



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE TRANSPORTES, MOVILIDAD
Y AGENDA URBANA

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 EN SUSPENSIÓN
EN EL CURSO BAJO DEL RÍO EBRO DURANTE LA
AVENIDA CONTROLADA DEL 5 DE MAYO DE 2022**

NOTA TÉCNICA

Madrid, agosto de 2022



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA.....	6
2.1. Hidrograma.....	6
2.2. Propagación del hidrograma.....	7
2.3. Secciones de control	7
2.4. Equipos de trabajo.....	12
2.5. Instrumental de medida	12
2.6. Plan de ensayos	15
3. Resultados de la campaña de muestreo.....	16
3.1. S0. Puente de Ribarroja. Muestreo durante la punta del hidrograma.....	17
3.2. S0A. Embarcadero de Flix. Muestreo durante la punta del hidrograma	18
3.3. S1. Puente de Ascó. Muestreo durante la punta del hidrograma 1	19
3.4. S1. Puente de Ascó. Muestreo durante la punta del hidrograma 2	20
3.5. S1. Puente de Ascó. Muestreo posterior a la punta del hidrograma.....	21
3.6. S2. Puente de Mora de Ebro. Muestreo previo a la punta del hidrograma	22
3.7. S2. Puente de Mora de Ebro. Muestreo durante la punta del hidrograma.....	23
3.8. S2. Puente de Mora de Ebro. Muestreo posterior a la punta del hidrograma	24
3.9. S3. Puente de Benifallet. C-12. Muestreo durante la punta del hidrograma	25
3.10. Toma de muestras del equipo 4.....	26
4. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS	27
5. CONCLUSIONES	36



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Hidrograma programado.	6
Figura 2. Planta general. Secciones de control S0, S1, S2 y S3.	8
Figura 3. Planta general. Secciones de control S3, S4, S5 y S6.	8
Figura 4. Sección de control S0. Puente de Ribarroja.....	9
Figura 5. Sección de control S1. Puente de Ascó.	9
Figura 6. Sección de control S2. Puente de Mora de Ebro N-420a.	10
Figura 7. Sección de control S3. Puente de C-12. Aguas arriba de Benifallet.	10
Figura 8. Sección de control S4. Puente de Tortosa.	11
Figura 9. Sección de control S5. Puente colgante de Amposta.	11
Figura 10. Sección de control S6. Puente Lo Passador de Deltebre.....	12
Figura 11. Turbisonda Bureau Reclamation.USB-48.	13
Figura 12. Turbidímetro.....	13
Figura 13. Torno para descenso de turbisonda.	13
Figura 14. Equipo 3 durante la toma de muestras en el puente de Mora de Ebro.....	14
Figura 15. Equipo 5 realizando un aforo líquido en el puente de Ribarroja.....	14
Figura 16. Aliviadero de la presa de Flix durante las maniobras de apertura.	16
Figura 17. S0. Puente de Ribarroja. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	17
Figura 18. S1, Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	19
Figura 19. S1. Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	20
Figura 20. S1. Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	21
Figura 21. S2. Puente de Mora de Ebro. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	22
Figura 22. S1. Puente de Mora de Ebro. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	23
Figura 23. S2. Puente de Mora de Ebro. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	24
Figura 24. S3. Puente de Benifallet. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.	25
Figura 25. S0. Puente de Ribarroja. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	27
Figura 26. S0A. Embarcadero de Flix. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	27



Figura 27. S1. Puente de Ascó. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	28
Figura 28. S1. Puente de Ascó. Variación de la turbidez con la profundidad, relación ente la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	28
Figura 29. S1. Puente de Ascó. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	28
Figura 30. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	29
Figura 31. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	29
Figura 32. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	30
Figura 33. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.	30
Figura 34. Relación de turbidez y concentración de SS con todos los datos.	32
Figura 35. Relación de turbidez y concentración de SS con todos los datos, discriminando el tipo de turbidímetro.	32
Figura 36. Relación entre la turbidez y la concentración de SS con todos los datos, discriminando el tipo de turbidímetro y eliminando los datos anómalos.	33
Figura 37. Hidrograma y registro de turbidez en Ascó.	34
Figura 38. Hidrograma y registro de turbidez en Tortosa.	35



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Secciones de control.	7
Tabla 2. Plan de ensayos.	15
Tabla 3. S0. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	17
Tabla 4. S0A. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	18
Tabla 5. S1. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	19
Tabla 6. S1. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	20
Tabla 7. S1. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	21
Tabla 8. S2. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	22
Tabla 9. S2. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	23
Tabla 10. S2. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	24
Tabla 11. S4. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.	25
Tabla 12. S3, S5 y S6. Muestreo realizado por el equipo 4 (UV).	26
Tabla 13. Relación de muestras analizadas con datos de turbidez, concentración y oxidabilidad.	31
Tabla 14. Concentración media en los puntos de control.	35



1. INTRODUCCIÓN

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.

Actualmente no se dispone de datos suficientes para determinar con precisión el transporte de sedimento en el curso bajo. Existen tres estaciones de medida de turbidez en activo en el tramo. Una en Flix explotada por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA) y otras dos de la red del Sistema Automático de Información de Calidad de las Aguas (SAICA) en Ascó y en Xerta. Existe otra en Amposta, pero fuera de servicio. Para poder estimar el transporte de sedimento en suspensión (SS) a partir de los registros de turbidez es necesario comprobar la correlación de estos registros con valores de concentración medidos en campo. Esta correlación hay que contrastarla para una amplia gama de caudales sólidos, pues la calibración de los sensores de turbidez se realiza para un rango de NTU (Nephelometric Turbidity Unit), fuera del cual deja de medir correctamente. Por otro lado, los sensores de turbidez suelen dejar de medir durante las avenidas que es cuando se produce la mayor parte del transporte de sedimentos. Por esto, se están tratando de buscar otras técnicas que permitan medir durante estos episodios. Una alternativa es el empleo de técnicas de teledetección, calibrando fotografías de satélite con datos de campo. De esta forma es posible asignar a los diferentes patrones de la imagen satélite una concentración de sedimento en suspensión.

La Confederación Hidrográfica del Ebro en coordinación con Endesa Generación, SA, titular de la presa de Flix, realizan dos avenidas controladas, una en primavera y otra en otoño, desde el embalse 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 realizar una campaña de muestreo de sedimento en suspensión durante la avenida controlada de primavera de 2022, que permita calibrar los registros de las estaciones de turbidez. Así mismo, se programó la campaña para el 5 de mayo coincidiendo con el paso del satélite Sentinel-2 por la zona de estudio.

Además de la CHE y del CEDEX, en esta campaña ha colaborado 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 la presente nota técnica se presentan los resultados de la campaña de muestreo, así como las conclusiones más relevantes obtenidas.

2. PLANIFICACIÓN DE LA CAMPAÑA

Con el fin de coordinar todos los equipos de trabajo y obtener el máximo rendimiento de la campaña se realizó la siguiente planificación.

2.1. Hidrograma

La avenida controlada se programó para el día 5 de mayo de 2022 haciéndola coincidir con el paso del satélite Sentinel-2. La figura 1 muestra el hidrograma de salida de la presa de Flix. La avenida se diseñó para que alcanzara una punta de 1200 m³/s a las 8:40 am y se mantuviera durante casi 5 horas con una duración de una hora tanto de la rama ascendente como la descendiente.

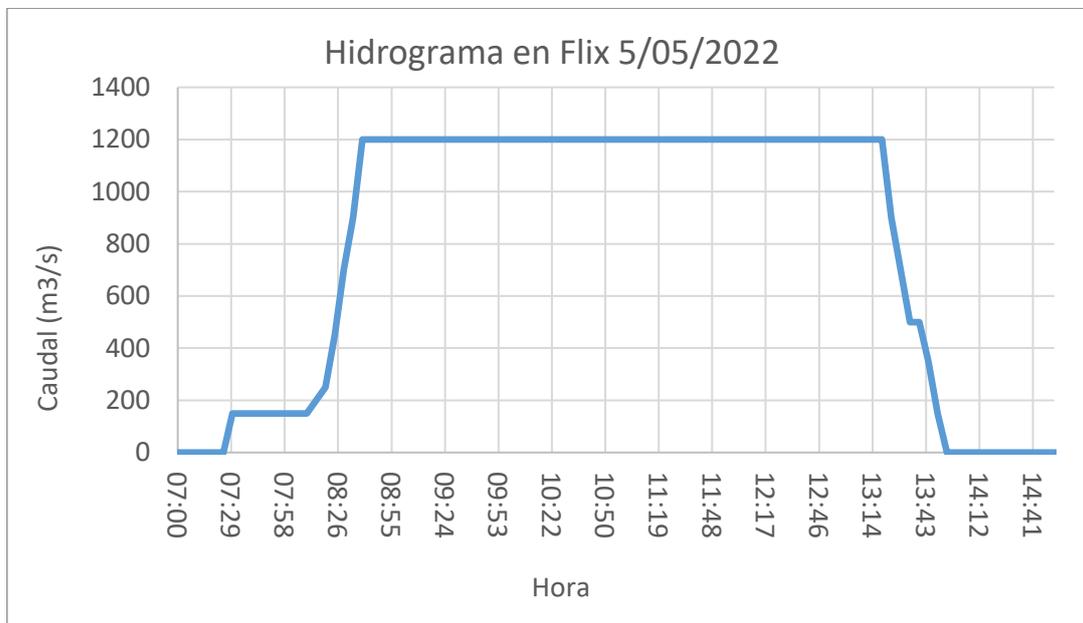


Figura 1. Hidrograma programado.



2.2. Propagación del hidrograma

Se dispone de los registros del SAICA de la avenida del mes de noviembre de 2021, que también tuvo una punta de 1200 m³/s. Esto ha permitido estimar, con bastante precisión, la velocidad de propagación del hidrograma a lo largo del curso bajo y programar las horas más adecuadas para la toma de las muestras.

La tabla 1 indica la previsión de la hora de paso del frente de onda de avenida a los diferentes puntos de control del curso bajo.

Tabla 1. Secciones de control.

Localización	Sección control	Distancia a presa de Flix (m)	Hora
Puente de Ribarroja	S0	-8590	8:30
Presa de Flix		0	8:30
Embarcadero de Flix		4800	9:30
Azud de Ascó		10200	10:30
Puente de Ascó	S1	12000	10:40
Puente de Mora de Ebro N-420a	S2	27000	12:30
Puente de C-12	S3	49650	15:50
Azud de Xerta		58400	17:00
Puente de Tortosa	S4	74300	19:00
Puente de Amposta	S5	89100	21:00
Puente Lo Passador de Deltebre	S6	101500	22:30

2.3. Secciones de control

Las secciones de control han sido ubicadas en puentes desde los que se pueden realizar los trabajos de muestreo con seguridad, en lugares que permitan caracterizar el evento con la mayor representatividad. Con este criterio se han seleccionado los 7 puntos de control identificados en la tabla 1 y en las figuras 2 y 3.

Las figuras 4 a 10 muestran la ubicación exacta de cada uno de los puentes, y unas imágenes de estos para facilitar su localización. Asimismo, se incluyen imágenes de las aceras y barandillas desde donde se pueden realizar las labores de muestreo.

