

# ***Ajuste del transporte de sedimentos de fondo en modelo físico y calibración del modelo numérico Iber***

*Alba González, David López, M<sup>a</sup> Isabel Berga*

*Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)*

[alba.gonzalez@cedex.es](mailto:alba.gonzalez@cedex.es); [david.lopez@cedex.es](mailto:david.lopez@cedex.es); [m.isabel.berga@cedex.es](mailto:m.isabel.berga@cedex.es)

*Georgina Corestein, Ernest Bladé*

*Institut Flumen (UPC)*

[georgina.corestein@upc.edu](mailto:georgina.corestein@upc.edu); [ernest.blade@upc.edu](mailto:ernest.blade@upc.edu)

*Juan Antonio Martín Ventura*

*Confederación Hidrográfica del Cantábrico*

[jamartin@hccantabrico.es](mailto:jamartin@hccantabrico.es)

## **1 Introducción**

La dinámica sedimentológica del río Narcea ha sido fuertemente alterada por las diversas canalizaciones realizadas entre los años ochenta y noventa. Por encargo de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico (CHC), se está realizando en el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos el estudio mediante modelo físico y matemático del meandro de Quinzanas para poder llevar a cabo una futura restauración hidromorfológica.

En esta comunicación se presentan los trabajos que se están realizando para la calibración sedimentológica del tramo seleccionado tanto en modelo físico a escala reducida, como en modelo matemático. Con este fin se han llevado a cabo ensayos para obtener la capacidad de transporte de sedimento del cauce. Determinando los caudales sólidos de alimentación de los modelos asociados a los diferentes caudales líquidos de ensayo que mantienen la pendiente media de equilibrio (2 milésimas).

El modelo numérico se creó empleando el programa Iber ("Iber" 2010) y para ello se empleó la misma información topográfica que para la construcción del modelo físico y se asignaron condiciones de contorno adecuadas para reproducir las condiciones de laboratorio.

## **2 Modelo Físico**

El modelo físico se ha construido a escala 1/85 y cuenta con dos sistemas de alimentación variable, tanto de aporte sólido como líquido, de manera que se pueden representar los hidrogramas correspondientes a cada período de retorno y sus solidogramas asociados.

En la Figura 1 se puede ver el hidrograma completo de avenida para el periodo de retorno de 500 años calculado por la CHC y el hidrograma correspondiente al cauce principal para ese mismo periodo de retorno estimado con la ayuda del programa IBER. Se ha realizado este reparto de caudales para llevar a cabo la calibración sedimentológica porque se considera que el transporte de sedimentos en la llanura de inundación es despreciable en comparación con el producido en el cauce principal, de manera que en los ensayos se ha independizado el dicho cauce del resto de modelo y el caudal líquido aportado en esta zona es el representado en dicha figura.

Como consecuencia de lo anterior, el cauce se ha modelizado con lecho móvil, mientras que en la llanura de inundación se ha optado por lecho fijo, debido a las condiciones de gran estabilidad que presenta. El lecho del río Narcea en el tramo de estudio tiene una granulometría en la que predomina la fracción gruesa, con un  $D_{90}$  de 125 mm. En la Figura 2 se presenta la curva granulométrica de una de las muestras subsuperficiales tomadas por parte del INDUROT.

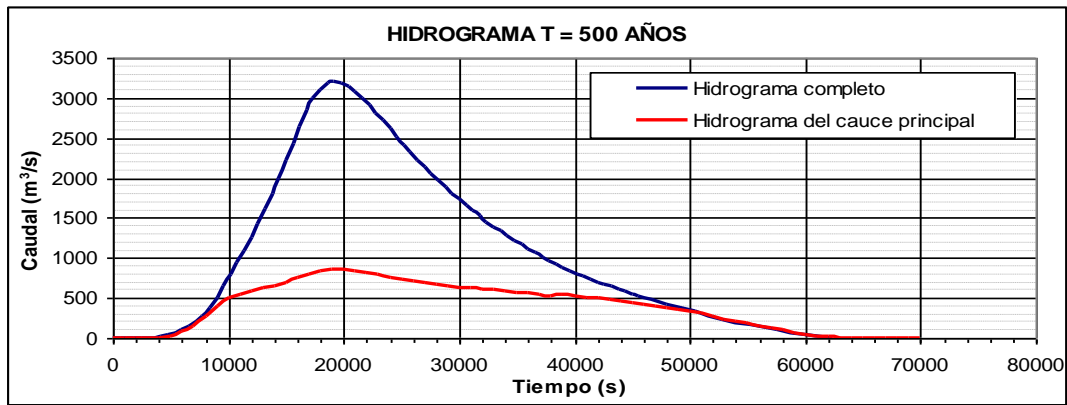


Figura 1 Hidrograma para el periodo de retorno de 500 años.

