



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES
Y MOVILIDAD SOSTENIBLE

VICEPRESIDENCIA
TERCERA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS
Y EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

CAMPAÑA DE MUESTREO DE SEDIMENTOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN EL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO DURANTE LA AVENIDA CONTROLADA DEL 30 DE ENERO DE 2024

NOTA TÉCNICA

Borrador

Madrid, febrero de 2024



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	4
2. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA DE ENERO DE 2024.....	5
2.1. Equipos de muestreo	5
2.2. Metodología de muestreo de los equipos de aforo de SS	6
2.3. Hidrograma y niveles de embalse.....	6
3. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS	10
3.1. Aforos de caudal	10
3.2. Registros de turbidez y sedimentos en suspensión	11
3.3. Registros de transporte de fondo.....	17
3.4. Imágenes de satélite.....	19
4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA AVENIDA CON EL MODELO IBER	21
4.1. El modelo Iber.....	21
4.2. Módulo de transporte de sedimentos en suspensión.....	23
4.3. El modelo del curso bajo del río Ebro	26
4.4. Comparativa de los resultados hidrodinámicos.....	26
4.5. Comparativa de los registros de sedimentos en suspensión	29
5. INTEGRACIÓN DEL TRANSPORTE DURANTE LA AVENIDA	33
6. CONCLUSIONES	35



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hidrograma a la salida de la presa de Flix y en los SAIH de Ascó y Tortosa.	7
Figura 2. Reparto de caudales entre los órganos de desagüe de Mequinenza, Ribarroja y Flix.	7
Figura 3. Evolución del nivel del embalse de Mequinenza.	8
Figura 4. Evolución del nivel del embalse de Ribarroja.	8
Figura 5. Evolución del nivel del embalse de Mequinenza.	9
Figura 6. Evolución Vista del río Ebro desde el embarcadero de Flix el día 30 de enero de 2024 a las 10:40 horas.	14
Figura 7. Fotografía del canal de la margen derecha el día 31 de enero de 2024 a las 09:40 horas.	15
Figura 8. Registros de turbidez y concentración de sedimentos en suspensión.	16
Figura 9. Correlación de los registros de turbidez y concentración de SS de los turbidímetros Hach.	16
Figura 10. Correlación de los registros de turbidez y concentración de SS del turbidímetro de la UPC.	17
Figura 11. Correlación de los registros de turbidez y concentración de SS del turbidímetro Hanna.	17
Figura 12. Sonda Helley Smith de 156 mm.	18
Figura 13. Camión con pluma de 25 m situando la sonda Helley Smith.	18
Figura 14. Sonda Helley Smith tras su extracción.	19
Figura 15. Imagen del Sentinel-2 del 30 de enero de 2024 a las 12:30.	20
Figura 16. Comparativa de imágenes de satélite del 27 de enero y 1 de febrero de 2024. ...	20
Figura 17. Esquema de la ecuación de Exner para determinar la evolución del lecho.	23
Figura 18. Vista global del modelo Iber del curso bajo del río Ebro.	26
Figura 19. Hidrogramas obtenidos de la simulación en Iber en las secciones de control.	27
Figura 20. Comparativa de los hidrogramas del SAIH y el calculado con Iber en el puente de Ascó y los aforos realizados con ADCP.	27
Figura 21. Comparativa del hidrograma calculado con Iber en el puente de Mora de Ebro y los aforos realizados con ADCP.	28
Figura 22. Comparativa del hidrograma calculado con Iber en el puente de la C-12 en Benifallet y los aforos realizados con ADCP.	28
Figura 23. Comparativa del hidrograma del SAIH y el calculado con Iber en el puente de Tortosa y los aforos realizados con ADCP.	29
Figura 24. Condiciones de contorno de entrada de sedimento en suspensión analizadas.	30
Figura 25. Campo de concentraciones en el curso bajo a las 13:00 horas del 30 de enero de 2024.	30
Figura 26. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el embarcadero de Flix.	31
Figura 27. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el puente de Ascó.	31
Figura 28. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el puente de Mora de Ebro.	32
Figura 29. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el puente de la C-12 en Benifallet.	32
Figura 30. Solidogramas en las diferentes secciones de control.	33



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Registros de caudal en el puente de Ascó.	10
Tabla 2. Registros de caudal en el puente de Mora de Ebro.	10
Tabla 3. Registros de caudal en el puente de Benifallet.	11
Tabla 4. Registros de caudal en el puente de Tortosa.	11
Tabla 5. Registros de turbidez.	12
Tabla 6. Registros de turbidez y concentración de SS.	13
Tabla 7. Volumen y masa de los solidogramas.	34



1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

CEDEX está colaborando con la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en el estudio del tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro. Esta colaboración se realiza como apoyo a la Dirección General del Agua en el marco de las funciones estatutarias de este organismo.

La Confederación Hidrográfica del Ebro, en coordinación con Endesa Generación SA, titular de las presas de Mequinenza, Ribarroja y Flix, realizan habitualmente dos avenidas controladas, una en primavera y otra en otoño, en cumplimiento del régimen de caudales ecológicos establecido en el Plan Hidrológico y con la intención de controlar el crecimiento de macrófitos en el curso bajo del río Ebro. Estas algas se están desarrollando de forma intensiva en este tramo por la claridad del agua debido a la baja tasa de transporte de sedimento en suspensión.

Se ha decidido emplear esas avenidas como pruebas piloto para la mejora de la gestión del sedimento en las presas, y aumentar el tránsito sedimentario en el curso bajo del río Ebro, incrementando las aportaciones al Delta del Ebro, como medida complementaria para la adaptación al cambio climático, entre las que destaca el fortalecimiento del cordón dunar en la costa deltaica.

El 5 mayo de 2022 se realizó la primera prueba piloto, en la que se realizó una primera campaña de muestreo, haciendo coincidir la avenida controlada con el paso del satélite Sentinel-2 por la zona de estudio. Además de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y del CEDEX, en esta campaña colaboró la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en el marco del proyecto europeo REST-COAST, con cuyos fondos se han financiado los análisis de laboratorio de las muestras de sedimento en suspensión. Así mismo, han participado la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la Universidad de Valencia (UV).

En agosto de 2022, CEDEX emitió una nota técnica en la que se reportaron los trabajos realizados y los registros obtenidos.

Posteriormente, CEDEX ha realizado una simulación numérica del curso bajo, a fin de contrastar con los datos de la campaña, la representatividad del modelo numérico. Como resultado de esta simulación se ha podido comprobar la bondad del modelo Iber para simular el transporte de sedimentos en el curso bajo del río Ebro. En el Anexo I se incluye la comparativa realizada entre la simulación numérica y los resultados experimentales.

Como resultado de la campaña de mayo de 2022 se alcanzaron algunas conclusiones. Se pudo comprobar que la concentración del sedimento en suspensión es bastante homogénea



en la sección transversal por lo que no merece la pena mantener tantos puntos de muestreo. Es preferible medir en un punto con mayor frecuencia. Por otro lado, se comprobó que sin un descenso en los niveles de los embalses de Ribarroja y Flix, el transporte de sedimentos es muy reducido. Durante esa campaña por la sección del embarcadero de Flix transitaron unas 2.000 toneladas, de las cuales unas 650 t llegaron al azud de Xerta.

De acuerdo con la experiencia previa se ha programado una nueva prueba piloto que se realizó el 30 de enero de 2024, retrasada a estas fechas por las condiciones de sequía precedentes, coincidiendo de nuevo con el paso del satélite Sentinel-2.

2. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA DE ENERO DE 2024

En esta campaña se han aforado en las siguientes secciones de control:

1. Puente de Mequinenza sobre el Ebro.
2. Puente de Mequinenza sobre el Segre.
3. Embarcación en el embalse de Ribarroja.
4. Puente Ribarroja sobre el embalse de Flix.
5. Embarcadero de Flix.
6. Puente de Ascó.
7. Puente de Mora de Ebro.
8. Puente de Benifallet (C-12).
9. Puente de Tortosa.

El día siguiente, 31 de enero de 2024, se obtuvieron muestras en Amposta, Deltebre y en el canal de la margen izquierda.

2.1. Equipos de muestreo

El número de equipos de muestreo en esta campaña ha sido mayor. La CHE dispuso de dos equipos de aforo de caudal líquido con sondas ADCP, que estuvieron aforando en los puentes de Ascó, Mora de Ebro, Benifallet y Tortosa. La CHE además dispuso un equipo que muestreó sedimentos en suspensión en barca en el embalse de Ribarroja, y otro que lo hizo desde los puentes de Mequinenza sobre el Segre, y posteriormente en el puente de Benifallet. Finalmente, otro equipo de la CHE sobrevoló con dron la zona de estudio grabando el evento. La compañía TRAGSA, en el marco de un encargo con la DGA, aportó un equipo de muestreo de sedimento en suspensión que aforó en el puente de Mequinenza sobre el Ebro, en el que



se incorporaron también técnicos de la DGA. TRAGSA también aportó un equipo para aforo de transporte de fondo, equipado con un camión con grúa con una pluma de 25, que permitió colocar en el cauce una sonda Helley Smith de 156 mm del CEDEX. Este equipo se dispuso en el embarcadero de Flix, en el embarcadero de Pas de L'Ase y en Tortosa.

CEDEX junto con UPM proporcionaron un equipo de aforo de SS que aforó en el embarcadero de Flix y en el puente de Tortosa. UPC también aportó un equipo que aforó SS en el puente de Ascó. La empresa NTT data también aportó un equipo que aforó en el puente de Mora de Ebro.

Simultáneamente, un equipo de la Universidad de Lleida estuvo probando un sistema para la detección del transporte de fondo, mediante una medida combinada con sonda ADCP y GPS, en los puentes de Ascó y de Mora de Ebro.

2.2. Metodología de muestreo de los equipos de aforo de SS

Cada uno de los equipos de muestreo obtuvieron muestras subsuperficiales, obtenidas a un metro de profundidad, aproximadamente cada 15 minutos, reservando algunas muestras para contraste en laboratorio.

Previamente, CEDEX simuló la avenida lo que ha facilitado la planificación y la logística de los equipos de muestreo.

La mayor parte de los registros de la campaña se han realizado con turbidímetros HACH HQ2100. EL equipo UPC empleó un turbidímetro de desarrollo propio, y CEDEX empleó un turbidímetro HANNA HI93703 de la UPM.

2.3. Hidrograma y niveles de embalse

La CHE ha facilitado el registro de niveles de los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix. La figura 1 muestra el hidrograma de salida de la presa de Flix con una punta de 1.400 m³/s durante 5 horas, aunque al inicio se produjo una punta muy breve que alcanzó los 1.600 m³/s. Además, presenta los hidrogramas registrados en el SAIH de Ascó y de Tortosa. La figura 2 algo más compleja muestra el reparto de caudales entre los órganos de desagüe de las presas de Mequinenza, Ribarroja y Flix. También muestra el caudal circulante (27 m³/s) por el canal de la margen derecha. El de la izquierda permaneció cerrado durante la campaña de muestreo.

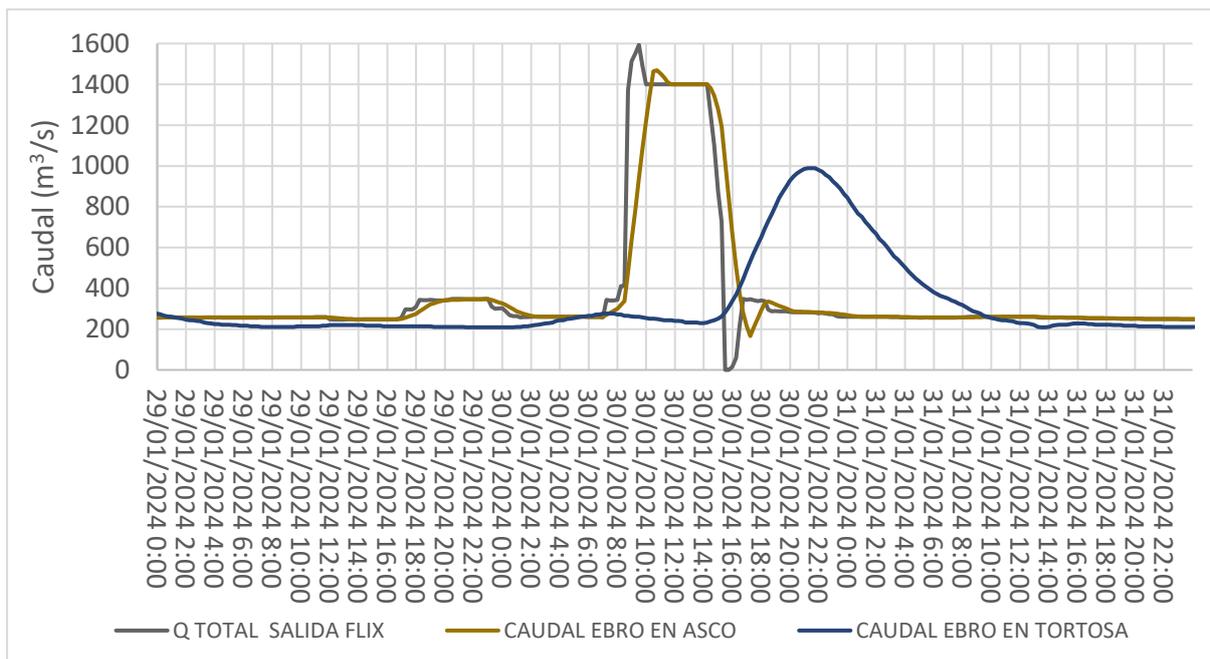


Figura 1. Hidrograma a la salida de la presa de Flix y en los SAIH de Ascó y Tortosa.