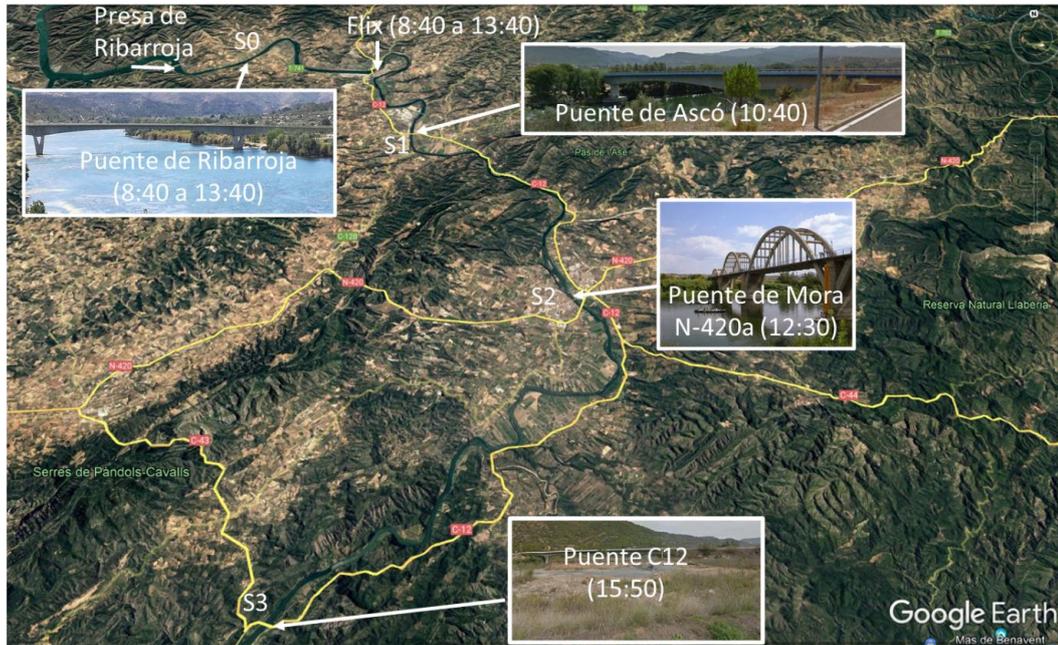


Figura 2. Planta general. Secciones de control S0, S1, S2 y S3.



Figura 3. Planta general. Secciones de control S3, S4, S5 y S6.



Figura 4. Sección de control S0. Puente de Ribarroja.

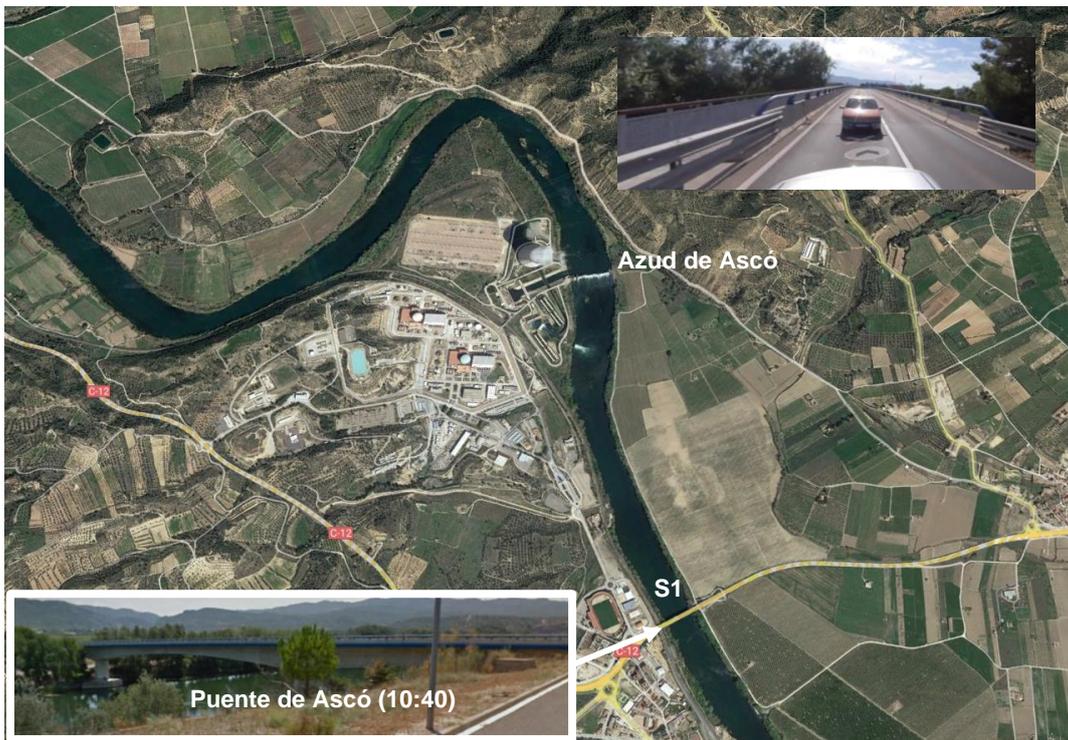


Figura 5. Sección de control S1. Puente de Ascó.

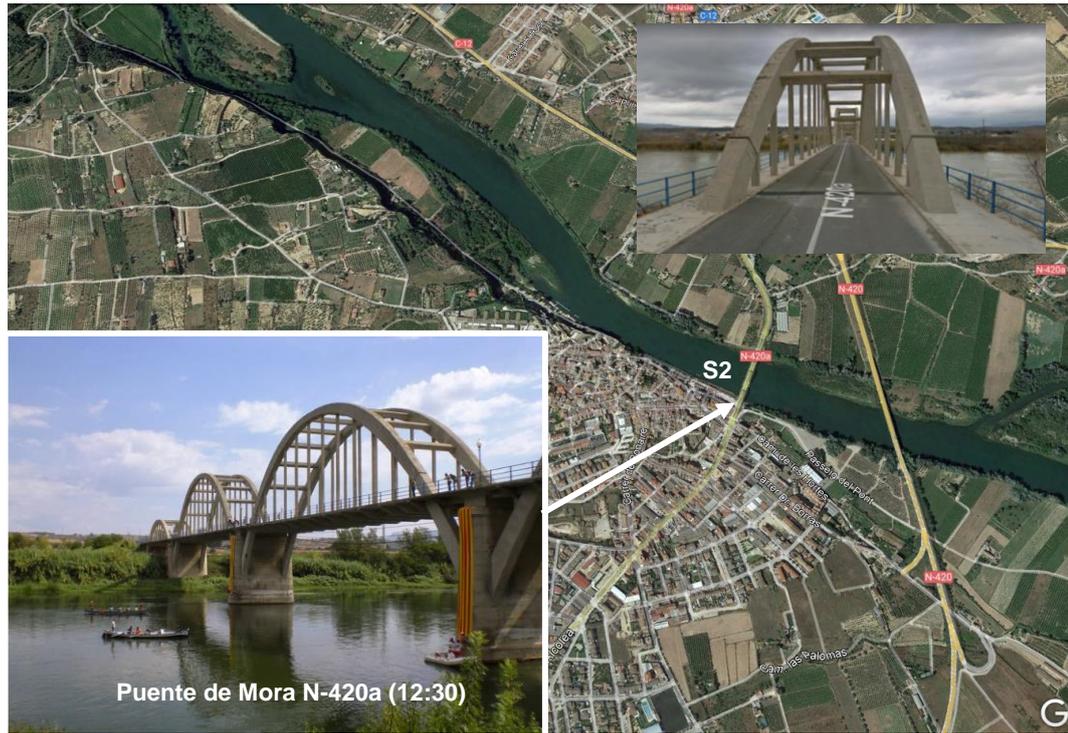


Figura 6. Sección de control S2. Puente de Mora de Ebro N-420a.



Figura 7. Sección de control S3. Puente de C-12. Aguas arriba de Benifallet.



Figura 8. Sección de control S4. Puente de Tortosa.



Figura 9. Sección de control S5. Puente colgante de Amposta.



Figura 10. Sección de control S6. Puente Lo Passador de Deltebre.

2.4. Equipos de trabajo

Se han constituido 6 equipos de trabajo con las siguientes funciones:

- Equipo 1 (CEDEX): toma de muestras de SS.
- Equipo 2 (UPC): toma de muestras de SS.
- Equipo 3 (CHE): toma de muestras de SS.
- Equipo 4 (UV): toma de muestras de SS.
- Equipo 5 (CHE): aforo líquido con Doppler (2 grupos).
- Equipo 6 (CHE): grabación de video con dron.

2.5. Instrumental de medida

La toma de muestras de SS se realizó con turbisonda (figura 11) montada sobre torno (figura 13), con escala o contador de vueltas, que permite saber la longitud de cable desenrollado con el fin de medir la profundidad del punto de muestreo. Todas las muestras se analizaron con turbidímetro (figura 12) y se seleccionan algunas para su análisis en laboratorio. Los turbidímetros empleados estaban calibrados para un rango de 0 a 1000 NTU.

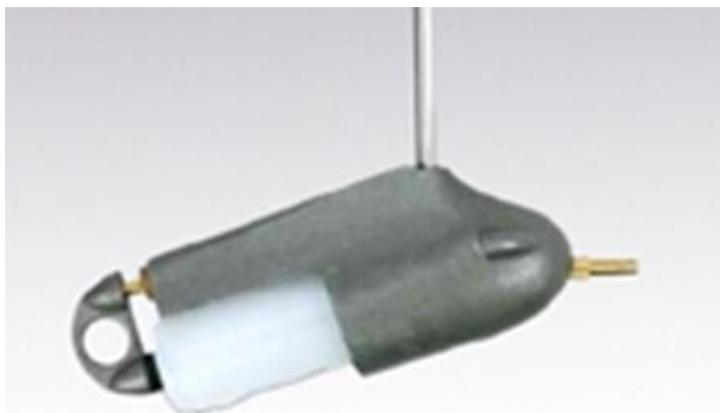


Figura 11. Turbisonda Bureau Reclamation.USB-48.



Figura 12. Turbidímetro.

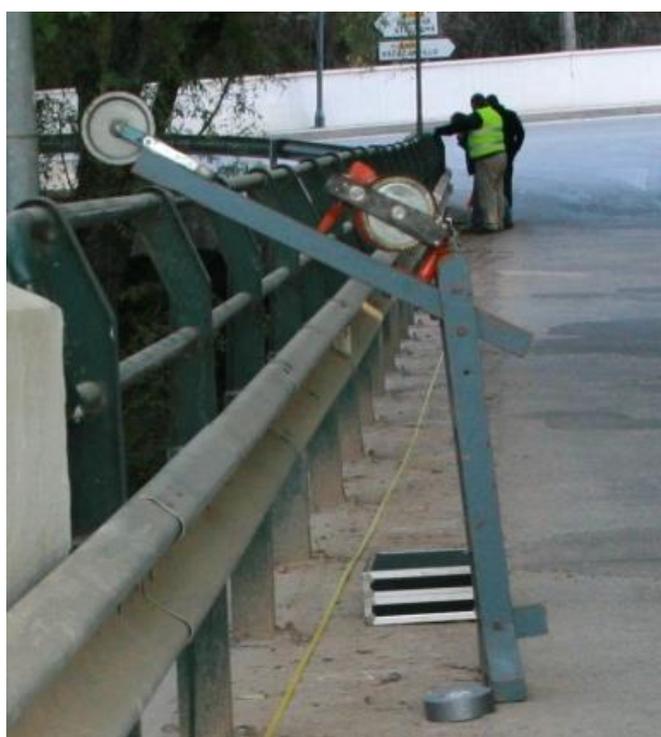


Figura 13. Torno para descenso de turbisonda.



Figura 14. Equipo 3 durante la toma de muestras en el puente de Mora de Ebro.

El equipo 4 que tomó muestras en la zona de la desembocadura con botella oceanográfica, mientras que el equipo 5 realizó aforos líquidos con sonda Doppler (figura 15). Esto permite, por un lado, contrastar el avance del frente de avenida y por otro, caracterizar el flujo hidrodinámico transversal de las secciones de muestreo de SS para poder calcular correctamente el caudal sólido en dichas secciones. Por esta razón, se han hecho coincidir los aforos realizados por el equipo 5 con los de los equipos de muestreo de sedimentos. Finalmente, el equipo 6 empleó el dron de la CHE para registrar los trabajos realizados (video 1).



