



Estudio para la implementación de las técnicas de arrastre hidráulico y de las corrientes de turbidez en el sistema de embalses Mequinenza-Riba-Roja d'Ebre: viabilidad técnica y percepción social

Trabajo final de Máster



Autores:

Genís Freixas Borrell

Pere Josep Jiménez Mur

Coordinador:

Albert Rovira (I.R.T.A.)



"El presente trabajo es un ejercicio práctico de Máster presentado para optar al certificado de aptitud por los autores, realizado en parte como supuesto real y en parte con contenidos académicos. Su contenido, calidad y adecuación a la realidad son de la exclusiva responsabilidad de sus autores, así como los cálculos, aseveraciones, conclusiones y recomendaciones. Éstas no tienen porqué coincidir con las de los tutores-directores del trabajo, ni del Máster, ni de sus organismos patrocinadores. La existencia de este trabajo no supone su aprobación ni la aceptación de su contenido."



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1. <i>Introducción.....</i>	9
1.2. <i>Objetivos del proyecto.....</i>	9
2. IMPACTO DE LOS EMBALSES EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTO	10
2.1 <i>El impacto de los embalses en el sistema hidromorfológico</i>	10
2.2 <i>Características en la sedimentación en los embalses.....</i>	15
3. TÉCNICAS DE GESTIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	16
3.1. <i>Métodos de gestión del sedimento en embalses.....</i>	16
3.2.1 <i>Arrastre hidráulico o “flushing”</i>	18
3.2.2 <i>Corrientes de densidad.....</i>	23
3.2. <i>Ejemplos de aplicación de métodos de gestión de sedimentos.....</i>	31
4. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	43
4.1. <i>Características generales de la zona de estudio.....</i>	43
4.1.1 <i>El sistema de embalses Mequinenza-Riba-Roja d’Ebre -Flix</i>	45
4.1.2 <i>Los cambios en la dinámica fluvial y su impacto sobre las riberas</i>	49
4.2. <i>Principales espacios fluviales naturales dentro de la zona de estudio</i>	55
4.3 <i>Sedimentación de los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d’Ebre</i>	62
4.4 <i>Batimetría del embalse de Riba-Roja d’Ebre</i>	65
4.5 <i>Caracterización físico-química de los sedimentos</i>	72
4.5.1 <i>Caracterización física</i>	74
4.5.2 <i>Caracterización química.....</i>	75
5 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ARRASTRE Y CORRIENTES DE DENSIDAD EN LOS EMBALSES DE RIBA-ROJA D’EBRE Y MEQUINENZA.....	81
5.1 <i>Aplicación de la técnica de arrastre hidráulico en el embalse de Riba-Roja d’Ebre</i>	82
5.2 <i>Aplicación de la técnica de corrientes de densidad a través de las compuertas de fondo</i>	88
5.3 <i>Resultados en la aplicación de las técnicas</i>	89
6 PERCEPCIÓN SOCIAL	93
6.1 <i>La falta de sedimento en el río Ebro: concepciones previas</i>	93
6.2 <i>Un río que nada tiene que ver con el actual: La pérdida de la memoria histórica</i>	94
6.3 <i>Descripción de la situación actual y percepción social</i>	99
6.4 <i>La problemática de la actual gestión y los impactos percibidos por los sectores sociales</i>	102
6.5 <i>Esquema conceptual según el modelo VENSIM de la problemática de la gestión de sedimentos en el tramo final del Ebro</i>	105



6.6	<i>Aplicación del modelo NAIADE a la propuesta de diferentes soluciones a la falta de sedimentos</i>	107
-----	--	-----

7	MEDIDAS COMPLEMENTARIAS A LA PROPUESTA DE GESTIÓN DE SEDIMENTOS DESDE LOS EMBALSES	109
8	CONCLUSIONES	112
9	BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXO 1. ACCEPTABILIDAD SOCIAL A UNA NUEVA GESTIÓN HIDROLÓGICA Y A LA GESTIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES		117

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	<i>El río como modelo de transporte de sedimento (Fuente: Kondolf et al. 2002)</i>	11
Fig. 2.	<i>Capacidad de movilización de sedimentos durante las fases de arrastre y formación del canal de erosión en una operación de vaciado (extraído de Morris & Fan 2000).</i>	22
Fig. 3.	<i>Ejemplo de secuencia de una operación de arrastre (extraído de Morris & Fan 2000).</i>	23
Fig. 4.	<i>Esquema vertical de un flujo de agua entrando en un embalse estratificado (Morris & Fan 2000)</i>	24
Fig. 5.	<i>Liberación de corrientes de turbidez a través de la presa del embalse de Xiaolangdi, China (Yang 2008).</i>	25
Fig. 6.	<i>Línea o punto de sumersión “plungepoint” en el embalse de Eril Emda, Argelia (ICOLD 2007)</i>	26
Fig. 7.	<i>Circulación de las corrientes de turbidez dentro de un embalse y deposición de sedimentos (Morris 2000).</i>	28
Fig. 8.	<i>Planta y ubicación del embalse de Joaquín Costa, Aragón (Navas et al. 1998).</i>	39
Fig. 9.	<i>Ubicación de la zona de estudio (extraído de Batalla & Vericat 2.006)</i>	43
Fig. 10.	<i>Embalse de Mequinenza (Foto: P.J. Jiménez).</i>	46
Fig. 11.	<i>Trazado del proyecto de construcción de la presa de Flix sobre el antiguo cauce del río (Fuente: Archivo Municipal de Flix).</i>	47
Fig. 12.	<i>Embalse de Flix (Foto: P.J. Jiménez)</i>	48
Fig. 13.	<i>Esquema de los flujos hídricos en la zona del meandro de Flix (Fuente: Proyecto de actuación global en el meandro del río Ebro en Flix, 2.004).</i>	49
Fig. 14.	<i>Distribución de barras y diques naturales, y evolución de su grado de cobertura vegetal en el tramo aguas abajo del embalse de Flix. Fuente: Sabaté et al. (2011)</i>	50



Fig. 15. Imagen de limos depositados sobre antiguos depósitos de gravas y cantos rodados y fijados por vegetación de ribera en el meandro de Flix (Foto: Marc Viñas).....	51
Fig. 16. Distribución de barras y diques naturales, y evolución de su grado de cobertura vegetal en el tramo aguas abajo del embalse de Flix. Fuente: Sabaté et al. (2011).....	53
Fig. 17. Distribución de superficies activas y ocupación por actividades agrícolas en el tramo aguas abajo del embalse de Flix. Fuente: Sabaté et al. (2011).....	55
Fig. 18. Ubicación de las zonas protegidas entre el Aiguabarreig del Segre, Cinca y Ebro, y el meandro de Flix (Fuente: ICC 2011).....	56
Fig. 19. Imagen de l'aiguabarreig con sus islas fluviales, carrizales y bosque de ribera que albergan colonias de reproducción de diversas especies de ardeidas (Foto: P.J. Jiménez).	57
Fig. 20. Detalle zona protegida de Sebes y meandro de Flix (Fuente: archivo Reserva Natural de Sebes).	58
Fig. 21. Imagen de las antiguas zonas de cultivo situadas aguas arriba del embalse de Flix. En la actualidad una franja de más de 100 m es zona inundable recubierta por carrizales (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	58
Fig. 22. Imagen de la misma zona con el margen derecho del Ebro cubierto por vegetación de ribera (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	59
Fig. 23. Cambios hidrogeomorfológicos en el meandro de Flix (Fuente: Archivo municipal de Flix)..	60
Fig. 24. Estabilización y colonización por bosque de ribera de antiguas barras de cantos rodados (Fuente: Archivo municipal de Flix).	61
Fig. 25. Espacios fluviales protegidos aguas abajo del embalse de Flix (Fuente: ICC, 2011).	62
Fig. 26. Diagrama conceptual de los valores de concentración media presentados en el estudio realizado por FLUMEN en 2009 (elaboración propia).....	64
Fig. 27. Tramos considerados en la batimetría (FLUMEN 2009).....	66
Fig. 28. Modelo definitivo de la Batimetría 07. Se indica el PK, el eje y la cota del fondo (FLUMEN 2009).....	67
Fig. 29. Comparativa de sedimentación-erosión. En tono rojizo se indica la erosión. Las cifras se refieren a los PK. (FLUMEN 2009).....	68
Fig. 30. Altura del sedimento (m) depositado en el embalse. Se indica el PK, el eje y la cota del fondo. (FLUMEN 2009).	69
Fig. 31. Para cada tramo de 1.000 metros, volúmenes de sedimentación neta, de erosión neta y de sedimentación media (FLUMEN en 2009).	70
Fig. 32. Volumen acumulado de sedimentación media, neta y erosión neta (FLUMEN en 2009). .	71



Fig. 33. Volumen de sedimento acumulado en el periodo noviembre 2007-diciembre 2008 (FLUMEN en 2009).	71
Fig. 34. Ubicación de los puntos de muestreo de sedimento en el embalse de Riba-Roja d'Ebre (FLUMEN en 2009).	73
Fig. 35. Diagrama de Shepard que indica la composición porcentual de arcillas, limos y arenas en los sedimentos superficiales del embalse de Riba-Roja d'Ebre. Se han representado los distintos tramos del embalse con diferente color. Se indica también el código correspondiente a las estaciones del tramo superior dada su gran variabilidad (FLUMEN en 2009).	74
Fig. 36. Variación a lo largo del embalse de la concentración de fósforo, nitrógeno y carbono.....	77
Fig. 37. Concentraciones de zinc, cobre, plomo, cromo y níquel en el sedimento superficial de Riba-Roja d'Ebre. La línea roja indica la concentración a la que la probabilidad de efectos tóxicos es elevada. La línea marrón indica el nivel considerado como umbral de toxicidad. Concentraciones en $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (FLUMEN 2009).	79
Fig. 38. Concentración de fósforo reactivo soluble en el agua profunda del embalse FLUMEN 2009).....	80
Fig. 39. Rango de aplicación de la técnica (extraído de Sumi 2003).....	84
Fig. 40. Ubicación de las compuertas de fondo de la presa de Riba-Roja d'Ebre. Las compuertas principales están situadas dentro del círculo azul y las auxiliares dentro de los círculos rojos (Roca & Martín-Vide 2005).....	84
Fig. 41. Zona del embarcador de la Mina Virgen del Pilar, 1945 (Fuente: Archivo municipal de Flix).	94
Fig. 42. "Llaüts" remontando el Ebro con las velas desplegadas para aprovechar la "garbinada" (viento de mar a tierra) a la altura de la población de García. A la derecha la desembocadura del río Siurana, libre de vegetación (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	95
Fig. 43. "Llaguters" tirando ("sirgant") de la embarcación por una playa de cantos rodados, a falta de viento para remontar el Ebro cerca de la población de Móra de Ebro (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	95
Fig. 44. Antigua noria y molino harinero de la población de Flix destruido con la construcción del complejo industrial. Foto de 1895 aprox. (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	96
Fig. 45. Molino harinero formado por dos "llaüts" que aprovechaba la corriente de agua (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	96
Fig. 46. Remonte del río con la ayuda de una mula tirando desde una playa en García (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	97
Fig. 47. Antiguo paso de barca de Mequinenza (Fuente: Archivo municipal de Flix).....	97



Fig. 48. <i>Instalación del complejo Electroquímico de Flix con su azud a la derecha y la central hidroeléctrica (Casa de Turbinas) que substituyó a la antigua noria (Fuente: Archivo municipal de Flix).</i>	98
Fig. 49. <i>Detalle del azud de Flix en época de estiaje. Al fondo la Casa de Turbinas (Fuente: Archivo municipal de Flix)</i>	98
Fig. 50. <i>Embalse de Flix que substituyó al antiguo azud. A la izquierda antiguo canal de navegación con su esclusa que servía para salvar el desnivel del azud. En el curso, los pilares del puente que había proyectado el gobierno de la República y que quedó sin terminar (Fuente: Archivo municipal de Flix)</i>	99
Fig. 51. <i>Esquema conceptual de según modelo VENSIM de la problemática de gestión de sedimentos en el tramo inferior del Ebro.</i>	106
Fig. 52. <i>Esquema del orden de prioridad de las alternativas según los intereses de los sectores.</i>	108
Fig. 53. <i>Análisis de equidad.</i>	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Ventajas e inconvenientes de la aplicación de las diferentes técnicas.</i>	17
Tabla 2. <i>Factores limitantes de las operaciones de arrastre y solución para aumentar la efectividad.</i>	20
Tabla 3. <i>Detalle de las operaciones de arrastre realizadas.</i>	36
Tabla 4. <i>Impacto medioambiental de las operaciones de arrastre realizadas.</i>	42
Tabla 5. <i>Principales características de los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre.</i>	44
Tabla 6. <i>Retención de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre, teniendo en cuenta el balance de entradas y salidas de material en suspensión en el período 1.997-1.999. Extraído del informe realizado por FLUMEN en el año 2009 y teniendo en cuenta que un 99,5 % del sedimento es transportado en suspensión y un 0,5% como carga de fondo según Vericat y Batalla en 2006 en el período 2.002-2.004 (elaboración propia).</i>	65
Tabla 7. <i>Concentración media, desviación estándar y coeficiente de variación de los elementos mayoritarios en el sedimento de Riba-Roja d'Ebre. Datos en $mg.g^{-1}$ (FLUMEN 2009).</i>	76
Tabla 8. <i>Concentración media, desviación estándar y coeficiente de variación de zinc, cobre, níquel, plomo, y cromo en el sedimento superficial de Riba-Roja d'Ebre. Datos es $mg.g^{-1}$. Se comparan los datos con (1) concentración promedio en la corteza terrestre; (2) roca caliza; (3) promedio del sedimento en suspensión en ríos del mundo (FLUMEN 2009).</i>	78
Tabla 9. <i>Concentración media y desviación estándar de los metales disueltos en el perfil vertical de agua intersticial en las estaciones en que se realizó un análisis detallado en profundidad. Ref.</i>	



<i>Criterio de calidad utilizado como referencia por la Agencia Americana de Protección Ambiental (USEPA, 2006). Concentraciones en µg/l (FLUMEN 2009).</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 10. Caudal de desagüe en las compuertas de fondo en función del nivel de agua por encima de éstas (Roca& Martín-Vide 2005)</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 11. Propuesta de combinación de las técnicas de gestión de sedimentos.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 12. Hipótesis sobre el estado químico de los sedimentos, medidas preventivas e inconvenientes.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 13. Concepciones previas relativas a la problemática de la falta de sedimentos, tanto a nivel general como por los sectores más representativos de la zona.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 14. Cuadro resumen de la situación derivada de la gestión actual y problemas generados, tanto a nivel general como por los sectores más representativos de la zona.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 15. Ejercicio de valoración de las diferentes propuestas de actuación por sectores implicados.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabla 16. Medidas complementarias a la propuesta de gestión de sedimentos desde los embalses.</i>	<i>110</i>



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

En el presente estudio se describe en primer lugar la problemática de la retención de sedimentos en los embalses de la zona de estudio para posteriormente explicar detalladamente dos de las técnicas de gestión de sedimento que se consideran las más apropiadas para su aplicación en la zona. A continuación se describe la zona de estudio (el sistema de embalses Mequinenza, Riba-Roja d'Ebre y Flix, localizado en el bajo Ebro), describiéndose los principales impactos que causa y ha causado la construcción de los embalses y los pertinentes cambios hidrogeomorfológicos que se han producido aguas debajo de éstas. Por otro lado también se presenta la batimetría del embalse de Riba-Roja d'Ebre, su distribución dentro del vaso del embalse y el estado físico-químico superficial de los sedimentos almacenados dentro de éste para poder analizar la posibilidad de implementación de estas técnicas en el sistema Mequinenza-Riba-Roja d'Ebre- Flix. La viabilidad de aplicación de estas técnicas se acompaña de un análisis socioeconómico teniendo en cuenta cuál es la percepción social de la problemática de la retención de los sedimentos en la zona y su posible gestión, valorando la opinión e intereses de los diferentes actores involucrados en esta problemática y evaluar los diferentes condicionantes que puedan surgir.