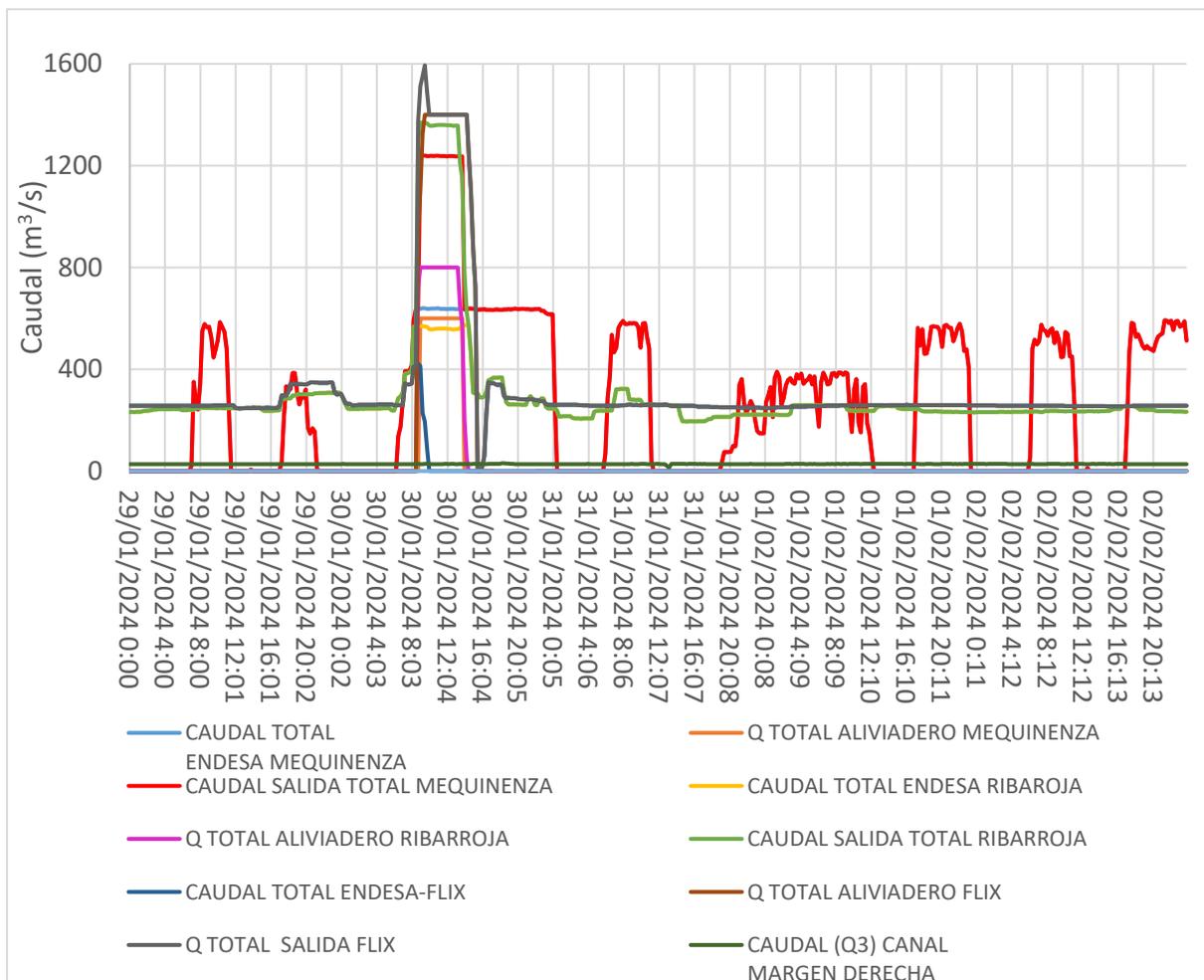


Figura 2. Reparto de caudales entre los órganos de desagüe de Mequinenza, Ribarroja y Flix.



Las figuras 3 a 5 muestran la evolución de los niveles en los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix. Se ha superpuesto el hidrograma en Flix para facilitar el análisis. Se aprecia que la mayor parte del volumen de agua proviene de Mequinenza, que durante la punta de la avenida Ribarroja se encuentra entorno a la cota 67,5 msnm. El nivel del embalse de Flix osciló alcanzando el mínimo al final de la punta.

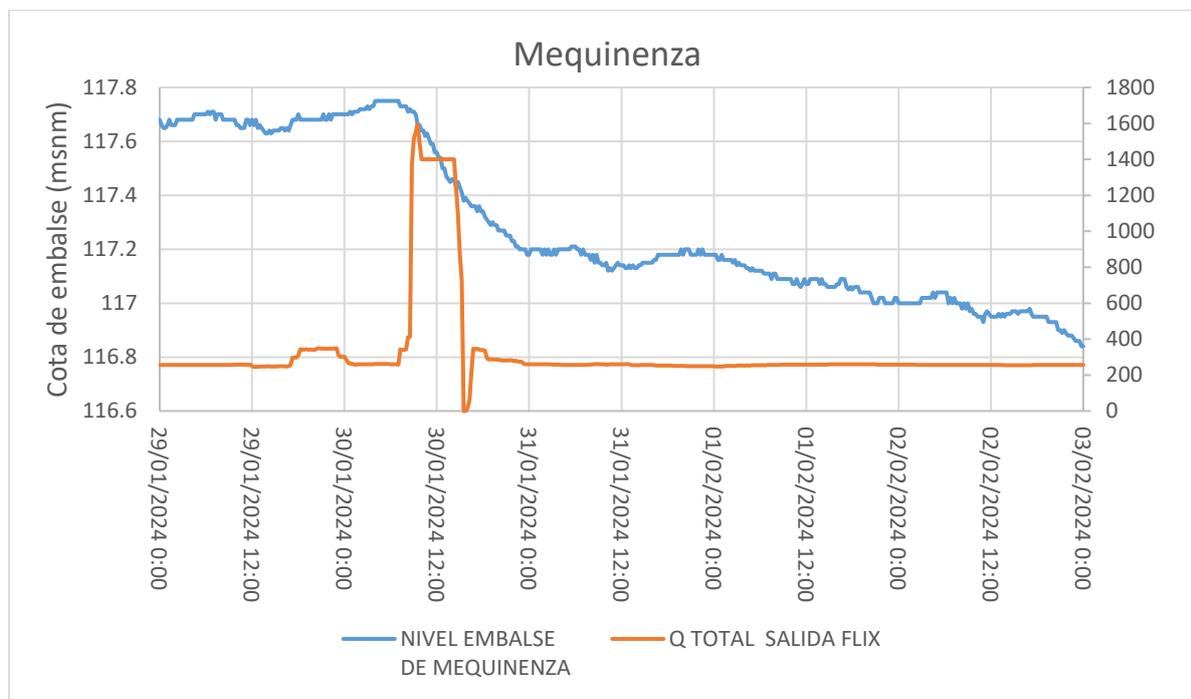


Figura 3. Evolución del nivel del embalse de Mequinenza.

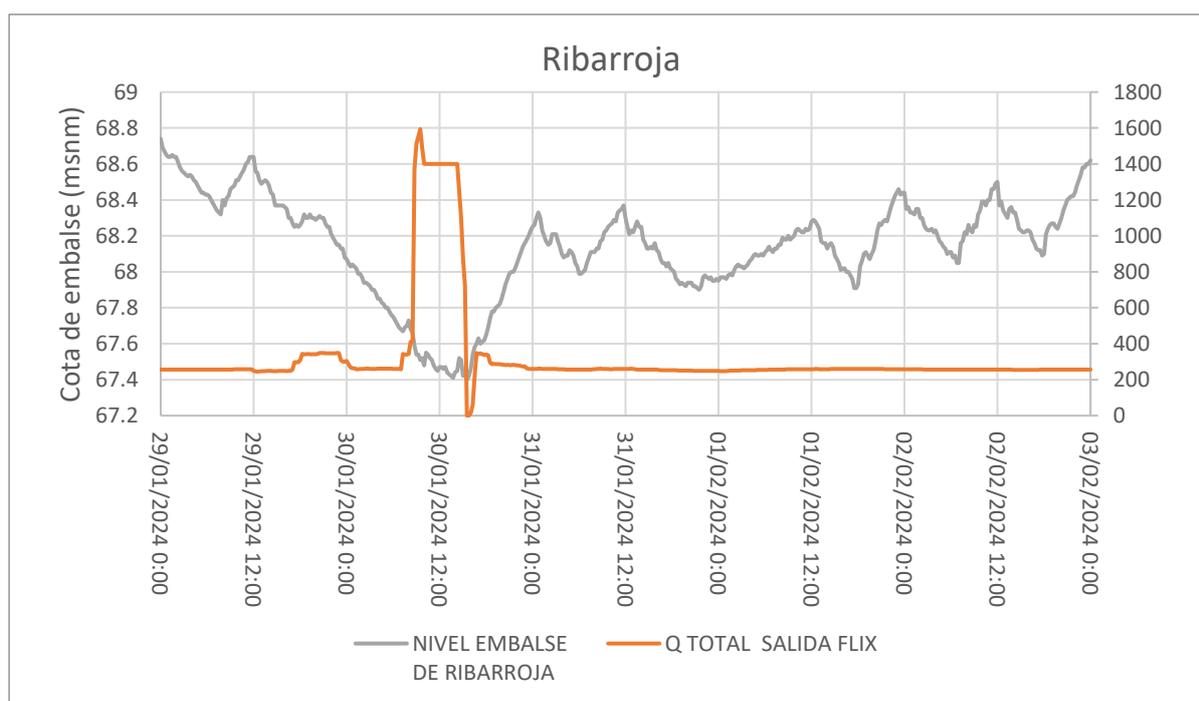


Figura 4. Evolución del nivel del embalse de Ribarroja.

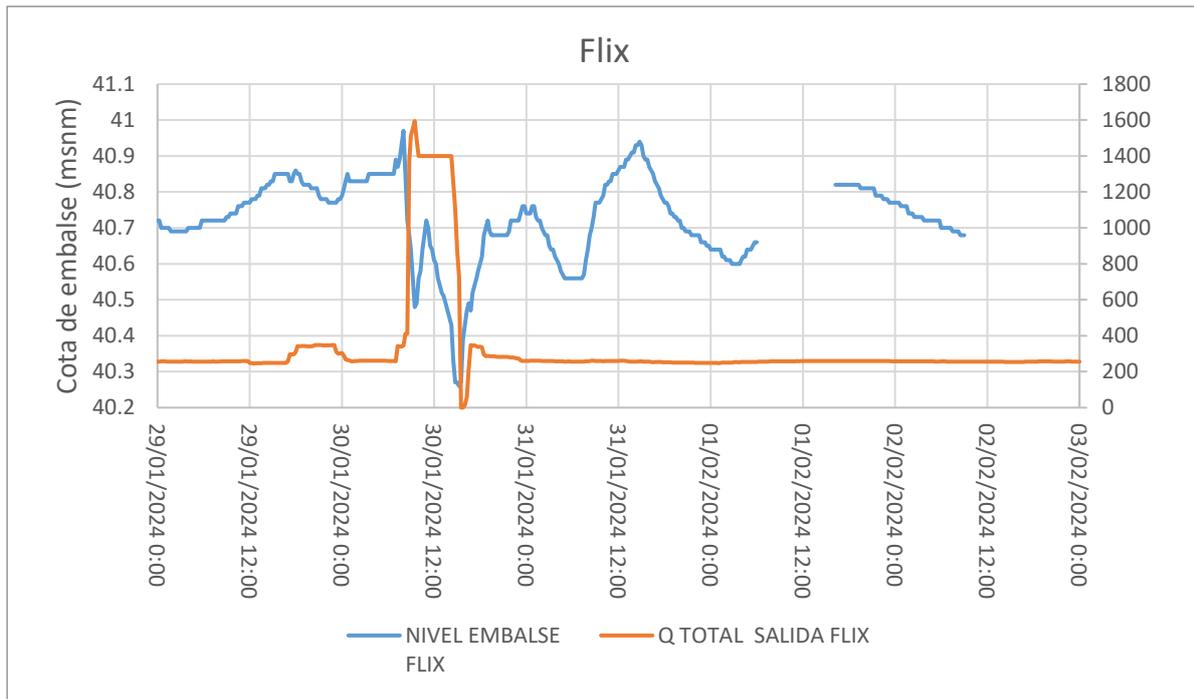


Figura 5. Evolución del nivel del embalse de Mequinenza.



3. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS

3.1. Aforos de caudal

Se resumen a continuación los registros obtenidos por los diferentes equipos de aforo líquido, en los puentes de Ascó, Mora de Ebro, Benifallet y Tortosa. La hora indicada corresponde al instante inicial de la medida.

Tabla 1. Registros de caudal en el puente de Ascó.

Hora	Q (m ³ /s)
10:44:52	1.167
10:52:17	1.242
11:01:12	1.273
11:21:51	1.236
11:33:47	1.267
12:09:45	1.344
12:30:07	1.311
13:03:15	1.348
13:24:43	1.428
13:30:32	1.437
13:35:41	1.376
13:42:06	1.338
14:18:23	1.450
14:22:08	1.442
14:44:57	1.424
14:48:58	1.466
16:20:26	707
16:26:06	618
17:19:38	438
17:23:34	435

Tabla 2. Registros de caudal en el puente de Mora de Ebro.

Tiempo	Q (m ³ /s)
11:39:25	898
11:45:41	913
12:18:18	1.079
12:24:35	1.142
12:45:50	1.200
12:50:56	1.207
14:15:36	1.176
14:27:27	1.254
15:13:42	1.298
15:24:48	1.266
15:54:32	1.262
16:58:40	1.031
17:27:08	901



Tabla 3. Registros de caudal en el puente de Benifallet.

Tiempo	Q (m ³ /s)
11:40:07	268
11:52:31	267
13:48:52	508
13:58:30	533
14:27:22	685
14:40:58	732
16:30:26	1.103
16:42:20	1.096
17:21:22	1.202
17:31:28	1.164
18:23:28	1.255
18:27:48	1.239

Tabla 4. Registros de caudal en el puente de Tortosa.

Tiempo	Q (m ³ /s)
12:55:16	251
13:03:55	236
18:21:20	733
18:29:34	769

3.2. Registros de turbidez y sedimentos en suspensión

La tabla 5 recoge todos los registros de turbidez obtenidos en los diferentes puntos de control. La tabla 6 se ha elaborado con los registros de turbidez de las muestras que han servido de contraste, y los valores de concentración de sedimento en suspensión obtenidos en laboratorio (LABAQUA). Los resultados de laboratorio proporcionan la concentración de sedimento en suspensión y la de sólidos totales, que incluyen los sólidos en suspensión más los sólidos disueltos y la materia orgánica.



Tabla 5. Registros de turbidez.

Hora	NTU Emb. Flix	Hora	NTU Ascó	Hora	NTU Mora Ebro	Hora	NTU Benifallet	Hora	NTU Tortosa
9:00	99	9:15	13	10:00	108	16:05	106	19:15	111
9:02	138	9:30	21	10:15	35	16:20	149	19:30	131
9:04	173	9:45	24	10:30	28	16:35	194	19:40	107
9:08	252	10:00	49	10:45	37	16:50	183	19:55	124
9:12	297	10:15	135	11:00	38	17:05	184	20:05	131
9:18	296	10:30	182	11:15	40	17:20	238		
9:20	272	10:45	191	11:30	42	17:35	265		
9:30	144	11:00	151	11:45	48	17:50	253		
9:35	125	11:15	176	12:00	68	18:05	346		
9:50	147	11:30	294	12:15	90	18:20	291		
10:10	169	11:45	345	12:30	165	18:35	312		
10:30	214	12:00	454	12:45	165	18:50	303		
10:35	282	12:15	463	13:00	221				
10:40	301	12:30	510	13:15	186				
10:50	306	12:45	533	13:30	234				
11:00	329	13:00	590	13:45	269				
11:10	297	13:15	543	14:00	265				
11:20	245	13:30	496	14:15	307				
11:30	196	13:45	405	14:30	372				
11:40	225	14:00	370	14:45	378				
11:50	219			15:00	464				
12:00	210			15:15	547				
12:10	178			15:30	545				
12:20	180			15:45	506				
12:30	169			16:00	521				
12:40	150			16:15	432				
13:00	169			16:30	360				
13:30	105			16:45	333				
13:45	63								



Tabla 6. Registros de turbidez y concentración de SS.