Figura 15. Equipo 5 realizando un aforo líquido en el puente de Ribarroja.



2.6. Plan de ensayos

La tabla adjunta resume el plan de trabajo propuesto para el día 5 de mayo de los diferentes equipos.

Tabla 2. Plan de ensayos.

	Sección control	Punta	HORARIO DE MUESTREO								
S0	Puente de Ribarroja	8:30	9:00	11:00	12:40					Equipo 1	CEDEX
S1	Puente de Ascó	10:40	9:00	11:00	12:40	16:30				Equipo 2	UPC
S2	Puente de Mora de Ebro N-420a	12:30		11:00	12:40	16:30	18:00			Equipo 3	CHE
S3	Puente de C-12	15:50				16:30	18:00	20:00		Equipo 1	CEDEX
S4	Puente de Tortosa	19:00						20:00		Equipo 2	UPC
S5	Puente de Amposta	21:00			12:40	16:30		20:00	22:00	Equipo 4	UV
S6	Puente de Lo Passador de Deltebre	22:30					18:00			Equipo 4	UV

- Equipo 1 (CEDEX): Muestrea en S0 tres veces y otras tres en la S3.
- Equipo 2 (UPC): Muestrea en S1 cuatro veces y otra en la S4.
- Equipo 3 (CHE): Muestrea en S2 cuatro veces.
- Equipo 4 (UV): Muestrea en S5 y S6.
- Equipo 5 (CHE): Los dos equipos de aforo Doppler aforan simultáneamente en secciones consecutivas. Las horas de muestreo están marcadas en rojo.
- Equipo 6 (CHE): Grabación con dron aéreo. Tiene un funcionamiento autónomo del resto de los equipos.

Las celdas blancas indican que la onda de avenida no ha llegado a la hora del aforo. Las celdas de color marrón más oscuro indican que la onda de avenida está en el máximo. Las celdas de color marrón más claro indican que la onda de avenida ya ha pasado y está en rama descendente.

La tarde del 4 de mayo del 2022 se realizó una puesta en común de los procedimientos de medida entre los equipos de muestreo con el fin de garantizar la homogeneidad en la toma de muestras.

3. Resultados de la campaña de muestreo

La campaña de muestreo se ajustó bastante bien al plan previsto. La figura 16 muestra el aliviadero de la presa de Ribarroja en la fase inicial del hidrograma. Aunque desde el embalse de Flix se suministró el hidrograma planeado, el nivel del embalse de Flix no se vio prácticamente alterado, pues desde aguas arriba se suministraba el mismo caudal. Esto tiene la ventaja de no generar molestias a pescadores y otros usuarios del embalse, sin embargo, tiene el inconveniente de no movilizar apenas sedimento desde el propio embalse de Flix.

Por esta razón, y al comprobar los bajos niveles de turbidez del agua en el puente de Ribarroja, que cruza el embalse de Flix, se decidió sustituir el punto de medida S0, por el punto S0A, en el embarcadero de Flix aguas abajo del meandro de Flix.



Figura 16. Aliviadero de la presa de Ribarroja durante las maniobras de apertura.

Siendo tan reducido el aporte de sedimento desde el embalse de Flix, el material sedimentario movilizado en esta avenida es exclusivamente el existente en el curso bajo, que no resultó ser mucho por el arrastre que habían generado las avenidas de primeros de año.

3.1. S0. Puente de Ribarroja. Muestreo durante la punta del hidrograma

Tabla 3. S0. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: S0. Puente de Ribarroja		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	8:52	P1	0.5	41.9	
2	9:10	P1	2.8	32	
3	9:30	P4	3.9	24	67
4	9:40	P4	0.5	21	
5	9:55	P3	0.5	13.9	
6	10:04	P3	5	12.6	
7	10:24	P2	0.5	13.3	19
8	10:40	P2	6	14.7	13

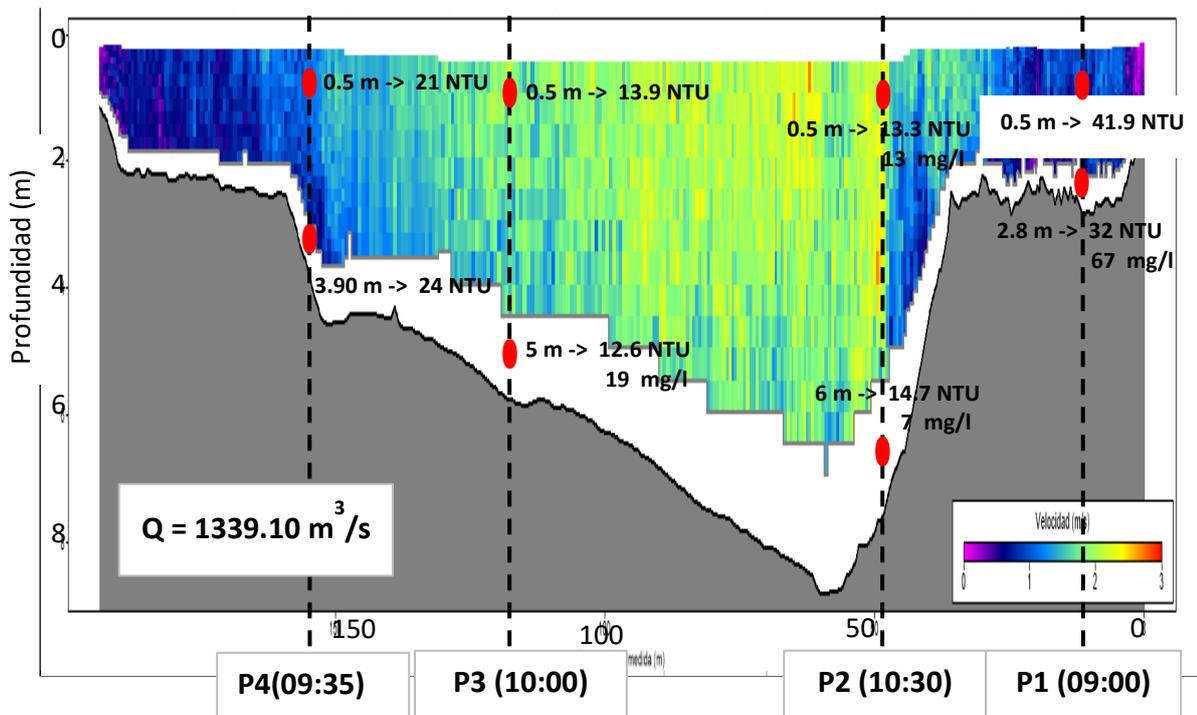


Figura 17. S0. Puente de Ribarroja. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.



3.2. S0A. Embarcadero de Flix. Muestreo durante la punta del hidrograma

Tabla 4. S0A. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Embarcadero de Flix		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	11:12	P2	0.2	110	89
2	11:25	P2	?	115	86
3	11:40	P1	5	116	
4	12:00	P3	0.2	93	
5	12:10	P3	6	83.7	60
6	12:21	P4	0.2	64.4	96
7	12:35	P4	4	66.8	
8					
9	12:43	P3	0.2	56.5	
10	12:51	P3	6	57.4	
11	12:57	P4	0.4	52.6	
12	13:02	P4	3.8	53.3	59
13	13:26	P2	0.3	50	
14	13:31	P2	5	39.5	
15	13:35	P1	0.5	40.9	
16	13:40	P1	6	41.6	

En este perfil no fue posible realizar un aforo líquido pues la elevada velocidad del agua no permite maniobrar la barcaza que cruza el río.

3.3. S1. Puente de Ascó. Muestreo durante la punta del hidrograma 1

Tabla 5. S1. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Puente de Ascó		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	10:10	58	1	50	209
2	10:23	58	3	85	131
3	10:36	58	5	67.5	132
4	10:52	73	1	58.125	
5	10:55	73	3	55	
6	11:05	73	5	45.625	
7	11:12	43	1	57.5	
8	11:17	43	3	57.5	
9	11:24	43	5	36.875	
10	11:31	28	1	51.25	
11	11:38	28	3	51.875	
12	11:48	28	5	51.875	
13	12:05	88	1	57.5	
14	12:05	88	3	67.5	
15	12:18	88	5	65	
16	12:25	-8	0	28.125	43

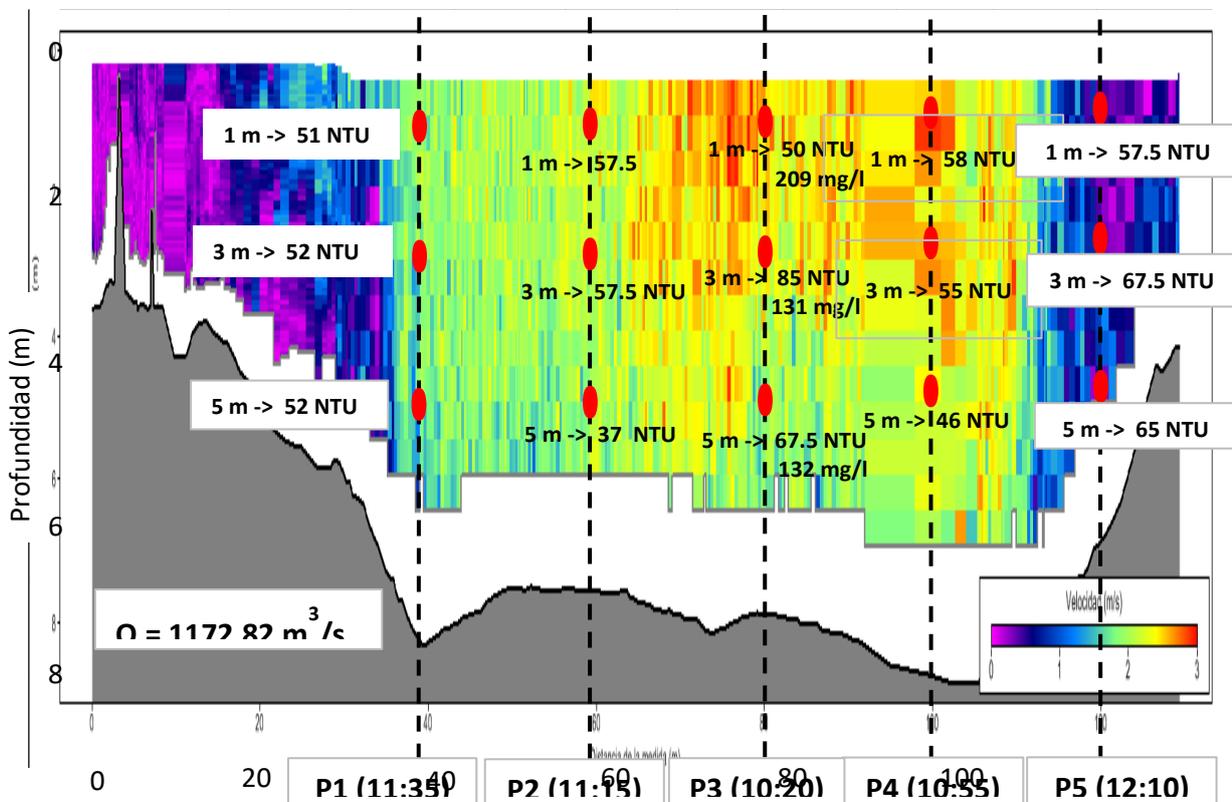


Figura 18. S1, Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

3.4. S1. Puente de Ascó. Muestreo durante la punta del hidrograma 2

Tabla 6. S1. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Puente de Ascó		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	12:40	58	1	68.75	
2	12:51	58	3	81.25	
3	12:57	58	5	81.875	
4	13:05	73	1	67.5	73
5	13:11	73	3	68.75	
6	13:18	73	5	66.25	
7	13:24	88	1	59.375	87
8	13:29	88	3	62.5	71
9	13:35	88	5	59.375	77
10	13:41	43	1	50.625	60
11	13:45	43	3	46.875	56
12	13:15	43	5	53.125	65
13	13:55	28	1	52.5	59
14	13:59	28	3	50	59
15	14:04	28	5	44.375	52

