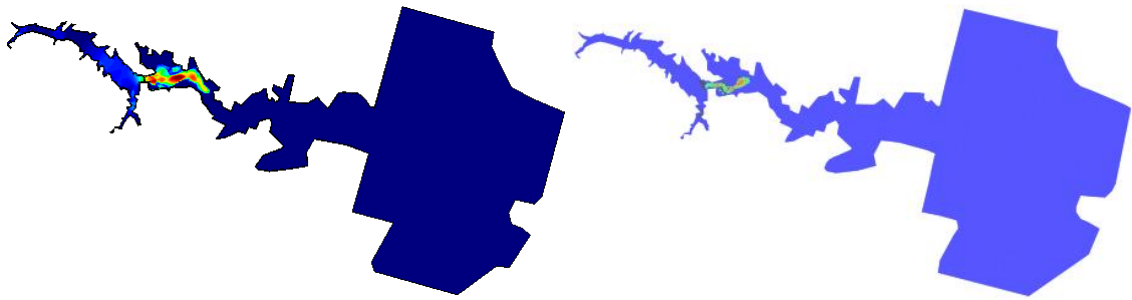
**RIVERFLOW2D**



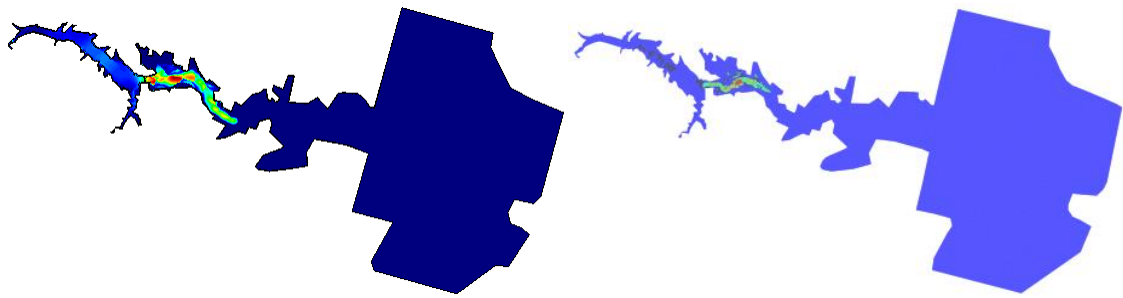
**0 s (0 min)**



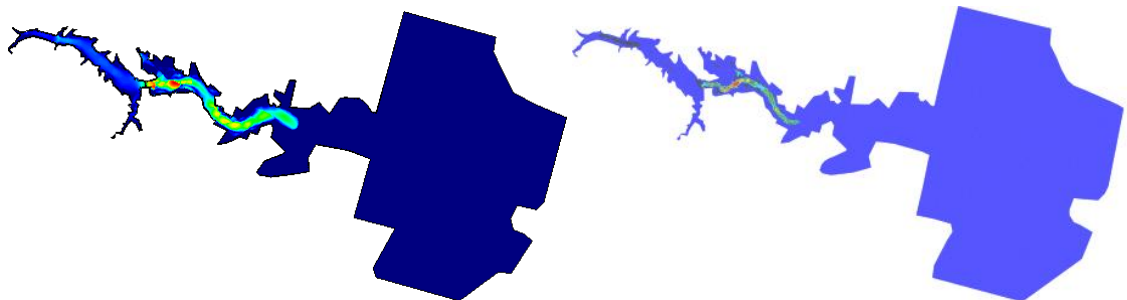
**61 s (1 min 01 s)**



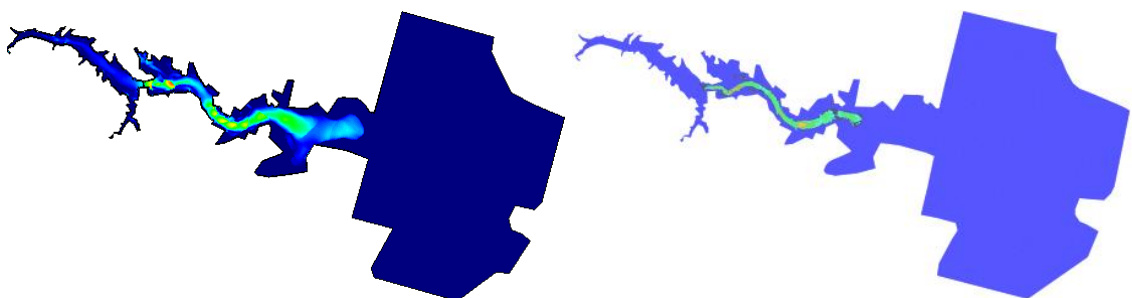
126 s (2 min 06 s)