	N. Embalse	NTU Hach	NTU Hanna	NTU UPC	SS (mg/l)	ST (mg/l)	% SS/ST
Puente Mequinenza Segre	37	71.9			43	810	5,31
	9	68.1			45	860	5,23
	14	50.1			67	830	8,07
Puente Mequinenza Ebro	74	21.2			4	748	0,53
	5	51.8			46	762	6,04
	33	33.4			34	780	4,36
	1	17.9			16	742	2,16
	28	25.3			10	810	1,23
	84	13.8			6	724	0,83
Embalse Ribarroja	38	150			95	796	11,93
	50	32.1			26	774	3,36
	66	21.3			42	768	5,47
	29	32.6			6	750	0,80
	42	10.7			5	714	0,70
	49	11.8			20	706	2,83
	44	7.11			2	718	0,28
	3	8.28			12	754	1,59
Puente Ribarroja	22	258			295	786	37,53
	2	155			151	966	15,63
	27	56.8			64	908	7,05
	18	39.1			44	812	5,42
	117	33.2			41	822	4,99
Emb. Flix	43		173		392	1.038	37,76
	69		297		502	1.274	39,40
	30		169		279	1.010	27,62
	32		214		304	1.174	25,89
	110		301		337	1.252	26,92
	57		329		428	1.278	33,49
	23		178		432	1.298	33,28
	10		150		327	1.190	27,48
Ascó	15			182	448	1.064	42,11
	90			151	206	1.028	20,04
	11			294	261	1.000	26,10
	73			454	312	1.152	27,08
	26			510	401	1.304	30,75
	31			590	316	1.244	25,40
	62			496	346	1.382	25,04
	91			370	326	1.230	26,50

	N. Embalse	NTU Hach	NTU Hanna	NTU UPC	SS (mg/l)	ST (mg/l)	% SS/ST
Mora de Ebro	21	89,8			75	910	8,24
	4	165			194	994	19,52
	17	234			231	1.050	22,00
	76	307			266	1.120	23,75
	88	378			287	1.192	24,08
	24	464			329	1.112	29,59
	7	506			326	1.202	27,12
	12	432			284	1.158	24,53
	8	360			246	1.178	20,88
Benifallet	40	149			108	866	12,47
	52	184			213	942	22,61
	51	253			225	1.006	22,37
Canal M. derecha	99		221		186	1.120	16,61
Amposta	41		85		54	822	6,57
Deltebre	36		25		25	786	3,18

Se muestra a continuación una imagen tomada desde el embarcadero de Flix a las 10:40 horas del 30 de enero de 2024, donde se aprecia la alta turbidez del agua.



Figura 6. Evolución Vista del río Ebro desde el embarcadero de Flix el día 30 de enero de 2024 a las 10:40 horas.

La figura 7 muestra como el canal de la margen derecha seguía transportando una alta turbidez al día siguiente de la avenida. Esto se explica porque la reducida pendiente del canal ralentiza el flujo, prolongando el tiempo de transporte del sedimento por el canal.



Figura 7. Fotografía del canal de la margen derecha el día 31 de enero de 2024 a las 09:40 horas.

Con el fin de generar una serie continua de concentración de sedimento en suspensión, se multiplica la serie de turbidez por un coeficiente tal que minimice el error conjunto con respecto a los registros de laboratorio (figura 6).

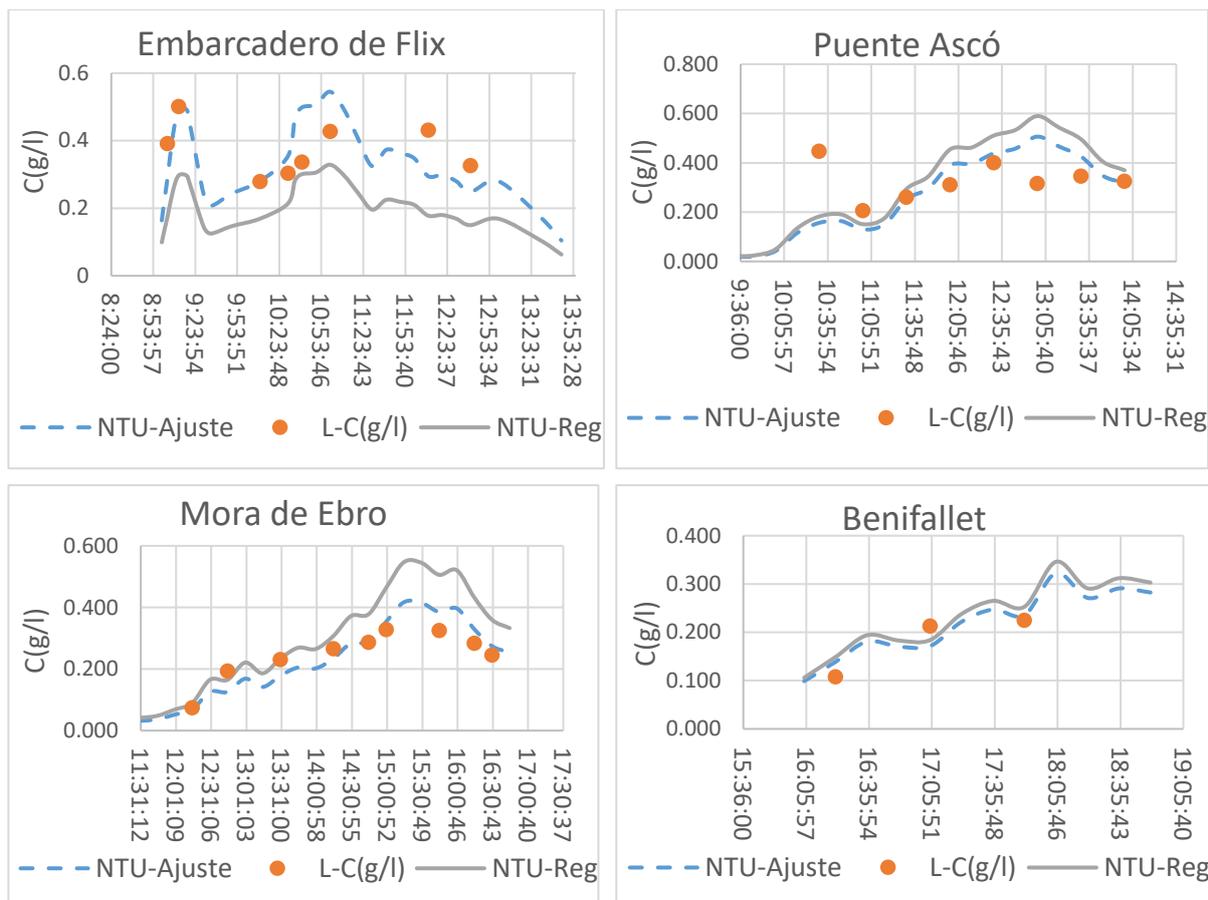


Figura 8. Registros de turbidez y concentración de sedimentos en suspensión.

Finalmente, se ha analizado la correlación entre los turbidímetros con los registros de SS obtenidos en laboratorio. Se aprecia que es muy buena en el caso de los turbidímetros Hach.

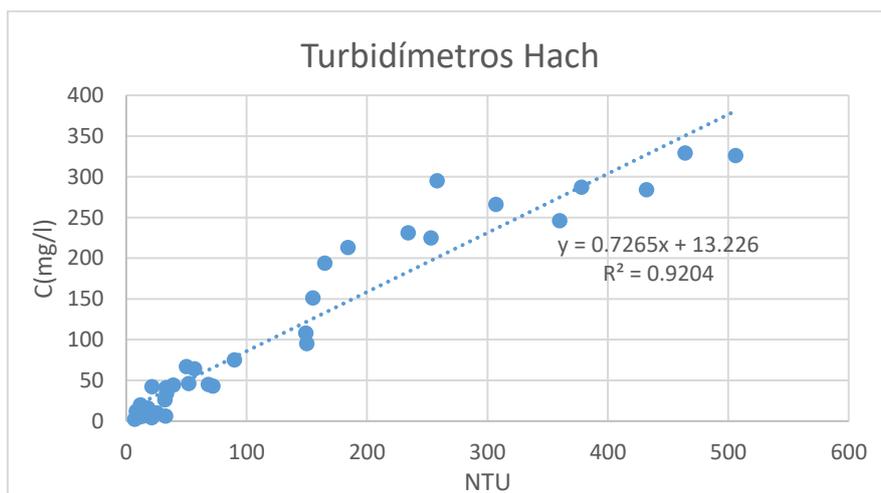


Figura 9. Correlación de los registros de turbidez y concentración de SS de los turbidímetros Hach.

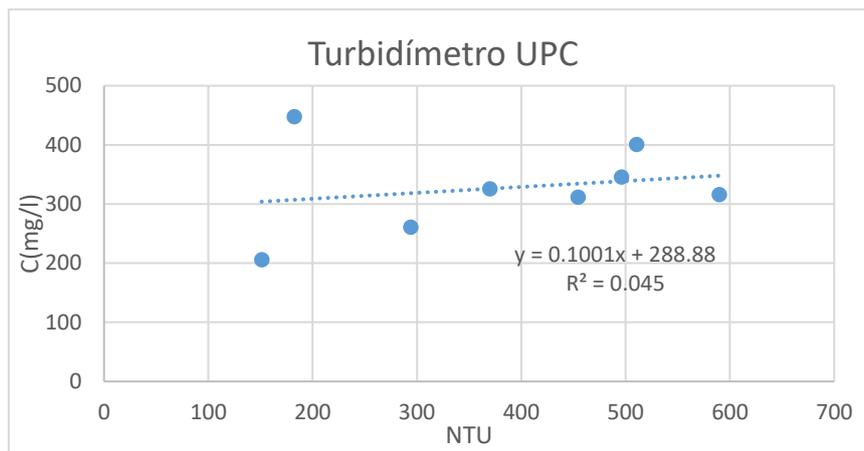


Figura 10. Correlación de los registros de turbidez y concentración de SS del turbidímetro de la UPC.

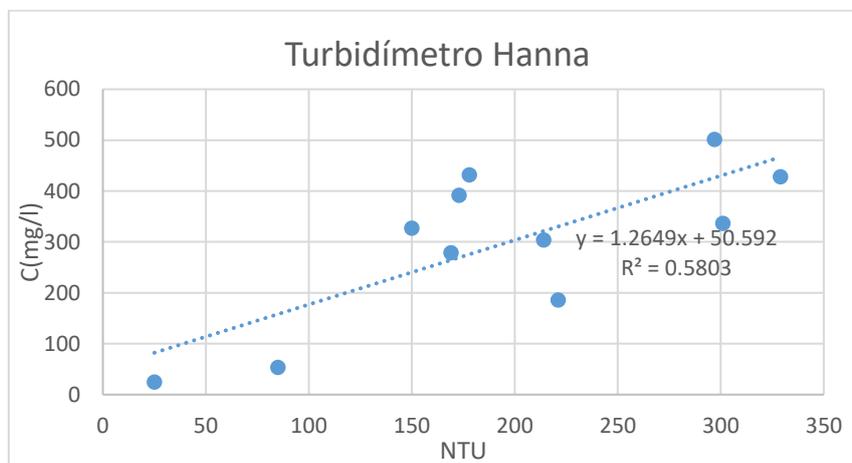


Figura 11. Correlación de los registros de turbidez y concentración de SS del turbidímetro Hanna.

3.3. Registros de transporte de fondo

Se realizaron tres muestreos. El primero en el embarcadero de Flix, el segundo en el Pas de L'Ase, y el tercero desde la orilla de la margen izquierda aguas abajo del puente peatonal de Tortosa. La figura 10 muestra la sonda Helley Smith de 156 mm del CEDEX. En la figura 11 se aprecia el camión grúa con pluma de 25 m manejada por el equipo de TRAGSA. Finalmente, la figura 12 muestra la sonda tras su extracción. En todos los casos se recogió materia orgánica, y algo de lodo. Esto se debe a que en Flix y Pas de L'Ase el río se encuentra acorazado. En Tortosa el acorazamiento es parcial pero una pluma de 25 metros no es capaz de situar la sonda en el cauce activo. En consecuencia, para las próximas avenidas controladas es necesario disponer de dispositivos motorizados que permitan situar la sonda

desde puentes o tramitar los permisos necesarios que permitan operar desde un camión grúa en los puentes.



Figura 12. Sonda Helley Smith de 156 mm.



Figura 13. Camión con pluma de 25 m situando la sonda Helley Smith.



Figura 14. Sonda Helley Smith tras su extracción.

3.4. Imágenes de satélite

Desafortunadamente las nubes del día 30 de enero de 2024 cubrieron la zona de estudio y no permitieron obtener imágenes útiles desde el satélite Sentinel-2. La Universidad de Valencia ha facilitado las imágenes de satélite que se muestran en las figuras 15 y 16.

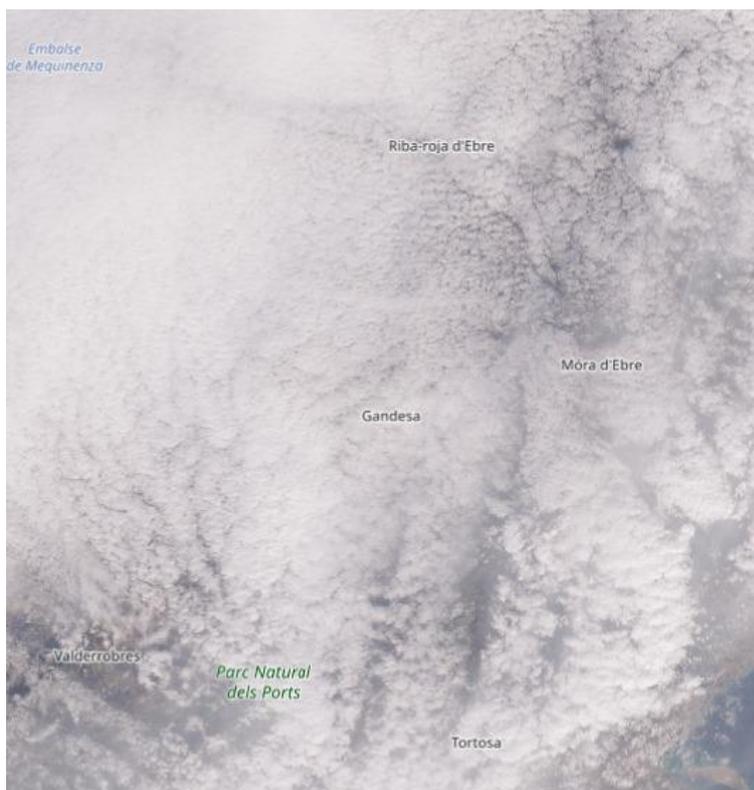


Figura 15. Imagen del Sentinel-2 del 30 de enero de 2024 a las 12:30.

La figura 16 muestra una comparativa de las imágenes del Sentinel-3 del día 27 de enero, y otra del Sentinel-2 del 1 de febrero, donde se aprecia la pluma de sedimento generada por la avenida.

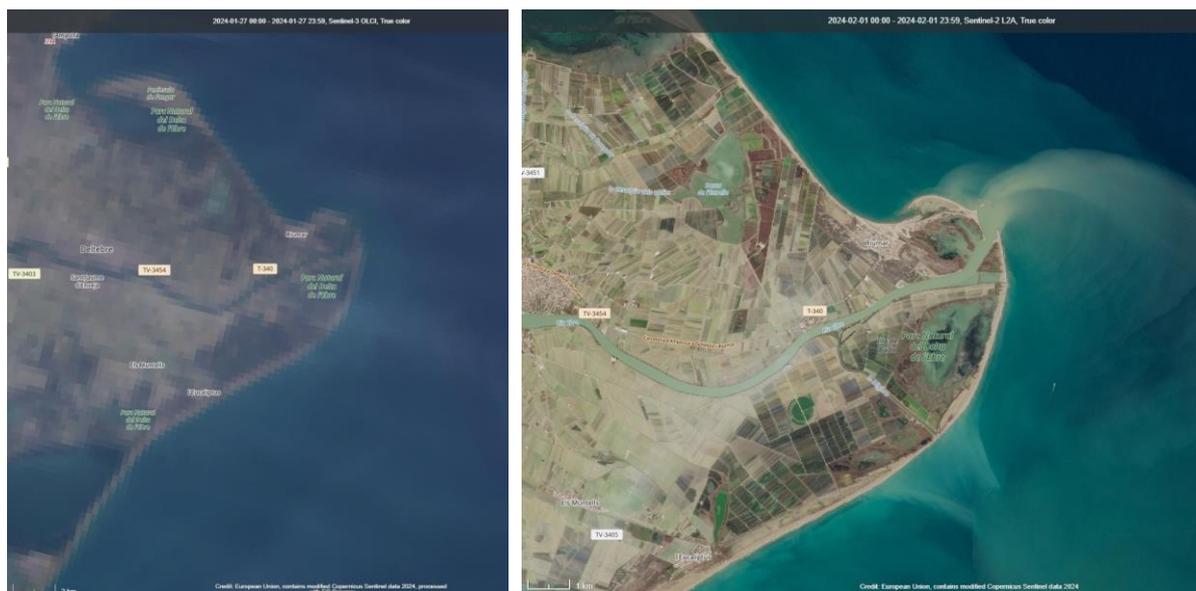


Figura 16. Comparativa de imágenes de satélite del 27 de enero y 1 de febrero de 2024.



4. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA AVENIDA CON EL MODELO IBER

4.1. El modelo Iber

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre y régimen variable para el estudio hidromorfológico de cauces.

El campo de aplicación de Iber es muy amplio, siendo su principal finalidad el estudio hidrodinámico en ríos, si bien permite estudiar además el transporte de sedimentos en los cauces y realizar análisis de inundabilidad. También es adecuado para estudiar el flujo de marea en estuarios y realizar simulaciones de rotura de presas (Bladé et al., 2014).

Iber es una herramienta en continuo desarrollo y en la actualidad consta de múltiples módulos. Los fundamentales son el módulo hidrodinámico, el módulo de turbulencia y el módulo de transporte de sedimentos. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). El módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad. En la versión actual se incluyen un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo $k-\epsilon$. El módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad bidimensionales, también conocidas como ecuaciones de Saint Venant 2D. Dichas ecuaciones asumen las hipótesis de distribución de presión hidrostática y distribución uniforme de velocidad en profundidad. La hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios y zonas costeras. La hipótesis de distribución uniforme de velocidad en profundidad se cumple de forma habitual en ríos y estuarios, siempre y cuando no existan procesos relevantes de estratificación debido a diferencias de salinidad, de temperatura o al viento.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad (1)$$

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

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

(3)

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

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

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

La actual versión 3.3 de Iber incorpora el módulo R-Iber que permite la computación sobre GPU. Esto facilita la realización de modelos de gran extensión espacial con tamaños de malla reducidos, lo que redundará en una mayor precisión de los resultados, y con tiempos de ejecución muy reducidos (Sanz y López, 2022; López et. al. 2024).

4.2. Módulo de transporte de sedimentos en suspensión

El modelo Iber permite resolver las ecuaciones de transporte de sedimento por arrastre de fondo, así como las de transporte en suspensión. El modelo de arrastre de fondo calcula las tensiones tangenciales de fondo que movilizan el sedimento de fondo por el criterio de partición de tensiones de Einstein. Por otro lado, calcula las tensiones críticas de inicio de arrastre por el criterio de Shields. Con ambas tensiones el modelo permite estimar la capacidad de transporte de fondo por diferentes modelos experimentales como son el de Meyer-Peter-Muller, Van Rijn o el de Engelund-Hansen, entre otros. Conocidos los caudales sólidos, con la restricción de capa de roca, es posible calcular la evolución de la cota del lecho mediante la ecuación de conservación de masa de Exner (4).

$$(1-p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E \quad (4)$$

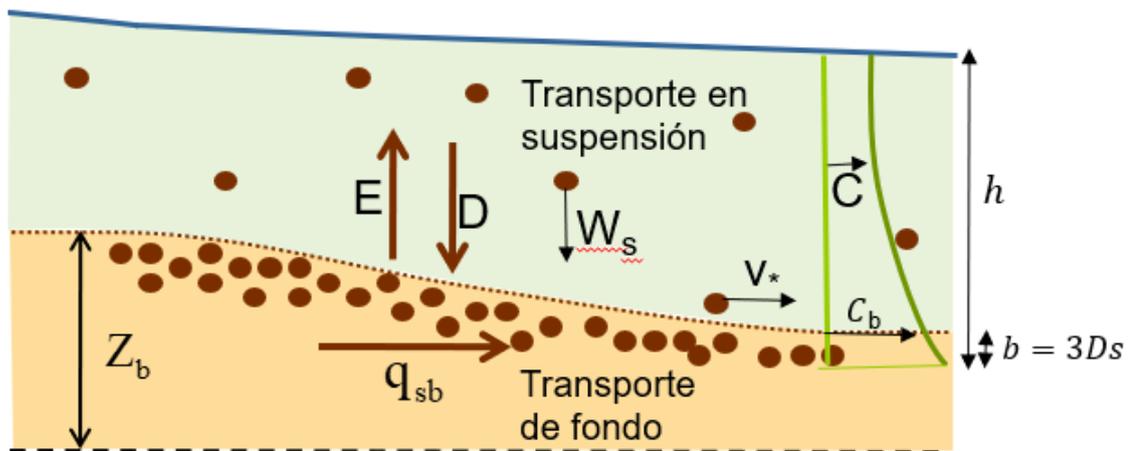


Figura 17. Esquema de la ecuación de Exner para determinar la evolución del lecho.

En esta formulación Z_b representa la cota del fondo, p la porosidad del material, $q_{sb,x}$ y $q_{sb,y}$ representan los caudales adimensionales sólidos en los ejes x e y . Los términos D y E representan la deposición y erosión derivadas del transporte en suspensión (6 y 7).

El transporte de sedimento en suspensión es más complejo pues requiere resolver una ecuación adicional que es la de advección-difusión (5), del sedimento en suspensión. Esto permite estudiar la evolución de la concentración de sedimento en suspensión en el dominio de estudio. Iber incluye tres modelos para estimar la erosión y sedimentación que se produce en cada celda de cálculo, a partir de los resultados de concentración. Para material granular

resultan más adecuados Smith McLean y Van Rijn, mientras que para material cohesivo es más adecuada la formulación de Ariathurai-Arulanandam (1978).

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hU_x C}{\partial x} + \frac{\partial hU_y C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\Gamma + \frac{v_t}{S_{c,t}} \right) h \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + (E - D) \quad (5)$$

Donde h es el calado, C la concentración de sedimento en suspensión, U_x y U_y , las componentes de la velocidad, V_t la viscosidad cinemática turbulenta, $S_{c,t}$, la constante de Smith y Γ , la viscosidad molecular.

En la formulación de Van Rijn (1987) el término E-D se evalúa a partir de la siguiente expresión:

$$E - D = W_s (c_a^* - c_a) = \alpha W_s (C^* - C) \quad (6)$$

Donde α es un coeficiente que relaciona la concentración media de partículas en suspensión y la concentración cerca del lecho del río, cuyo valor se obtiene a partir del perfil de Rouse para la distribución de concentración de sedimentos en profundidad, W_s es la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas, C es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad, C^* es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad en condiciones de equilibrio (capacidad de transporte de sólidos en suspensión), c_a y c_a^* son respectivamente la concentración instantánea y la concentración de equilibrio a una altura $z=b$ sobre el lecho del río, siendo a el espesor de la capa en la cual se produce el transporte de fondo (límite teórico de separación entre el transporte de fondo y el transporte en suspensión). Dicho espesor se puede evaluar de forma aproximada a partir del diámetro del sedimento. El coeficiente α se calcula a partir de la distribución de concentración en la vertical (perfil de Rouse) a partir de la siguiente integral (7), y Z_u el exponente del perfil de Rouse (8).

$$\alpha = \frac{h - b}{\int_b^h \left[\frac{h-z}{z} \frac{b}{h-b} \right]^{Z_u} dz} \quad (7)$$

$$Z_u = \frac{W_s}{kv_*} \quad (8)$$



Siendo $k=0.41$ la constante de Von Karman. La concentración de equilibrio cerca del lecho del río propuesta por van Rijn (1987) es:

$$c_b = 0.015 \frac{D_{50} T^{1.5}}{b D_*^{0.3}} \quad (9)$$

$$b = 3k_s; \quad k_s = D_s \quad (10)$$

$$D_* = D_s \cdot \left(\frac{g R}{v^2} \right)^{1/3} \quad \text{con} \quad R = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \quad (11)$$

W_s es la velocidad de sedimentación. En este estudio se emplea la formulación de Van Rijn para calcular la velocidad de caída (12, 13 y 14).

$$W_s = \frac{R \cdot g \cdot D_{50}^2}{18 \cdot v} \quad \rightarrow \quad D_{50} < 10^{-4} \text{ m} \quad (12)$$

$$W_s = \frac{10 \cdot v}{D_{50}} \left(\sqrt{\frac{1 + 0.01 \cdot R \cdot g \cdot D_{50}^3}{v^2}} - 1 \right) \quad \rightarrow \quad 10^{-4} \text{ m} < D_{50} < 10^{-3} \text{ m} \quad (13)$$

$$W_s = 1.1 \cdot \sqrt{R \cdot g \cdot D_{50}} \quad \rightarrow \quad 10^{-3} \text{ m} < D_{50} \quad (14)$$

4.3. El modelo del curso bajo del río Ebro

Se ha modelizado el tramo de río situado aguas abajo de la presa de Flix hasta la desembocadura. Un total de 120 km de río. Para ello se ha empleado la batimetría obtenida por la CHE en 2023, de 0,5 m de precisión, completada con el MDT del vuelo LiDAR del IGN. La malla de cálculo consta de 1,45 millones de elementos con elementos de malla de 15 m. (Figura 13). La rugosidad de Manning empleada en el cauce ha sido $n=0,028$.

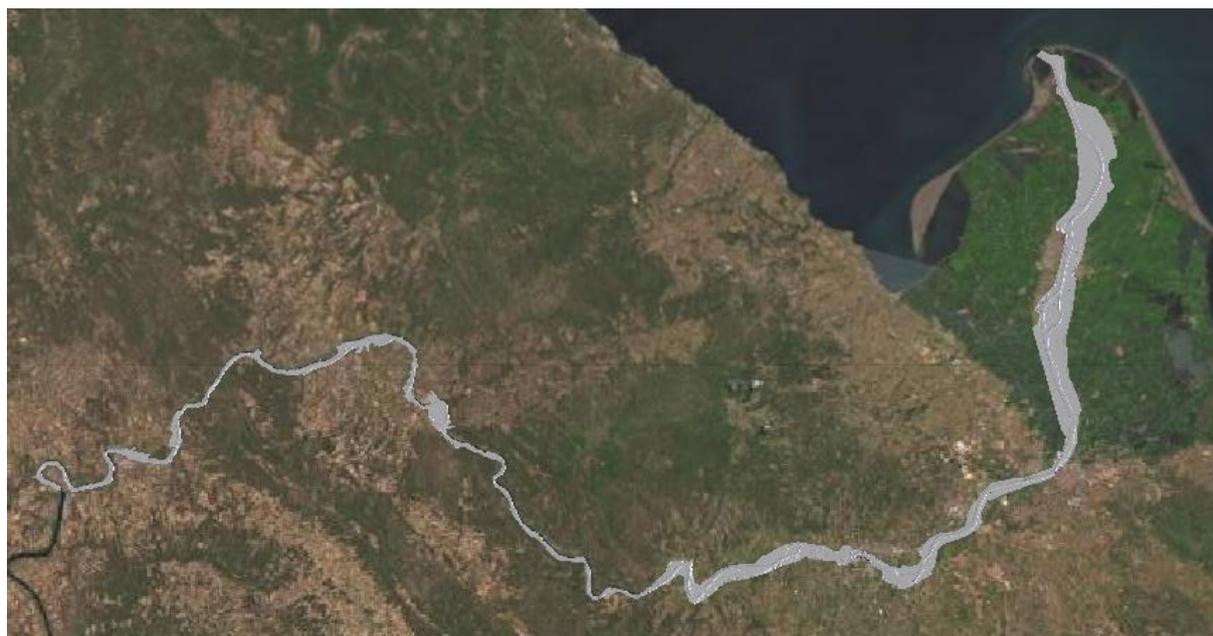


Figura 18. Vista global del modelo Iber del curso bajo del río Ebro.

El cauce se encuentra completamente acorazado hasta Tortosa, parcialmente hasta Amposta, y en libre en el resto del cauce hasta la desembocadura. Por esta razón se ha supuesto lecho no erosionable en la simulación. Se ha considerado que durante la avenida se movilizan arenas muy finas. Se ha considerado en este análisis $D_{50}=0,12$ mm.

4.4. Comparativa de los resultados hidrodinámicos

La figura 15 muestra los hidrogramas obtenidos en la simulación en Iber de la avenida controlada, en las diferentes secciones de control. Las figuras 16 a 19 muestran las comparativas con los hidrogramas registrados en el SAIH de Ascó y Tortosa, y los registros de caudal obtenidos con las sondas ADCP. Se aprecia que el modelo numérico reproduce con gran precisión la propagación de la onda de avenida, mostrando un buen ajuste con los resultados experimentales.

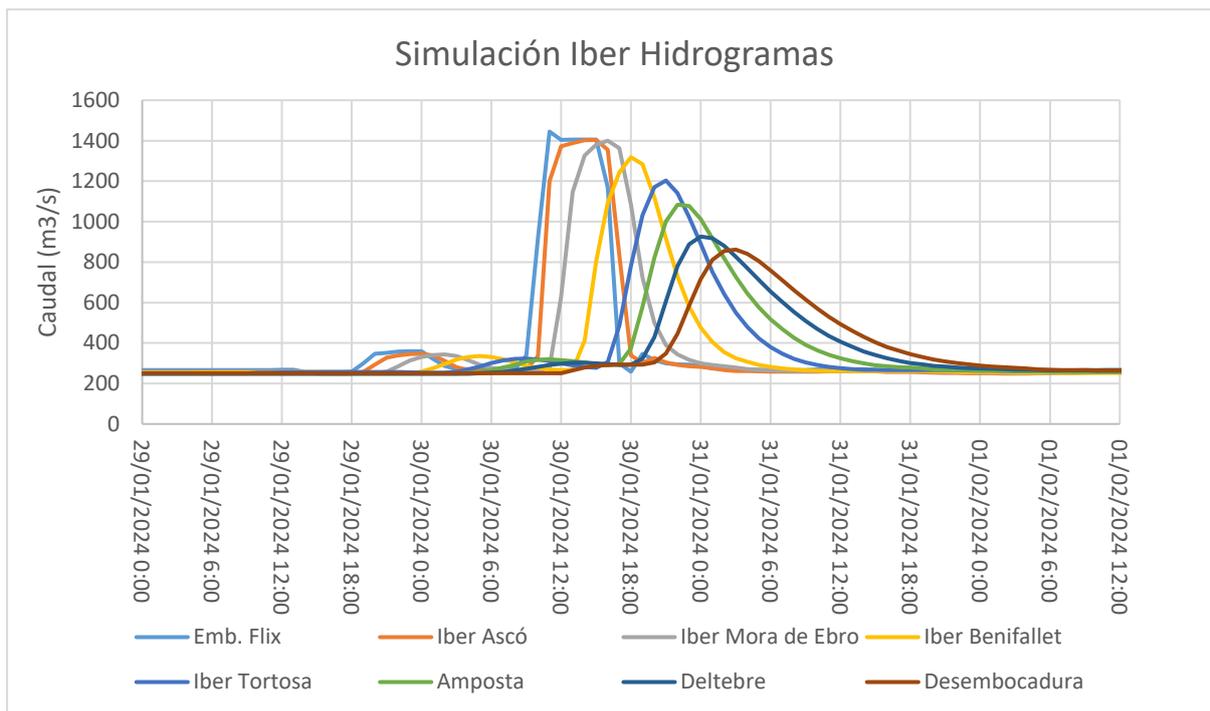


Figura 19. Hidrogramas obtenidos de la simulación en Iber en las secciones de control.