1.2. Objetivos del proyecto

El presente proyecto forma parte del trabajo final de la III Edición del Máster en Gestión Fluvial Sostenible y Gestión Integrada de Aguas. Su objetivo general es realizar una aproximación al conocimiento de las técnicas de gestión de sedimentos acumulados en los embalses, su impacto sobre los ecosistemas fluviales y el análisis de la posible aplicación incorporando la percepción social de la problemática, así como la aceptabilidad de las propuestas y su viabilidad económica.

El marco geográfico del trabajo comprende el propio sistema de embalses Mequinenza - Riba-Roja d'Ebre- Flix así como el tramo de río que discurre desde la presa de Flix hasta la población de Miravet. Éste último en cuanto a efectos y cambios hidrogeomorfológicos del canal fluvial.

Como objetivos específicos se establece:

-Superar el reduccionismo: gestión de sedimentos para compensar la subsidencia del delta del Ebro.



- Proponer la recuperación de funcionalidades en el tramo inferior del Ebro a partir de la gestión de los sedimentos.
- Integrar la gestión de caudales y la gestión de sedimentos.
- Analizar la percepción social, la aceptabilidad y viabilidad de una nueva gestión.
- Realizar una propuesta de gestión.

Las acciones realizadas han sido:

- Recopilar y analizar la información disponible en relación a la gestión de sedimentos en embalses.
- Analizar la situación actual (cambios hidromorfológicos, gestión de caudales, etc.) en el tramo de estudio.
- Recopilar y analizar la información disponible relacionada con los sedimentos atrapados en el embalse de Riba-Roja d'Ebre (textura del sedimento, distribución de éste, grado de contaminación, etc.).
- Análisis de la percepción social a la problemática de la retención de sedimentos y a su posible gestión mediante la aplicación de los modelos Naiade y Vensim.
- Evaluar la posibilidad de aplicación de las técnicas para la removilización y traspaso del sedimento almacenado en el sistema Mequinenza-Riba-Roja d'Ebre-Flix.

2. IMPACTO DE LOS EMBALSES EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTO

2.1 El impacto de los embalses en el sistema hidromorfológico

La construcción de presas para el almacenamiento de agua conlleva la interrupción en la transferencia de los sedimentos, rompiendo el equilibrio hidro-sedimentario del río y la alteración del ecosistema existente aguas abajo de las presas. En la interrupción de la transferencia de sedimentos en los ríos, se para la función de “cadena transportadora”, ya que se retiene en el vaso del embalse la mayor parte de la carga transportada en suspensión (en muchos casos superior al 90%), y la totalidad de la carga de fondo, tal y como se observa en la Fig. 1:

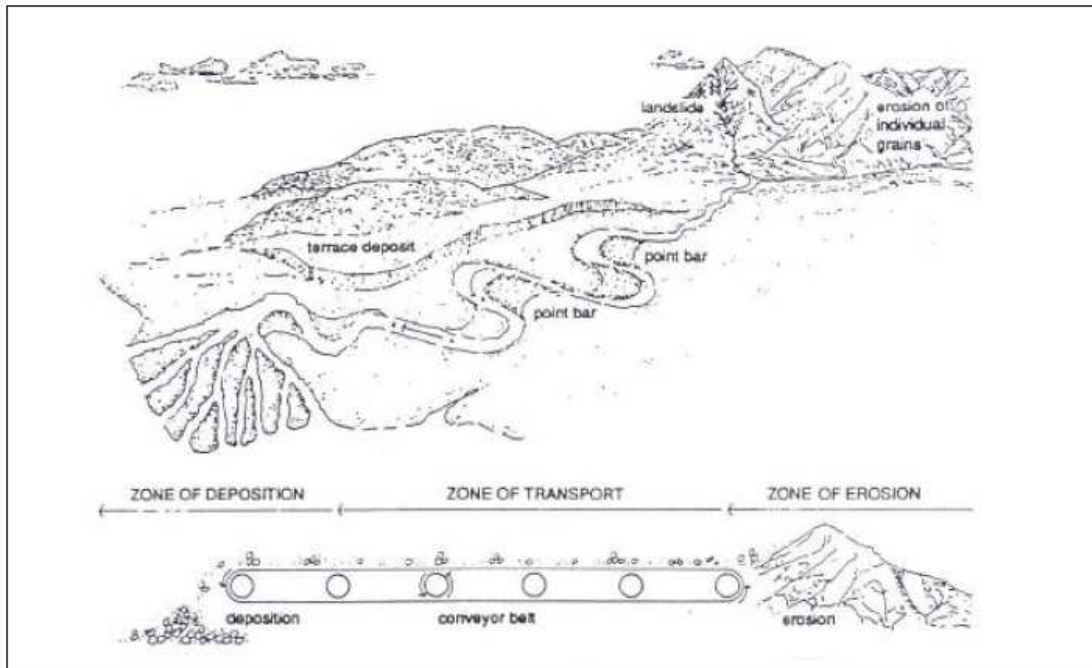


Fig. 1. El río como modelo de transporte de sedimento (Fuente: Kondolf et al. 2002)

Varios autores han cuantificado el porcentaje de volumen perdido en los embalses a nivel mundial por efecto de la deposición de sedimentos en éstos, permitiendo obtener una percepción de cuál es el volumen de sedimentos interceptados por las presas. White (2001) relacionó la capacidad de almacenaje, obtenida a partir de los datos de la International Comision of Large Dams (ICOLD) del año 1998, con los datos de capacidad del año 2000, mostrando que la pérdida de almacenaje hasta el momento había sido de un 10% (576 km³). Posteriormente, ICOLD realizó el mismo cálculo que White, pero actualizado para el año 2007, y determinó que para aquel año la capacidad total de almacenamiento mundial se había perdido en el 21%, y que las previsiones para el año 2.500 eran del 42% de pérdida de volumen total. Tal y como muestran estos datos, un gran volumen de sedimento es retenido en los embalses en todo el mundo en períodos temporales relativamente cortos, dejando de formar parte del proceso de transporte sedimentario natural que ejercen los ríos. Bajo condiciones de transporte natural, es decir, sin la consecuente intercepción de sedimentos, se produciría una deposición de éstos en las partes bajas de las cuencas fluviales, manteniendo los correspondientes complejos sedimentarios de desembocadura y el buen estado geomorfológico de los ríos, cosa que en muchos casos no sucede.

Como es sabido, las presas de los embalses están construidas y operadas para el almacenamiento de agua destinada al abastecimiento residencial, comercial y agrícola,



para la laminación de avenidas y además son aprovechadas por las compañías hidroeléctricas para la generación de electricidad, entre otros. A pesar de cumplir estas funciones consideradas positivas, destacan algunos aspectos negativos donde las presas, además de realizar la función de trampa para los sedimentos transportados, también producen una alteración en los picos de caudal y los regímenes estacionales del río, cambiando la naturaleza y funcionalidad y por tanto, rompiendo el equilibrio hidrosedimentario.

La modificación de la dinámica natural comporta una serie de impactos en la hidromorfología del río aguas arriba del embalse, dentro de éste y aguas abajo. Por otra parte, también produce cambios en los ecosistemas aguas abajo. Así, en la zona de cabecera del embalse, en la transición del río con éste, donde el agua calmada frena el flujo entrante hacia dentro del embalse, se produce una agradación del canal fluvial por la deposición de sedimento, que conlleva la colmatación de los sistemas de irrigación y captaciones, la reducción del canal de navegación y el incremento de la frecuencia de las inundaciones aguas arriba.

En la cabecera del embalse, la presencia de una presa crea un efecto de decantación de sólidos en suspensión y de la carga de fondo, produciendo la reducción de la capacidad de almacenaje dentro de éste, y por tanto reduciendo su vida útil si no se toman medidas al respecto. Tal es así que hoy en día varios estudios estiman que aproximadamente entre el 0,8 y el 1%, es decir, entre 30 y 45 km³/año del volumen total de almacenamiento mundial se pierde anualmente como consecuencia de la sedimentación en los embalses (White 2001, Morris & Fan 2000, Palmieri et. al. 2001). Este hecho hace que a veces disminuya la capacidad de regulación del embalse, y con ella todo el beneficio del almacenamiento, regulación de avenidas, generación de energía hidroeléctrica, etc.

Aguas abajo de la presa el agua liberada a través de las compuertas de fondo tiene potencial suficiente como para transportar el sedimento perteneciente al lecho del río. Éste agua liberada a través de la presa presenta poca concentración de sedimentos, y por ello algunas veces esta agua es denominada como agua “limpia”. Éste agua “limpia” tiene un alto potencial de erosión que se traduce en la erosión del lecho del río en forma de incisión, fenómeno que puede durar varios años después de la construcción de la presa. Éste efecto de erosión a su vez conlleva el acorazamiento del lecho que consiste en el aumento del tamaño de las partículas por el lavado de los materiales más finos, hasta que el equilibrio es alcanzado y los materiales más gruesos no pueden ser movilizados por el flujo. No obstante, en algunos casos, la reducción de los picos de caudal aguas abajo de la presa, puede causar una agradación de sedimentos en el lecho



del río, ya que el propio flujo hídrico no tiene capacidad de transportar éste sedimento. Es decir, el sedimento depositado en el lecho del río por los tributarios, puede quedar retenido en el cauce principal, degradando el cauce y el ecosistema fluvial.

Bajo los efectos de incisión del lecho del río, se produce la desestabilización de los márgenes fluviales, la erosión remontante, el sobredrenaje del acuífero, la afectación de las infraestructuras fluviales (p.e. socavación y descalzado de cimentaciones de puentes y otras infraestructuras hidráulicas), la degradación del sistema acuático y la reducción de aportes de sedimentos en deltas y playas.

Paralelamente, la reducción de la frecuencia de las avenidas por el efecto de la laminación de las presas, reduce también el comportamiento dinámico natural del río aguas abajo lo que provoca una alteración en los ecosistemas fluviales. Una gran crecida anual o bianual es esencial para mantener la riqueza de especies autóctonas. Además, las variaciones de caudal producidas por las presas pueden ser muy importantes, dependiendo del tamaño de la presa y de la operación que se lleve a cabo en ésta. No obstante, incluso la presencia de una presa de pequeño tamaño puede causar un cambio sustancial en la reducción de los caudales aguas abajo y por tanto, participar activamente en la transformación del río. Por otra parte, los peces autóctonos están habituados a los regímenes de flujo natural que implican crecidas en ciertos períodos, por eso cuando el flujo hídrico pasa a ser constante se puede favorecer un establecimiento de especies invasoras.

Las crecidas mantienen la distribución, abundancia y biodiversidad de especies autóctonas y sucesivos estadios de vegetación riparia, y en cambio, la reducción de los episodios de crecida bajo la presa, producen la migración de canales y disminuyen el hábitat ripario. En éstos tramos, la invasión de la vegetación permanente en las partes activas del canal, puede ocurrir en reacción a la disminución de las avenidas y la deposición del sedimento, que en caso de régimen de flujo natural, ésta vegetación sería arrastrada por la consecuente crecida. Como causa de la disminución de las inundaciones se produce el establecimiento de vegetación permanente en el canal activo, donde decrece la capacidad del canal, estabiliza el río en el lugar de paso actual y elimina los hábitats de las barras fluviales emergidas, los cuales son fundamentales para la supervivencia de muchas especies. El estrechamiento de los ríos ha causado la pérdida de zonas de inundación capaces de contener las crecidas en los ríos.

Como se ha comentado, la acumulación de sedimentos en los embalses comporta una disminución de los aportes de sedimento en el tramo fluvial posterior a la presa y cambios en la naturaleza y origen del mismo, y por otro lado, disminuye la capacidad de



almacenaje del embalse. No obstante, a pesar de que la retención de sedimentos es negativa por estos dos factores, también tiene como aspecto “positivo” la contribución a la retención de los nutrientes y metales contaminados, que reducen la eutrofización y/o contaminación en el tramo fluvial posterior a la presa.

La procedencia de los sedimentos que forman parte de un embalse, pueden ser de dos tipos; en primer lugar puede ser de origen externo, donde éstos han sido transportados por el río en suspensión o como carga de fondo hasta el embalse (material alóctono procedente de la cuenca), y en segundo lugar puede ser un material autóctono que se ha formado dentro del mismo embalse. Los materiales que están sedimentados en el embalse no tienen porque tener las mismas características físico-químicas que el material que ha sido transportado en suspensión por el río. Durante el proceso de transporte se producen procesos de selección de sedimentos, dónde éstos vienen dados por el tamaño de las partículas, y por la variación de la energía del flujo que las transporta. Este hecho produce una gran heterogeneidad espacial no solo en lo referente a la estructura física del sedimento, sino que además también a su composición química. Asimismo no se puede considerar al sedimento como una simple acumulación de partículas inertes, ya que en ellos se producen una serie de reacciones biogeoquímicas que modifican la naturaleza y estructura del material sedimentado. Por ejemplo, la interacción entre la materia orgánica y las arcillas (partículas sedimentarias inorgánicas de tamaño muy fino) genera agregados complejos de mayor tamaño, en los que la materia orgánica queda protegida de la biodegradación, no descomponiéndose, y por lo tanto, quedando mucho más tiempo establecida en los sedimentos. Estos agregados además tienen una gran capacidad de adsorción (propiedad de un sólido para retener partículas de un fluido en su superficie) por lo que retienen iones metálicos o nutrientes en las formas particuladas que en caso de no existir no serían retenidos y estarían en disolución en el agua. En el sedimento depositado, por otro lado, también se produce la actividad de organismos que alteran sus condiciones físico-químicas, siendo el potencial redox una de las que tiene mayor importancia. Como resultado de estas reacciones, las formas en equilibrio de los distintos metales y nutrientes pueden variar, con lo cual se modifican los flujos de intercambio entre el agua y el sedimento.

La pertenencia de los elementos disueltos y particulados en el entorno químico, hacen que el sedimento pueda pasar a ser una fuente de elementos químicos, especialmente nutrientes y contaminantes hacia el agua del embalse que está en contacto con ellos, cuando las propiedades físico-químicas del sedimento se ven afectados, o cuando éste vuelve a estar en suspensión por cambios naturales en el flujo del agua debidos a



cambios causados por una acción humana, como pueden ser diferentes operaciones de movilización de sedimentos.

Así pues, los sedimentos pueden retener altas concentraciones de nutrientes y/o contaminantes que no tienen porque ser iguales a las que se encuentran en el agua, y en algunos casos pudiendo llegar a ser superiores. Es por ello que el estudio detallado de la calidad de los sedimentos y su monitorización tiene un gran interés en la gestión ambiental del ecosistema. Aunque la composición tanto física como química de un sedimento no es la única manera de valorar su calidad, sí que es una de las características de estudio más utilizadas en los ecosistemas acuáticos de diversos tipos.

Es por tanto el conocimiento detallado de los sedimentos depositados en el fondo de un embalse un requerimiento esencial para la gestión adecuada de éste, teniendo especial importancia la capa superficial de estos, ya que esta parte es la que más interacciona con el agua del embalse y la que mejor refleja los procesos biogeoquímicos que tienen lugar en el sedimento. Es muy importante también conocer la distribución granulométrica del sedimento causado por los procesos de selección del flujo, ya que la naturaleza granulométrica puede variar los procesos biogeoquímicos, y de esta manera, la información obtenida en una determinada zona de muestreo puede ser poco representativa del conjunto de materiales que forman el sedimento.

2.2 Características en la sedimentación en los embalses

Des del punto de vista geomorfológico la vida de un embalse se puede describir a partir de tres episodios bien diferenciados:

-Estadio 1: Captura continuada de sedimento. La construcción del embalse modifica el antiguo cauce del río, convirtiéndolo en una gran superficie de aguas estancadas, prácticamente sin movimiento, dónde hay una alta capacidad de captura del sedimento. Cuando el río entra en el embalse, su capacidad de transporte cambia drásticamente por la pérdida de velocidad del flujo y la carga total de sedimentos transportada depende esencialmente de las condiciones hidráulicas existentes en el embalse, más que de la propia disponibilidad de sedimento. Así, la sedimentación de las partículas en el embalse se produce de tal manera que las partículas más gruesas decantan en la cola del embalse (punto dónde el flujo pierde en gran parte su capacidad de transporte), y las partículas más finas (arcilla y limo, diámetro <math><60 \mu\text{m}</math>) son depositadas en el centro de la zona de la presa, ya que estas partículas son transportadas por la propia turbulencia del flujo, las corrientes de densidad o por la suspensión coloidal. La sedimentación se



produce principalmente en el antiguo canal del río, y a medida que va aumentando la sedimentación, empieza la formación de una llanura aluvial sumergida.