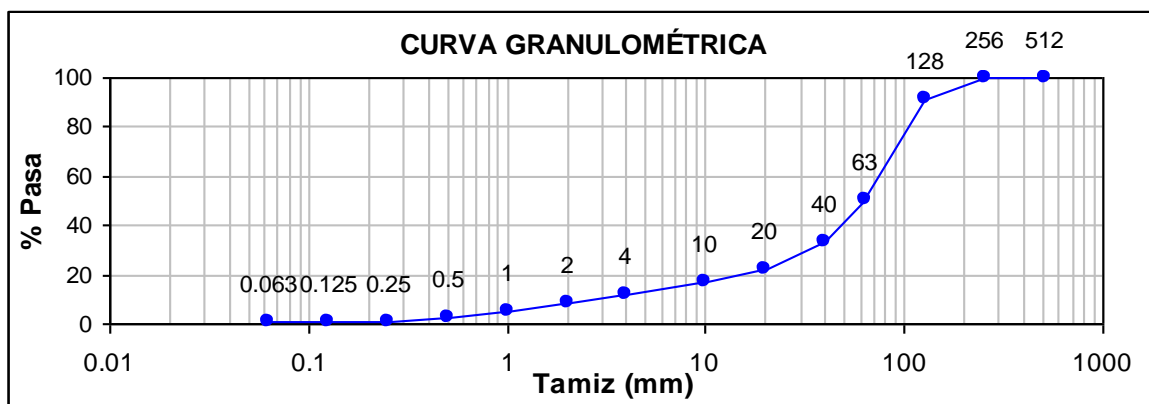


Figura 2 Curva granulométrica del meandro de Quinzanas.

Como trabajos previos, se estudiaron las condiciones de contorno aguas abajo del meandro, mediante modelización matemática realizada por el grupo Flumen (UPC), y además se analizó la sensibilidad de la rugosidad en el tramo de estudio, utilizando en ambos casos un modelo bidimensional basado en el programa CARPA (Flumen 2009).

Conjuntamente, se han llevado a cabo numerosos ensayos para calibrar el coeficiente de rugosidad, modificando las texturas superficiales del modelo físico y comparando los resultados obtenidos en los ensayos con los datos proporcionados por el INDUROT de niveles de inundaciones históricas y también con los datos de la simulación numérica realizada con el modelo IBER (Corestein et al. 2010). Para ello, el modelo cuenta con 48 limnímetros de ultrasonidos distribuidos a lo largo de todo el tramo de estudio en 17 secciones transversales al cauce, mediante los que se obtienen datos de calados con precisiones de décimas de milímetros (tanto en la llanura de inundación, como en el cauce).

En la Figura 3 se puede observar las secciones transversales, así como la posición de los limnímetros. En rojo se ha resaltado el tramo de estudio de transporte de sedimentos y en distintas tonalidades de verde, la clasificación de los coeficientes de rugosidad utilizados en el modelo.

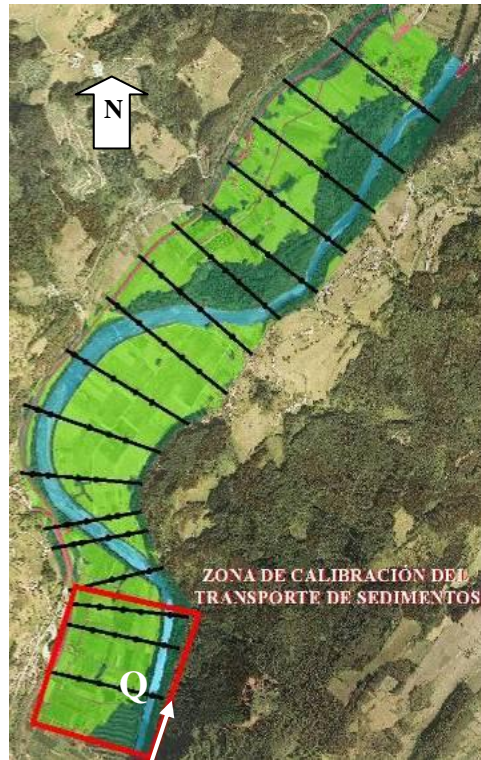


Figura 3 Vista aérea del meandro de Quinzanas. Perfiles transversales y limnómetros.