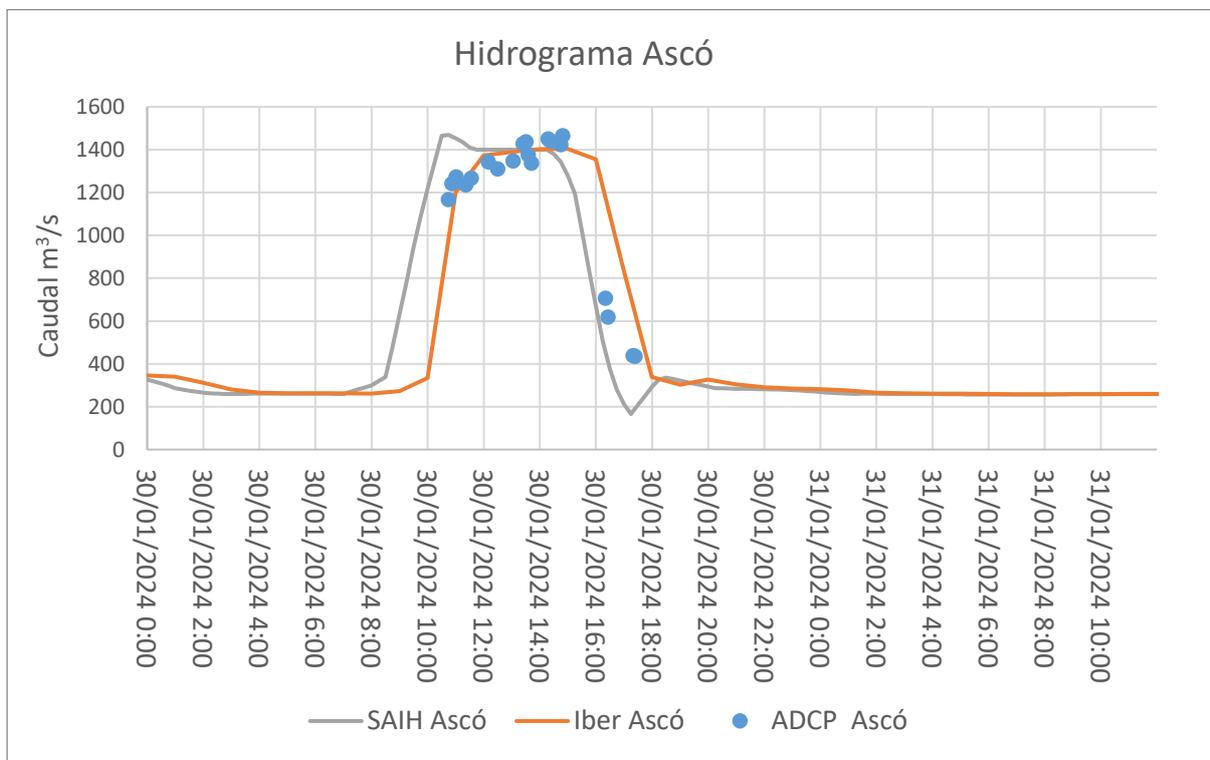


Figura 20. Comparativa de los hidrogramas del SAIH y el calculado con Iber en el puente de Ascó y los aforos realizados con ADCP.

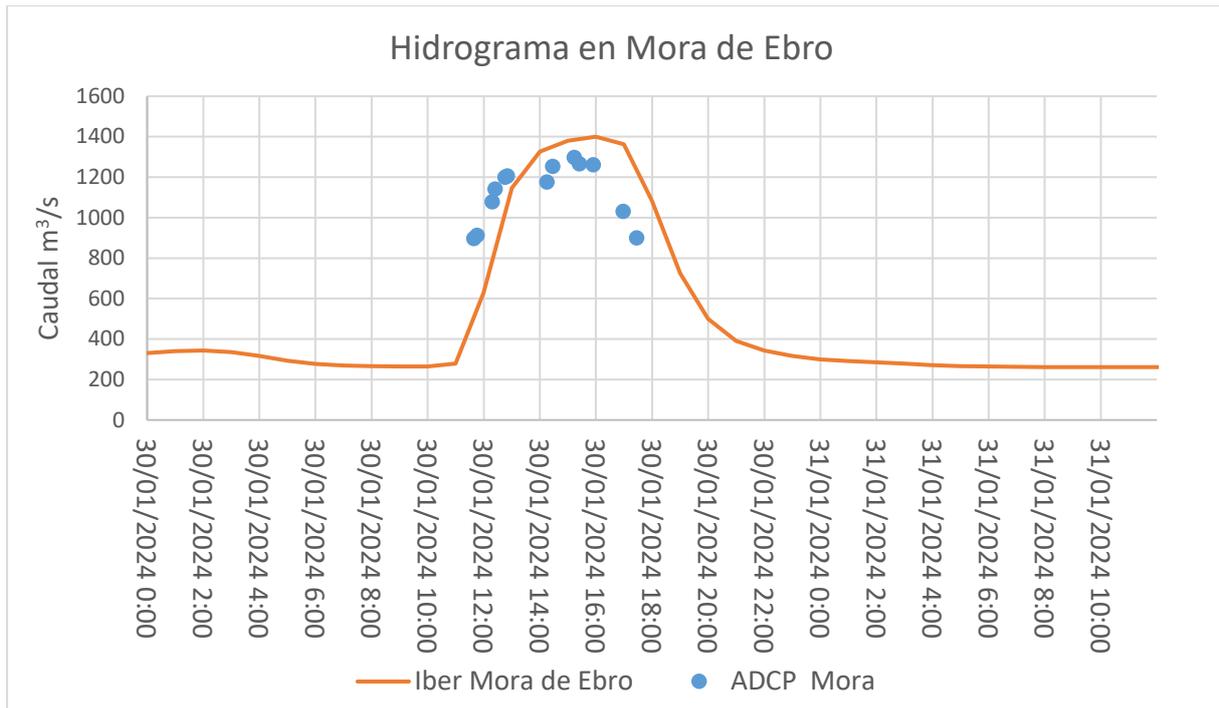


Figura 21. Comparativa del hidrograma calculado con Iber en el puente de Mora de Ebro y los aforos realizados con ADCP.

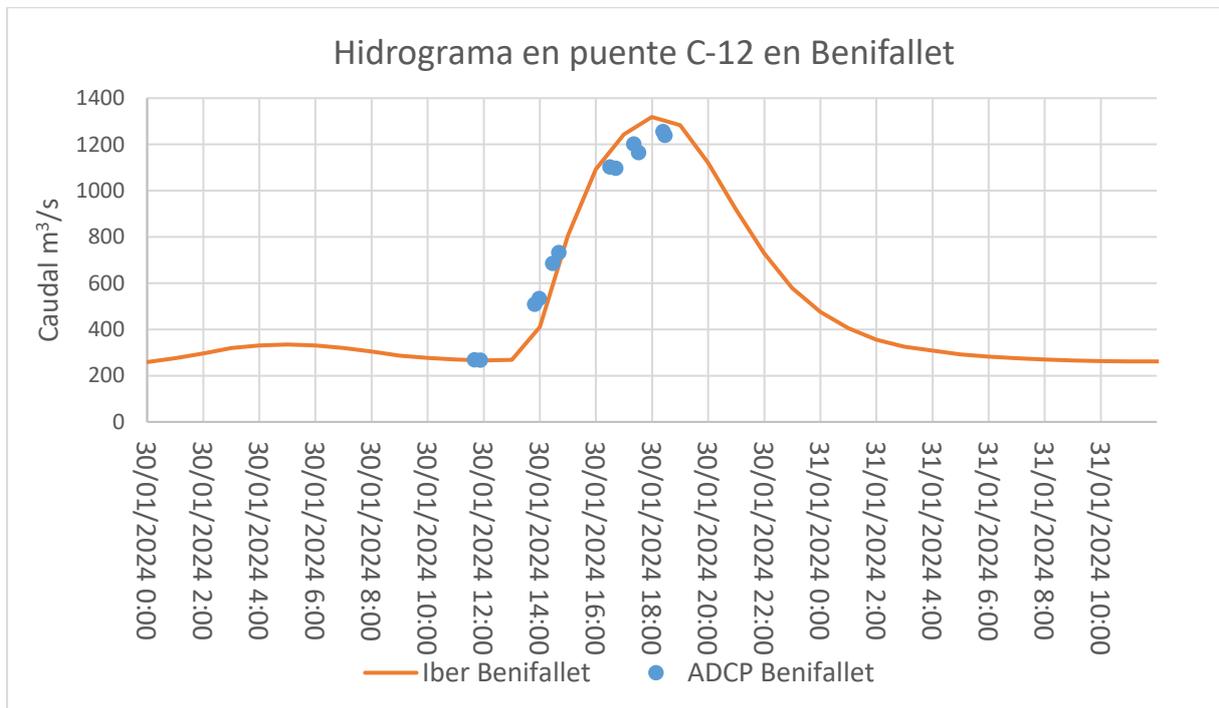


Figura 22. Comparativa del hidrograma calculado con Iber en el puente de la C-12 en Benifallet y los aforos realizados con ADCP.

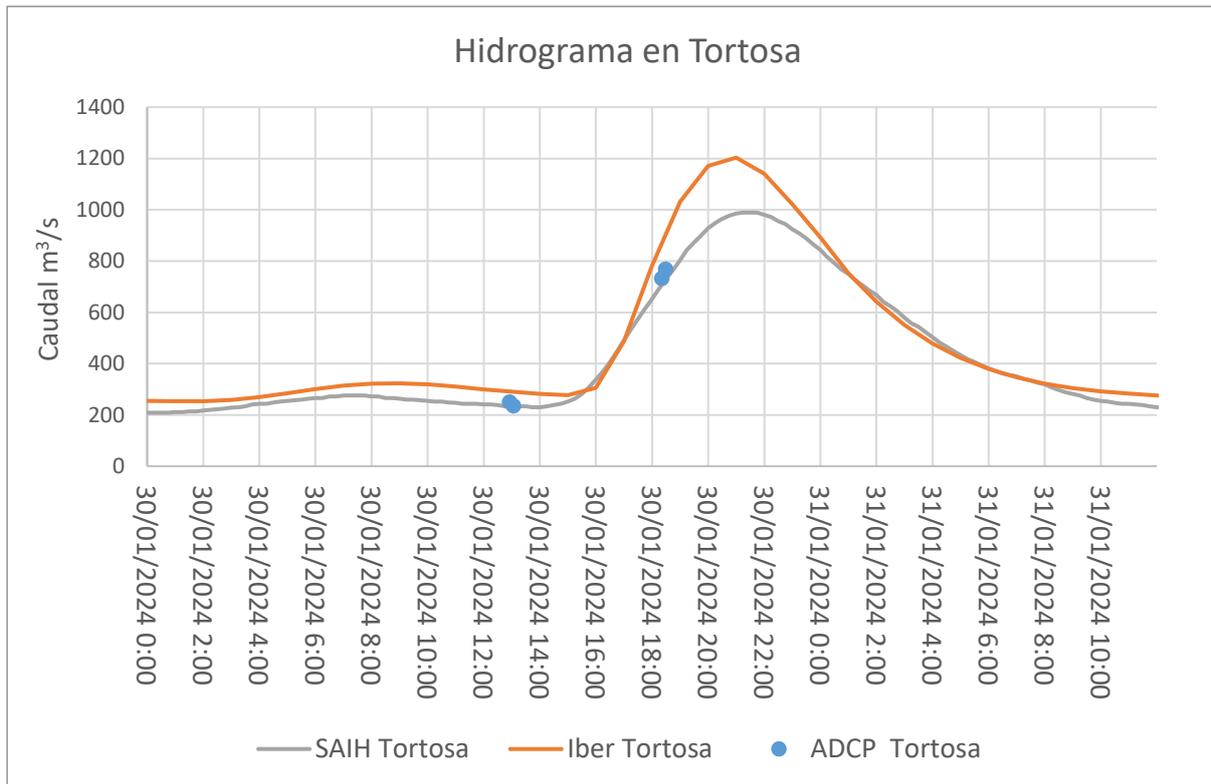


Figura 23. Comparativa del hidrograma del SAIH y el calculado con Iber en el puente de Tortosa y los aforos realizados con ADCP.

4.5. Comparativa de los registros de sedimentos en suspensión

La concentración de sedimento en suspensión a lo largo del cauce viene condicionada por el sedimento que se haya movilizado desde los embalses con las maniobras operadas. Se han realizado diversas simulaciones suponiendo diferentes concentraciones de sedimento en suspensión en la sección de entrada al modelo, al pie de la presa de Flix. Para cada una de las simulaciones se ha realizado una comparativa de la evolución de la concentración en las secciones aforadas buscando la mayor representatividad que se ha alcanzado con el hidrograma indicado en la figura 20 como CCI5. La figura 21 muestra el campo de concentraciones a las 13:00 del día 30 de enero del 2024, de acuerdo con la calibración realizada.

Las figuras 22 a 25 comparan los resultados de la campaña de muestreo con las evoluciones de concentración calculadas con la condición de entrada CCI5. Se aprecia una gran coherencia de resultados.

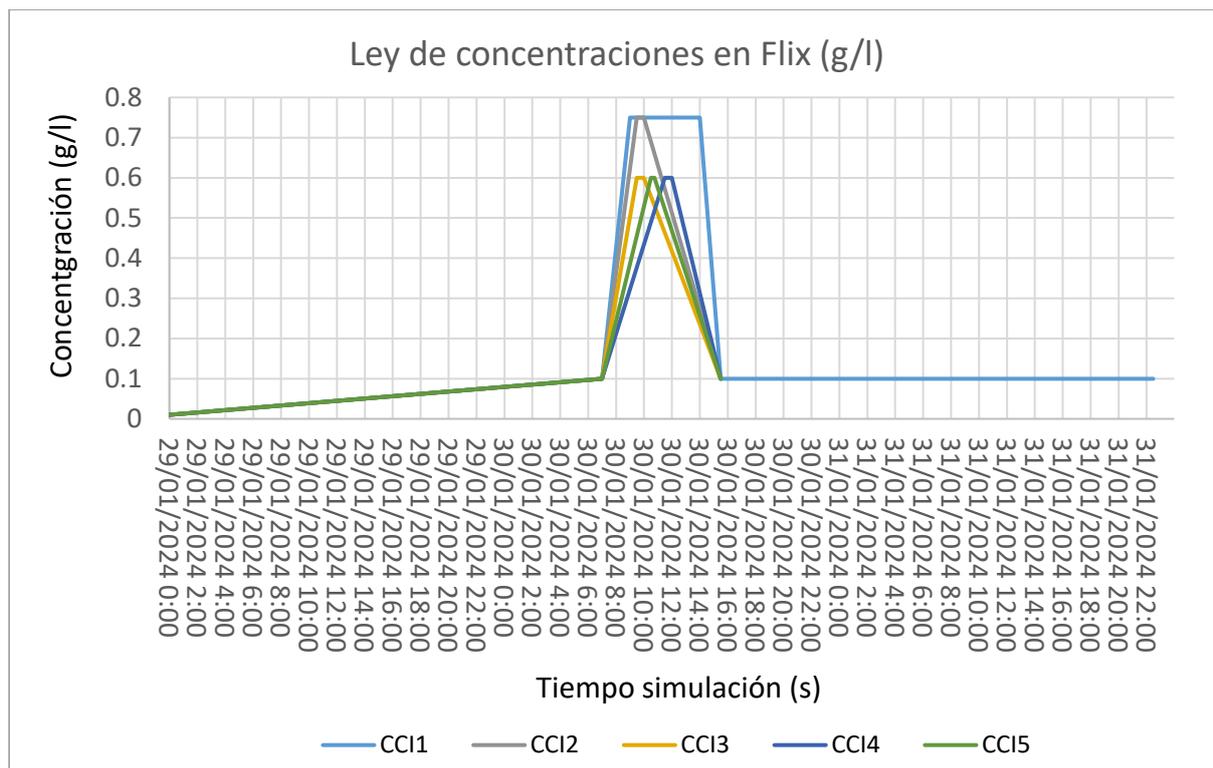


Figura 24. Condiciones de contorno de entrada de sedimento en suspensión analizadas.