A medida que se va incrementando la sedimentación del embalse, se produce una transición desde un estadio de sedimentación continuado hacia un estadio de régimen mixto de deposición y erosión.

-Estadio 2: Canal principal y crecimiento de la llanura aluvial. Éste estadio se produce cuando la sedimentación llega a la cresta de la presa. Bajo éstas condiciones el canal principal se sigue manteniendo por la erosión y el transporte de sedimento. No obstante, continua la acreción de sedimentos en la llanura aluvial hasta el punto que su altitud es superior a la cresta de la presa.

-Estadio 3: Equilibrio sedimentológico. Se considera que se llega a este estadio cuando el volumen de entrada y salida de sedimento en el embalse se igualan en el balance. En este estadio la llanura aluvial puede llegar a crecer por encima de la presa y en determinados casos, los depósitos deltaicos pueden llegar a la presa antes que se haya llegado al estado de equilibrio.

3. TÉCNICAS DE GESTIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES Y EJEMPLOS DE APLICACIÓN

3.1. Métodos de gestión del sedimento en embalses

Actualmente, existen varias técnicas para gestionar el sedimento acumulado dentro de los embalses que, ya sea individualmente o mediante su combinación, permiten su removilización y transferencia a través de las compuertas de las presas.

Estas técnicas se agrupan según su objetivo final sea (Morris & Fan 2000; White 2001):

- Minimizar la sedimentación en los embalses donde se incluyen técnicas de traspaso como el lavado, las corrientes de densidad o los sistemas de by-pass.
- Removilizar el sedimento acumulado dentro del embalse mediante la generación de caudales de arrastre o “flushing”.
- Controlar la localización de los depósitos de sedimento en los embalses para realizar su extracción mecánica (p.e. dragado).

Cada una de estas técnicas tiene unas limitaciones técnicas, socioeconómicas y ambientales, que restringen su aplicación.



En la aplicación de estas técnicas hay que tener en cuenta los impactos que pueden llegar a producirse en el ecosistema fluvial, tanto por las altas tasas de sedimentación que se llegan a alcanzar como para la alta concentración de sólidos en suspensión que pueden afectar tanto a los hábitats fluviales como a la supervivencia de peces. Para minimizar estos impactos deben de establecerse varias medidas de mitigación tales como escoger el período y duración adecuada de la ejecución de las operaciones, cambiar el modo operativo del embalse, coordinar las operaciones aguas arriba y aguas abajo, construir hábitats para peces y especies acuáticas que permitan su recuperación y supervivencia, etc.

Actualmente todavía existe un alto grado de incertidumbre en cuanto al potencial de aplicación de estas técnicas, su viabilidad técnica y operacional y su éxito en la transferencia de sedimentos aguas abajo del embalse.

En la *Tabla 1* se muestran las ventajas e inconvenientes de las diferentes técnicas de gestión:

Tabla 1. Ventajas e inconvenientes de la aplicación de las diferentes técnicas.

Técnica	Ventajas	Inconvenientes
Liberación de corrientes de densidad	<ul style="list-style-type: none">• Si el embalse tiene una morfología adecuada (estrecho y corto) la operación puede ser muy efectiva.• Es una técnica relativamente económica.	<ul style="list-style-type: none">• Tiene que haber compuertas de fondo y tienen que estar operativas.• Hay que prever con antelación la apertura de compuertas durante los episodios de crecida.
By-pass	<ul style="list-style-type: none">• Se consigue evacuar los sedimentos aguas abajo de la presa antes de que lleguen al vaso del embalse.	<ul style="list-style-type: none">• Infraestructura muy cara de realizar y necesita un buen dimensionamiento.• Necesita mantenimiento.
Arrastre hidráulico	<ul style="list-style-type: none">• Relativamente económico en comparación a otras técnicas.	<ul style="list-style-type: none">• Necesidad de vaciar el embalse (pérdidas económicas y de capacidad de gestión).• Requiere estudio detallado de los sedimentos depositados.• Requiere un caudal mínimo de arrastre.



		<ul style="list-style-type: none">• Requiere utilización de compuertas de fondo.
Extracción mecánica	<ul style="list-style-type: none">• La más efectiva de todas las técnicas.• No hace falta perder capacidad de almacenaje durante la aplicación.	<ul style="list-style-type: none">• Muy costoso económicamente.

3.2.1 Arrastre hidráulico o “flushing”

La técnica del arrastre hidráulico o “flushing” es una técnica que consiste en la liberación del sedimento depositado en el vaso del embalse a través de las compuertas de fondo de la presa, y preservar así la capacidad útil de los embalses. Éste método de arrastre difiere de los métodos de traspaso (p.e. corriente de densidad) fundamentalmente en dos aspectos: 1) éste tipo de técnica es capaz de remover el sedimento depositado en el reservorio mientras que las técnicas de traspaso no; 2) la cantidad de sedimento liberado a través de la presa puede llegar a ser mucho mayor que en las técnicas de traspaso.

Ésta técnica consiste en el vaciado temporal del embalse a través de las compuertas de fondo permitiendo la restauración del antiguo curso fluvial del río a lo largo del vaso del embalse. En cuanto el embalse es vaciado y los depósitos de sedimentos de la presa quedan parcialmente emergidos se crea un canal de erosión encima del paquete sedimentario que es transferido aguas debajo de la presa. Ésta técnica se puede aplicar en embalses ya construidos (aunque en determinadas circunstancias hay que adaptar o construir las compuertas de fondo de las presas), o en embalses de nueva construcción dónde la presencia de las compuertas de fondo ya forme parte del diseño. No obstante, ésta técnica no se puede utilizar en todas las presas, sino que se son necesarios una serie de condicionantes de diseño para que esta técnica sea efectiva. Según Morris & Fan (2000) la aplicación de esta técnica puede ser efectiva cuando:

- 1) La removilización del sedimento se efectúa en aquel previamente depositado.
- 2) La evacuación del sedimento se produce en el sedimento depositado durante el periodo de tiempo transcurrido entre dos operaciones de arrastre.
- 3) La geometría del canal de erosión facilita el movimiento de las corrientes de densidad hacia el pie de la presa y su posterior transferencia aguas abajo.

Entre los factores que determinan el volumen de sedimento removido por el canal de erosión destacan el ancho del canal de erosión en relación al ancho total del embalse, la tendencia a la formación de corrientes de densidad, la capacidad hidráulica del canal de



erosión y el modo de operar del embalse.

Uno de los factores que hay que tener en cuenta es que para poder llevar a cabo esta técnica hay que vaciar el embalse para que el río pueda erosionar y transportar el sedimento depositado en el reservorio; con lo que ello pueda comportar. Una vez el embalse ya ha sido vaciado, los sedimentos que va arrastrando el río también son transportados a través de las compuertas de fondo de la presa.

Como característica principal, cabe destacar que las concentraciones de sedimento en el agua que se obtienen son muy altas, sobre todo si se aprovechan episodios de crecida del río, dónde se puede transferir una gran cantidad de sedimentos a través de un gran caudal en muy poco tiempo. Por lo tanto, en la mayoría de los casos se aprovechan éstas épocas para la aplicación de ésta técnica.

Según Fan (1986), esta técnica se puede clasificar en dos grandes categorías generales:

- 1) Arrastre por vaciado o flujo libre: ésta técnica consiste en el vaciado total del embalse hasta las compuertas de fondo, de tal manera que el canal erosivo trasfiere el material arrastrado a través de las compuertas.
- 2) Arrastre por presión: a diferencia del arrastre por vaciado o flujo libre, el embalse se vacía parcialmente y por encima de las compuertas de fondo con lo que el arrastre es menos efectivo.

Esta técnica se aplica de una u otra manera en función del margen de maniobra que se disponga en la cobertura de las diferentes demandas hídricas de las cuales depende éste embalse y las características de la presa.

De ésta manera, para aplicar ésta técnica de manera exitosa hay que realizar preferiblemente un vaciado total del embalse aunque ello repercuta en un cambio sustancial en la gestión de éste.

Otro motivo por el cual debe realizarse el vaciado total del embalse es el hecho que puede producirse la deposición del material arrastrado desde la cola del embalse hacia las zonas más próximas a la presa. Este hecho puede agudizar el problema de deposición de los sedimentos en la zona más cercana a la presa con lo que se pueden generar varios problemas como son, entre otros, el bloqueo de las compuertas de fondo y la erosión del sistema de turbinado. En consecuencia, la aplicación de la técnica de arrastre hidráulico mediante el vaciado total o parcial del embalse conlleva una serie de problemas técnicos, económicos y medioambientales que limitan su uso. Estos factores



se describen en la *Tabla 2* y se dan una serie de criterios para conseguir un arrastre hidráulico más efectivo:

Tabla 2. Factores limitantes de las operaciones de arrastre y solución para aumentar la efectividad.

Factores limitantes	Solución para aumentar efectividad
No se puede conseguir el vaciado total del embalse por la inexistencia de compuertas de fondo o éstas no son capaces de desaguar el caudal suficiente.	Construcción de compuertas de fondo en la presa construida o tener en cuenta en la fase de diseño.
Se dispone de un caudal limitado para realizar la operación eficientemente.	Aplicar un caudal alto durante un período temporal pequeño (más efectivo que aplicar un caudal pequeño durante un largo periodo).
La formación del canal de erosión dependerá de la anchura del embalse. Si es demasiado ancho el canal cubrirá poca superficie.	Ayuda mediante medios mecánicos a la apertura de canales auxiliares.
El sedimento depositado puede tener mayor tamaño de grano al esperado o presentar un estado de consolidación y compactación elevado.	Hacer una buena caracterización de los materiales depositados, para hacer un mejor diseño de caudal para la operación de arrastre.
Pérdidas económicas por parte la empresa hidroeléctrica que gestiona el embalse y las compañías deportivas y turísticas.	Realización de una buena campaña de sensibilización y acuerdo económico entre los diferentes agentes implicados.
Pérdida de la capacidad de almacenaje.	Hay que escoger una época del año húmeda para poder garantizar un caudal mínimo durante la operación y efectuar un rellenado rápido del embalse.
Problemas medioambientales aguas abajo de la presa debido a las altas concentraciones de sedimento.	Realizar un buen control de la concentración de sedimento aguas abajo de la presa durante las operaciones y parada en caso que la concentración sea demasiado excesiva.

Según Morris & Fan (2000) las fases de la operación de arrastre son tres: vaciado, erosión y rellenado. A continuación se presenta con detalle la explicación de las tres fases:



- 1) Vaciado: en la primera fase, llamada vaciado preliminar, se vacía el embalse al mínimo, garantizando el subministro de agua a la población y la generación de energía hidroeléctrica. Posteriormente, una vez ha terminado el vaciado preliminar durante algunos días, se realiza el vaciado final, dónde se vacía el embalse al mínimo mediante las compuertas de fondo. A diferencia del vaciado preliminar, esta segunda fase dura del orden de algunas horas y empieza a haber una movilización importante y compleja de los sedimentos. Es en esta fase cuando hay una gran transferencia de sedimentos desde la cola del embalse hasta las partes más bajas del vaso; produciéndose en algunos casos corrientes de densidad del material erosionado.
- 2) Erosión: ésta segunda fase tiene lugar cuando el antiguo curso fluvial del río se restablece a lo largo de todo el embalse en forma de canal y dónde la velocidad del flujo es suficientemente alta para permitir la erosión y transporte de los materiales sedimentados. Es en este estadio cuando el potencial hidráulico es suficiente como para removilizar los sedimentos retenidos en el vaso del embalse y cuando se arrastra la mayor cantidad de material, siendo la más efectiva y donde se recupera la mayor parte de la capacidad de almacenamiento del embalse.

A nivel temporal, éste proceso puede durar unos días o unas semanas, en función de cuál sea el caudal circulante por el canal y la cantidad de sedimento a removilizar.

En esta fase se pueden distinguir dos momentos bien diferenciados:

Formación del canal de erosión: empieza cuando el flujo arrastra el sedimento depositado en el embalse a través de las compuertas de fondo. Es aquí cuándo se produce lo que se conoce como una erosión remontante, producida por un cambio energético del flujo hídrico, debido a los cambios de pendiente del sedimento depositado. Éste cambio de pendiente llamado punto de pivotaje o “nickpoint” aparece en la zona más cercana a la presa, y va retrocediendo, alejándose de la presa, a medida que el material va siendo arrastrado por el canal. Éste proceso termina por homogeneizar la pendiente del sedimento depositado, una vez el “nickpoint” ya no puede retroceder más.

Una vez ha finalizado éste primer momento, empieza el segundo estadio denominado erosión progresiva, dónde la erosión del canal se produce a lo largo de toda la longitud del embalse de manera uniforme, y no sólo en aquellos puntos donde hay cambios bruscos de la pendiente.

En un primer momento, el transporte que produce el agua que llega “limpia” a través del canal es muy alta, ya que la cantidad de material susceptible a ser erosionado es muy grande y la capacidad de erosión del flujo muy alta. No obstante, a medida que el agua

va circulando y va transportando el material de cabecera, la capacidad de transporte y de erosión disminuyen hasta poder llegar a ser prácticamente nula. De ésta manera, las mayores tasas erosivas se producen en las zonas más lejanas a la presa, dónde el agua se encuentra con una menor concentración de sedimentos, y van disminuyendo en la medida que se acerca a ésta, dónde el flujo presenta una mayor densidad. Éste patrón erosivo podría variar si en la zona inicial del paquete sedimentario hubiera un material que requiriera mayor energía de transporte (mayor medida de grano o mayor compactación) situándose la zona más erosiva más cerca de la presa.

Cabe destacar que en este estadio también se forman canales secundarios, o auxiliares que se localizan longitudinal y transversalmente al canal principal.

En la *Fig. 2* se muestran las concentraciones obtenidas en una primera operación de arrastre y en operaciones sucesivas:

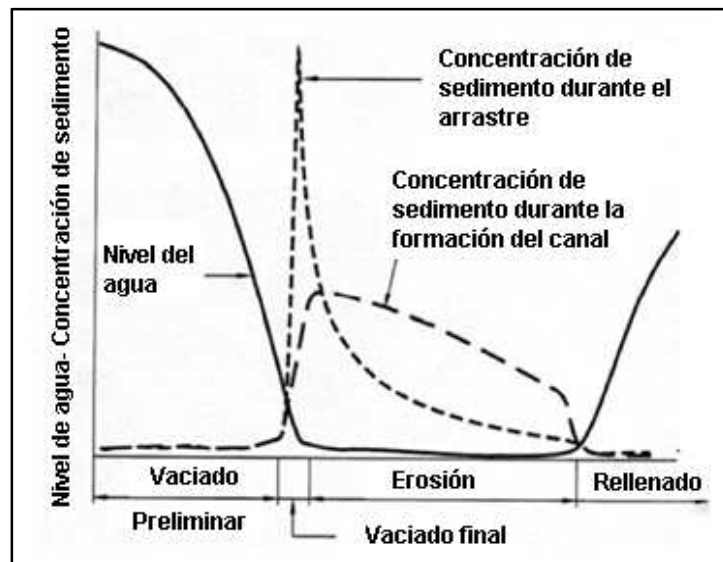


Fig. 2. Capacidad de movilización de sedimentos durante las fases de arrastre y formación del canal de erosión en una operación de vaciado (extraído de Morris & Fan 2000).

Mantenimiento del canal de erosión: Esta segunda fase empieza cuando el canal de erosión se ha estabilizado. Una vez llegado a éste estado, el canal erosiona los sedimentos depositados entre dos operaciones de arrastre, dónde la erosión del sedimento es más fácil que en la fase anterior debido al bajo grado de compactación de los materiales depositados en el propio canal.

En aquellos embalses con gran anchura se forma un tipo de geometría parecida a una llanura de inundación donde una parte del sedimento que entra en el embalse se deposita en ella. Éste hecho puede comportar la acumulación continuada de sedimentos

en la llanura de inundación, lo que requiere con frecuencia la apertura mecánica de canales auxiliares para la removilización de sedimentos que se encuentran fuera del área de erosión del canal principal (Morris & Fan 2000).