El ajuste sedimentológico se realiza en la zona inicial del modelo, que reproduce un tramo sensiblemente recto situado aguas arriba del meandro. Para acotar el estudio a la zona del cauce principal se ha independizado del cauce de avenidas mediante una pantalla.

Para los ensayos de calibración de transporte de sedimentos, se ha diseñado un equipo de aporte de sólidos automatizado con un repartidor de áridos y un tornillo sin fin, que permite dosificar caudales muy reducidos con gran precisión (de hasta 15 g/minuto) y de forma homogénea por todo el ancho de cauce principal.

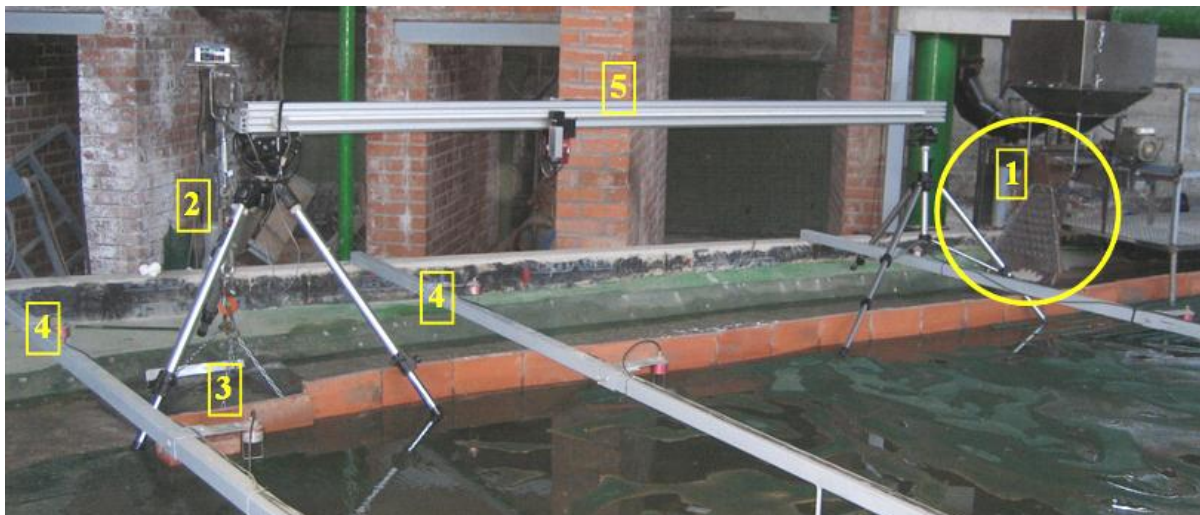


Figura 4 Fotografía de la instrumentación para los ensayos de transporte de sedimentos del tramo de estudio (1. Tornillo sin fin y repartidor de árido, 2. Célula de carga, 3. Trampa de sedimentos, 4. Limnómetros de ultrasonido y 5. Perfilómetro láser)

El modelo también cuenta con un sistema de aforo de sedimento instrumentado con una célula de carga, de precisión de centésimas de Kilogramo, que permite registrar el peso del sedimento retenido en una caja alojada en el cauce, a la salida del tramo de estudio. Cabe mencionar, que además, se está empleando un perfilómetro láser que posee una precisión de décimas de milímetros para tomar perfiles longitudinales de la cota de superficie del lecho móvil en el tramo aguas arriba de la trampa. En la siguiente fase del estudio se utilizará este perfilómetro para registrar la evolución de las secciones transversales y estimar los procesos de erosión y sedimentación producidos en el meandro.

La instrumentación utilizada en cada uno de los ensayos de capacidad de transporte de la zona de estudio puede verse en la Figura 4 .

El objetivo de estos ensayos es obtener la curva de capacidad de transporte del modelo físico, para ello se realiza un aporte de caudal líquido constante y su caudal sólido asociado y se comprueba que la pendiente media de equilibrio no se vea sensiblemente alterada. Estos ensayos se prolongan en el tiempo hasta que el caudal sólido registrado en el sistema de aforo de sedimentos coincide con el aportado al modelo físico, momento en el cual se alcanza el equilibrio. A continuación, en la Figura 5 , se puede observar el peso registrado en uno de los ensayos a modo de ejemplo.