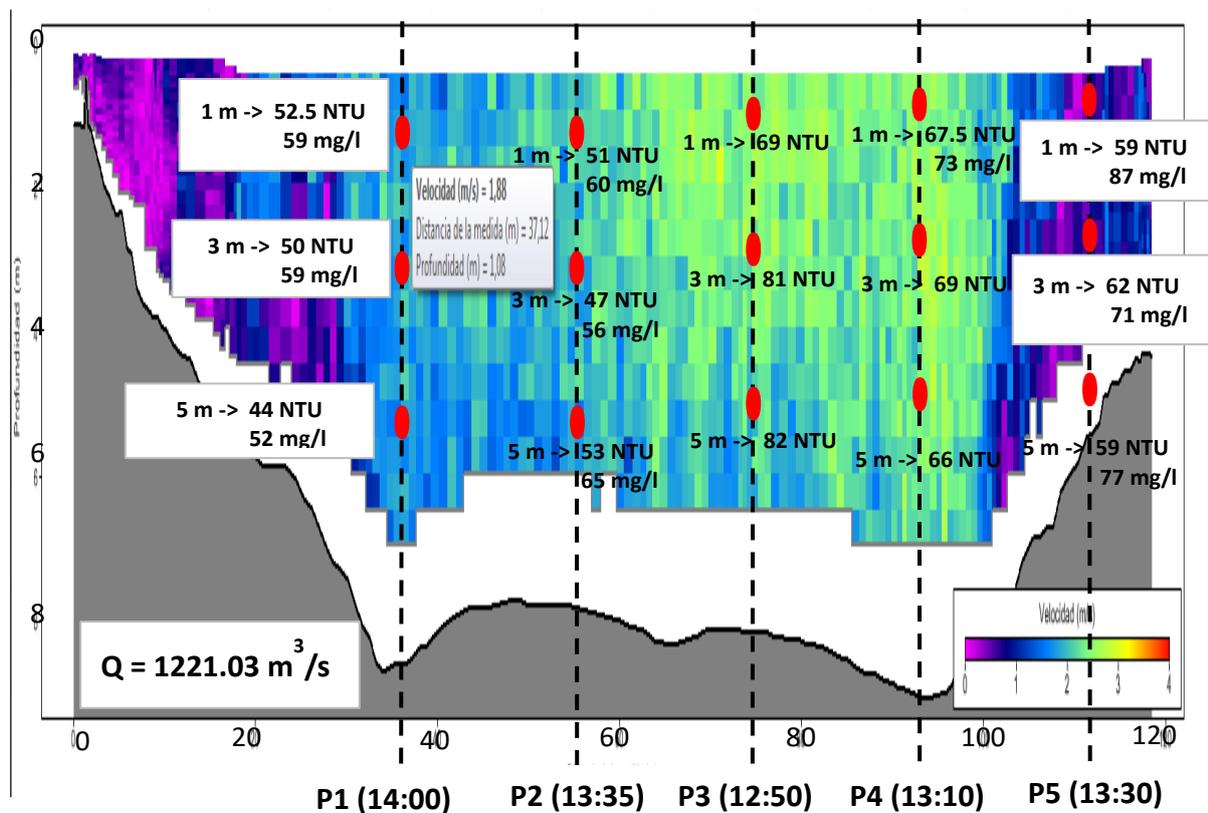


Figura 19. S1. Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

3.5. S1. Puente de Ascó. Muestreo posterior a la punta del hidrograma

Tabla 7. S1. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

MUESTRAS DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN			Sección de control: Puente Ascó		
Nº muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración Sedimentos (mg/l)
1	16:21	88	0	23.75	21
2	16:21	88	1	25	33
3	16:28	73	0	17.5	22
4	16:30	73	1	19.375	29
5	16:35	58	0	19.375	21
6	16:35	58	1	16.25	25
7	16:40	43	0	21.25	18
8	16:40	43	1	18.75	22
9	16:48	28	0	18.125	13
10	16:48	28	1	16.25	23
11	17:00	-2	0	20	

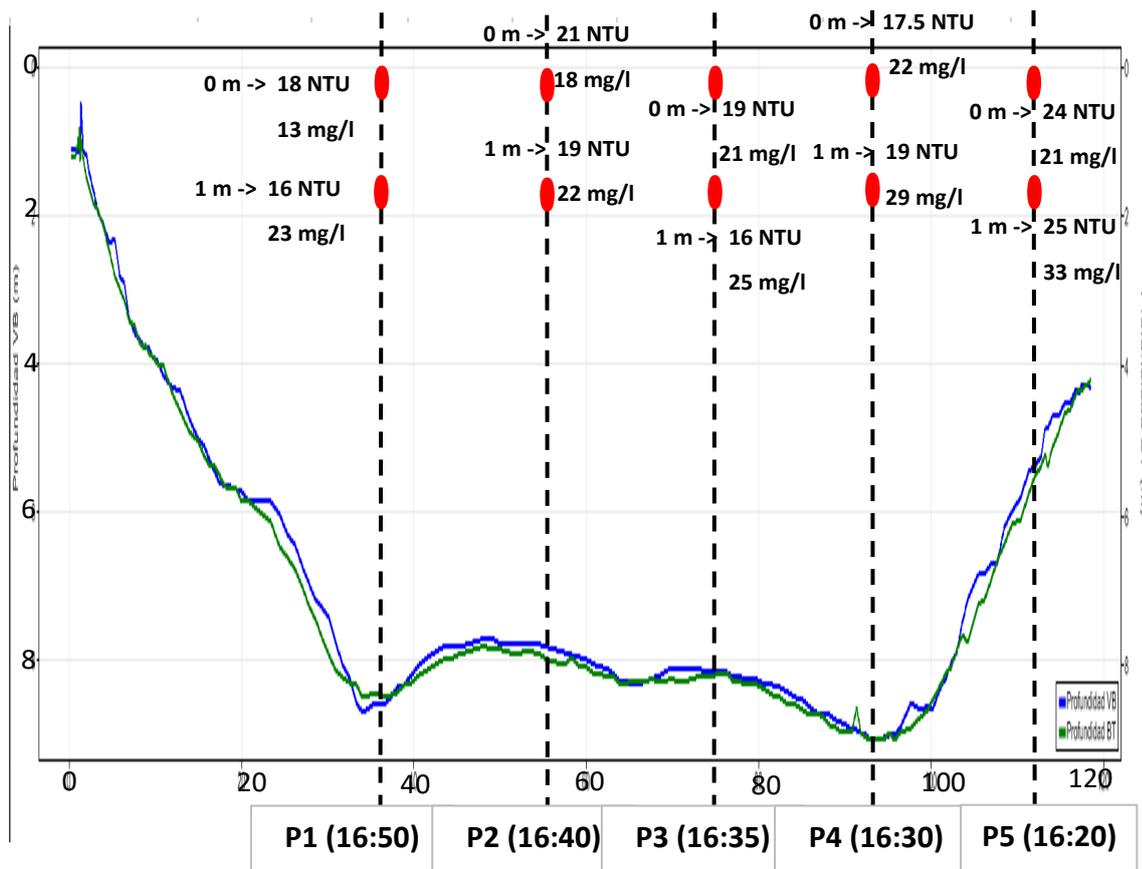


Figura 20. S1. Puente de Ascó. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

3.6. S2. Puente de Mora de Ebro. Muestreo previo a la punta del hidrograma

Tabla 8. S2. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Mora de Ebro		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	10:36	P4	2	2.65	
2	10:43	P4	1	3.8	
3	10:49	P3	3	2.78	8
4	10:54	P3	1	2.43	
5	11:00	P2	3	2.69	
6	11:05	P2	1	3.89	
7	11:10	P1	3	2.39	
8	11:15	P1	1	4.33	

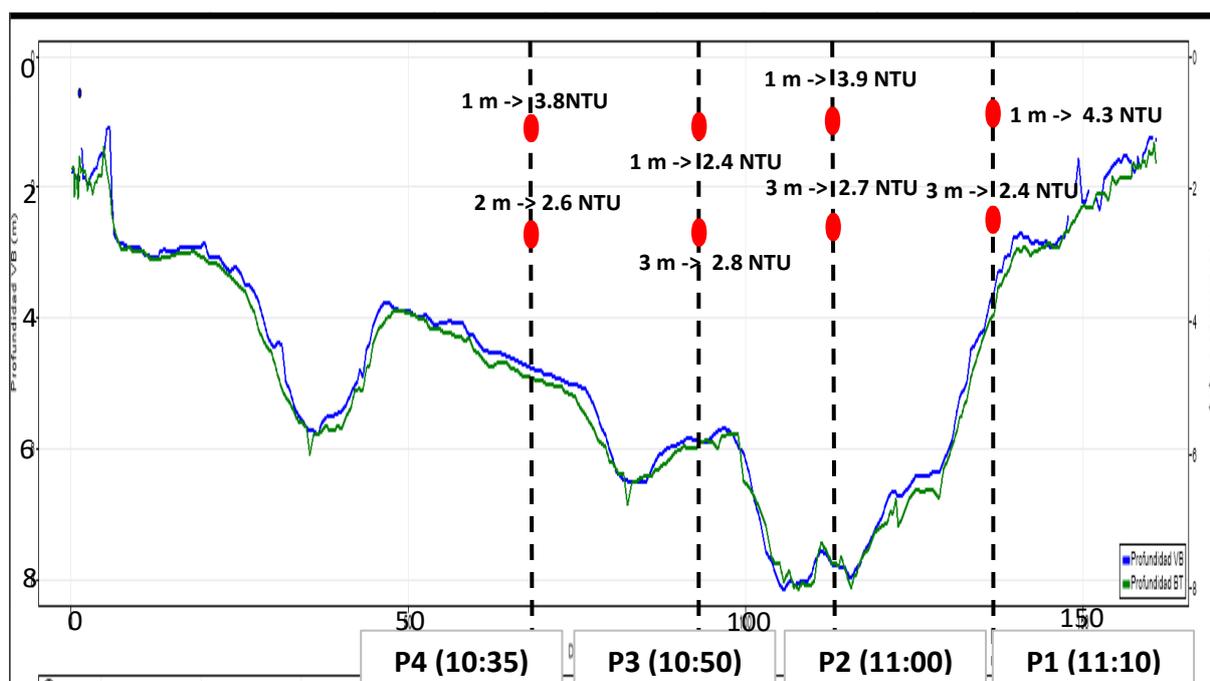


Figura 21. S2. Puente de Mora de Ebro. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

3.7. S2. Puente de Mora de Ebro. Muestreo durante la punta del hidrograma

Tabla 9. S2. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Mora de Ebro		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	12:44	P1	5	71.2	
2	12:50	P1	3	84.2	85
3	12:57	P1	1	82.4	
4	13:02	P2	5	69.3	
5	13:09	P2	1	75.3	
6	13:20	P2	3	83.8	79
7	13:25	P3	5	85.8	87
8	13:33	P3	3	84.9	
9	13:37	P3	1	79.2	
10	13:47	P4	5	83.2	
11	13:51	P4	3	70.7	67
12	13:57	P4	1	77.7	79
13	14:10	P5	3	72.6	
14	14:16	P5	1	74.3	64