- 3) Llenado: éste episodio empieza justo después del cierre de las compuertas de fondo y el posterior rellenado del embalse. Es aquí cuando se vuelve a producir un proceso de sedimentación de los materiales que entran de nuevo. No obstante, al estar el agua a la entrada del embalse poco cargada en sedimento y tener muy alto potencial para transportar sólidos, muchas veces se aprovecha para abrir las compuertas de fondo en algún momento del rellenado y arrastrar los sedimentos depositados en el tramo del río aguas abajo de la presa.

En la Fig. 3 se muestran los tres episodios de una operación de arrastre:

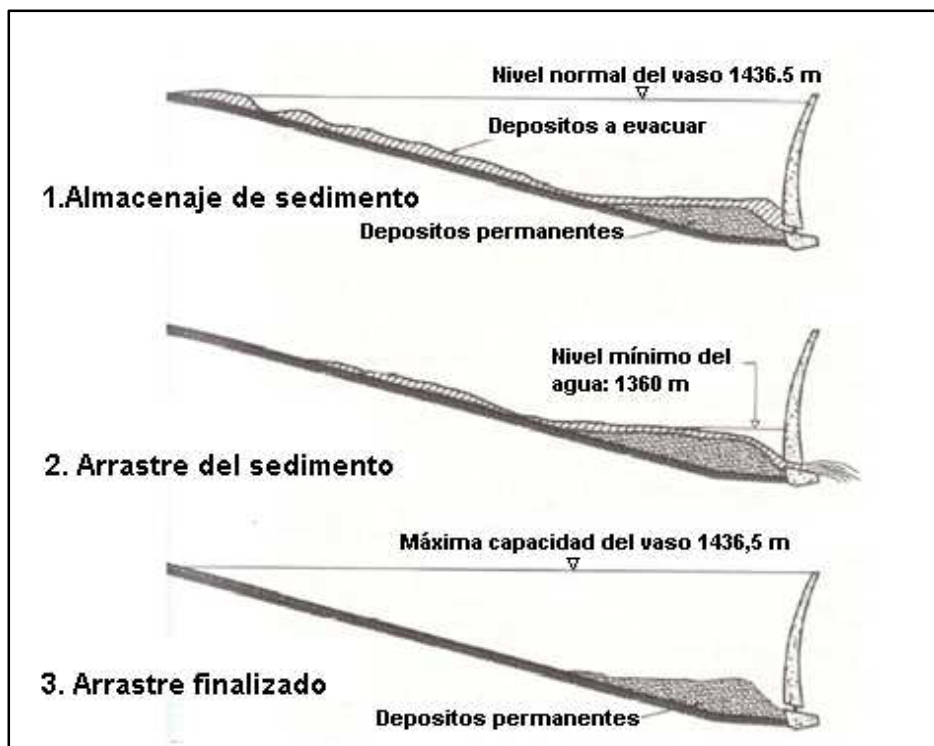


Fig. 3. Ejemplo de secuencia de una operación de arrastre (extraído de Morris & Fan 2000).

3.2.2 Corrientes de densidad

Se puede definir una corriente de densidad como un movimiento inducido por la gravedad de un fluido que viaja por debajo, a través o por encima de otro fluido, como causa de las diferencias de densidad entre los dos cuerpos (Morris & Fan 2000). Los cambios de densidad en el agua vienen determinados por la diferencia de temperatura, el contenido de sólidos en suspensión y al contenido en sólidos disueltos. El factor más importante en

los cambios de densidad en el agua es en primer lugar el contenido de sólidos en suspensión, seguido de las diferencias de temperatura y el contenido de sólidos disueltos (Fig. 4).

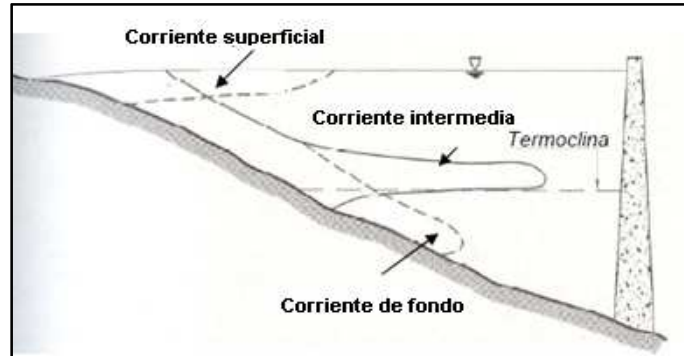


Fig. 4. Esquema vertical de un flujo de agua entrando en un embalse estratificado (Morris & Fan 2000).

Cabe destacar que aunque los dos efectos no tienen el mismo peso en la creación de este tipo de corrientes, los dos juegan un papel muy importante.

Una de las principales características de las corrientes de densidad es que pueden viajar grandes distancias, y en algunos casos, éstas han llegado a ser de hasta un centenar de kilómetros (lago Mead, EEUU). Se puede transferir una gran cantidad de sedimento entrante en aquellos casos en que la distancia de viaje potencial de la corriente es superior a la longitud del embalse. Así, en algunos casos de aplicación de éste método se ha llegado a transferir aguas abajo la mitad del sedimento entrante mediante crecidas individuales, como es el caso de algunos embalses situados en China o Argelia. Para que una corriente de densidad sea efectiva en cuanto a la transferencia de sedimento hace falta que la crecida exceda temporalmente a la llegada de la corriente desde el punto de sumersión hasta la presa, ya que para que estas corrientes se mantengan tiene que haber una entrada continua de agua cargada con sedimento. Cuando el flujo de entrada cargada con sedimento finaliza, la corriente de densidad se disipa y por tanto también la transferencia de sedimentos a través de la presa.

Ésta técnica ha sido utilizada desde principios del siglo XIX en diferentes países como por ejemplo E.E.U.U. y China, con el fin de evitar la decantación de sólidos en los embalses y transferir éstos aguas abajo de la presa, así como mantener el equilibrio sedimentológico del río y minimizar el efecto de las presas en el sistema hidrogeomorfológico y el ecosistema fluvial. En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de ésta operación:



Fig. 5. Liberación de corrientes de turbidez a través de la presa del embalse de Xiaolangdi, China (Yang 2008).

Las corrientes de densidad se caracterizan por:

- 1) La interfaz entre la corriente de densidad y el fluido que la envuelve es brusca.
- 2) La cabeza de la corriente de densidad es la parte de la corriente con más turbidez y va disipándose en la medida que se acerca hacia la cola.
- 3) Estas corrientes se caracterizan por tener un comportamiento inestable.
- 4) Pueden pasar por encima de los diferentes obstáculos que se interpongan a ella debido a su comportamiento de baja gravedad; tal y como ha sido demostrado en diferentes experimentos de laboratorio.
- 5) Cuando más alto es el caudal de entrada en un embalse, más alta es la velocidad de la corriente de turbidez.

Se puede determinar la existencia de una corriente de turbidez en la superficie de un embalse por la presencia del “plungepoint” o línea de sumersión (Fig. 6), que es aquel punto o línea donde el agua que entra en el embalse se sumerge por debajo del agua almacenada en el reservorio. El “plungepoint” queda definido por dos características principales: 1) el cambio brusco en la coloración del agua, donde el agua turbia entrante se sumerge por debajo del agua clara embalsada y; 2) por la acumulación de troncos y restos flotantes que se acumulan estáticamente en este punto. Esta acumulación de materiales flotantes en el punto de contacto entre las dos aguas es debido al efecto del movimiento de la corriente de densidad que cuando esta entra a cierta velocidad, el agua

embalsada estancada realiza un movimiento de contracorriente muy débil debido a la fricción entre las dos aguas, creando un punto de intersección con dos velocidades opuestas y acumulando materiales flotantes estáticamente.



Fig. 6. Línea o punto de sumersión “plungepoint” en el embalse de Eril Ermda, Algéria (ICOLD 2007)

Normalmente el “plungepoint” se forma en el límite inferior del delta sedimentario que se forma en la cola del embalse. No obstante, su posición no es estática sino que varía en función del nivel de agua en el embalse, el caudal entrante, la concentración de sólidos en suspensión y la geometría de éste, entre otros. Por ejemplo, puede ser que en cuanto baje el caudal o la concentración de sólidos en suspensión de la corriente entrante, el “plungepoint” se traslade aguas abajo.

La línea de sumersión puede variar según la morfología del embalse; en concreto en función de la anchura de éste. De ésta manera, en los embalses estrechos esta línea puede ocupar toda la anchura del embalse y crear una zona de frontera entre las aguas con alta densidad de la corriente entrante cargada de materiales en suspensión y las aguas embalsadas con menor densidad. En cambio, en los embalses con mayor anchura, ésta línea se suele presentar en forma de lengua que va variando de posición en función de las características del flujo de entrada.

A parte de éstos dos hechos indicadores de las corrientes de densidad, éstas corrientes sólo se pueden detectar de una manera inequívoca cuando salen a través de las compuertas de fondo de la presa. De ahí que, para poder identificar exactamente la presencia de este tipo de corrientes se requiere de una monitorización en continuo de los sólidos en suspensión con un punto inmediatamente aguas arriba de la entrada del embalse y, otro punto al pié de la presa para detectar su presencia. Ésta monitorización también permite establecer la velocidad de las corrientes de densidad.



A parte del muestreo de los sólidos en suspensión hay otros parámetros indicativos que se pueden medir para el control y la localización espacial de la corriente, como pueden ser la temperatura y el oxígeno disuelto, durante los periodos de crecida.

Movimiento y transporte de las corrientes de densidad

Según Ford & Johnson (1983), las corrientes de densidad al ser flujos dirigidos principalmente por la gravedad, normalmente viajan a través del antiguo canal de estiaje del río.

Referente al tamaño del material del sedimento transportado, en cuando se inician este tipo de flujos, éste es muy heterogéneo y depende de la capacidad potencial de transporte que varía en función de las propiedades del flujo. Al producirse un flujo turbulento se produce el transporte de partículas superiores al que tendría este flujo en estado laminar y por tanto, su capacidad potencial de transporte aumenta. De esta manera, la deposición de los materiales que lleva en suspensión el flujo se produce de manera gradacional a través del vaso del embalse, ya que este tipo de corrientes van perdiendo capacidad de transporte con la pérdida de velocidad. Así, en las partes más cercanas a la cabecera del embalse se encuentra la deposición de los materiales con mayores medidas de grano, y a medida que el flujo se va desplazando en dirección a la presa va depositando de forma gradual materiales cada vez más finos.

La pérdida de los materiales más gruesos en la corriente de turbidez tiene un doble efecto; por una parte el flujo pierde densidad y en segundo lugar hay una disminución de las fuerzas gravitacionales que mantienen en flujo en movimiento. Estos dos factores causan el descenso de la velocidad de la corriente de densidad que se traduce en una disminución del flujo turbulento y una pérdida de la capacidad de transporte de éste. Este proceso se inicia en el punto de sumersión donde la corriente pierde cierta capacidad de transporte por la disminución de su velocidad, y las partículas más gruesas son sedimentadas. Estas corrientes terminan por disiparse si no hay una entrada continuada de un flujo en el embalse, de tal manera que si el tiempo de viaje que requiere la corriente para llegar hasta la presa es mayor que el tiempo que existe en el flujo entrante la corriente termina por disiparse. Por otra parte, cuando las condiciones son las adecuadas (concentración de sedimento adecuada y tasa de sedimentación de las partículas lenta), las corrientes de densidad pueden llegar a viajar grandes distancias.

La *Fig. 7* muestra la circulación de una corriente de turbidez dentro de un embalse:

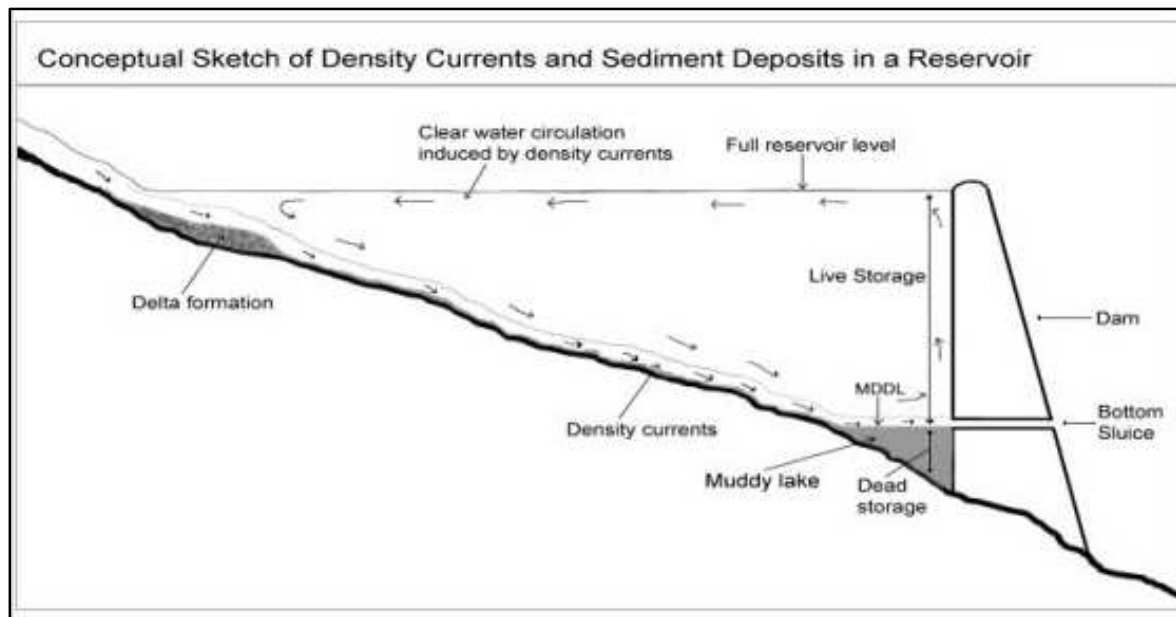


Fig. 7. Circulación de las corrientes de turbidez dentro de un embalse y deposición de sedimentos (Morris 2000).

Formación de depósitos y efectos de la sedimentación

Las corrientes de densidad crean básicamente dos tipos de depósitos de sedimentos; los depósitos tipo vaguada y los depósitos formados al pie de la presa del embalse. El segundo tipo se origina por aquellas corrientes de densidad que llegan al fondo del embalse, en la zona de la presa.

A continuación se hace una pequeña explicación de esta tipología de depósitos:

- 1) Depósitos de vaguada: estos depósitos se forman por la sedimentación de las partículas finas llevadas por la corriente de dentro del embalse. Las dimensiones de estos depósitos muestran la importancia de estas corrientes como mecanismos de control, transporte y deposición de las partículas de menor tamaño de grano dentro del embalse.

Debido a la disipación del flujo de la corriente a medida que se va desplazando por dentro del embalse se produce una distribución del paquete sedimentario, dónde se observa que tanto el grueso de éste como la medida de las partículas que forman el sedimento, decrecen a medida que se desplaza aguas abajo, debido a la naturaleza cuneiforme del flujo. Los materiales que forman parte de ésta tipología de depósito son más finos que los depósitos sedimentados de la cola de embalse que corresponden a depósitos deltaicos.

En la gran mayoría de los casos, la carga sedimentaria transportada por las corrientes de densidad empieza a depositarse inmediatamente aguas abajo del punto de sumersión,



punto en el cual la corriente pasa de ser un flujo turbulento a una corriente de densidad. Aguas abajo de este punto, las partículas van sedimentando sobre la antigua vaguada en el cauce del canal hasta que la corriente se disipa totalmente. Por otro lado, en las zonas más distantes a la vaguada o las zonas marginales menos profundas, la cantidad proporcional de sedimento que se deposita es muy baja.

- 2) Depósitos de pié de presa: esta tipología de depósitos se forman cuando las corrientes de densidad llegan hasta éste punto y las corrientes no son trasferidas a través de la presa; o bien cuando la transferencia de sedimentos a través de esta se realiza de una manera muy lenta. Por contrario, la ausencia de este tipo de depósitos indica que las corrientes de densidad se disipan o depositan la mayor parte de la carga sedimentaria antes de llegar a ésta zona.