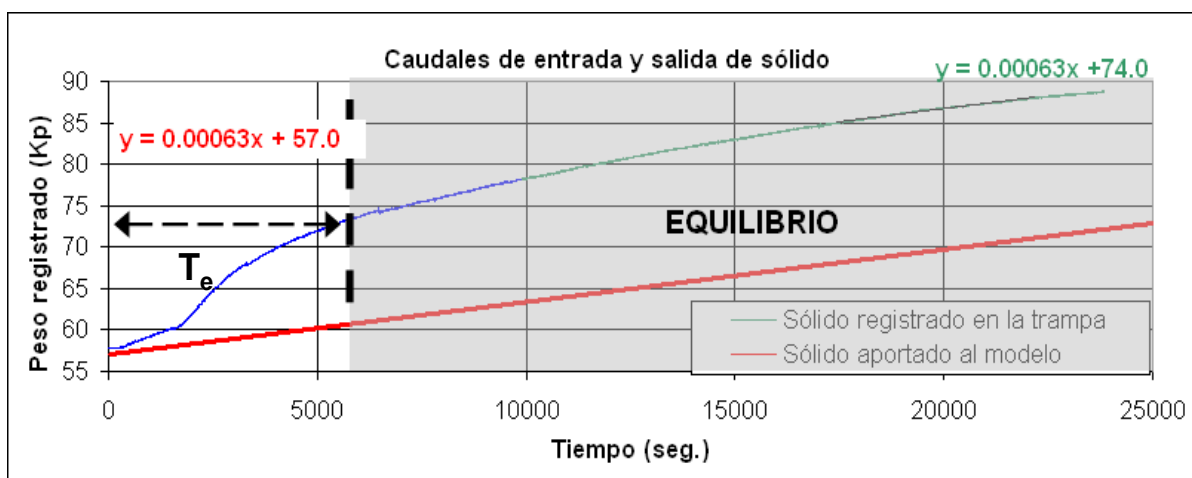


Figura 5 Comparación entre el caudal sólido aportado y el registrado en la célula de carga a lo largo del tiempo

En la figura se puede determinar, el tiempo de equilibrio,  $T_e$ , que se ha necesitado para que los caudales sólidos de entrada y de salida del modelo (el registrado en la trampa de sedimentos) coincidiesen. Al inicio de este ensayo, el peso recogido en la caja era mayor que el aportado, debido a que el cauce se encontraba en un proceso de erosión, pero transcurridos unos 6000 segundos ( $T_e$ ) se puede observar que las pendientes se igualan. De manera que se puede concluir que el ensayo alcanzó el equilibrio en un tiempo relativamente corto, así las condiciones del ensayo se pueden estimar como cercanas al equilibrio.

Se ha obtenido, en varios estadios intermedios, el perfil longitudinal del tramo de cauce estudiado para analizar la evolución temporal de la pendiente del lecho. Con este procedimiento se pretende ajustar la curva de capacidad de transporte de fondo para las condiciones hidrodinámicas y sedimentológicas de este tramo de río, lo que permitirá reproducir correctamente la condición de contorno de transporte sólido en el modelo físico.

La Figura 6 muestra un perfil longitudinal de la superficie del lecho antes y después del ensayo medido con el perfilómetro láser desde la trampa de sedimentos hacia aguas arriba. Se puede estimar que se han producido sedimentaciones poco importantes, y el valor de la pendiente ha aumentado ligeramente, en torno a 2 milésimas con respecto a la inicial.