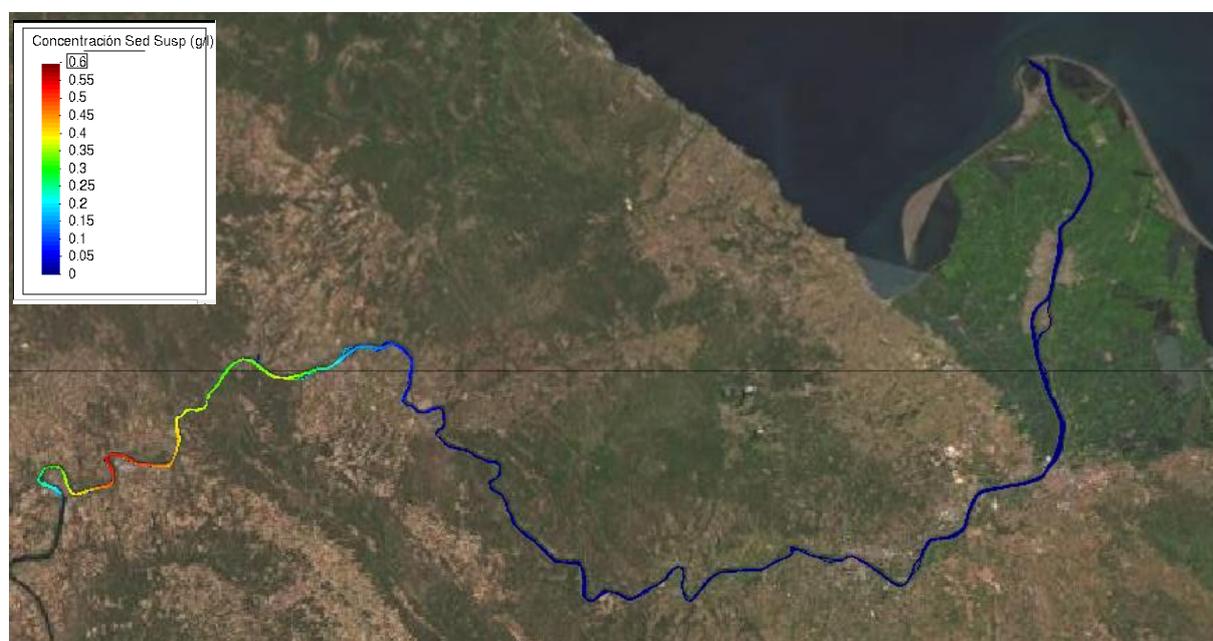


Figura 25. Campo de concentraciones en el curso bajo a las 13:00 horas del 30 de enero de 2024.

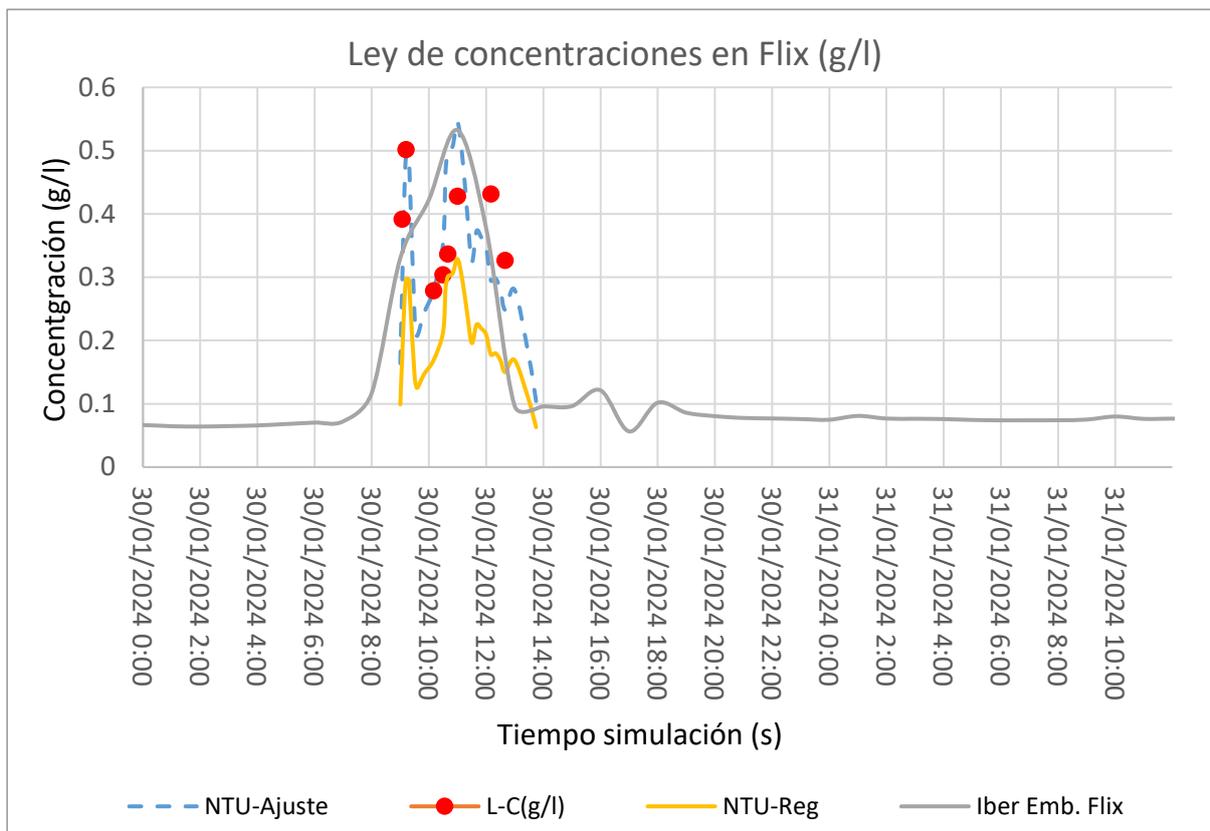


Figura 26. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el embarcadero de Flix.

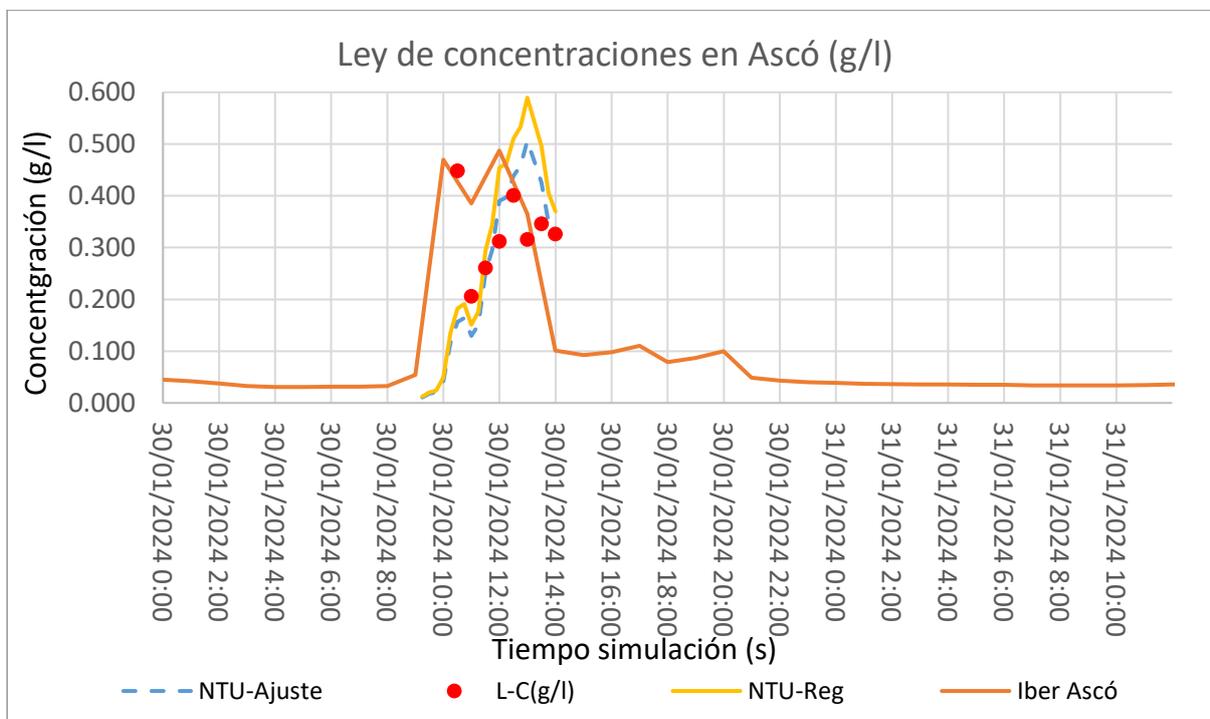


Figura 27. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el puente de Ascó.

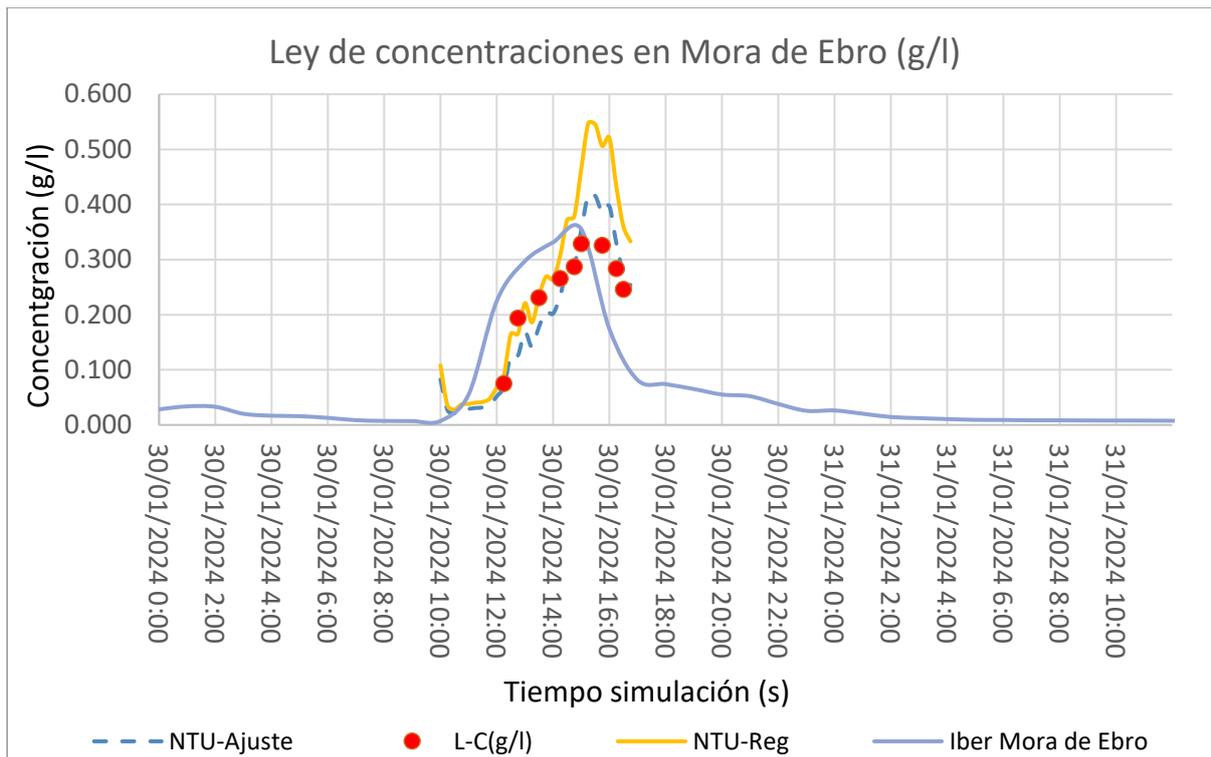


Figura 28. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el puente de Mora de Ebro.

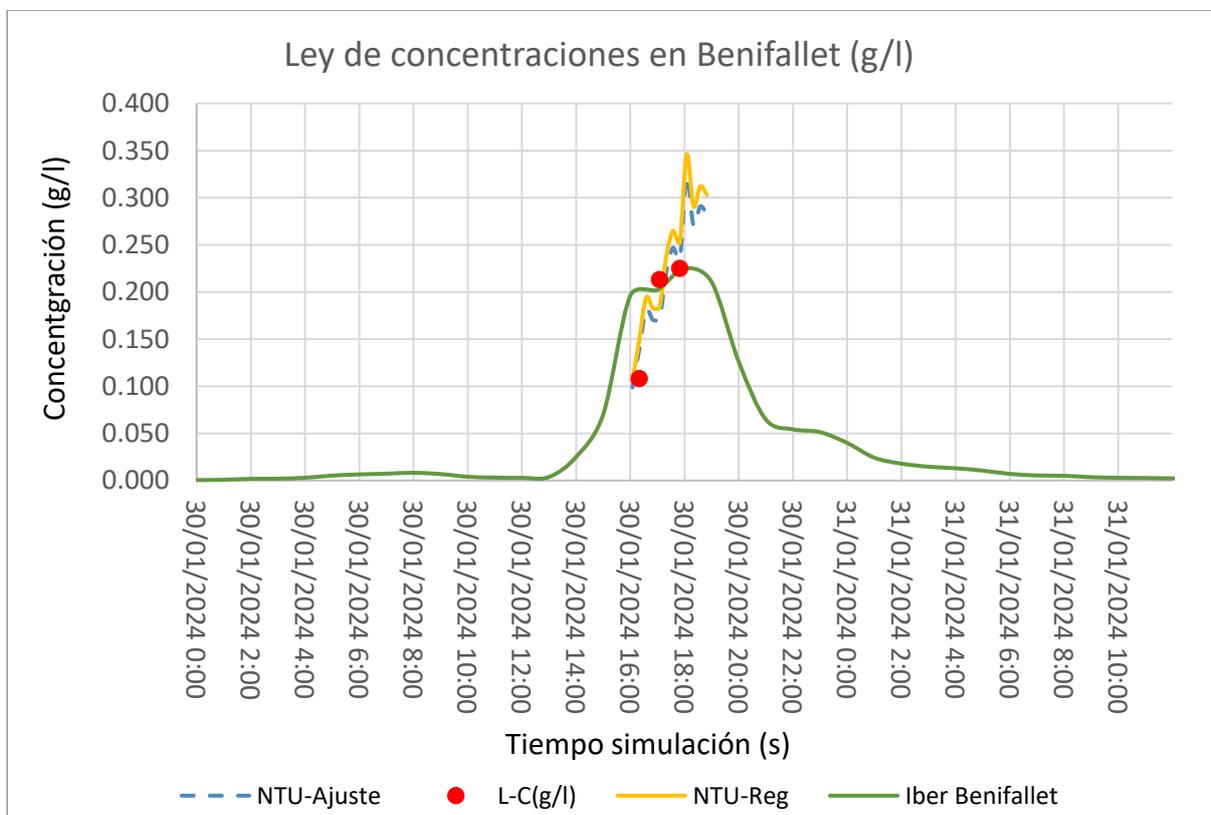


Figura 29. Comparativa de concentraciones entre la simulación y los registros experimentales en el puente de la C-12 en Benifallet.