238 s (3 min 58 s)

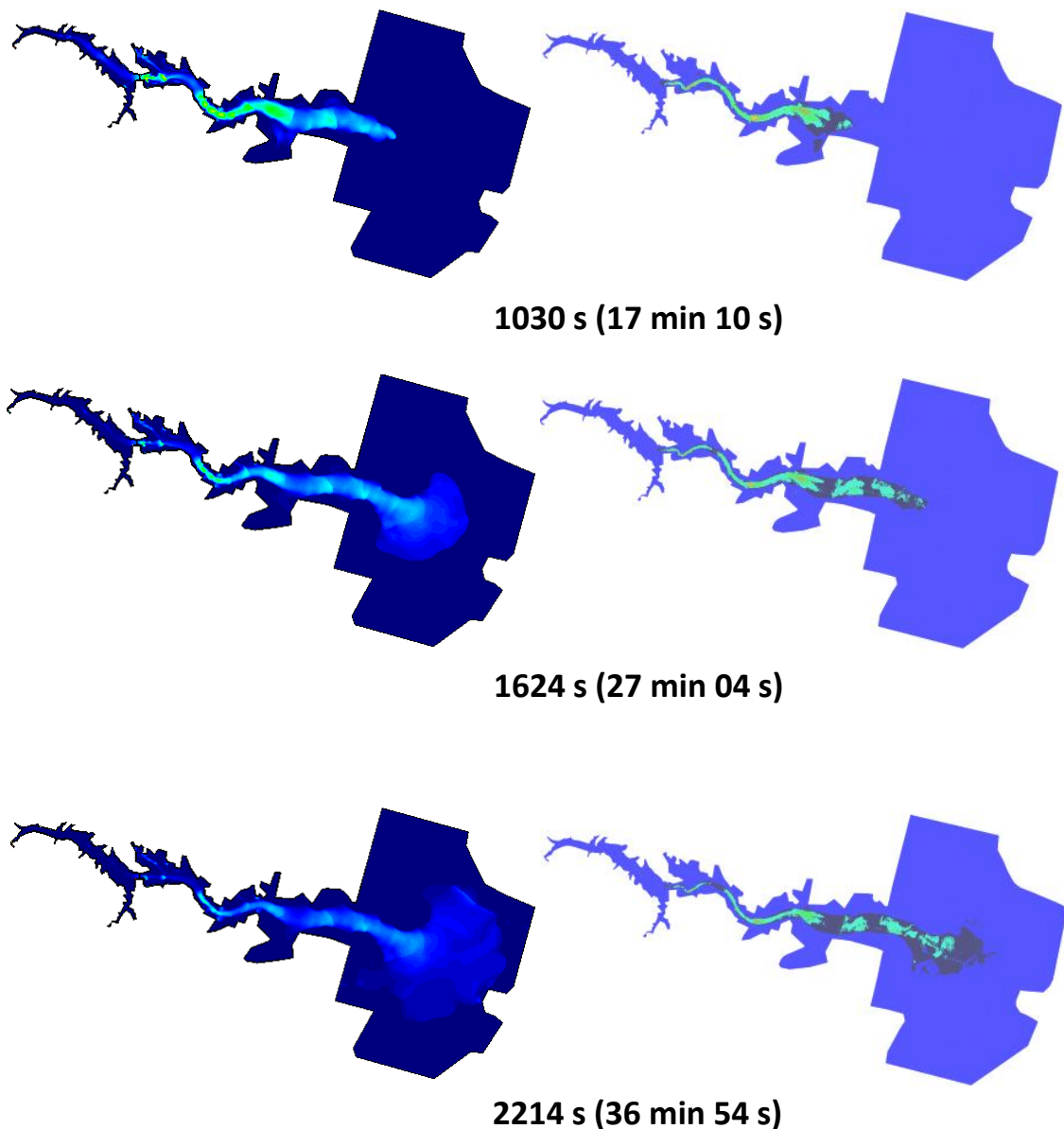


432 s (1 min 12 s)