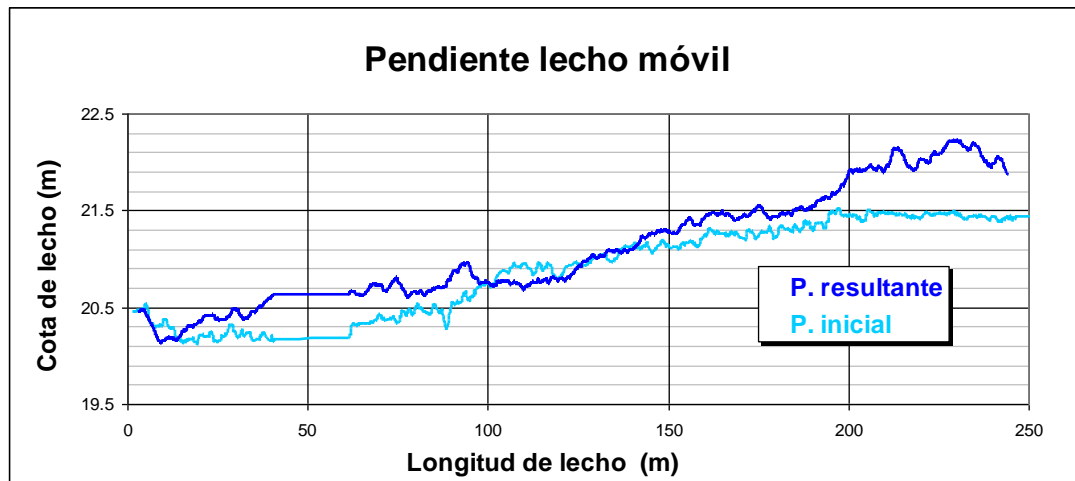


Figura 6 Pendiente resultante durante al inicio y final de un ensayo

### 3 Modelo Numérico

Otro trabajo que se está realizando en el marco de este estudio es la calibración del módulo del transporte de sedimentos del modelo Iber (“Iber” 2010). Los ensayos que se realizan en el laboratorio de Centro de Estudios Hidrográficos suponen un buen banco de pruebas para calibrar el módulo de transporte de sedimentos de dicho modelo. Por este motivo se están realizando simulaciones numéricas en las que se busca reproducir los ensayos de laboratorio. Una vez alcanzado el régimen permanente de transporte de sedimento en el tramo de prueba, estudiar la evolución de la pendiente del fondo, que debe ser nula en situación de equilibrio sedimentario. Estas simulaciones permitirán mediante el análisis comparativo de resultados ajustar el comportamiento del modelo numérico.

Finalizados estos ensayos se estudiará la respuesta del cauce ante diferentes episodios de avenida, lo que será de gran utilidad para diseñar las propuestas de restauración que se diseñarán conjuntamente con los técnicos de la Confederación.

#### 3.1 Simulaciones

La estrategia aplicada consiste en realizar diferentes simulaciones que permitan aproximar cada vez más a los resultados de laboratorio considerados éstos como referencia. Hasta el momento se está trabajando, desde el punto de vista geométrico, en dos grupos de simulaciones. El primer grupo empleando un canal rectangular idealizado de 55 m de ancho, 400 m de largo y fondo plano con una pendiente de 0.2%. Discretizado mediante 5000 elementos cuadriláteros que se muestra en la Figura 7



Figura 7 Malla empleada para las simulaciones en canal rectangular

El segundo grupo de simulaciones se realiza con una geometría que representa la topografía del cauce. En este caso se discretizó empleando tanto elementos triangulares como cuadriláteros (Figura 8 ) con un número aproximado de 1000 elementos. Esta geometría tiene una longitud aproximada de 400 m, ancho de 53 m y pendiente media de 0.2%.

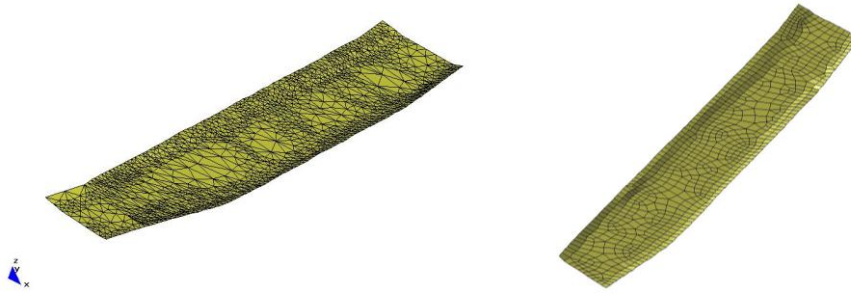


Figura 8 Mallas empleadas para las simulaciones del modelo de la zona empleada en los ensayos.

Como se observa en ambos casos las dimensiones adoptadas corresponden a la escala de prototipo, es decir a las dimensiones reales de la zona de estudio. Por este motivo las comparaciones se realizarán con los valores obtenidos en los ensayos a escala.

El siguiente criterio para agrupar las simulaciones corresponde a las formulaciones de transporte empleadas y al tipo de aportación de sólidos. En primera instancia se aplica la formulación de Meyer-Peter & Müller (Wong and Parker 2006) y el propósito final es emplear la expresión de ajuste que surja de los ensayos de laboratorio.

## 3.2 Resultados

### Canal rectangular

De las simulaciones realizadas se han obtenido resultados de interés. La Figura 9 corresponde a una simulación en la geometría simplificada, empleando un caudal líquido de  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ , un caudal sólido de  $0.086 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{50}$  62.3 mm y como ecuación de transporte la expresión de Meyer-Peter & Müller (Wong and Parker 2006). En esta figura se muestra la evolución temporal del caudal sólido acumulado en tres puntos: el inicio de la geometría en azul, el inicio de la zona de fondo móvil en lila, celeste y rojo, y la salida del modelo en verde. Como se observa no se consigue el equilibrio entre la entrada y la salida pero si se observa una tendencia en las pendientes de las curvas de entrada y salida que invita al optimismo puesto que estas son similares.