En éste caso, en relación con la morfología del paquete sedimentario, este tipo de depósitos consisten en capas prácticamente horizontales de sedimentos que se extienden desde el pié de presa hacia aguas arriba desde este punto. También presentan una interface entre el depósito sedimentario y el agua embalsada muy marcada, la cual puede incrementarse de manera muy rápida después de la entrada de una nueva corriente de densidad y a la caída lenta de las partículas debido a la dificultad a la sedimentación. Como ya se ha comentado anteriormente, en éstos depósitos hay una primera sedimentación de los materiales más gruesos y una posterior sedimentación de los materiales más finos, y en las condiciones más apropiadas se crea una estratificación donde las partículas se clasifican de mayor a menor diámetro de partícula desde la parte inferior del estrato hacia la parte superior, y donde los estratos están asociados a las principales crecidas. Éste tipo de depósitos crecen en tanto que el volumen de sedimento transportado por la corriente de densidad supere a las pérdidas por traspaso de la corriente de densidad a través de la presa y por la subsidencia del depósito dada la compactación del sedimento ya depositado.

La formación de estos depósitos no solamente se produce en el pié de una presa sino que también se puede formar aguas arriba de un obstáculo sumergido tal como una mota; y aunque algunas corrientes de densidad puedan presentar una concentración baja en sedimentos, la formación de esta tipología de depósitos es igualmente posible.

La entrada continuada de corrientes de densidad dentro del embalse comporta una deposición constante de sedimentos en el vaso del reservorio que puede causar la modificación de la geometría inicial, de tal manera que se pueden llegar a modificar las condiciones originales que eran favorables para la formación y tránsito de corrientes de densidad a través de éste. Estos cambios en la geometría del vaso del embalse vienen



explicados principalmente por los dos tipos de depósitos descritos anteriormente: la progresiva sedimentación de la vaguada y los depósitos de pié de presa. En el primer caso, la sedimentación de la vaguada del río comporta una modificación del fondo de los sedimentos del embalse, creando un fondo ancho y llano, y haciendo que las corrientes de densidad reduzcan su espesor e incrementen su anchura. En su efecto, se produce un aumento tanto del cauce como de la fricción entre la corriente de densidad y el agua almacenada en el embalse, facilitando la disipación de la corriente. En el segundo caso, los depósitos de pié de presa sustituyen la pendiente original del fondo por una superficie prácticamente horizontal que se extiende desde el pié de la presa hacia aguas arriba. En consecuencia, se produce una disminución de la fuerza gravitacional que domina el movimiento de avance de este tipo de corriente y la corriente se disipa. La acumulación de sedimento en la zona de la presa comporta interferencias en las operaciones de las compuertas de fondo, y en algunos casos puede llegar a bloquearlas. Por el contrario, la formación de un delta en la cola del embalse comporta la reducción de la longitud efectiva del vaso del embalse y provoca que la línea de sumersión se vea desplazada hacia el pié de la presa, reduciendo la distancia de tránsito de la corriente de densidad y posiblemente incrementando la pendiente del vaso del embalse, y por tanto facilitando el movimiento de la corriente y su transferencia a través de la presa.

La transferencia de sedimentos a través de las presas por las corrientes de densidad

La vía de salida de las corrientes de densidad a través de una presa se realiza a través de las compuertas de fondo situadas en la base de la presa. El éxito o fracaso de la transferencia a través de la presa depende de la localización de las compuertas de fondo y del caudal de salida, que tiene que ser como mínimo igual al flujo entrante de la corriente de densidad.

Las características que determinan cuales son aquellas corrientes de densidad que llegarán al pié del embalse o contrariamente se disiparán antes de llegar a éste punto, son, entre otras, las características de los sedimentos, la geometría del embalse o la duración de la crecida. Si las características no son favorables, el sedimento transportado en suspensión va sedimentando en el vaso del embalse, modificando la geometría de éste y dificultando la propagación de las corrientes de densidad. Es decir, la eficiencia de las corrientes de densidad puede disminuir con el tiempo si hay una sedimentación continuada en la superficie que ocupaba la antigua vaguada. Una práctica eficaz para



remover los sedimentos depositados en la antigua vaguada y en el pié de la presa, es la realización de arrastres mediante la técnica de arrastre controlado, que permite transportar aquel sedimento que ha sido acumulado previamente por la disipación de las corrientes de densidad, a través de las compuertas de fondo. La combinación de estas dos técnicas en un mismo embalse es muy efectiva, ya que permite preservar la geometría del vaso del embalse, evitar la colmatación y mantener la distancia de viaje de las corrientes de densidad.

Una corriente de densidad mantendrá su continuidad hasta las compuertas de base y se disipará en cuanto el flujo de entrada se detenga, es decir, que la eficacia de descarga tiende a aumentar cuando menor es la longitud del embalse y en cuando mayor es la duración del caudal de entrada correspondiente a la crecida que lo produce. A pesar de ello, en la práctica, la eficiencia de la descarga está influenciada en gran medida por el tiempo que las compuertas de fondo están abiertas y la situación de éstas en la presa.

Para que una corriente de densidad sea lo más eficaz posible, hay que prever que tiempo tardará esta corriente en llegar al embalse y cuándo llegará a la presa, para poder calcular el tiempo óptimo de apertura de las compuertas de fondo. Para poder determinar la velocidad de la corriente se puede calcular in-situ mediante la instalación de la instrumentación que permita medirlo, o mediante la aproximación a través de cálculos matemáticos a partir de las condiciones de flujo entrante y las medidas realizadas previamente. A día de hoy, la medición in-situ de estos flujos puede ser determinada con bastante exactitud y sin la necesidad de realizar grandes inversiones, ya que estas corrientes pueden ser medidas mediante sensores de registro de turbidez. Podría ser suficiente la monitorización mediante una estación en la entrada del embalse y dos o tres estaciones más a lo largo de éste, para poder determinar tanto la formación de esta corriente como la velocidad en que se propaga.

3.2. Ejemplos de aplicación de métodos de gestión de sedimentos

En éste apartado se presentan una serie de experiencias en la aplicación de métodos de gestión de sedimentos obtenidos en el estudio “Arrastre controlado de sedimento en el embalse de Riba-Roja d’Ebre”, realizado por Roca & Martín-Vide (2005), dónde se hace una recopilación bibliográfica de diferentes casos de aplicación en el mundo. Según los datos que se facilitan en el estudio, actualmente en el mundo existen aproximadamente 40.000 presas de más de 15 metros de altura, dónde aproximadamente en un millar de ellas se han realizado operaciones de arrastre controlado. No obstante, actualmente sólo



se dispone de información y documentación detallada de 50 casos. En éste apartado se hará una breve explicación de algunas experiencias mundiales así como de un caso nacional, tal y como se verá más adelante.

Cabe destacar que la mayor experiencia de arrastre controlado proviene de China, tanto por el gran número de grandes presas que tiene éste país, como por los grandes problemas de gestión de sedimento que afectan a la cuenca del río Amarillo.

Por otro lado hay que destacar que Francia cuenta con una extensa experiencia en el vaciado de embalses, aunque no se dispone de información específica de operaciones de arrastre. Por ley, en períodos de 10 años, los embalses franceses deben ser vaciados para su inspección. La empresa Electricité de France ha desarrollado un extenso análisis sobre los impactos del arrastre controlado en embalses en las condiciones del río aguas abajo de las presas.

En general, todos los casos que se presentan a continuación, las operaciones de arrastre siempre tienen como objetivo la recuperación de la capacidad del embalse en lugar de tener como objetivo principal la recuperación de la dinámica sedimentaria natural del río desde un punto vista ecológico. Sólo en algunos casos se comenta la recuperación del transporte del material sólido aguas abajo de la presa como un beneficio secundario. Por este motivo, el objetivo de los casos presentados en éste apartado es un tanto diferente al del presente trabajo, no obstante, estos casos son valiosos para tenerlos en cuenta para la posible aplicación en la zona de estudio.

Los casos seleccionados a continuación son los que guardan un mayor parecido con el caso de Riba-Roja d'Ebre. La comparación se establece mediante dos parámetros: el volumen del embalse y el tamaño del embalse en sentido hidrológico. Si el parámetro de comparación es el del tamaño en sentido hidrológico, los embalses que presentan una mayor semejanza con el de Riba-Roja d'Ebre son el de Gebidem y Palgnedra en Suiza y Shuicaozi en China.

El parámetro correspondiente al tamaño del embalse en sentido hidrológico es clave para determinar la efectividad de una operación de arrastre controlado, ya que garantiza los caudales de arrastre y el posterior rellenado de éste. Este parámetro se define como el cociente entre el volumen útil de almacenaje y la aportación media anual del río. En embalses dónde éste coeficiente es menor del 30 %, se consideran embalses con tamaño hidrológico pequeño, y si el tamaño hidrológico es menor al 5%, los embalses permiten un llenado rápido, así como periodos de arrastre más duraderos.

Riba-Roja d'Ebre puede considerarse un embalse pequeño desde el punto de vista



hidrológico, ya que el cociente entre el volumen de agua almacenamiento (210 hm^3) como valor máximo, y la aportación media anual (10.690 hm^3), es de un 2% por lo que con éste criterio, es un embalse en el que se puede aplicar con éxito la operación de éstas características.

Por otra parte, comparando los volúmenes de algunos de los embalses dónde se ha aplicado ésta técnica, los más parecidos a Riba-Roja d'Ebre son el embalse de Warsak (Pakistán), Ouchi-Kurgan (antigua URSS) y Guernsey (EEUU). A continuación se resumen las características generales de estos embalses y las operaciones de arrastre realizadas en ellos.

Presa de Warsak

Situada en Paquistán, la presa de Warsak fue construida en 1960 sin la presencia de desagües de fondo; por lo que las operaciones de arrastre se realizaron vaciando el embalse únicamente hasta la cota del aliviadero situada 12 metros por debajo del máximo nivel del embalse.

Durante los 20 años de operación del embalse, éste quedó prácticamente colmatado y fue por ello que se decidió realizar operaciones de arrastre de fondo. En total se realizaron cinco operaciones, durante el periodo comprendido entre los años 1976 y 1979 con una duración de unos 20 días cada una. El total de sedimentos removilizado en el total de estas cinco operaciones fue de aproximadamente 4 hm^3 . Este sedimento fue muy beneficioso para contrarrestar la erosión que se estaba produciendo en ésta zona.

Posteriormente, no se llevaron a cabo más operaciones de arrastre ya que se llegó a un estado de equilibrio tal que no era posible incrementar el volumen de sedimento a movilizar y aumentar así la capacidad del embalse para el almacenaje de agua.

Guernsey (EEUU)

El embalse de Guernsey (EEUU) fue construido en 1927. Este embalse presenta un volumen de almacenamiento comparable con el de Riba-Roja d'Ebre. En un periodo de 30 años, este embalse perdió un 40% de su capacidad.

Entre 1959 y 1962 y con una frecuencia anual se realizaron vaciados parciales del embalse, dónde las descargas de agua y de sedimentos se realizaban a través del aliviadero y los caudales utilizados fueron cuantificados entre los $120\text{-}140 \text{ m}^3/\text{s}$.

Una gran parte de los depósitos arrastrados en la zona alta del embalse se depositaron nuevamente en la zona cercana a la presa, con lo que las operaciones de arrastre no resultaron del todo eficientes. Por otra parte, también se produjo una baja tasa de



erosión, seguramente producida por la edad de los sedimentos, y por su alto grado de compactación y consolidación.

Dada la baja eficiencia de las operaciones de arrastre y la escasa removilización de sedimentos, los impactos provocados aguas abajo fueron prácticamente nulos.

Palgnedra (Suiza)

La presa del embalse de Palgnedra, construida en 1952, dispone de un túnel de derivación con una capacidad de 225 m³/s (construido en 1974) para permitir que las avenidas cargadas de sedimento pudieran traspasar la presa a través de este bypass. Durante el tiempo de operación del embalse las corrientes de densidad habían causado problemas de sedimentación al depositar materiales más finos en la zona próxima a la presa, y materiales más gruesos (arenas y gravas) en la cabecera del embalse.

En el año 1978 se realizó una operación de arrastre que tuvo una duración de 4 meses y medio y constó de dos fases; una primera fase, de un mes y medio de duración, donde se arrastraron sedimentos a través de las salidas situadas unos 11 metros por encima del fondo original y donde tan solo se evacuaron 0,3 hm³ de material y, una segunda fase, de tres meses de duración, donde se abrieron los desagües de fondo traspasándose 2,1 hm³ de sedimento. Además, se utilizaron medios auxiliares mecánicos para mover material hacia el canal de erosión.

Shuicaozi (China)

Este embalse, construido en 1958, no dispone de desagües de fondo; así que las diversas operaciones de arrastre se hicieron a través del aliviadero. En un período de 23 años, el embalse perdió un 25% de su capacidad, motivo por el cual se llevaron a cabo 6 operaciones de arrastre en el período comprendido entre 1965 y 1981.

Para la realización de las operaciones de arrastre se utilizó un procedimiento basado en el vaciado del embalse hasta la cota del aliviadero, y desde el embalse situado aguas arriba se proporcionaba un caudal de 50m³/s para el arrastre de los sedimentos depositados en el fondo. Las operaciones se efectuaron durante un periodo de un día y se consiguió removilizar una cantidad de 0,2 hm³ de material en cada operación.

La mayor parte de la removilización de los sedimentos se producía en las partes más cercanas a la presa pero éste efecto disminuía aguas arriba, llegando a ser nulo 4 km. aguas arriba de la presa. La poca efectividad de las operaciones de arrastre era debida, a parte de la alta posición del aliviadero, al alto grado de consolidación de los limos ya la alta sedimentación de materiales en la cola del embalse. La erosión regresiva del fondo



se iniciaba dónde alcanzaba la lámina de agua del embalse, controlada por la cota del aliviadero.

A raíz de las observaciones realizadas se propusieron unas pautas de operación que fueron utilizadas en arrastres posteriores al año 1984 y que permitieron incrementar la concentración de material a la salida y reducir el consumo de agua. Estas pautas fueron las siguientes:

-No proporcionar el caudal de arrastre hasta haber conseguido el vaciado del embalse a la cota deseada.

-Una vez formado el cauce principal reducir el caudal de arrastre para provocar la inestabilidad de los márgenes (es decir provocar situaciones transitorias que favorecieran el desplome de las orillas).

-Incrementar de nuevo el caudal para poder arrastrar el material acumulado y así ampliar la sección transversal del cauce.

Gebidem (Suiza)

Previamente a la construcción de la presa de Gebidem (Suiza), en 1968, se estudiaron distintas posibilidades para gestionar los sedimentos optándose finalmente por la técnica del arrastre controlado por ser la más económica. De ésta manera, el diseño de la presa incluyó la construcción de dos desagües de fondo debajo de las tomas de agua y junto al fondo del embalse. Éstas se recubrieron para resistir la erosión.

Actualmente, se realiza una operación de arrastre controlado anual entre los meses de mayo y julio con una duración de unos 2-3 días. En cuanto a la eficiencia de las operaciones, ésta es alta, ya que prácticamente todo el sedimento depositado en el fondo del embalse es traspasado aguas abajo de la presa. Éste hecho es producido por la poca amplitud del embalse, que propicia que el canal de erosión ocupe buena parte de la superficie de éste. Los periodos idóneos para realizar éstas operaciones son aquellos en los cuales los caudales del río son suficientemente pequeños para permitir el vaciado completo del embalse y dónde los caudales del río Ródano (aguas abajo de la presa) son suficientes para diluir las concentraciones de material que proviene del río Massa, dónde se sitúa el embalse de Gebidem.

En la *Tabla 3* se muestran las características generales de las diferentes operaciones descritas:

Tabla 3. Detalle de las operaciones de arrastre realizadas.

Tipo de embalse	Embalse	Operaciones realizadas	Volumen de sedimento removido (hm ³)	Características de la operación
Embalses parecidos a Riba-Roja d'Ebre en sentido hidrológico	Shuicaosi (China)	6 operaciones en 15 años	0,2 hm ³ en cada operación y 1,2 hm ³ en total	<ul style="list-style-type: none"> Vaciado parcial. Alto grado de consolidación de los sedimentos. Bajo caudal de arrastre (50 m³/seg).
	Palgnedra (Suiza)	1 operación (duración 4,5 meses)	2,1 hm ³	<ul style="list-style-type: none"> Caudal muy alto de arrastre (300-1.500 m³/seg). Ayuda con medios mecánicos. Tiene bypass de derivación de sedimentos.
	Gebidem (Suiza)	1 operación anual (duración 3 días cada una)	Muy alto.	<ul style="list-style-type: none"> Existencia de compuertas de fondo
Embalses parecidos en capacidad a Riba-Roja d'Ebre	Warsak (Pakistán)	5 operaciones en 4 años (duración 20 días cada una)	4 hm ³	<ul style="list-style-type: none"> Granulometría muy fina. Vaciado parcial.
	Guernsey (EEUU)	3 operaciones en 3 años	0,14 hm ³	<ul style="list-style-type: none"> Caudal de arrastre pequeño (120-140 m³/seg). Vaciado parcial. Alto grado de consolidación de los sedimentos.