724 s (12 min 04 s)





**FIGURA 32: RESULTADOS NUMÉRICOS DEL MÓDULO DE LA VELOCIDAD DEL AGUA PARA LOS TIEMPOS (EN SEGUNDOS)  $T=0$ ,  $T=61$ ,  $T=238$ ,  $T=432$ ,  $T=724$ ,  $T=1030$ ,  $T=1624$ ,  $T=2214$ , CALCULADOS CON IBER (IZDA) Y RIVERFLOW2D (DCHA)**

Inicialmente ( $t=0$ ), la velocidad en todo el dominio es nula, ya que al no haberse roto la presa todavía no hay movimiento de agua. Viendo, en la figura 32, la evolución del módulo de la velocidad del flujo con respecto al tiempo es posible asegurar que la velocidad del agua es muy grande en los instantes próximos a la rotura, dado que el alto nivel de agua acumulado es capaz de generar una corriente con mucha energía, lo que conlleva una alta velocidad de desplazamiento. A su vez, esto conduce que, a medida que pasa el tiempo tras el momento de la rotura, la energía de la corriente de agua disminuya, provocando un descenso de la velocidad. Del mismo modo que antes, queda reflejado como el flujo obtenido de la simulación con Iber se mueve con mayor velocidad que el obtenido de la simulación con RiverFlow2D.

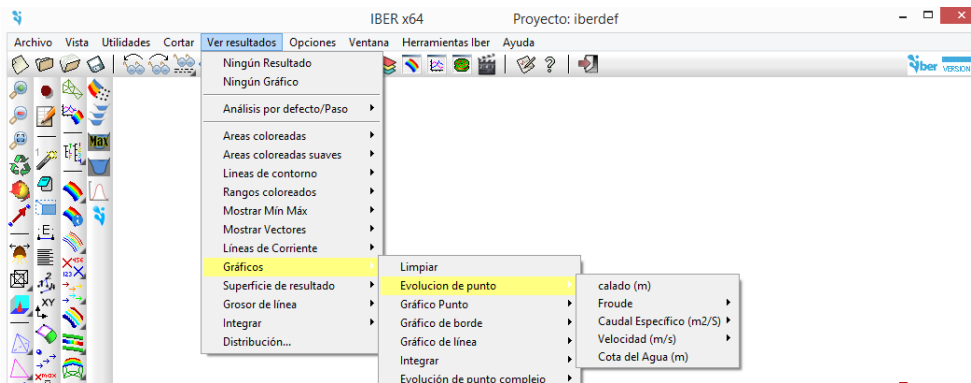
Por otra parte, se puede obtener información de una variable concreta, particularizando en puntos definidos dentro del dominio. En este caso, nos interesa ver la evolución temporal de la cota de la superficie libre en la posición de los transformadores, puntos medidos por la policía y puntos medidos en la maqueta para proceder a calibrar ambos programas de simulación. Esta información la proporcionan ambos softwares en forma de tablas.

Como ya se ha nombrado anteriormente, en el programa RiverFlow2D los puntos que se desean estudiar se crean en el preproceso en el apartado de Puntos de Observación mientras que en Iber se ven directamente en el postproceso.

Cada Punto de Observación de RiverFlow2D genera un archivo de lectura en forma de tabla; sin embargo, en Iber se tiene que seleccionar el punto y la variable que se desea conocer para posteriormente visualizar la información también en forma de tabla.

| SOFTWARE    | OBTENER INFORMACIÓN DE PUNTOS CONCRETOS  |
|-------------|--|
| Iber        | Ver resultados → Gráficos → Evolución de punto →seleccionar variable que se desee estudiar → seleccionar punto del dominio |
| RiverFlow2D | Se seleccionan los puntos en el preproceso y tras el cálculo se genera un archivo por cada punto                           |