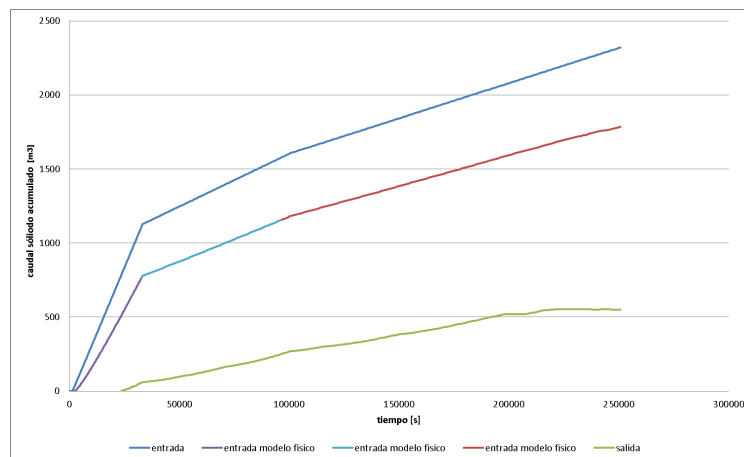


Figura 9 Caudal sólido acumulado. Canal rectangular usando MP&M y aporte de sedimentos por solidograma.



## Cauce

Como ya se mencionó se están realizando también simulaciones empleando la geometría del modelo físico y en este caso las condiciones hidráulicas son de  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  de caudal de entrada y salida en vertedero con un coeficiente de desagüe  $C_d$  que permita reproducir las condiciones de calado observadas en el modelo físico. Desde el punto de vista del transporte de sólidos, se estudian dos situaciones: la primera considerando que el sólido aportado en la condición de contorno de entrada es el equivalente a la capacidad de arrastre de flujo, calculada empleando la expresión de transporte de M-P&M. El sólido se caracteriza mediante el  $D_{50} 62.3 \text{ mm}$

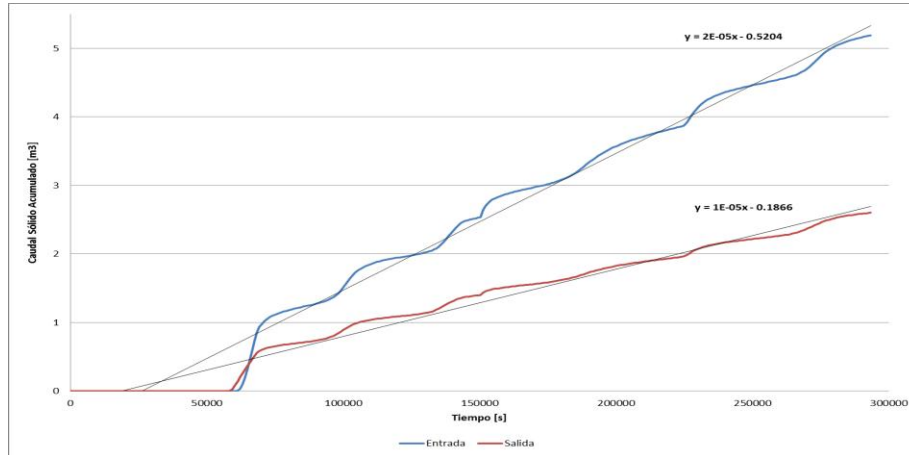


Figura 10 Caudal sólido acumulado: Modelo físico usando MP&M y aporte de sedimentos por capacidad de arrastre.

En la Figura 10 se muestran los resultados de caudal sólido acumulado en una sección justo al inicio y al final del fondo móvil en una simulación de 300000 segundos de duración, que corresponde al tiempo empleado en los ensayos de laboratorio. En la figura se incluyen líneas de tendencia (grado 1) con las que se puede ver con mayor claridad que las pendientes no coinciden lo cual indica que no se ha alcanzado el equilibrio. Además, que la pendiente de entrada (azul) sea mayor que la de salida (rojo) indica que en el interior de la geometría se están produciendo sedimentaciones de importancia.