5. INTEGRACIÓN DEL TRANSPORTE DURANTE LA AVENIDA

Una vez ajustada la concentración en la condición de contorno de entrada y calibrada la simulación, se han obtenido los solidogramas de la figura 25 a fin de evaluar el transporte de sedimentos generado durante la avenida controlada.

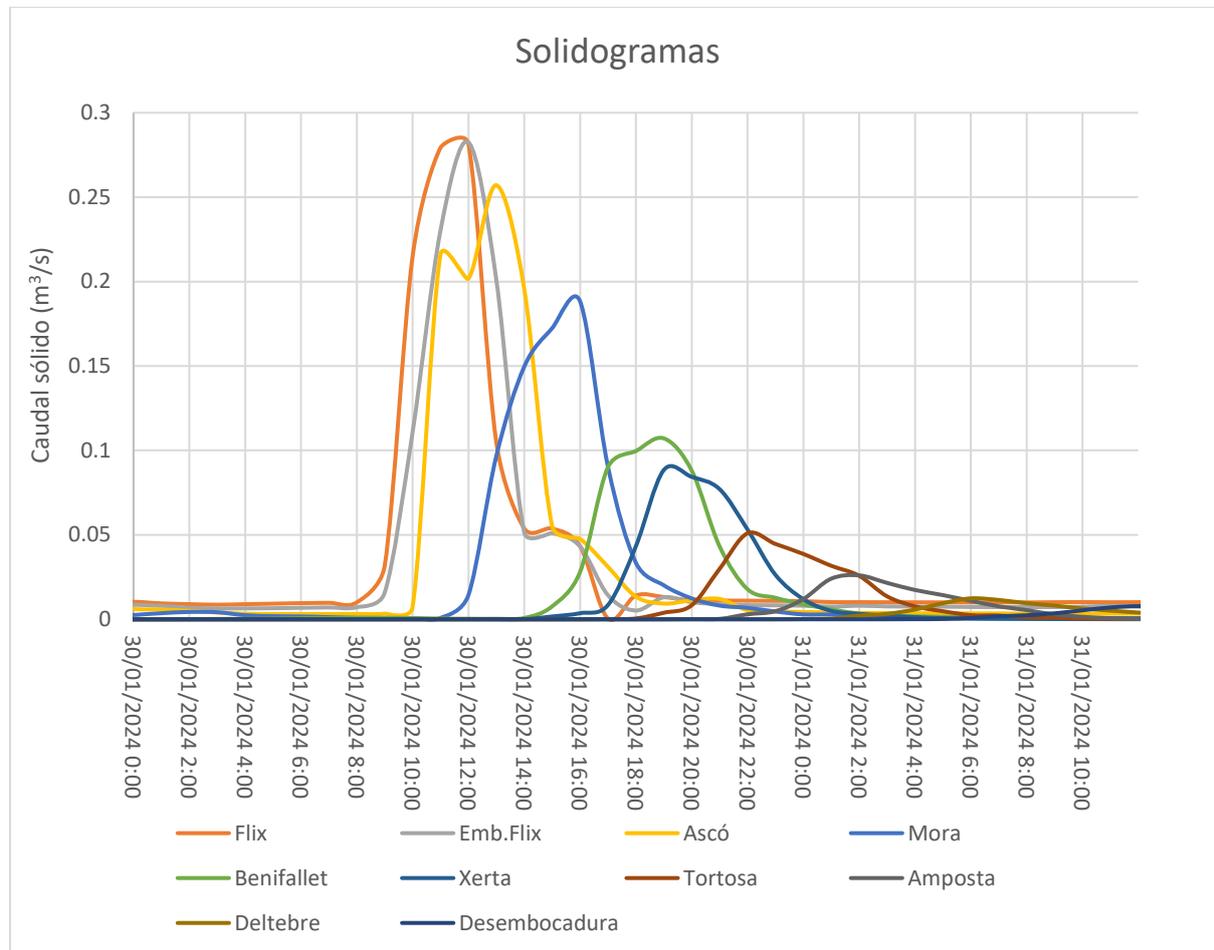


Figura 30. Solidogramas en las diferentes secciones de control.

Integrando el área de cada uno se ha calculado el volumen total que atravesó cada sección en el tiempo de control y la masa total de sedimento (tabla 7).



Tabla 7. Volumen y masa de los solidogramas.

	Flix	E.Flix	Ascó	Mora	Benifallet	Xerta	Tortosa	Amposta	Deltebre	Desemb.
Volumen (m ³)	6.664	5.774	4.837	3.144	1.925	1.487	970	550	313	246
Masa (ton)	17.660	15.302	12.819	8.333	5.102	3.939	2.571	1.458	829	653

El sedimento movilizado entre los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix fue algo inferior a las 18.000 toneladas, de las que llegaron al Azud de Xerta unas 4.000 toneladas y 653 a la desembocadura.



6. CONCLUSIONES

Como resultado de la campaña de muestreo de la avenida controlada del 30 de enero de 2024 y del análisis numérico realizado cabe concluir lo siguiente:

1. Se estima que en los embalses se han movilizado unas 18.000 toneladas de sedimento, de las que 4.000 toneladas llegaron a Xerta y unas 650 toneladas a la desembocadura.
2. Se han llegado a registrar concentraciones de sedimentos en suspensión superiores a 500 mg/l en el embarcadero de Flix.
3. La mayor parte del sedimento ha quedado retenida en el curso bajo, mejorando el equilibrio hidromorfológico del río, aunque serán movilizadas cuando los caudales superen las condiciones críticas de inicio de arrastre.
4. La planificación de esta avenida ha sido más exitosa que la crecida del 5 de mayo de 2022. El descenso de los niveles del embalse de Ribarroja y Flix ha permitido aumentar considerablemente la aportación de sedimento en el curso bajo. Sería recomendable que en sucesivas avenidas controladas se incrementen los descensos para caracterizar la capacidad de movilización de sedimentos.
5. La estrategia de aforo de sedimentos en suspensión ha resultado más exitosa en esta ocasión permitiendo una buena calibración del modelo numérico Iber.
6. Los turbidímetros Hach son los que han mostrado una mayor consistencia en las medidas. Con estos turbidímetros es posible estimar la concentración de sedimentos en suspensión como 73% de las NTU.
7. El muestreo de arrastre de fondo no ha permitido apreciar transporte, lo que se explica por el acorazamiento del cauce. No obstante, estos muestreos no han sido suficientemente representativos por haberse realizado a 20 metros de las orillas.
8. En próximas campañas sería necesario habilitar los permisos para disponer medios mecánicos en los puentes para la toma de muestras de arrastre de fondo.
9. Se ha comprobado la capacidad de transporte de sedimentos por el canal de la margen derecha. Sería conveniente realizar una campaña de muestreo más exhaustiva en los canales en próximas avenidas.

En la realización de esta Nota Técnica han colaborado Miguel de Blas Moncalvillo, personal contratado I+D, y María Isabel Berga Cano, Directora de programas.

Dr. David López Gómez
Jefe de Área del Laboratorio de Hidráulica
Febrero de 2024

ANEXO I

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA AVENIDA CONTROLADA DEL 5 DE MAYO DE 2022

Sobre el mismo modelo explicado anteriormente se realizó la simulación de la avenida del 5 de mayo de 2022. La figura A1 muestra los hidrogramas en las secciones de control. Las figuras A2, A3 y A4, muestran la comparativa de los hidrogramas calculados con los registros de aforo con la sonda ADCP realizados y los datos del SAIH.

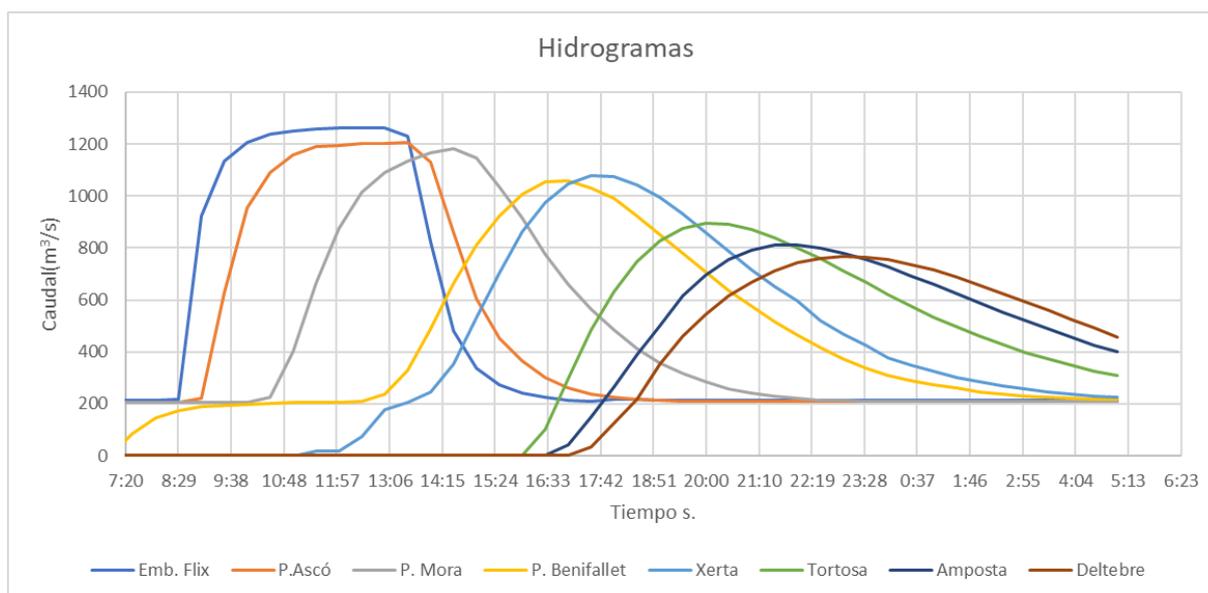


Figura A1. Hidrogramas en las secciones de control obtenidos en la simulación con Iber.

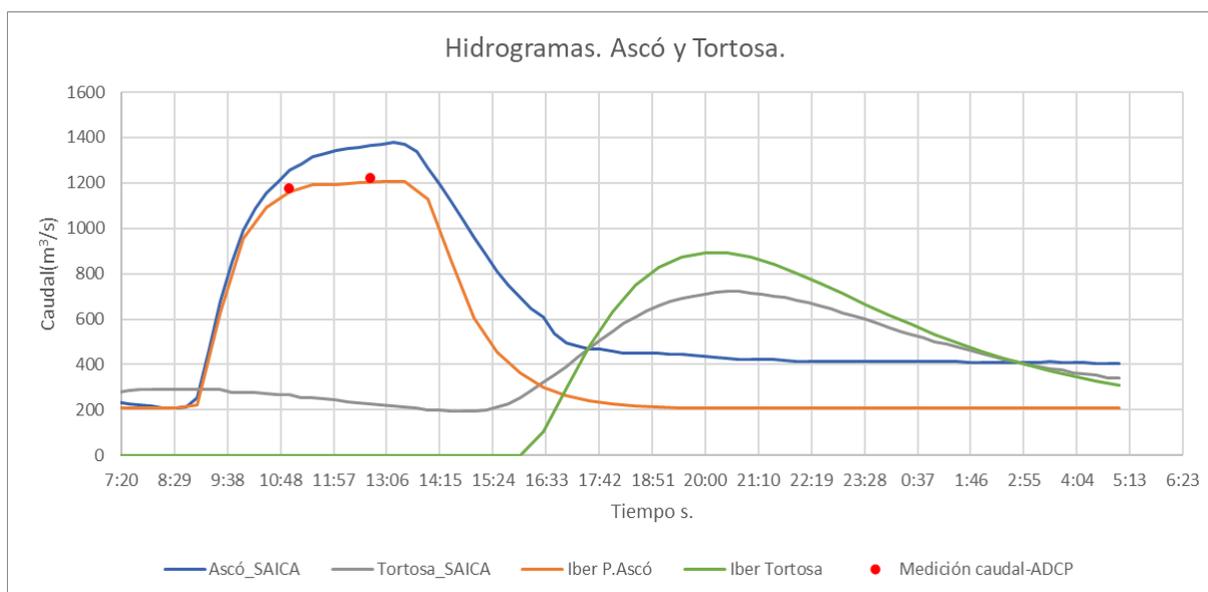


Figura A2. Comparativa de hidrogramas simulados en Ascó y Tortosa con los del SAIH. Incluye registros experimentales con sonda ADCP.

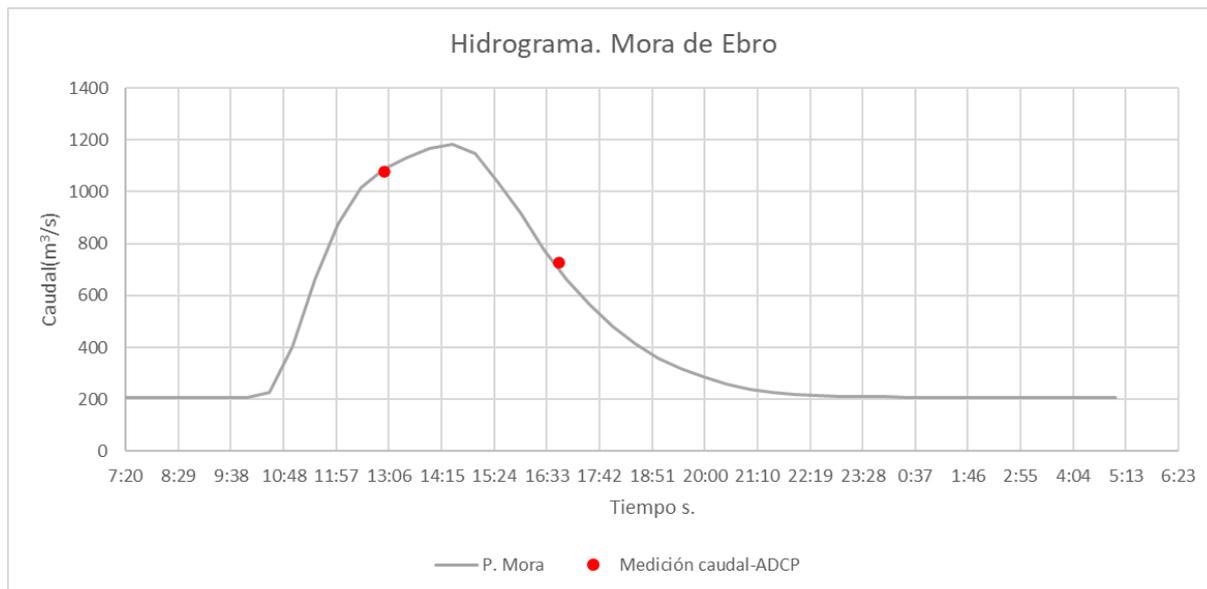


Figura A3. Comparativa del hidrograma simulado en el puente de Mora de Ebro con los registros obtenidos con sonda ADCP.