### Iber



# Anexo B: COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS OBTENIDOS CON IBER Y RIVERFLOW2D

---

Esta comparación se va a representar en formato de tabla (Apartado 5) y además se va a reflejar en dos columnas de la misma los errores cometidos en cada punto y con cada programa. El error cometido se va a calcular con la siguiente expresión:

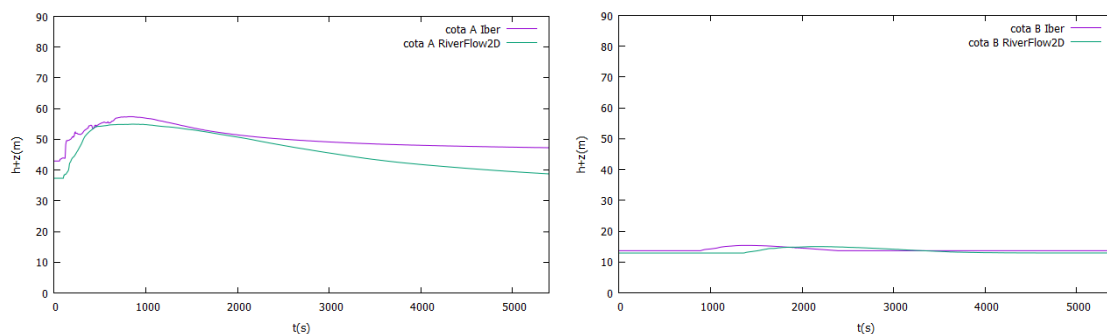
$$\% \text{ Error} = \frac{|Real - Simulado|}{Real} \cdot 100 \quad (8)$$

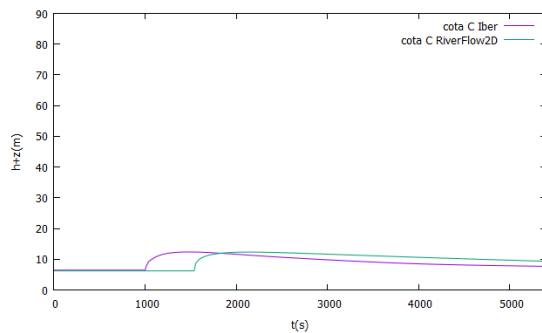
Para realizarlas gráficas comparativas se ha utilizado el programa Gnuplot 5.2.

## **B.1. TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS**

A continuación se representa gráficamente la evolución de la cota de la superficie libre en el eje de ordenadas (en metros) con respecto al tiempo en el eje de abscisas (en segundos) en los puntos en los que se sitúan los transformadores obtenidos con los dos programas (figura 33). El eje horizontal está acotado a 5400 segundos ya que equivale a la hora y media de tiempo simulado.

En la esquina superior derecha de cada gráfico se encuentra la leyenda y la referencia de cada transformador eléctrico.





**FIGURA 33: EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA COTA DE LA SUPERFICIE LIBRE (EN METROS) RESPECTO AL TIEMPO (EN SEGUNDOS) EN LA POSICIÓN DE LOS TRANSFORMADORES A, B Y C**