La segunda situación de transporte estudiada es en la que el aporte es mediante solidograma constante de  $0.00806 \text{ m}^2/\text{s}$ . El sólido se caracteriza también mediante el  $D_{50} 62.3 \text{ mm}$ . Los resultados obtenidos en relación al caudal sólido (Figura 11) presentan un comportamiento similar al observado en el caso anterior pero la diferencia entre pendiente es aún más evidente lo que nos indica sedimentaciones todavía mayores.

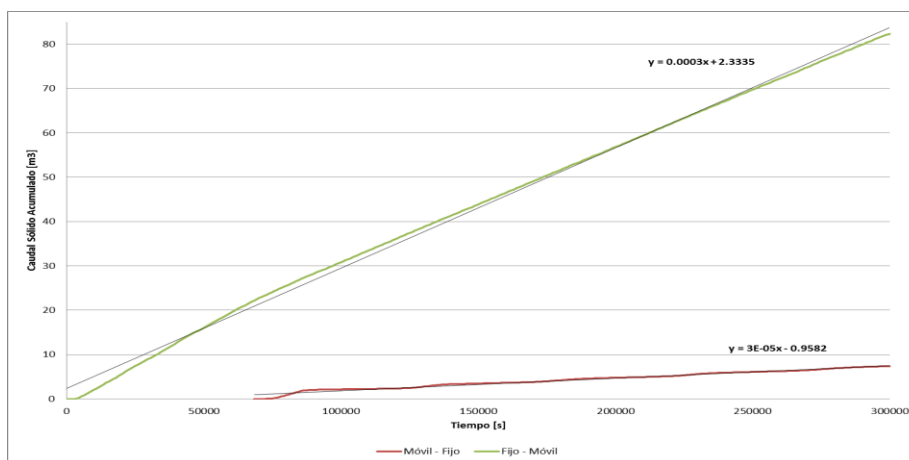


Figura 11 Caudal sólido acumulado: Modelo físico usando MP&M y aporte de sedimentos por solidograma.

Aunque los resultados anteriores no son satisfactorios, considerando que el escenario de aporte de sólidos mediante solidograma corresponde exactamente la situación de laboratorio y que se disponen de datos de evolución temporal de la pendiente longitudinal de gran precisión se estudia también este resultado para tener una visión global de las diferencias entre el comportamiento observado en laboratorio y el simulado por el modelo numérico. La Figura 12 muestra la evolución de la pendiente del fondo en doce instantes a lo largo de la simulación, esta figura incluye también tres líneas de tendencia (grado 1) que ponen de manifiesto la pendiente media del tramo. La línea azul corresponde al instante 0 s donde la pendiente es de 0.2%, las líneas siguientes ponen de manifiesto una tendencia a la estabilidad en un nuevo valor de pendiente algo mayor de 0.3%.

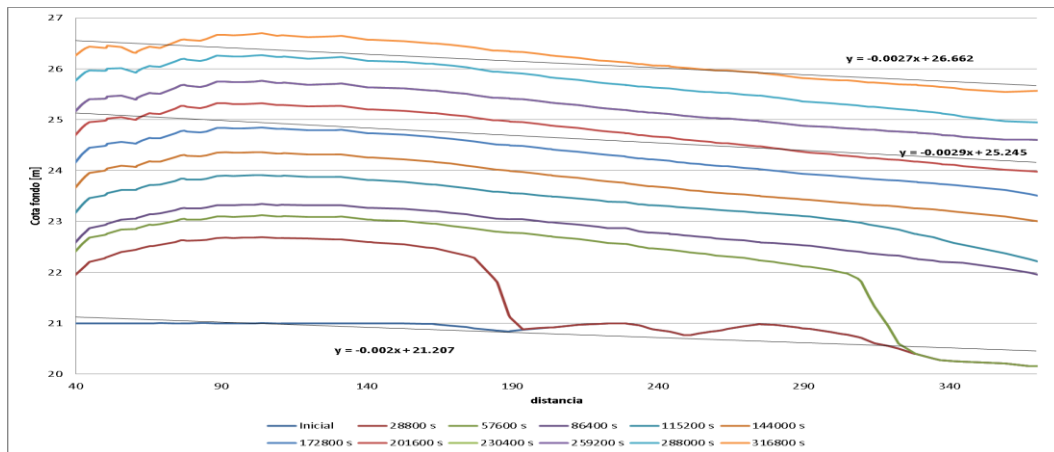


Figura 12 Evolución temporal del perfil longitudinal.