Uno de los mayores problemas que ocurre en las operaciones de arrastre controlado es el impacto ambiental causado aguas abajo debido al aumento repentino de la carga de sedimentos. Entre los problemas más frecuentes destacan los daños en los hábitats de reproducción de peces y moluscos, la abrasión de raíces y tallos de los macrófitos, el arrastre de algas e insectos que no pueden fijarse de nuevo sobre el lecho por estar



recubierto por una capa de material fino depositado, la reducción de la calidad o cantidad de comida de los invertebrados a medida que los finos se depositan sobre algas y hojas, etc. No obstante, la capacidad de recuperación que tiene el ecosistema es elevada. Además, si la cantidad de sedimento en suspensión obtenido en una operación de arrastre es del mismo orden de magnitud que las grandes avenidas del río, no cabe prever efectos negativos de larga duración.

En éste apartado se repasan algunos casos a nivel mundial de la bibliografía en los que se ha prestado especial interés al estudio de estos impactos y la respuesta del ecosistema fluvial en un arrastre de esta tipología.

Spöl (Suiza)

En el río Spöl se provocaron tres avenidas (de diferente magnitud), y cada una de ellas de una duración de 7-8 horas. Los valores máximos de concentración de sedimento fueron de aproximadamente 4 g por litro.

Éstas avenidas tuvieron un claro efecto en los cultivos de *periphyton*, los cuales su recuperación fue más lenta después del último suceso. También se observó que las avenidas disminuyeron considerablemente la riqueza taxonómica, la densidad y la biomasa de macroinvertebrados, aunque hubo una recuperación muy rápida de Chironomidae, Simuliidae, Baetidae y Plecoptera. Los datos obtenidos en referencia a las propiedades físicas del río indicaron que se produjeron cambios en la biota, aunque la recuperación en estos cambios se produjo en un corto periodo de tiempo demostrando que la generación de avenidas artificiales es una herramienta eficaz para el control de las especies invasoras y la conservación de las especies autóctonas.

Tongariro (Nueva Zelanda)

En éste embalse se generaron avenidas controladas con el objetivo principal de recuperar la capacidad del embalse. Tras las operaciones de arrastre se observó un gran descenso de macroinvertebrados, seguramente debido al arrastre por la corriente, y a su vez también se redujo la densidad de alguna colonia de invertebrados. Este hecho llevó a pensar que el arrastre controlado podía ser una técnica eficaz para reducir la proliferación de especies ligadas a la regulación hidrológica. En un tramo situado suficientemente aguas abajo de la presa se comprobó que la composición de la fauna era parecida a la existente aguas arriba, dónde la regulación hidrológica era inexistente.



Colorado (Estados Unidos)

La presa situada en el Glen Canyon es una gran presa situada en el río Colorado, uno de los grandes ríos de Estados Unidos. La decisión de crear avenidas controladas fue motivada por la preocupación por la pérdida de la dinámica hidrogeomorfológica del río Colorado, no tanto como para realizar operaciones de arrastre encaminadas a desalojar el sedimento almacenado en el vaso del embalse para aumentar la capacidad de almacenamiento de éste.

El objetivo principal de la operación era reconstruir unas barras fluviales arenosas elevadas respecto al cauce de aguas bajas, y proporcionar al sistema una dinámica más cercana a la que tenía el río antes de la construcción de la presa. Hubo un gran seguimiento técnico del proceso de restauración dónde equipos científicos de distintas especialidades realizaron un seguimiento del comportamiento del río y sus trabajos se difundieron ampliamente.

En la operación de arrastre controlado efectuada en marzo de 1996 se alteró significativamente la fauna acuática y se eliminaron productores primarios y secundarios a lo largo de todo el río; aunque dependiendo de su categoría biótica los efectos fueron de distinta importancia.

Más de un 90% del bentos fue eliminado en las primeras 24 horas de la avenida, y por contrario, el material más grueso no fue limpiado completamente de algas, especialmente de *Cladophoraglomerata*. Este hecho permitió que tuviera lugar una recuperación de fitobentos hasta en condiciones semejantes a las de antes de la avenida de forma relativamente rápida (aproximadamente un mes).

La biomasa de macroinvertebrados siguió la misma evolución que el fitobentos y se recuperó en unos dos meses. Las muestras tomadas de consumidores primarios con posterioridad a la avenida mostraron una mayor biomasa así como una mayor diversidad de fauna que en las muestras anteriores.

En cuanto a la afectación a los peces, la avenida tubo efectos menores en la distribución, abundancia y movimiento de las especies autóctonas y por contrario sí que tuvo efectos a corto plazo sobre las especies alóctonas. El número de *Oncorhynchusmykiss* “trucha arco iris” alóctona, decreció en aproximadamente un 8%, lo que sugiere que pudo haber sido desplazado aguas abajo por la avenida.

Se concluyó que la avenida fue insuficiente para reducir sustancialmente las poblaciones de peces alóctonos pero que eventos parecidos podrían poner impedimentos a depredadores y competidores exteriores y por tanto aumentar la supervivencia de los

peces autóctonos.

Casos en España

Actualmente en España existe un gran número de embalses (aproximadamente unos 1.200), dónde una gran parte de ellos presentan un importante problema de retención de sedimentos. Aun así, no se tiene el conocimiento de la existencia de demasiada documentación con respecto a operaciones periódicas de mantenimiento de los embalses para la liberación del sedimento depositado en ellos. Los dos casos en los cuales se ha encontrado bibliografía referente al vaciado de sedimentos son el caso del embalse de Joaquín Costa (Huesca, Aragón) y el caso de las operaciones de extracción mecánica de sedimento en el embalse de María Cristina (Castellón, Valencia), no obstante, la información disponible en éste segundo caso es muy escasa.

Embalse de Joaquín Costa (Huesca, Aragón)

El caso de estudio que se presenta en este trabajo, corresponde a las operaciones de arrastre del embalse de Joaquín Costa, conocido también como embalse de Barasona en el río Ésera, efluente del Cinca (*Fig. 8*).

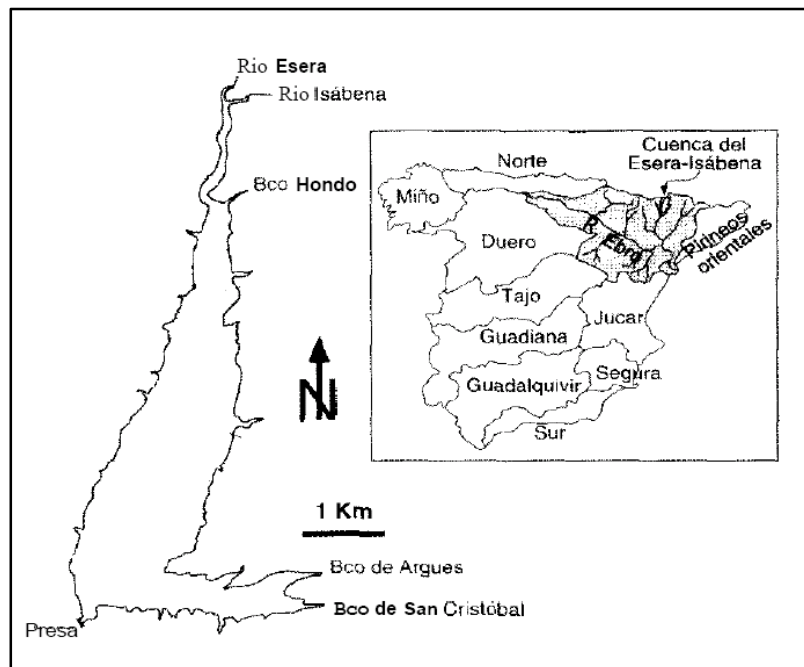


Fig. 8. Planta y ubicación del embalse de Joaquín Costa, Aragón (Navas et al. 1998).

Este ejemplo constituye un valioso ejemplo de las problemáticas asociadas al arrastre controlado de sedimento y a su alta concentración en el río, que además forma parte de



la cuenca vertiente del embalse de Riba-Roja d'Ebre. La documentación disponible y los trabajos realizados fueron promovidos por el Ministerio de Obras Públicas, Transporte y Medio Ambiente junto con la Confederación Hidrográfica del Ebro y dónde distintos grupos de científicos de diferentes universidades y centros de investigación españoles realizaron estudios sobre las consecuencias del vaciado sobre el medio natural y la dinámica de los sólidos en suspensión.

El embalse de Joaquín Costa, construido en 1932 en el congosto Olvero del río Ésera, tenía un volumen original de 92 hm³ y una superficie de 692 Ha. El uso principal es proveer de agua al canal de riego de Aragón y Catalunya además de realizar el suministro de agua potable a las poblaciones cercanas.

En el año 1995, éste embalse había perdido aproximadamente unos 16 hm³ de su capacidad por lo que se llevó a cabo varias operaciones de vaciado para la removilización del sedimento capturado por el embalse. La operación de vaciado se originó por una situación de avería, que llevó a descubrir un grave problema de colmatación de la presa. El problema surgió durante el período de riego del año 1993 en el que la toma del canal quedó taponada por acumulación de lodos y flotantes. Esto provocó una intervención inmediata para liberarla, lo que se llevó a cabo de forma manual. Se detectó además el deterioro de las compuertas de los dos desagües de fondo de la presa, que impedía su utilización para alimentar el canal de riego como alternativa en caso que la toma fallara. Por lo tanto, se impulsó la necesidad de una solución más permanente al problema de acumulación de lodos en el fondo del embalse.

Para la realización de los trabajos de reparación de la toma y los desagües la solución que se optó fue la de vaciar el embalse para su reparación. Dado que durante los meses de marzo a septiembre es fundamental que el embalse esté lleno para aportar agua al canal de riego, los trabajos de vaciado se iniciaron en octubre, debiendo finalizar con tiempo suficiente para conseguir el llenado total del embalse antes de la época de riego. Se realizaron tres operaciones de vaciado durante los meses de octubre de los años 95, 96 y 97.

Para la ejecución de las operaciones se tuvieron en cuenta todos los agentes implicados (regantes, pescadores, miembros de organizaciones ambientales, representantes de los pueblos afectados, científicos, etc.) y se formaron tres comisiones de trabajo. Se tuvieron que llevar a cabo algunas obras auxiliares, en especial en referencia al suministro de agua potable a ciertas poblaciones que quedaban sin servicio debido al vaciado.

Previamente a la ejecución de las sucesivas operaciones se iniciaron los estudios previos



dónde se caracterizaron los suelos de la cuenca con el objetivo de poder identificar las zonas que constituían una fuente de material para el embalse, el propio estudio de sedimentos dentro del embalse para determinar la distribución granulométrica, mineralógica, cantidad de materia orgánica, etc. y finalmente se realizaron batimetrías del embalse, en especial para determinar la altura de los sedimentos en las zonas alrededor de los desagües de fondo.

Durante la operación de vaciado se controló in-situ la concentración de sólidos del efluente en tres puntos, dos de ellos situados dentro del embalse y el último situado justo aguas abajo de la presa, éste último para poder controlar la concentración de sedimento en el punto de la presa y poder minimizar los impactos en el río por este motivo. Se determinó que las máximas concentraciones a las que se llegaron aguas abajo de la presa fueron del orden de pocos gramos por litro.

En cuanto al medio natural, éste fue objeto de numerosos estudios antes y después de las operaciones de vaciado, con el fin de observar los cambios provocados por el flujo con altas tasas de material en suspensión. La conclusión general fue que pasado un cierto tiempo, aproximadamente unos 4 meses después de la operación de vaciado, las comunidades afectadas se habían recuperado perfectamente y que en algunos casos casi incluso se mejoraron las condiciones ambientales ya que se dieron casos de recolonización con especies autóctonas. Dado que la operación de vaciado podía asimilarse a una avenida, el ecosistema fluvial está perfectamente adaptado para superar las fases del flujo con altas tasas de sólidos en suspensión, al formar parte de su dinámica natural.

Durante el estudio de la ictiofauna se determinó que tras el vaciado, la diversidad de peces disminuyó, sobretodo especies exóticas, predominando las especies nativas provenientes de los tributarios localizados aguas arriba.

Los estudios limnológicos llegaron a la conclusión de que la calidad de las aguas antes del embalse era buena, y una vez vaciado y pasado cierto tiempo la calidad volvió a recuperarse. En los tributarios, las conclusiones fueron parecidas, destacándose tres factores que influyeron decisivamente; en primer lugar en la época escogida para el vaciado del embalse la columna de agua está va muy mezclada, por lo que no presentaba problemas de oxigenación. Otro factor importante era que el grado de eutrofización del embalse era muy bajo y por tanto no había materia orgánica que pudiera reaccionar, es decir, la calidad de los sedimentos era buena. Y como tercer factor positivo se señalaba la presencia de crecidas posteriores al vaciado que contribuyeron a condicionar los distintos tramos del río. Estos estudios se basaron en la determinación de



las comunidades de macroinvertebrados y peces.

Los estudios sobre la vegetación de ribera dieron conclusiones parecidas, dónde las especies arbóreas y arbustivas no sufrieron daños, excepto en la zona más cercana a la presa, donde se alcanzaron altos niveles de lodos. Sin embargo, en esas zonas la vegetación se recuperó de forma natural, con especies autóctonas y en algunos puntos aparecieron especies halófitas, ligadas a los lodos, pero que al ser especies anuales desaparecieron.

Por último se hicieron estudios sobre la fauna de la ribera (principalmente anfibios, nutrias y aves) llegando a la conclusión que estas comunidades fueron capaces de adaptarse a los cambios momentáneos que supuso el arrastre de sedimentos en el embalse.

En la *Tabla 4* se muestra un resumen de los impactos producidos en las diferentes operaciones descritas:

Tabla 4. Impacto medioambiental de las operaciones de arrastre realizadas.

Embalse	Concentraciones aguas debajo de la presa	Características
Spöl (Suiza)	4 g/l	<ul style="list-style-type: none">• Reducción de perifiton y macroinvertebrados pero rápida recuperación.• Disminución de algunas especies invasoras de peces.
Colorado (EEUU)	*	<ul style="list-style-type: none">• Recuperación de algas en un mes.• Recuperación de macroinvertebrados en dos meses.• Reducción sustancial de las especies invasoras y recuperación rápida de especies autóctonas.
Tongario (Nueva Zelanda)	*	<ul style="list-style-type: none">• Reducción de invertebrados pero rápida recuperación.
Barasona (España)	<5g/l	<ul style="list-style-type: none">• Recuperación de biodiversidad de macroinvertebrados y peces alóctonos en 4 meses.• Recuperación rápida de la vegetación de ribera dañada cerca de la presa.

*No se dispone de datos al respecto.

4. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1. Características generales de la zona de estudio

La zona de estudio dónde se plantea éste trabajo se sitúa dentro de la cuenca del río Ebro. El río Ebro recorre el extremo nororiental de la Península Ibérica a través del valle que lleva su mismo nombre, situado en una depresión. Éste sigue una dirección noroeste-sureste desde su nacimiento hasta el mar Mediterráneo, en el que desemboca en el delta del Ebro, entre las poblaciones de Deltebre y SantJaume d'Enveja (Fig. 9).

El río tiene una longitud total de 930 km. y su cuenca hidrográfica es la más grande de España, con una superficie de 85.530 km² (Batalla et al. 2006). La cuenca se localiza principalmente en territorio español, aunque una parte de ésta comprende Andorra y Francia.