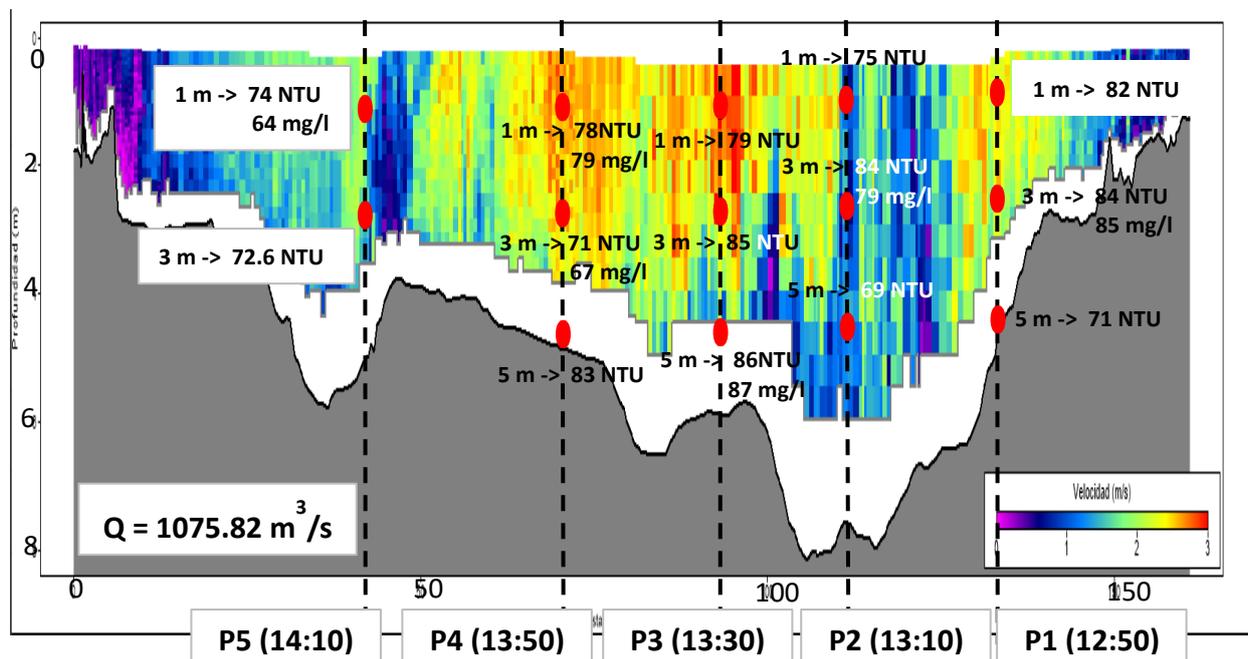


Figura 22. S1. Puente de Mora de Ebro. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

3.8. S2. Puente de Mora de Ebro. Muestreo posterior a la punta del hidrograma

Tabla 10. S2. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Mora de Ebro		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	16:57	P1	5	71.9	
2	17:08	P1	3	65.9	50
3	17:13	P1	1	66	
4	17:20	P2	5	59.2	44
5	17:27	P2	3	58	
6	17:32	P2	1	64.6	48
7	17:40	P3	5	62.6	
8	17:46	P3	3	48.1	
9	17:51	P3	1	47.1	47
10	17:57	P4	3	48.1	39
11	18:02	P4	1	42.3	
12	18:10	P5	1	53.5	42

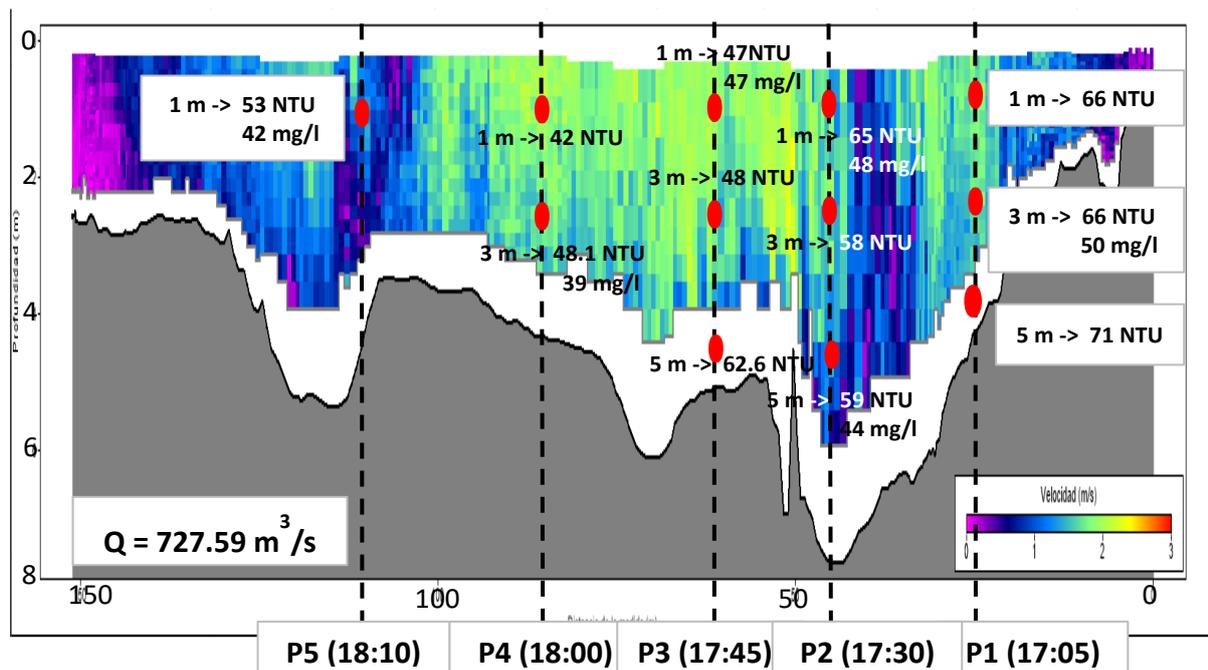


Figura 23. S2. Puente de Mora de Ebro. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.

3.9. S3. Puente de Benifallet. C-12. Muestreo durante la punta del hidrograma

Tabla 11. S4. Puntos de muestreo, turbidez y concentración de SS.

Muestras de sedimento en suspensión			Sección de control: Puente C-12		
N.º muestra	Hora	Posición (x)	Profundidad (z)	Turbidez (NTU)	Concentración SS (mg/l)
1	17:20	P1	0.5	65.8	74
2	17:40	P1	0.5	58.7	
3	17:52	P1	5	72.8	
4	18:04	P2	0.5	69.7	69
5	18:15	P2	8	68.7	91
6	18:26	P3	0.5	54.8	
7	18:41	P3	5.6	73.8	58

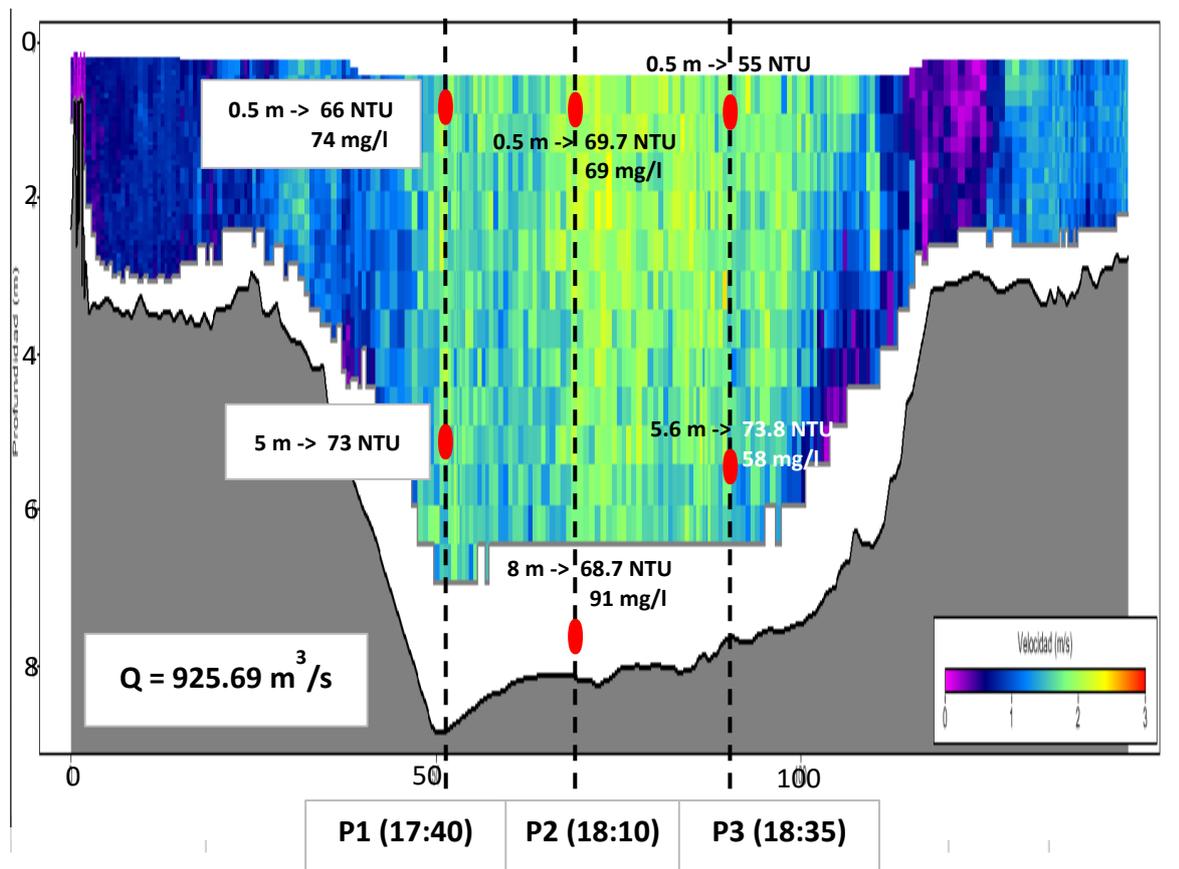


Figura 24. S3. Puente de Benifallet. Campo de velocidad, turbidez y concentración en los puntos de muestreo.



3.10. Toma de muestras del equipo 4

El equipo de la Universidad de Valencia se ubicó en la parte final del cauce, desde la desembocadura a hasta el puente de Benifallet. En la carretera C-12 donde tomaron una serie de muestras de contraste, la mayoría previas a la llegada de la onda de la avenida, excepto la realizada cuando la punta del hidrograma llegó al puente de Benifallet. La tabla 11 se resumen los registros obtenidos. Se aprecia que el contenido en materia orgánica varía entre el 13 y 20 %.

Tabla 12. S3, S5 y S6. Muestreo realizado por el equipo 4 (UV).

Sección de control	Descripción	Concentración SS (mg/l)	Concentración materia orgánica (LOI) (mg/l)	Materia orgánica (%)
S6	Deltebre Margen Derecha	3.1	0.54	17.4
S6	Deltebre Margen Izquierda	4.605	0.735	16.0
S5	Amposta Margen Derecha	3.035	0.63	20.8
S5	Amposta Margen Izquierda	3.01	0.575	19.1
S3	Puente C12-Centrado	64.5	8.8	13.6

Nota: Para estimar la materia orgánica se ha utilizado el método de pérdida de peso por ignición (LOI - Loss On Ignition).

4. ANÁLISIS DE LOS REGISTROS OBTENIDOS

El perfil obtenido en el puente de Ribarroja, en el embalse de Flix, durante la punta de la avenida, con un caudal superior a 1300 m³/s, muestra niveles de concentración bastante bajos. La figura 25 analiza los registros obtenidos. No se aprecia dependencia de la turbidez con la profundidad, al contrario que con la concentración donde se aprecia una relación lineal. A pesar de que todo el perfil se obtuvo durante la punta del hidrograma, se aprecia una evolución descendente de la turbidez con el tiempo. Es probable que durante las maniobras de apertura generase algún transitorio que movilizara sedimento en el embalse de Flix, pero al estabilizarse el nivel de embalse, va descendiendo la turbidez y con esta el transporte de sedimentos en el embalse.