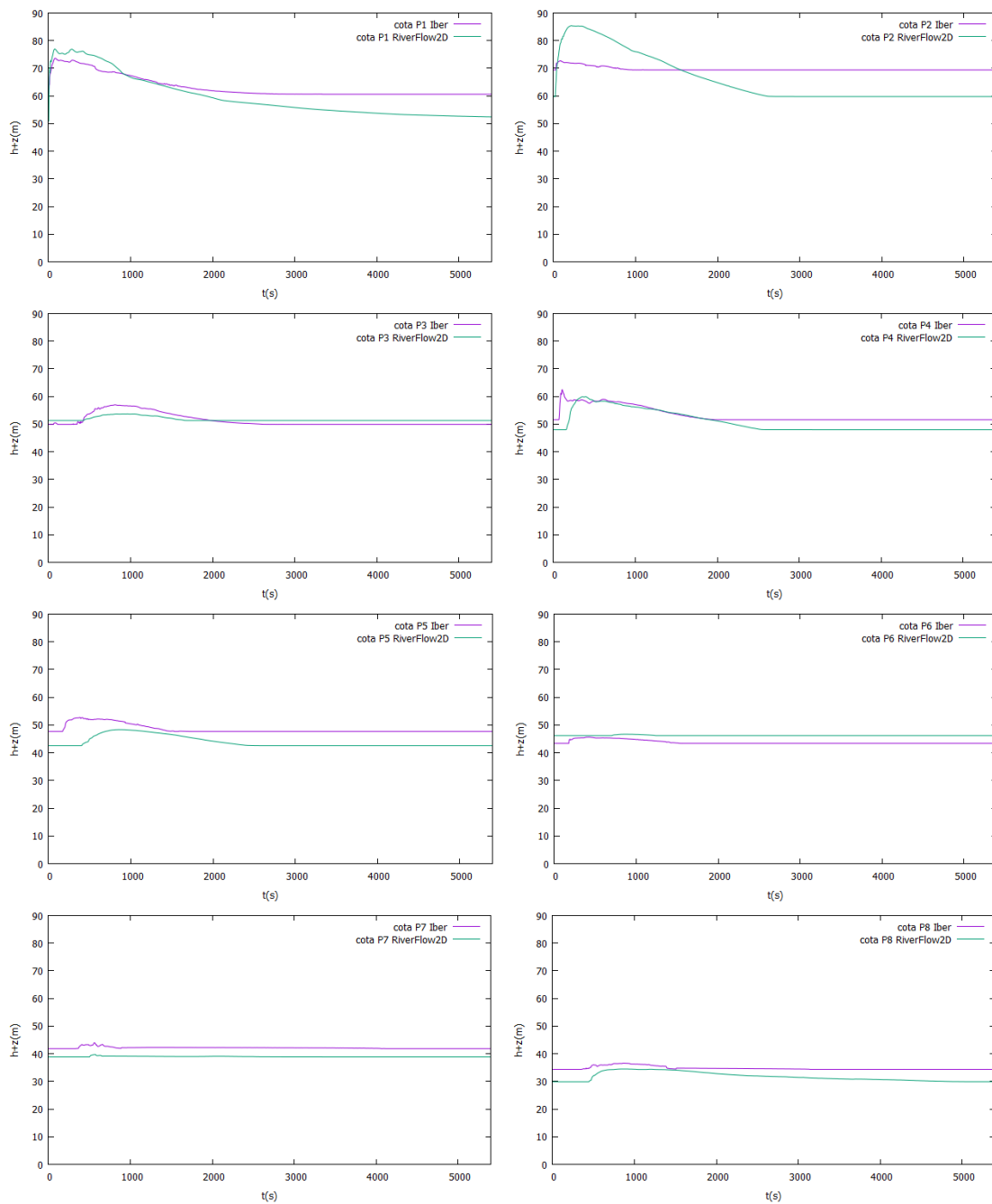
Observando la figura 33, vemos que el transformador A recibe una crecida de agua mucho más brusca que en el caso de los transformadores B y C; esto se debe a que el A estaba cerca de la zona de localización de la presa en donde la onda de agua se acaba de generar, mientras que B y C están muy alejados y la onda llega con menor fuerza.