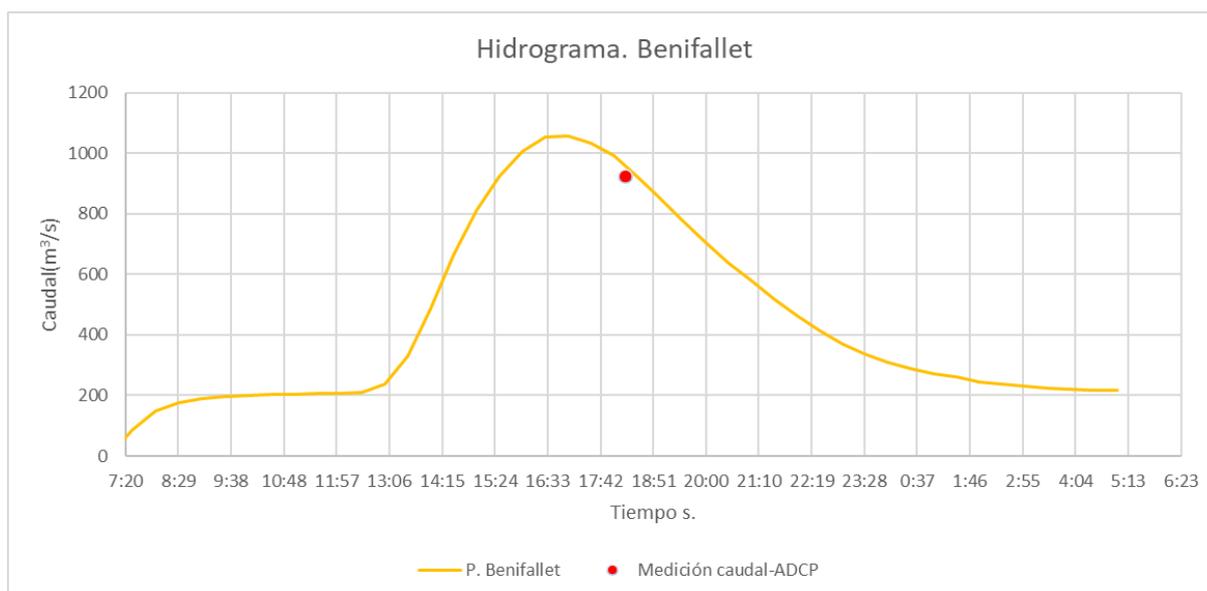


Figura A4. Comparativa del hidrograma simulado en el puente de la C-12 en Benifallet con los registros obtenidos con sonda ADCP.

Se presenta a continuación una comparativa entre los gráficos obtenidos de la evolución temporal de la concentración de SS, con los registros de turbidez obtenidos durante la campaña experimental del 5 de mayo de 2022.

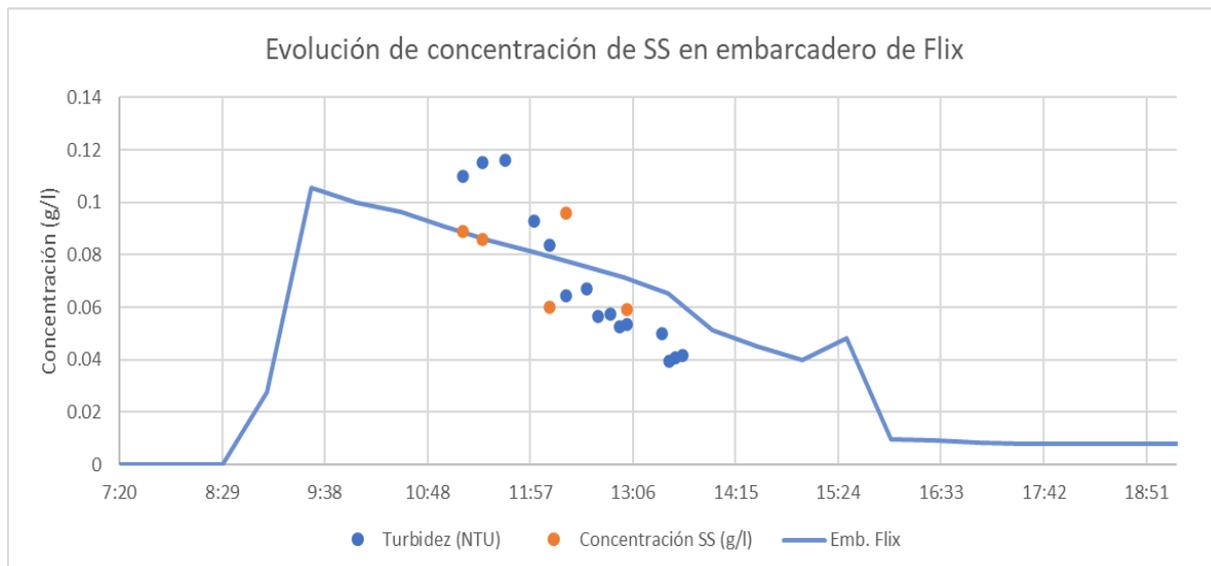


Figura A5. Comparativa de la evolución de la concentración calculada en el embarcadero de Flix con los registros de turbidez.

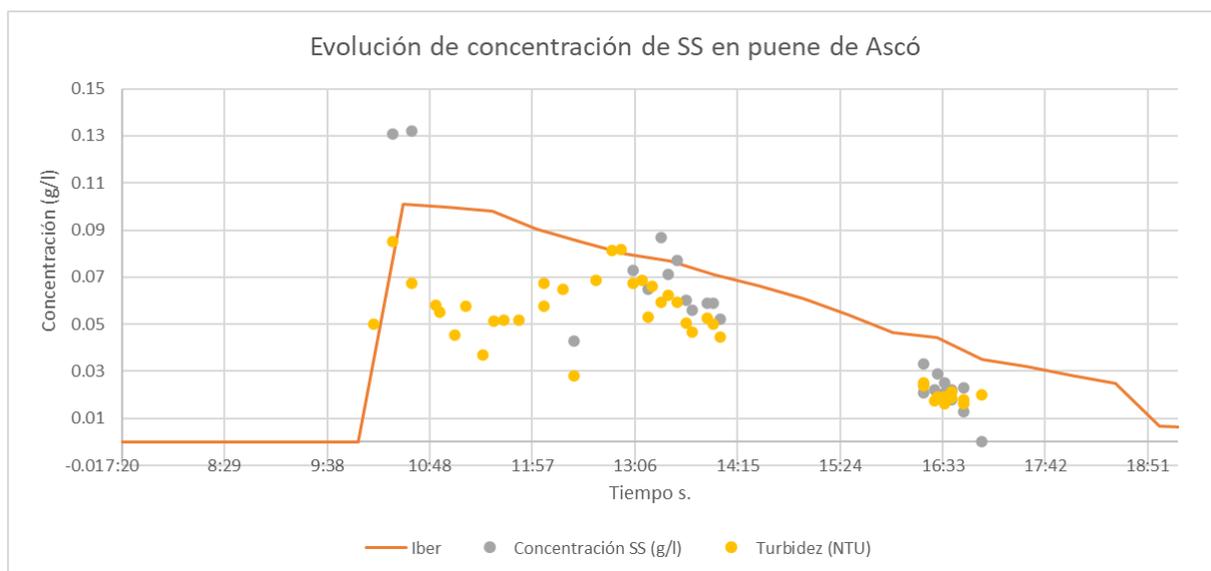


Figura A6. Comparativa de la evolución de la concentración calculada en el puente de Ascó con los registros de turbidez.

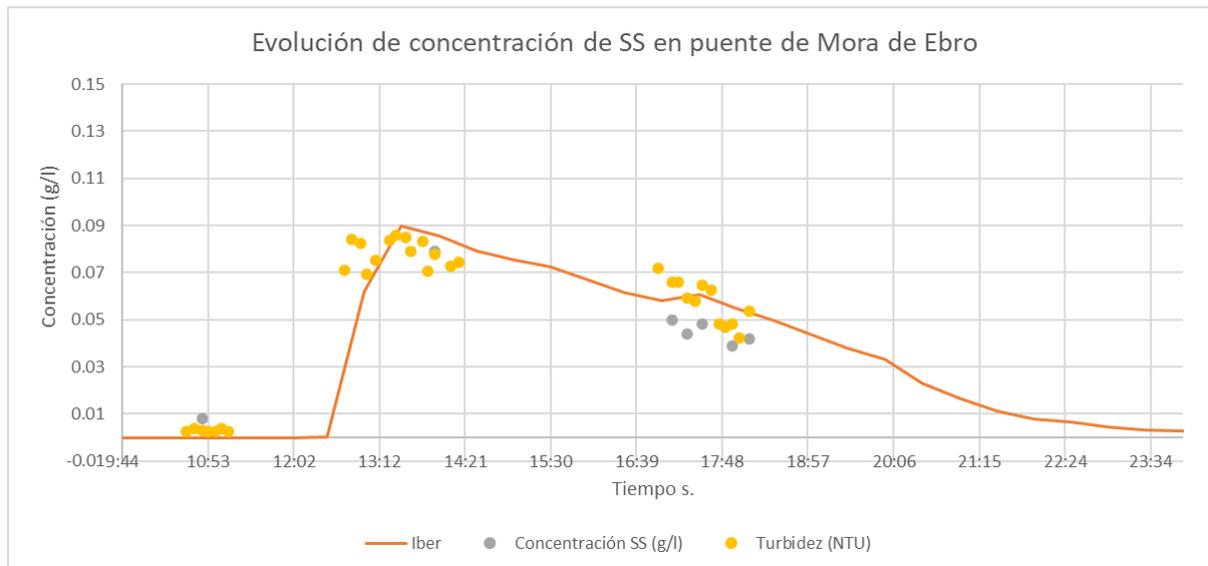


Figura A7. Comparativa de la evolución de la concentración calculada en el puente de Mora de Ebro con los registros de turbidez.

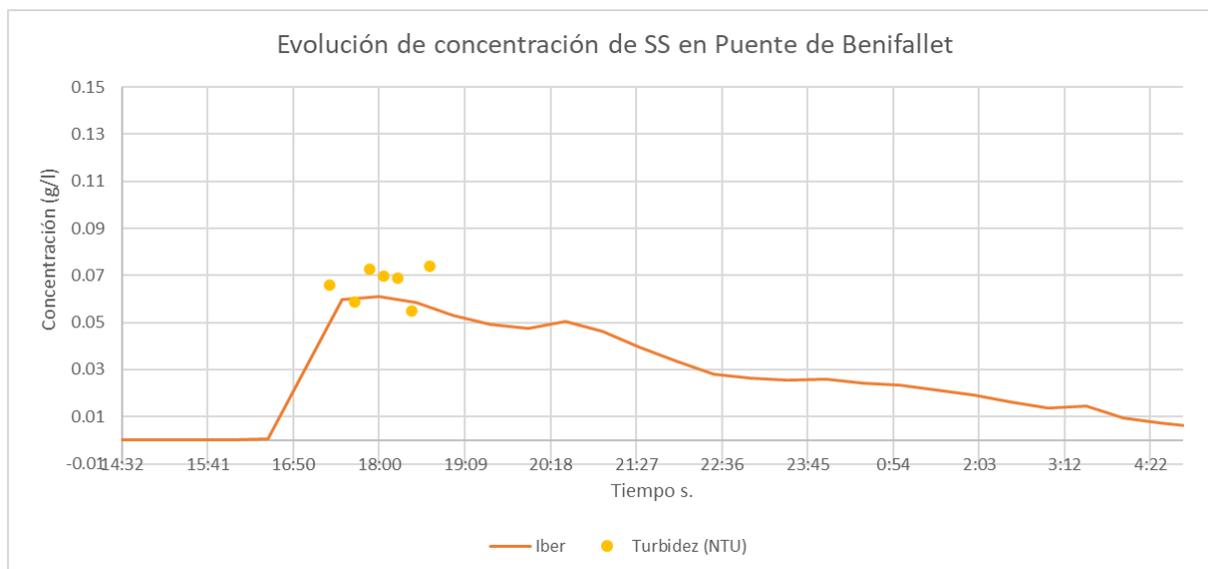


Figura A8. Comparativa de la evolución de la concentración calculada en el puente de la C12 en Benifallet con los registros de turbidez.

Finalmente, se han obtenido los solidogramas en las diferentes secciones de control que se presentan en la figura A9. De acuerdo con esto, se ha calculado el volumen y la masa de los hidrogramas. Se aprecia que por el embarcadero de Flix circularon unas 2.000 toneladas, mientras que a Xerta llegaron unas 650 toneladas.

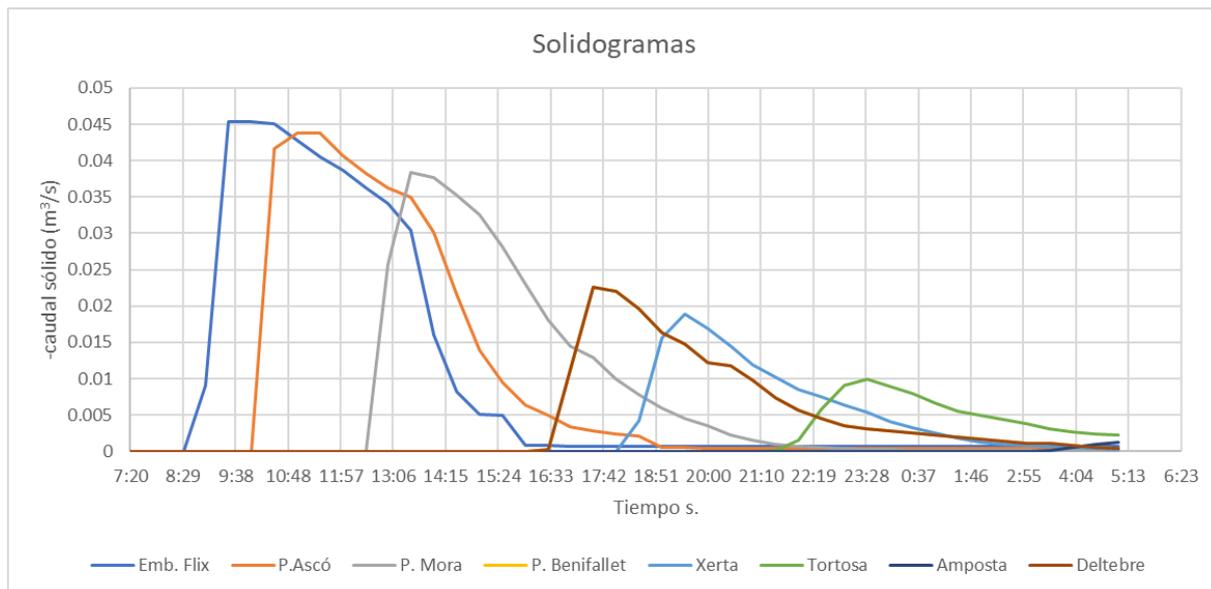


Figura A9. Solidogramas obtenidos en la simulación Iber.

Tabla A18. Volumen y masa de los solidogramas.

	Emb .Flix	Ascó	Mora	Benifallet	Xerta	Tortosa
Masa (ton)	1.999	1.832	1.455	865	651	371
Volumen(m ³)	754	692	549	326	246	140