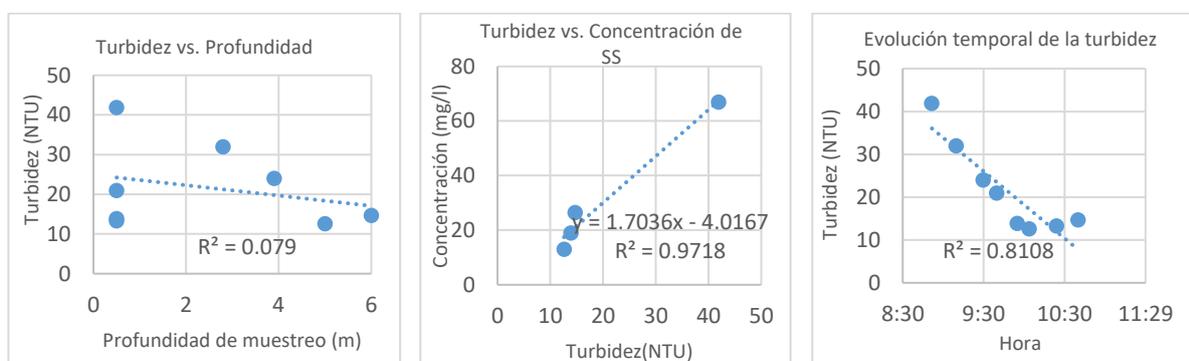


Figura 25. S0. Puente de Ribarroja. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

La figura 26 corresponde al muestreo del embarcadero. La primera parte de este muestreo se realizó durante la punta del hidrograma y el resto en fase descendente. Esto explica la reducción de la concentración a lo largo del tiempo. No se aprecia en estos registros dependencia de la turbidez con la profundidad. Tampoco se aprecia una clara dependencia con la concentración.

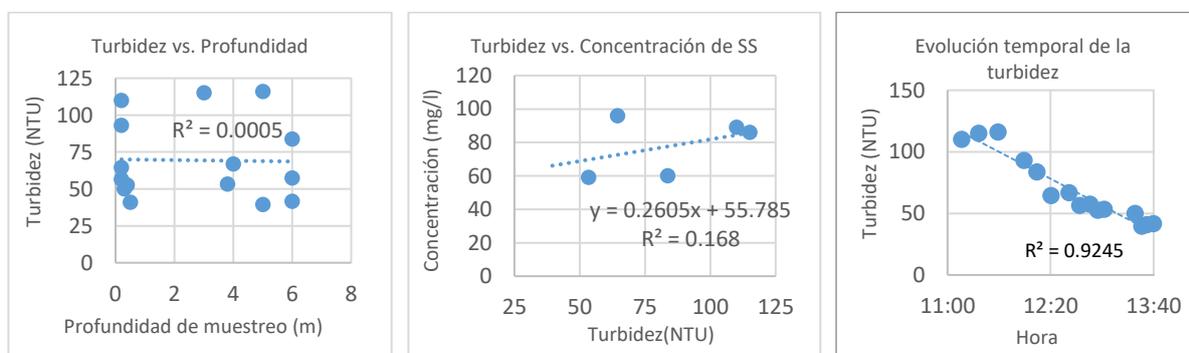


Figura 26. S0A. Embarcadero de Flix. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

En el puente de Ascó se obtuvieron tres perfiles. El primero en la punta del hidrograma (figura 27), el segundo en la punta iniciando la rama descendente (figura 28) y el tercero en la plena rama descendente (figura 29). En ningún caso se aprecia dependencia con la profundidad. En la figura 28 se observa una mayor relación de la concentración con la turbidez. Finalmente se aprecia la influencia del caudal en la turbidez, pues durante la punta de la avenida se mantiene constante (figura 27), desciende al inicio de la rama descendente del hidrograma (figura 28), manteniendo el descenso en la rama descendente (figura 29).

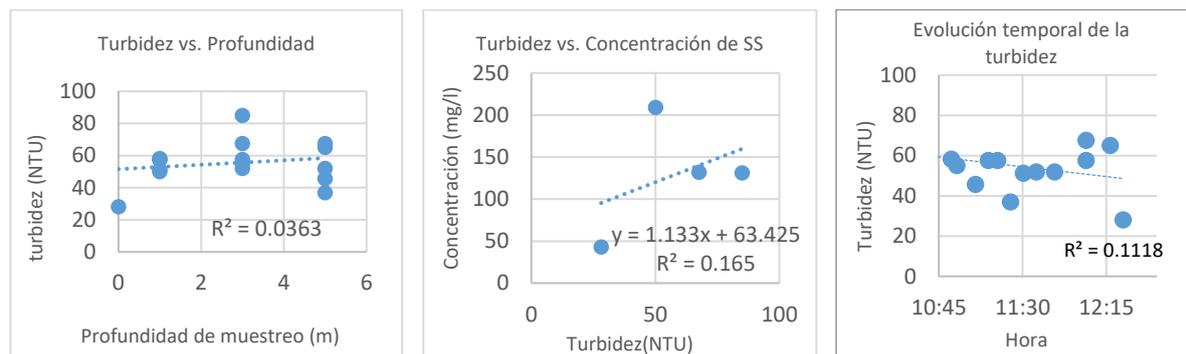


Figura 27. S1. Puente de Ascó. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

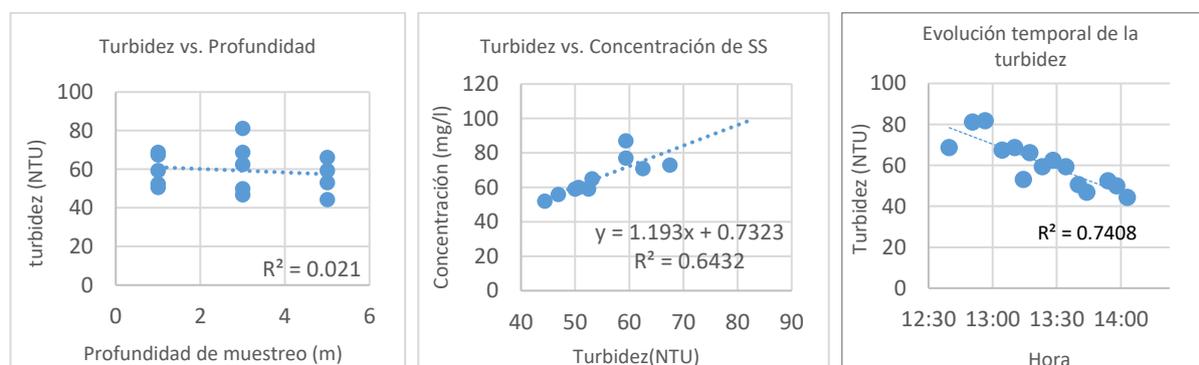


Figura 28. S1. Puente de Ascó. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

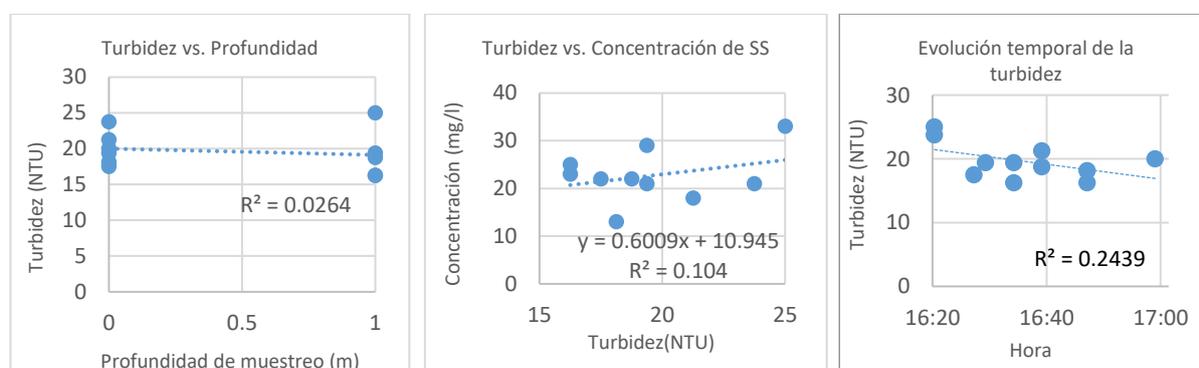


Figura 29. S1. Puente de Ascó. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

La siguiente sección de control (S2) es la del puente de Mora de Ebro. El primer muestreo se realizó en condiciones iniciales, previamente a la llegada de la onda de avenida (figura 30). El segundo, se obtuvo cuando la punta de la avenida estaba próxima a alcanzar su máximo (figura 31) y el tercero ya en la fase descendente (figura 32). En ninguno de los casos se aprecia dependencia de la turbidez con la profundidad. La tendencia ascendente y descendente de la turbidez con la hora muestra su dependencia con el caudal. Creciendo en el primer caso y descendiendo en los otros dos. En esta sección de control, se puede apreciar una clara dependencia de la concentración con la turbidez, aunque con una cierta dispersión.