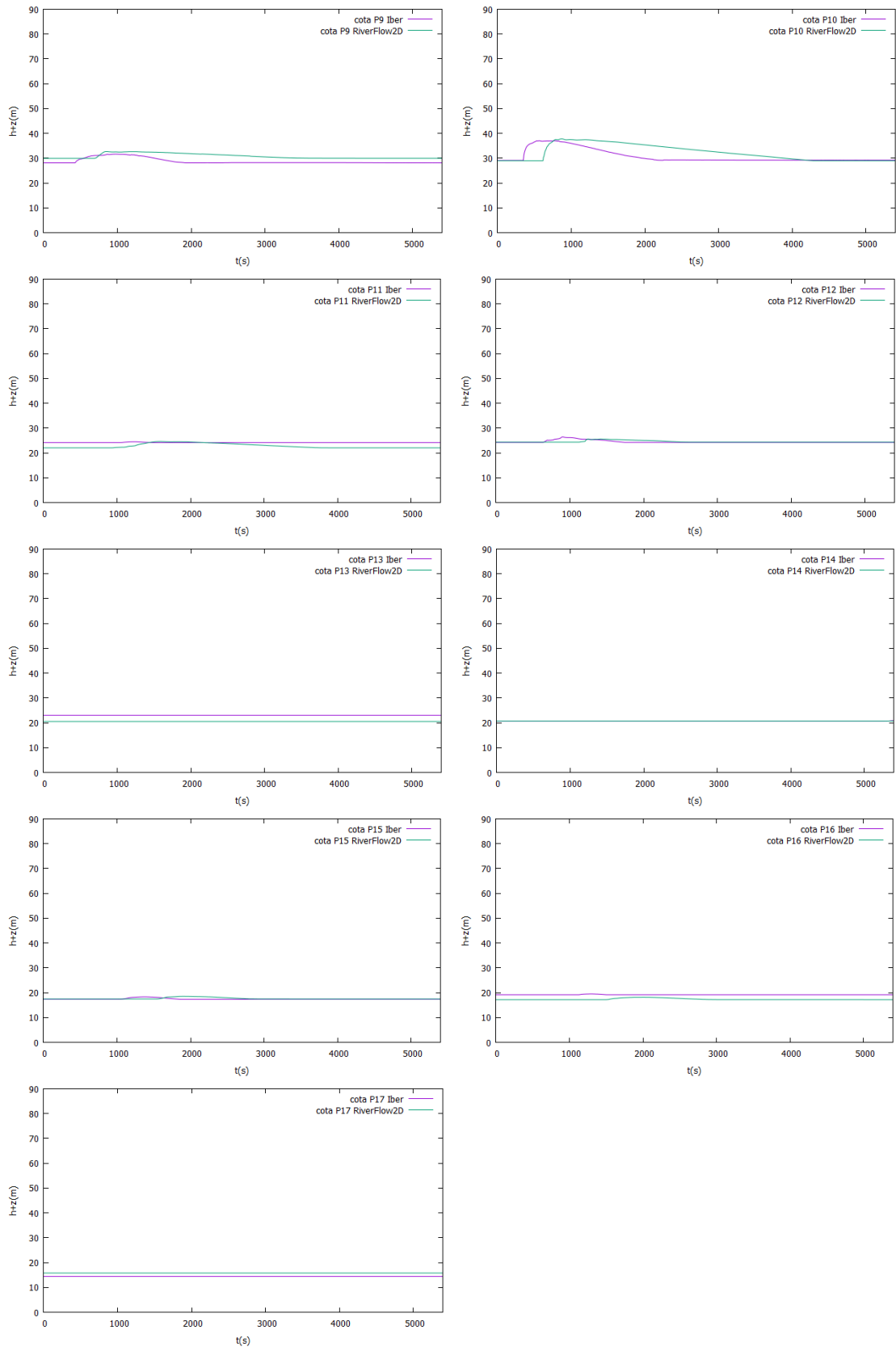
En la figura 33 también podemos ver (en el transformador A sobretodo) como la cartografía del terreno ( $z_b$ ) no es la misma en los dos programas, a pesar de que los datos de entrada son los mismos: en la gráfica del transformador A para el instante inicial ( $t=0$ ) se observa cómo la altura de terreno en Iber es de aproximadamente  $z_b=43$  metros y en el caso de RiverFlow2D es de aproximadamente  $z_b=38$  metros. Esto se debe a que cada uno interpola de manera diferente los puntos ( $x, y, z_b$ ) importados.

## **B.2. DATOS TOMADOS POR LA POLICÍA FRANCESA**

A continuación, en la figura 34, se representa la evolución temporal de la cota de la lámina libre en los puntos P1, P2, ..., P16 y P17 obtenidos con Iber y RiverFlow2D de la misma forma que se hizo para el caso de los transformadores.

En las gráficas vuelve a quedar patente que los puntos alejados de la zona de la rotura sufren variaciones de menos intensidad que los que están cerca de ella.