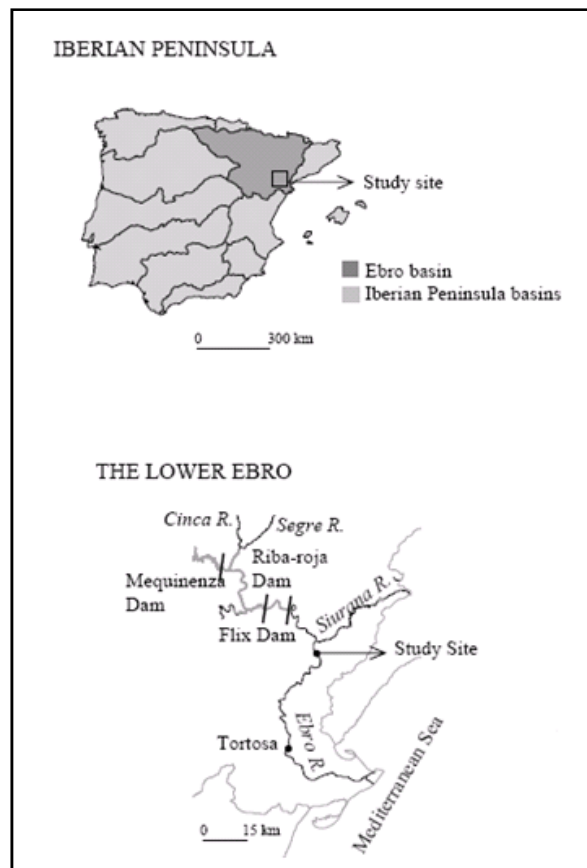


Fig. 9. Ubicación de la zona de estudio (extraído de Batalla & Vericat 2.006)

El tramo de estudio corresponde al bajo Ebro, en concreto el tramo de río comprendido entre la presa de Mequinenza, y la zona de influencia de los embalses de Riba-Roja d'Ebre y Flix. Las principales poblaciones de la zona son Caspe, Mequinenza, Fayón, Riba-Roja d'Ebre y Flix, que son pequeñas localidades que se sitúan justo en las orillas de éstos embalses.



El sistema de embalses se compone de tres presas: Mequinenza, Riba-Roja d'Ebre y Flix. El embalse de Mequinenza fue construido en el año 1965 y presenta una capacidad de almacenamiento 1.530 Hm^3 . Su función principal es la de regulación de avenidas procedentes del tramo principal del río Ebro así como el suministro de agua a regadíos y poblaciones de la zona y a la producción hidroeléctrica. El embalse de Riba-Roja d'Ebre, con una capacidad de 210 Hm^3 fue construido en 1969, cuatro años después de la presa de Mequinenza. A dicho embalse llegan las aguas del Segre, Cinca y Matarraña con crecidas históricas que pueden sumarse a las procedentes del Ebro aguas arriba de Mequinenza. Su principal función es la de suministrar agua a captaciones para regadíos y la producción hidroeléctrica. Finalmente, se encuentra el embalse de Flix, construido a finales de la década de 1940 y con una capacidad de almacenaje de 11 Hm^3 . Su función principal es la de producción hidroeléctrica para el complejo electroquímico de Flix.

Tabla 5. Principales características de los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre.

Embalse de Mequinenza (1996):	
Capacidad:	1.534 hm^3
Superficie inundada:	6.478 has
Cota máxima:	121 msnm
Cuenca Vertiente:	5.790.814,61 has
Profundidad media:	20 m
Profundidad máxima:	60 m
Geometría:	Irregular y meandriforme
Embalse de Riba-Roja d'Ebre (1969):	
Capacidad:	210 hm^3
Superficie inundada:	2.152 has
Cota máxima:	70 msnm
Cuenca Vertiente:	8.082.300 has
Profundidad media:	10,3 m
Profundidad máxima:	34 m
Geometría:	Regular y alargada

El río Ebro es uno de los más regulados de la Península Ibérica y cuenta a lo largo de su cuenca hidrológica con 185 embalses que retienen la mayor parte de sólidos que antaño llegaban al Delta del Ebro.

Las avenidas naturales de la que se tienen registros llegaron a aportar a la zona de Tortosa caudales de $12.000 \text{ m}^3/\text{seg}$ el 24 de octubre de 1.907 o de $10.000 \text{ m}^3/\text{seg}$ el 29 de octubre de 1.937 como cifras más significativas. Los valores de crecidas en años posteriores a la construcción de los grandes embalses muestran en la misma estación de



aforo valores muy por debajo: 3.327 m³/seg el 23 de mayo de 1.971 y 3.780 m³/seg el 9 de noviembre de 1.982 (Sanz Montero, M.E. *et al.*, 2001).

Cabe destacar que comparando aforos desde mediados del siglo pasado en momentos de crecida en Flix y en Tortosa, se obtienen valores superiores de hasta en 1.000 m³/seg en éste último punto. Esto se debe al importante papel de los barrancos y rieras laterales aguas abajo de Flix, especialmente los aportes del río Ciurana, con una cuenca vertiente de 585 Km², la mitad de la superficie de la cuenca vertiente entre las poblaciones de Flix y Miravet (Sanz Montero, M.E. *et al.*, 2001).

Actualmente, la capacidad de regulación de estos embalses es de aproximadamente el 60%, siendo este valor muy superior a la de otras cuencas de tamaño similar como por ejemplo el Rin, el Elba o el Wessem con un grado de regulación de entre el 5 y el 18%.

El caudal medio anual del río aguas abajo de la presa de Flix desde los años 60 (construcción embalses) a la actualidad se estima en 300 m³/seg., caudal inferior al que llevaría el río en condiciones naturales si no existiera dicha regulación, el cual correspondería a unos 500 m³/seg. A éste efecto también se le puede añadir una disminución en el régimen de precipitaciones así como un cambio en los usos del suelo, que conllevan una reducción de la escorrentía superficial.

La presencia de estos embalses produce un doble impacto; por un lado conllevan la regulación hidrológica que provoca, entre otros, una disminución de la frecuencia y magnitud de las crecidas y, por otro lado, una interrupción del tránsito natural de los sedimentos, al quedar éstos retenido en el sistema de embalses. Ello causa la alteración de la dinámica hidrogeomorfológica natural del río aguas abajo del sistema de presas, el establecimiento de los macrófitos en el lecho del río, el favorecer la presencia de especies invasoras ligadas a zonas de aguas tranquilas no sometidas a grandes avenidas ni a estiajes (p.e. mejillón cebrá, siluro, etc.), y la regresión del frente deltaico debido a la disminución de las aportaciones sedimentarias, entre otros.

4.1.1 El sistema de embalses Mequinenza-Riba-Roja d'Ebre -Flix

La construcción de los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre supusieron un cambio trascendental en la dinámica de caudales líquidos y sólidos en el tramo final del Ebro. El embalse de Mequinenza supuso el control del efecto de las avenidas generadas aguas arriba, aparte de destinarse a generar una destacada producción eléctrica. Por su gran capacidad, la función principal es la de regulación y garantía de suministro a

captaciones para regadíos. En la Fig. 10 se observa la presa del embalse de Mequinenza:



Fig. 10. Embalse de Mequinenza (Foto: P.J. Jiménez).

El embalse de Riba-Roja d'Ebre se sitúa estratégicamente para embalsar las aguas del subsistema Segre-Cinca y del Matarraña, que desembocan en el Ebro, además de las que vierte el embalse de Mequinenza. La función primordial a la que se ha destinado el embalse de Riba-Roja d'Ebre ha sido la de la producción eléctrica, manteniéndose de forma casi constante a lo largo del año a una capacidad al entorno del 95% para rentabilizar al máximo la producción y casi independientemente del año hidrológico.

Ya en la población de Flix se sitúa la última presa y embalse del tramo inferior del Ebro. En éste caso se trata de una presa que en su momento substituyó a un antiguo azud de origen árabe. Su construcción a finales de la década de los años cuarenta del siglo pasado fue una respuesta a las necesidades de consumo eléctrico del complejo electroquímico situado en esta población (Fig. 11).



Fig. 11. Trazado del proyecto de construcción de la presa de Flix sobre el antiguo cauce del río (Fuente: Archivo Municipal de Flix).

Por su escaso volumen y nivel de colmatación (su capacidad actual es de 4 Hm³ y la de construcción de 11 Hm³), no cumple ningún objetivo destacable cuanto a reserva ni a regulación. Consta de siete compuertas que pueden liberar agua tanto por vertido como por el fondo, así como una compuerta automática que en su día volcaba el agua cuando llegaba a un cierto nivel del embalse. Dicha compuerta ha sido anulada en los últimos años y ya no cumple su función de evitar sobrelevaciones. La peculiar situación del embalse de Flix en un angosto meandro del Ebro, y el bypass a través de dos túneles de dicho meandro para abastecer la central hidroeléctrica propicia que, en condiciones normales de caudal, solamente circulen por dicho meandro las pérdidas generadas por las compuertas del embalse (Fig. 12).



Fig. 12. Embalse de Flix (Foto: P.J. Jiménez).

Desde principios del año 2000, cuando se convierten en propiedad de la misma hidroeléctrica, el conjunto de los tres embalses funciona como un sistema para obtener el máximo rendimiento hidroeléctrico.

En la práctica aguas abajo del embalse de Flix se garantiza un caudal de 125-150 m³/seg (derivado de las servidumbres, más que del supuesto caudal ecológico). La principal servidumbre corresponde a las necesidades de refrigeración de los dos grupos de la Central Nuclear de Ascó, y aguas abajo las necesidades de los canales de la derecha y la izquierda del Ebro que abastecen a los arrozales del Delta del Ebro. Hasta caudales circulantes del entorno de 400 m³/seg de entrada en el embalse de Flix, todo el caudal se bypassa y se deriva a producción hidroeléctrica (Fig. 13).

sedimentos arrastrados por el río. Como se ha indicado anteriormente, cabe resaltar que cuando se habla de la problemática de los sedimentos no se hace únicamente del paquete sedimentario que retienen los embalses, sino también del propio lecho del río aguas abajo de ellos. En las Fig. 14, Fig. 16 y Fig. 17 extraídas de Sabaté et al. (2011), se pueden apreciar, a partir de la fotointerpretación de imágenes aéreas, los cambios que ha experimentado el cauce del río a nivel de estabilización de barras y márgenes naturales. El crecimiento de la vegetación, primero arbustiva y después arbórea, no es más que la respuesta natural a la falta de avenidas que ahora han menguado tanto en magnitud, como en frecuencia y duración.

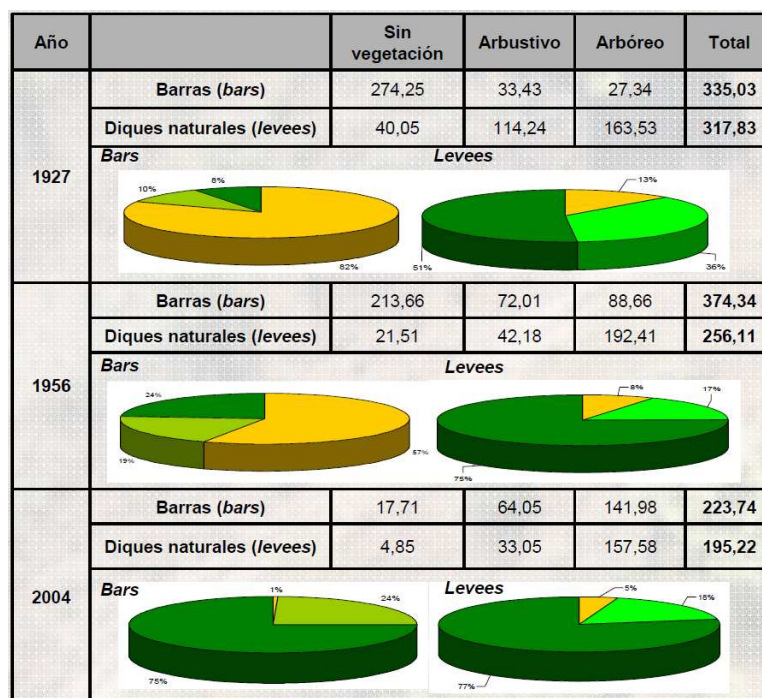


Fig. 14. Distribución de barras y diques naturales, y evolución de su grado de cobertura vegetal en el tramo aguas abajo del embalse de Flix. Fuente: Sabaté et al. (2011).

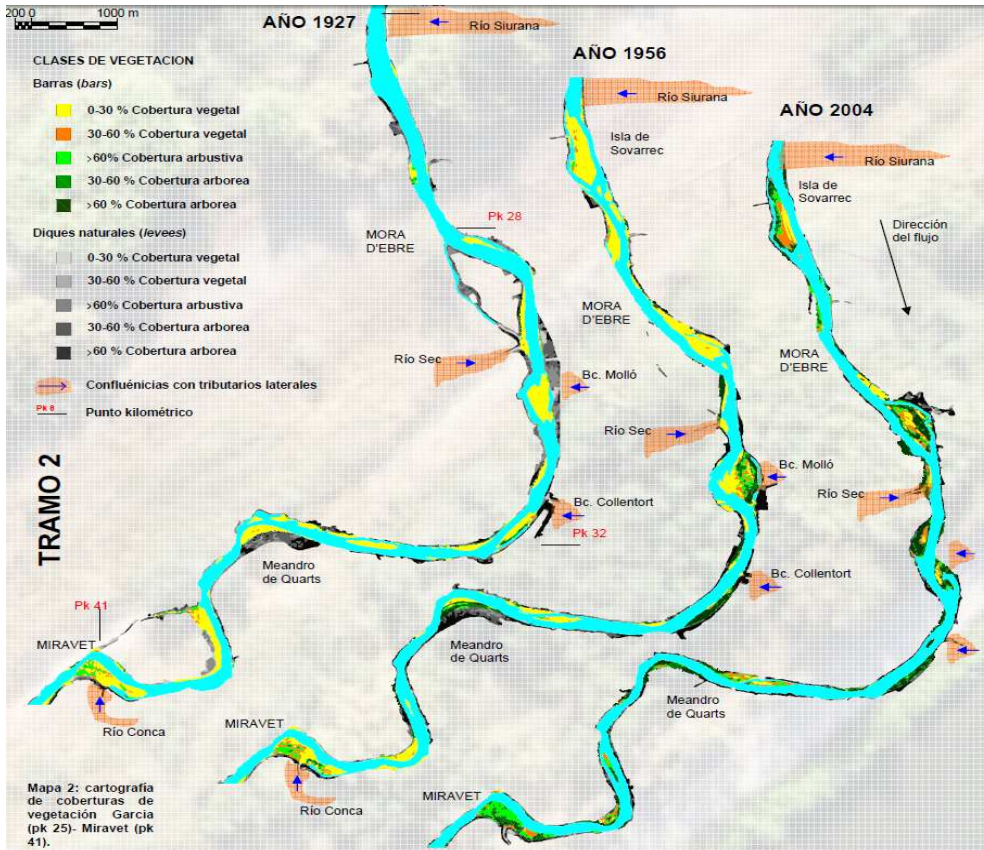
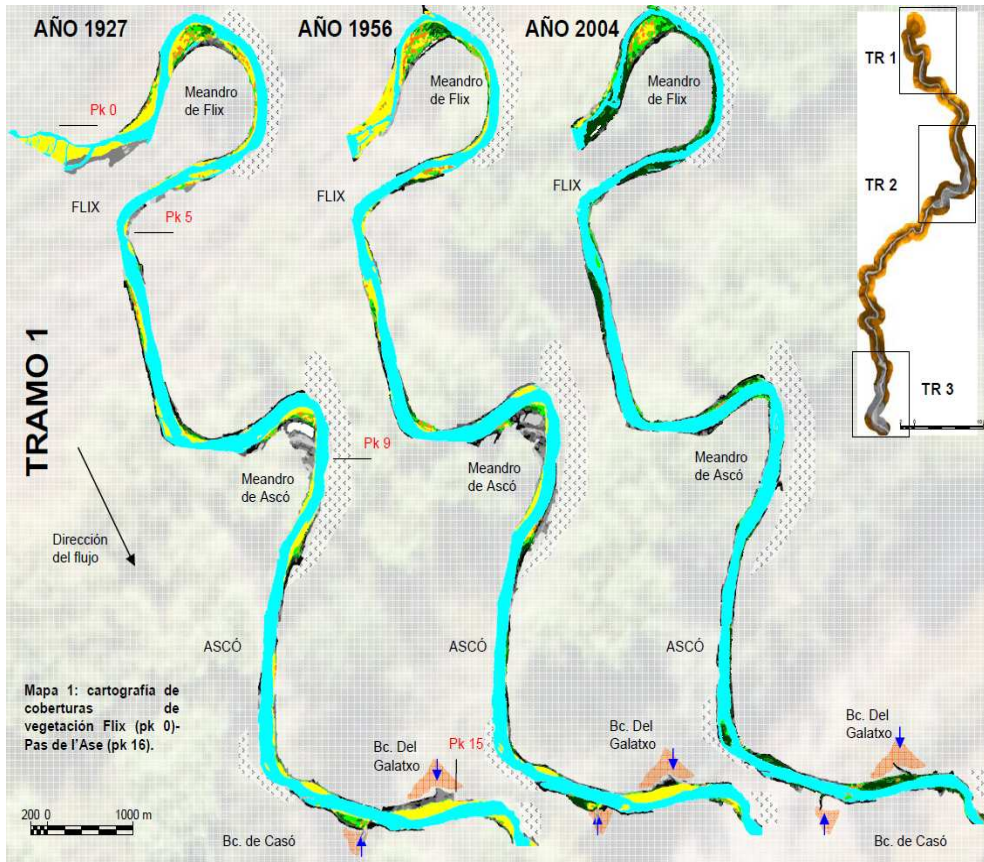
Para apreciar éste cambio no hay más que fijarse en los cambios en la cobertura vegetal y en la superficie que ocupan las barras y los diques naturales. Así, en el tramo que discurre desde Flix hasta Vinallop, la reducción de la superficie de barras libres de vegetación ha sido superior al 90 % desde finales de los años 50 del siglo pasado, y en el caso de márgenes o diques naturales libres de vegetación su superficie se ha reducido en casi un 80% en el mismo periodo. A dicha reducción hay que sumar la reducción en un 40% de la superficie total de barras actuales respecto a finales de los 50, o de más del 20% en el caso de diques naturales. Estos cambios son directamente atribuibles a la construcción de las presas. Es decir, hay una clara degradación tanto a nivel cuantitativo como cualitativo de los cauces y riberas en cuanto a la calidad hidrogeomorfológica, y en