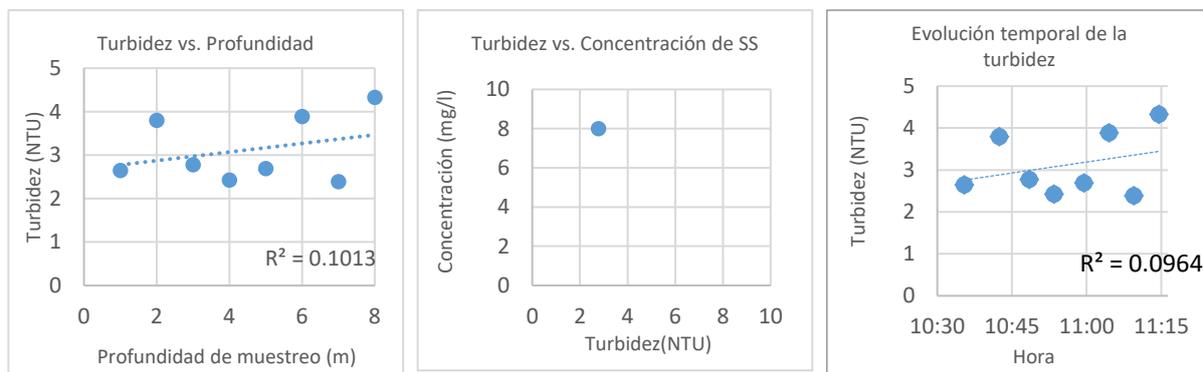


Figura 30. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

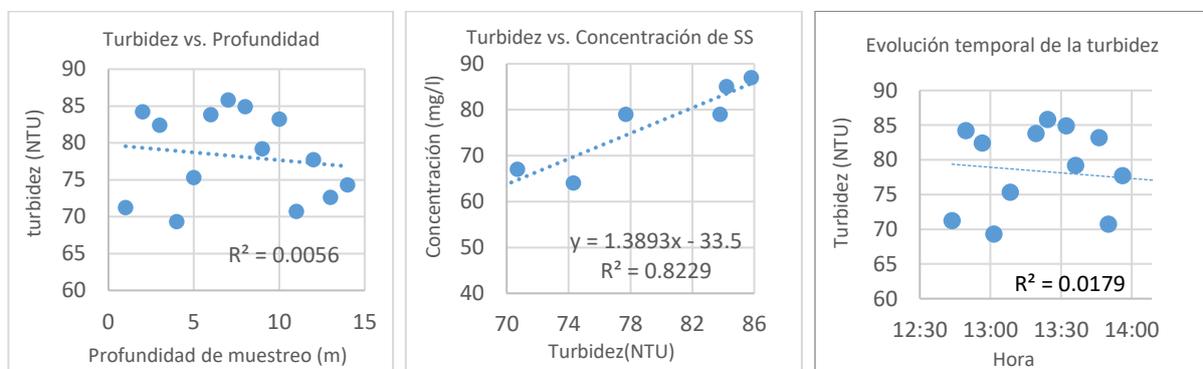


Figura 31. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

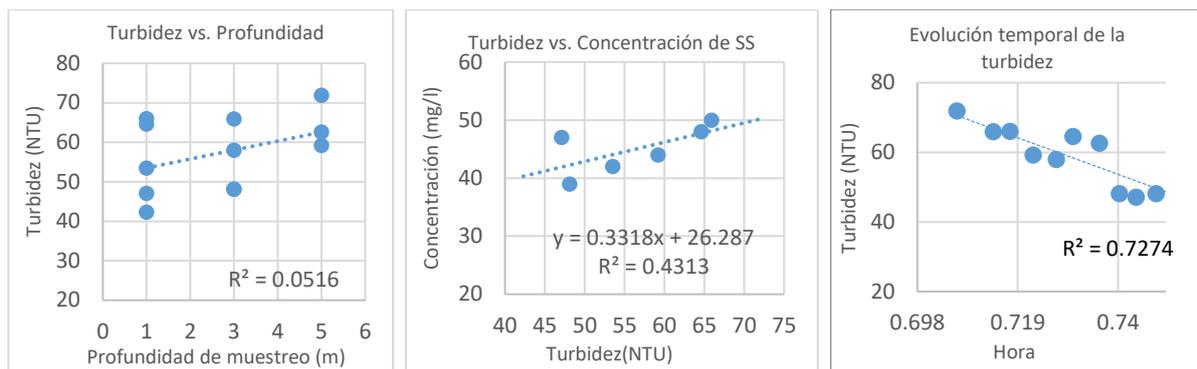


Figura 32. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

En el puente de Benifallet el muestreo se realizó en la punta de la onda de avenida. Por eso se aprecia en la figura 33 una tendencia cuasi-horizontal de la turbidez durante el tiempo de muestreo. No se aprecia dependencia de la turbidez con la profundidad ni tampoco es muy clara su dependencia con la concentración

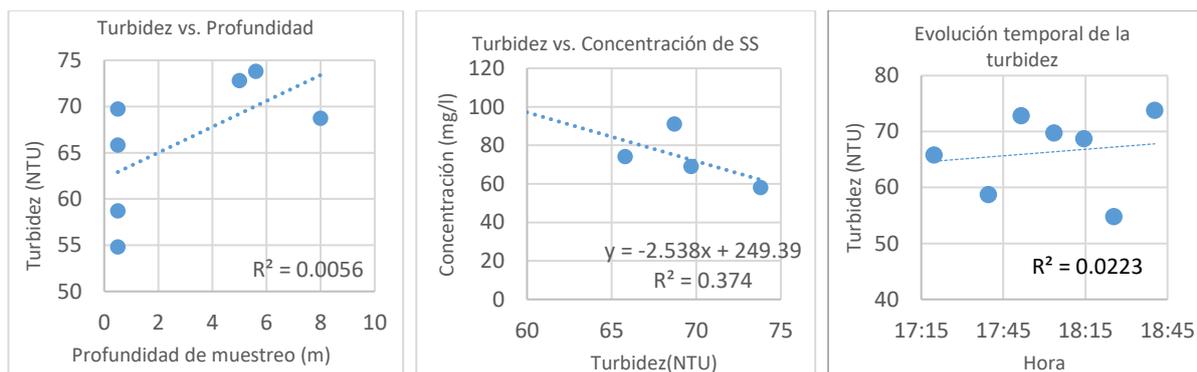


Figura 33. S2. Puente de Mora de Ebro. Variación de la turbidez con la profundidad, relación entre la turbidez y la concentración de SS y evolución temporal de la turbidez.

En resumen, se puede descartar la dependencia de la turbidez con la profundidad y en general se puede afirmar que para las tasas de transporte analizadas el campo de turbidez es muy homogéneo en la sección transversal en todos los analizados. También se evidencia una dependencia entre la turbidez y el caudal circulante, aunque con gran dispersión. Y finalmente se ha comprobado que en varias secciones muestreadas una dependencia lineal entre la turbidez y la concentración, aunque con un espacio muestral muy reducido. Para poder mejorar este análisis se ha graficado esta relación en la figura 34, con los datos de todas las secciones (tabla 12). Los datos de oxidabilidad se pueden relacionar con el contenido de materia orgánica. Se aprecia una dependencia lineal entre turbidez y concentración de SS, aunque con una importante dispersión, con un coeficiente de determinación de $R^2=0.4323$.



CEDEX

Tabla 13. Relación de muestras analizadas con datos de turbidez, concentración y oxidabilidad.

Muestra	Turbidímetro	Turbidez (NTU)	Concentración (mg/l)	Oxidabilidad (mg O2/l)
55	CHE	77.7	79	
56	CHE	70.7	67	
58	CHE	85.8	87	1.51
59	CHE	84.2	85	
60	CHE	2.78	8	1.16
61	CHE	59.2	44	1.19
63	CHE	47.1	47	1.51
64	CHE	83.8	79	
65	CHE	48.1	39	
67	CHE	64.6	48	1.19
70	CHE	74.3	64	
71	CHE	65.9	50	1.57
72	CHE	53.5	42	1.47
79	CHE	19.375	21	1.04
80	CHE	16.25	25	1.29
81	CHE	21.25	18	1.22
82	CHE	23.75	21	1.13
83	CHE	18.75	22	1.41
85	CHE	19.375	29	1.41
86	CHE	17.5	22	1.54
87	CHE	16.25	23	1.13
89	CHE	18.125	13	1.38
92	CHE	25	33	1.13
94	UPC	52.5	59	1.73
95	UPC	53.125	65	1.19
96	UPC	46.875	56	1.04
97	UPC	50.625	60	1.44
98	UPC	50	59	1.19
100	UPC	28.125	43	2.42
101	UPC	44.375	52	1.04
102	UPC	59.375	87	1.44
103	UPC	59.375	77	1.44
104	UPC	67.5	73	1.51
105	UPC	62.5	71	1.41
106	UPC	50	209	1.32
107	UPC	85	131	1.6
108	UPC	67.5	132	0.97
109	CHE	12.6	19	0.91
111	CHE	14.7	7	1.19
112	CHE	32	67	1.54
113	CHE	64.4	96	1.1
114	CHE	83.7	60	0.94
115	CHE	110	89	
116	CHE	115	86	1
119	CHE	53.3	59	1.1
120	CHE	13.3	13	

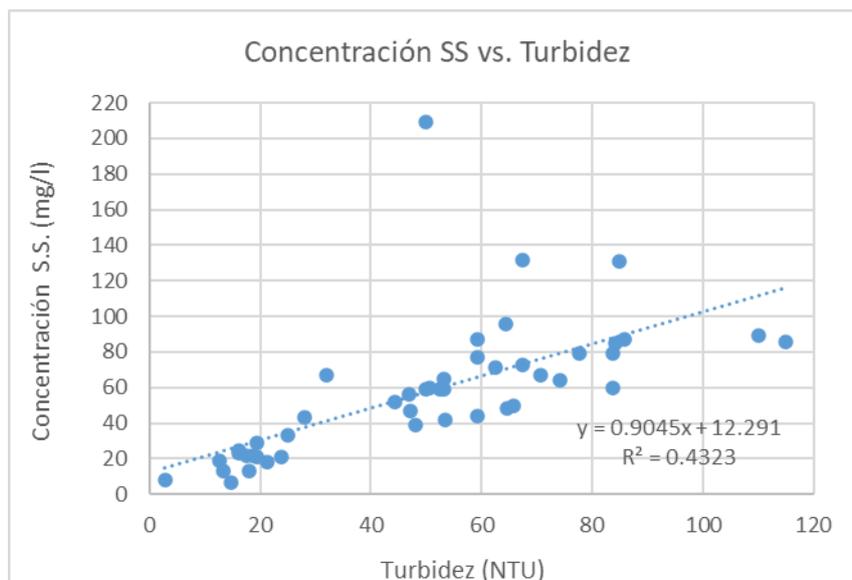


Figura 34. Relación de turbidez y concentración de SS con todos los datos.

Con la intención de eliminar fuentes de discrepancia se han graficado en la figura 35, por separado los registros de turbidez obtenidos con los turbidímetros comerciales de la CHE y el empleado por la UPC de desarrollo propio.

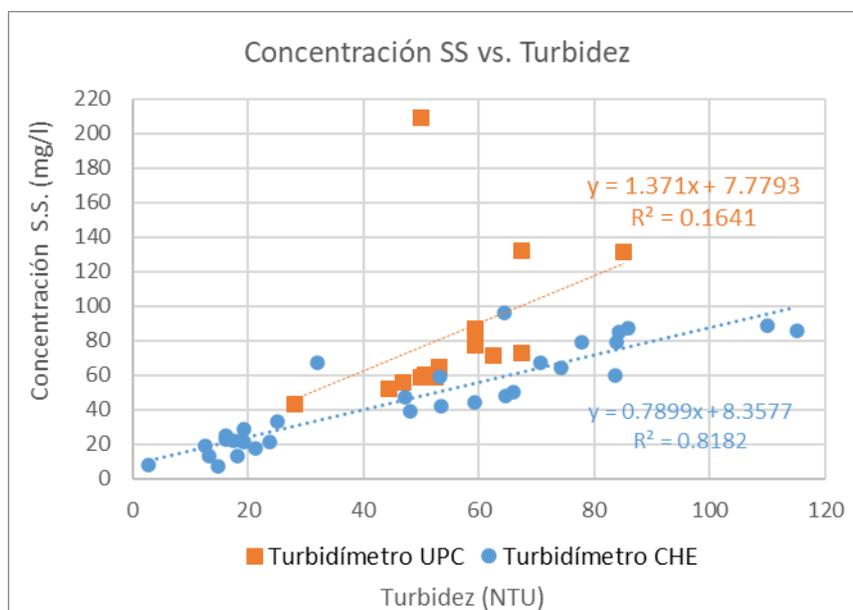


Figura 35. Relación de turbidez y concentración de SS con todos los datos, discriminando el tipo de turbidímetro.

Se aprecia en los tres primeros registros de turbidez de la UPC proporcionan valores de turbidez muy bajos en relación con las concentraciones obtenidas. Por lo que se ha generado el gráfico de la figura 36 eliminando estos tres registros. De esta forma ambos ajustes

presentan menor dispersión con un coeficiente de determinación $R^2= 0.8$ para el turbidímetro de la CHE y de $R^2= 0.73$ para el de la UPC.