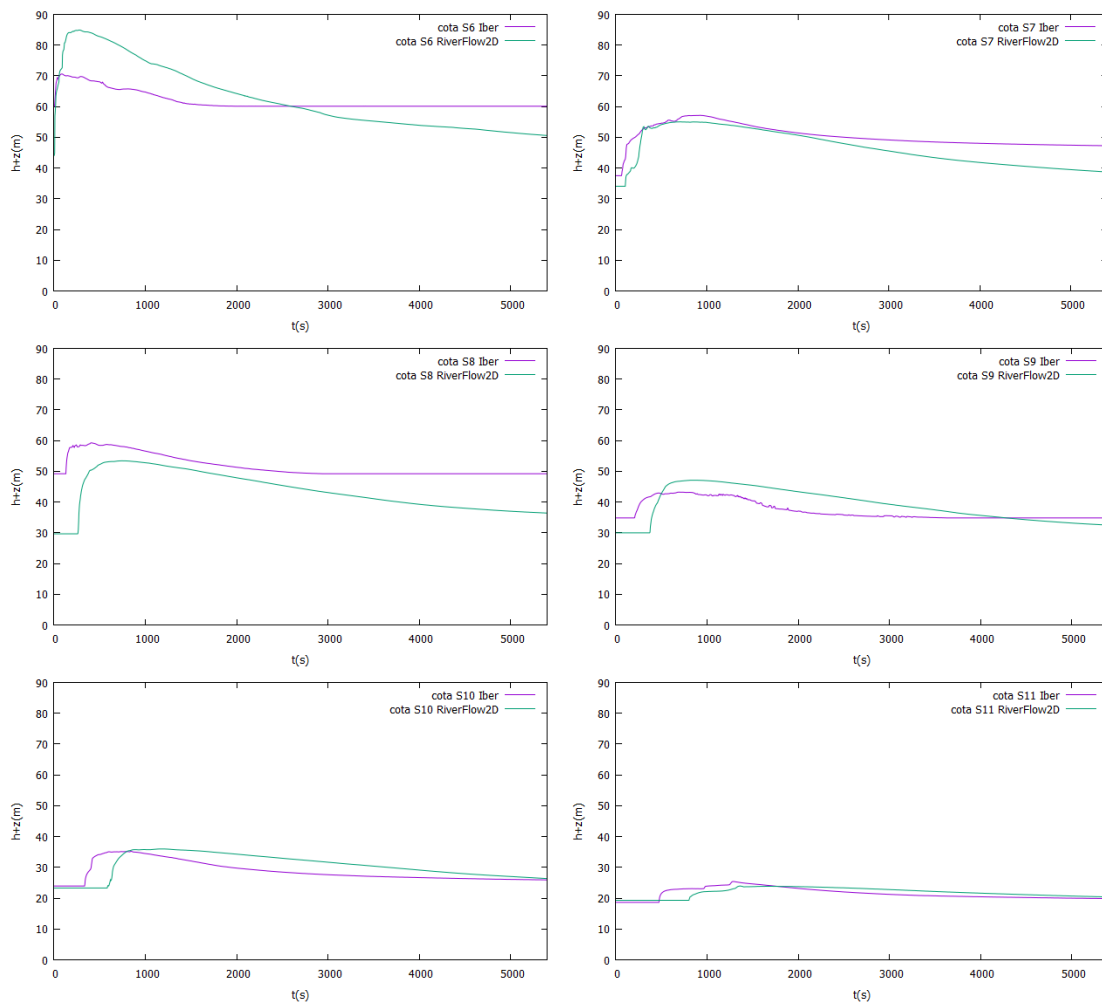


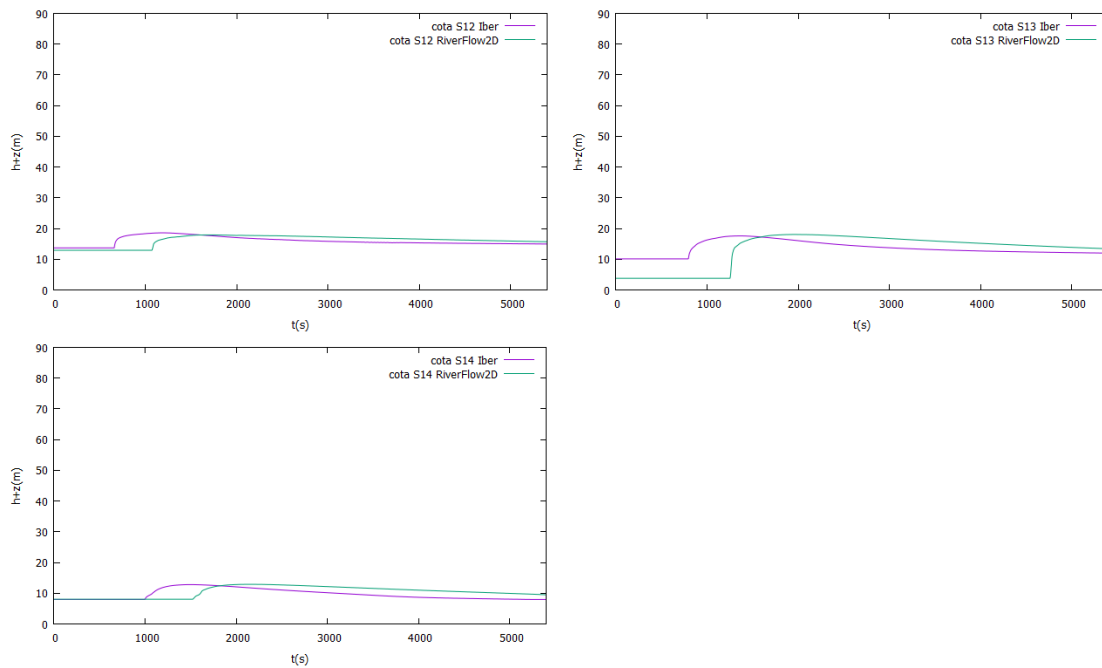


**FIGURA 34:EVOLUCIÓN TEMPORAL (EN SEGUNDOS) DE LA COTA DE LA LÁMINA DE AGUA (EN METROS) EN LOS PUNTOS P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16 Y P17.**

### **B.3. DATOS DE LA MAQUETA**

A continuación se presenta la evolución temporal de la cota de la lámina de agua en los puntos (S6, S7, ...,S14) obtenida con ambos programas (ver figura 35).En estas gráficas podemos analizar de forma visual los datos que hemos recogido en las tablas anteriores: cota máxima de la lámina y tiempo de llegada del frente.





**FIGURA 35: EVOLUCIÓN DE LA COTA DE LA LÁMINA DE AGUA (EN METROS) RESPECTO AL TIEMPO (EN SEGUNDOS) EN LOS PUNTOS S6, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13 Y S14 LOCALIZADOS EN LA MAQUETA.**

En la figura 35 podemos observar que en todos los puntos salvo en el S6, la tendencia de evolución de la cota de la lámina de agua es muy parecida con ambos programas, alcanzando valores prácticamente iguales y en lo que sí encontramos diferencias es en el tiempo de llegada del frente.

El programa Iber da tiempos de llegada mucho más cortos que el programa Riverflow2D en el que la onda parece que tarda más tiempo en llegar. Esta comparación de resultados también podríamos relacionarla con la evolución de la mancha de inundación que nos da manchas más extendidas en el caso de Iber y menos en el