Del análisis de los resultados anteriores se dedujo que la aplicación de la expresión de M-P & M no es apropiada para representar el comportamiento del tramo de estudio y por este motivo se inicia un nuevo grupo de simulaciones en las que la formulación de transporte empleada será personalizada.

En la actualidad, siguiendo el ritmo de los ensayos que se realizan en el modelo físico, se está iniciando la fase de simulaciones en las que se emplean como formulación de transporte las primeras expresiones de ajuste que se han conseguido en el laboratorio. Este trabajo se realiza con la expectativa de preparar el modelo numérico realizando las adaptaciones necesarias para implementar la expresión definitiva.

En la Figura 13 se muestran los resultados correspondientes a la simulación en la que la expresión de transporte empleada es un polinomio de orden 1.

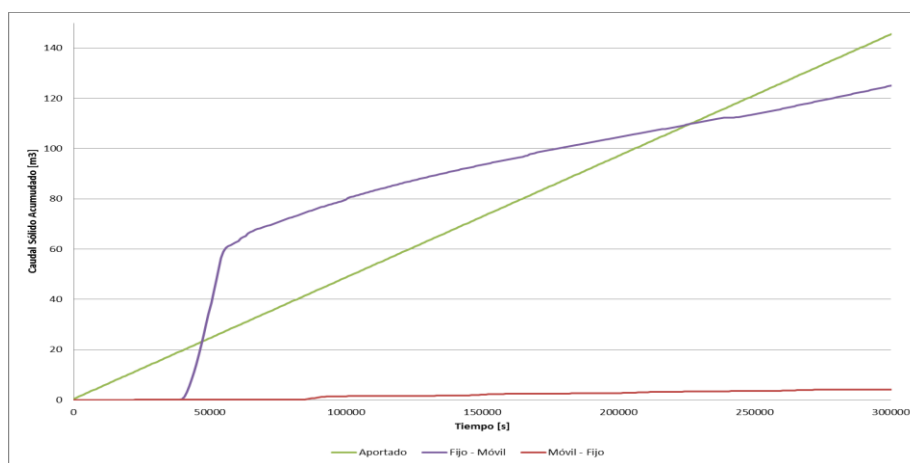


Figura 13 Modelo físico usando polinomio de ajuste y aporte de sedimentos por solidograma.



## 4 Conclusiones

Se ha modelado satisfactoriamente el tramo del río Narcea coincidente con el meandro de Quinzanas, representando su complejidad geométrica y usos del suelo. Ha sido también posible estudiar la hidrodinámica del tramo para un rango de caudales amplio que abarca desde las crecidas muy frecuentes hasta las excepcionales.

Los trabajos de calibración del transporte de sedimentos realizados en el modelo físico del río Narcea muestran que, a partir de caudales superiores a la punta del hidrograma de 500 años de período de retorno, el cauce no tiene un comportamiento sedimentológico que pueda ajustarse por una ley de transporte caudal líquido-caudal sólido, pues se encuentra en condiciones próximas al inicio de arrastre.

Las formulaciones clásicas de capacidad de transporte han sido obtenidas lejos de la zona de inicio de arrastre por lo que no son de aplicabilidad para la gama de caudales ensayada. Por esta razón no ha sido posible encontrar un comportamiento representativo con el modelo numérico. Con la intención de profundizar en los trabajos de calibración del modelo Iber, se ha obtenido la curva de capacidad de transporte de sedimentos para una gama de caudales mayores para los que sí ha sido posible encontrar un comportamiento sedimentológico definido.

La información obtenida de los ensayos de laboratorio realizados en el modelo físico ha sido empleada en los estudios de calibración del modelo numérico del meandro de Quinzanas permitiendo la evolución y validación de dicho modelo.

El uso de la información que proporcionan los ensayos de laboratorio realizados en el modelo físico permitirá validar IBER, calibrándolo para reproducir los ensayos y obtener así una herramienta eficaz para la predicción de los efectos de diversas avenidas.

## 5 Bibliografía

- Bladé, E., Gómez-Valentín, M. (2006) “Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones.” Monograph CIMNE N°97
- Corestein, G., Bladé, E., Lechuga, C., Berga, M. I., and González, A. (2010). “Estudio experimental y numérico del meandro de Quinzanas (Asturias).” *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Montevideo.
- Flumen. (2009). *Estudio mediante un modelomatemático del meandro de Quinzanas en el río Narcea (Asturias). Convenio de colaboración entre el CEDEX y la UPC.*
- “Iber.” (2010). <[www.iberaula.es](http://www.iberaula.es)>.
- Wong, M., and Parker, G. (2006). “Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database.” *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1159.