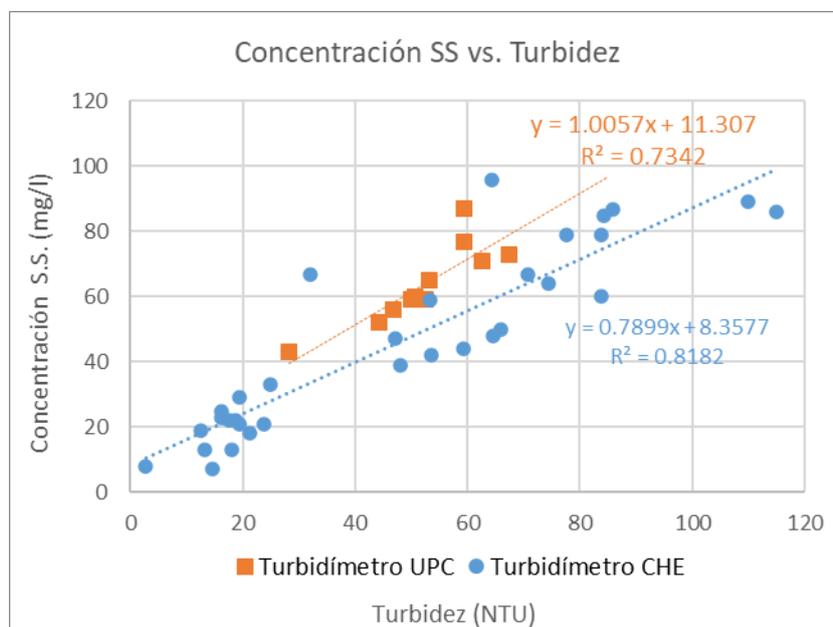


Figura 36. Relación entre la turbidez y la concentración de SS con todos los datos, discriminando el tipo de turbidímetro y eliminando los datos anómalos.

Como complemento a este análisis se dispone del registro de caudal y turbidímetro de la red SAICA de la CHE, en la central de Ascó. Esto nos permite contrastar con los valores registrados en el puente de Ascó. Teniendo en cuenta la homogeneidad de turbidez y, por ende, de la concentración de SS en la sección transversal, cada registro es representativo de toda la sección. Por tanto, empleando los múltiples registros de turbidez, desde las 10:00 hasta las 17:00, se ha podido ajustar el solidograma experimental y compararlo con el registrado por el SAICA. La figura 37 muestra esta comparativa. Se aprecia un desplazamiento de las puntas debido a la distancia entre la entre el puente de Ascó, aguas arriba de la estación SAICA. Teniendo en cuenta este desplazamiento y los registros de turbidez se ha aproximado el solidograma en el puente de Ascó. Se aprecia que los aforos líquidos obtenidos en el puente de Ascó proporcionan caudales algo inferiores a los del SAICA. Por otro lado, la turbidez registrada en el puente resulta algo mayor que la proporciona el SAICA.

Teniendo en cuenta la relación entre turbidez y concentración de sedimentos en suspensión de la figura 36 se ha podido calcular la cantidad de sedimento que pasó por la sección del puente de Ascó durante la avenida controlada. Algo más de 3130 toneladas de sedimento en suspensión en el período desde la 8:00 de la mañana hasta 17:00 horas, frente a las 145 toneladas con habría transportado el cauce en ese mismo período con un caudal base de 230

m³/s y una turbidez de 8 NTU. Es decir, el transporte se ha multiplicado aproximadamente por 20 durante el evento.

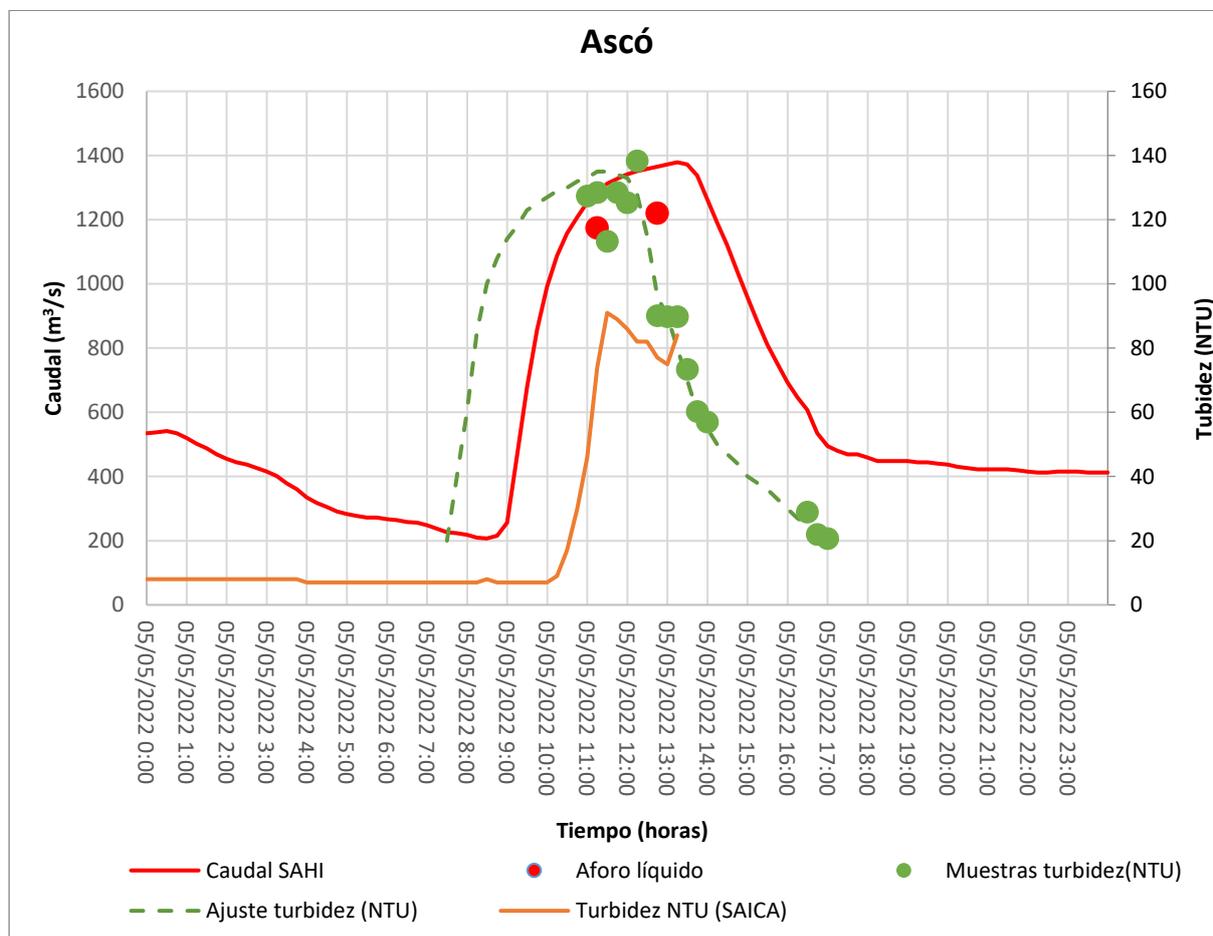


Figura 37. Hidrograma y registro de turbidez en Ascó.

Aunque en la estación de Tortosa no se llegó a obtener registros, sí que se dispone del registro del SAICA de caudales y turbidez (figura 38). Se aprecia que en Tortosa la onda de avenida se ha laminado mucho, con una punta máxima ligeramente superior de 700 m³/s, aumentando el tiempo de la base del hidrograma. En el intervalo de 24 horas que van desde 14:30 del día 5 de mayo, por la sección de control del SAICA de Tortosa pasaron 1250 toneladas. Por tanto, algo más de un tercio del sedimento que pasó por Ascó, llegó a Tortosa.

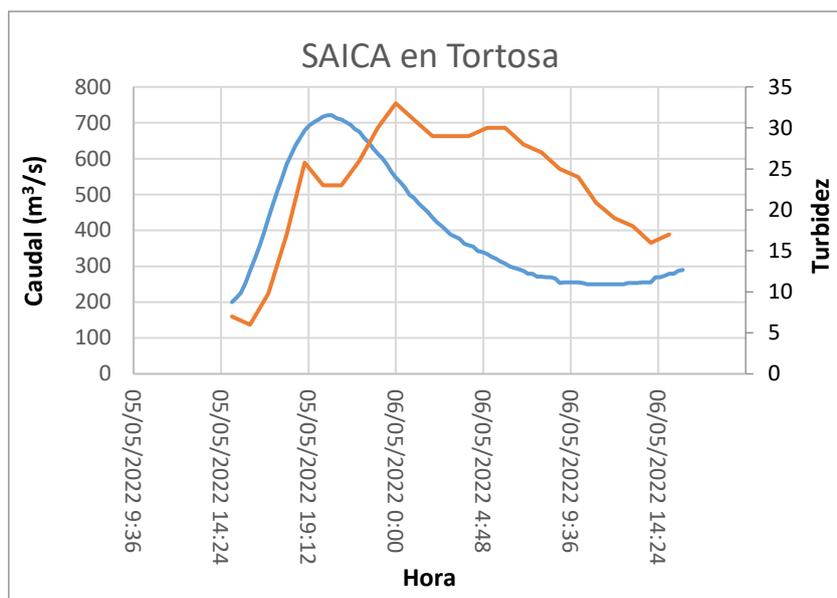


Figura 38. Hidrograma y registro de turbidez en Tortosa.

Finalmente, se incluye la tabla 14 que recoge el valor de la concentración media en los puntos de control a la hora de paso del satélite Sentinel-2, que será de utilidad para calibrar las imágenes de satélite.

Tabla 14. Concentración media en los puntos de control.

Punto de control	Concentración SS (mg/l)
S0. Puente de Ribarroja	10
S0A. Embarcadero de Flix	60
S1. Puente de Ascó	73
S2. Puente de Mora de Ebro	85
S3. Benifallet	8



5. CONCLUSIONES

El objeto de esta nota técnica es centralizar los datos de la campaña de aforo de sedimentos en suspensión realizada durante la avenida controlada del 5 de mayo de 2022, para que sirva de base para la calibración de imágenes satélites como de los turbidímetros de la red SAICA. Además, se ha realizado un análisis de los resultados que ha permitido obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones para próximas campañas:

1. Respecto al diseño de la avenida controlada:
 - a. Si la avenida controlada se genera manteniendo los niveles en el embalse de Flix, es muy poco el material que se moviliza desde este embalse, moviéndose tan sólo el sedimento existente en el curso bajo.
 - b. Los episodios de avenidas de principios de 2022 produjeron un importante lavado del lecho, por lo que las concentraciones de sedimento en suspensión registradas durante la avenida fueron muy bajas. Esto limita la utilidad de la campaña de aforo.
 - c. Se recomienda que en próximas avenidas controladas se realicen movilizándolo el sedimento del embalse de Flix, reduciendo su nivel de lámina a fin de recuperar pendiente hidráulica en el vaso.
2. En el rango de concentraciones registrados en esta campaña, entre 20 y 115 NTU, se aprecia una relación lineal con la concentración de sedimento en suspensión (mg/l) obtenidas en los ensayos de laboratorio.
3. Los valores de concentración de SS obtenidos muestran un reparto muy uniforme del transporte de sedimento en suspensión en toda la sección transversal, si apreciarse diferencias entre las muestras de fondo y en superficie. Será conveniente comprobar si esta uniformidad se mantiene con tasas de transporte más elevadas. Caso de confirmarse este extremo, en próximas campañas solamente sería necesario muestrear en superficie, facilitándose considerablemente el proceso de muestreo.
4. Durante el paso de la avenida por Ascó el valor de turbidez proporcionado por el turbidímetro del SAICA resultó ser un 30 % inferior de lo medido durante el aforo.
5. De acuerdo con los ensayos de la UV, el contenido en materia orgánica oscila entre el 13 y el 20 %.



CEDEX

El presente estudio ha sido dirigido por David López Gómez, Jefe de Área. También han colaborado María Isabel Berga Cano, Directora de Programa, y Miguel de Blas Moncalvillo, personal laboral contratado de I+D+i asociado al proyecto “Desarrollo, mejora y calibración de modelos matemáticos 3D lagrangianos de partículas y 2D eulerianos aplicados a la hidrodinámica”.

Madrid, agosto de 2022

El director del trabajo,

V.º B.º

David López Gómez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Jefe de Área

Luis Balairón Pérez

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director del Laboratorio de Hidráulica