caso de Riverflow2D. Al estar la mancha menos extendida, el flujo se propaga de forma más rápida por el cauce. Creemos que este factor puede ser debido a que el tratamiento del frente de seco-mojado en ambos programas es diferente. En el programa Riverflow2D se realiza conservando siempre el volumen de agua mientras que en el caso de Iber los manuales no explicitan cómo se realiza. Esto nos conduce a pensar que sería bueno comparar el error de masa cometido por los métodos numéricos detrás de ambos programas pero es un dato que no se facilita en el programa Iber, aunque sí en el programa Riverflow2D; pero como no se podía comparar, no lo hemos puesto aquí.

El punto S6 es representado por ambos modelos de forma muy distinta. Su localización está cercana al punto de localización de la presa. En este punto la onda de choque provocada por la rotura llega de forma bastante acusada. El programa Riverflow2D la resuelve con bastante similitud a lo que ocurre en la realidad mientras que el programa Iber la ha laminado bastante. Puede ocurrir que el método numérico contenga algún término de difusión numérica como viscosidad turbulenta. En el manual no se especifica este hecho; pero si fuera así no se



consideraría un buen modelo de simulación para roturas de presa, ya que no es capaz de capturar bien la onda de choque y por tanto no resuelve bien la cota máxima de agua alcanzada en puntos cercanos a la rotura.