consecuencia de su potencial como fuente de sedimentos por su grado de compactación y resistencia ante avenidas. Pero a su vez existe un problema de posible efecto de retención de los sedimentos que se liberen a partir de los embalses y que complica su gestión. No es descartable que parte de los antiguos brazos de río o galachos ahora casi colmatados, actúen como trampas de sedimentos, más si se tiene en cuenta que las avenidas que se puedan generar tendrán valores “de seguridad” para bienes y personas que pueden no ser suficientes para evitar ese efecto de retención en zonas revegetadas.



Fig. 15. Imagen de limos depositados sobre antiguos depósitos de gravas y cantos rodados y fijados por vegetación de ribera en el meandro de Flix (Foto: Marc Viñas).

Viendo el análisis de dichos cambios sobre la cartografía comparativa entre los tres vuelos fotográficos, se pueden apreciar los cambios acaecidos a partir de la construcción de los embalses. Cabe reseñar el considerable estrechamiento del cauce en determinados tramos, fenómenos de incisión, eliminación de tramos trenzados, colmatación de galachos, etc. Si a ello le sumamos la ocupación de los márgenes por la actividad agrícola o por construcciones de defensa ante inundaciones, se tiene un tramo final fuertemente alterado, con llanuras de inundación desnaturalizadas y con puntos que pueden presentar fenómenos de cierre hidráulico en caso de avenidas catastróficas.



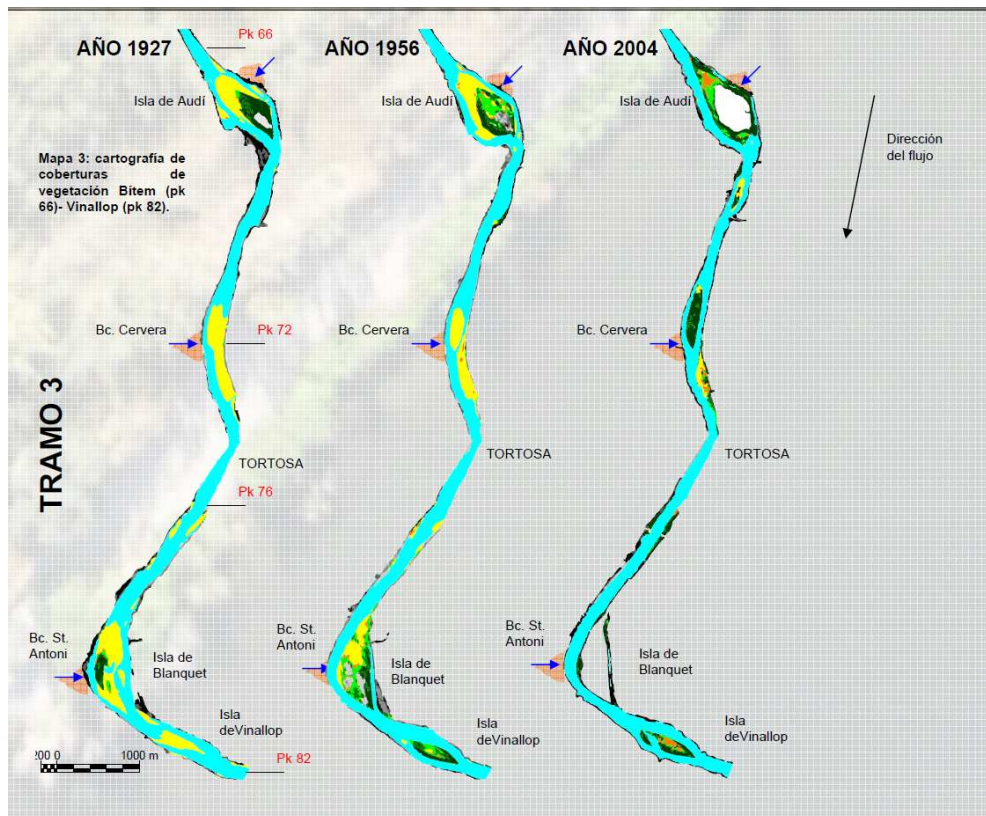
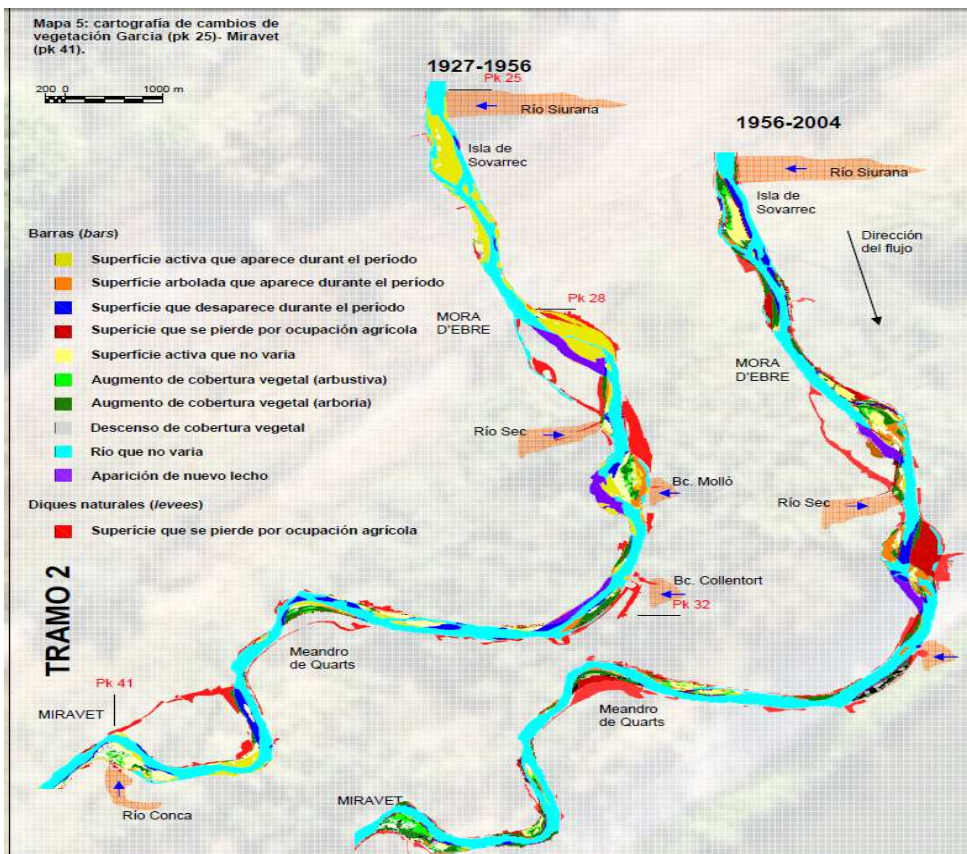
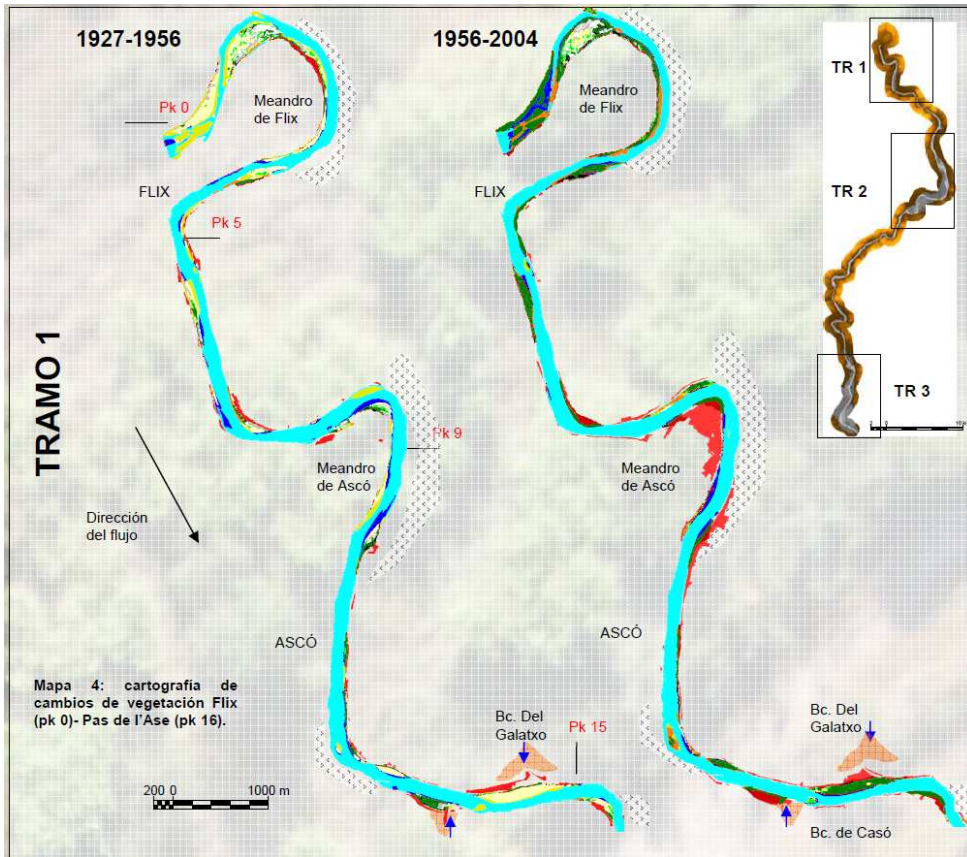


Fig. 16. Distribución de barras y diques naturales, y evolución de su grado de cobertura vegetal en el tramo aguas abajo del embalse de Flix. Fuente: Sabaté et al. (2011).

Otro fenómeno destacable que se extrae de éste trabajo es la pérdida de la influencia de los aportes laterales de los tributarios del Ebro. En éstos casos la existencia de impactos como la construcción de presas (como en el Siurana), la construcción de diques para atravesar rieras o barrancos, extracciones intensivas de áridos, la sobreexplotación de acuíferos, o su revegetación, contribuyen a disminuir ese aporte lateral que se sumaría al que discurre por el cauce natural del Ebro. Si a ello se le suma la disminución de la pluviometría derivada del cambio climático, no es nada desdeñable el volumen de sedimentos que ya no llegan por la red hidrográfica transversal.

Igual de interesante resulta apreciar la evolución de las zonas activas y de la ocupación agrícola de antiguos tramos del cauce activo y de los depósitos de sedimentos aportados. Se considera necesario evidenciar estos cambios de usos ya que condicionan cualquier acción futura de la gestión de caudales tanto sólidos como líquidos que tengan como objetivo recuperar una cierta dinámica natural.



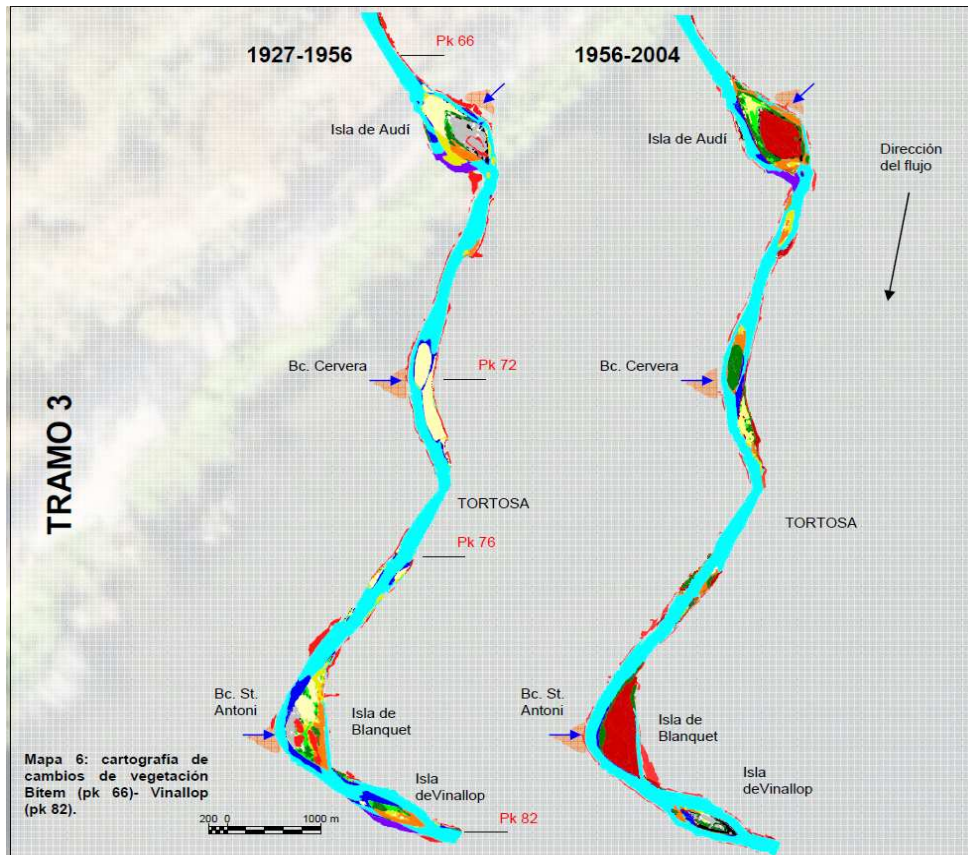


Fig. 17. Distribución de superficies activas y ocupación por actividades agrícolas en el tramo aguas abajo del embalse de Flix. Fuente: Sabaté et al. (2011).

Estas ocupaciones también ponen sobre la mesa uno de los principales problemas que tiene el bajo Ebro y que condiciona la legalidad de cualquier actuación de restauración: la falta de delimitación del Dominio Público Hidráulico. Este hecho favorece prácticas ilegales de ocupación de terrenos sobre los que se consolidan actividades o infraestructuras que después son esgrimidas como condicionantes para la gestión de avenidas, y que reclaman indemnizaciones por daños.

4.2. Principales espacios fluviales naturales dentro de la zona de estudio

El tramo de estudio comprendido entre el embalse de Mequinenza y la zona de Miravet conserva espacios fluviales protegidos tanto por el Plan de Espacios de Interés Natural de la Generalitat de Catalunya como por la Red Natura 2000 y considerados LIC. Las tres zonas más destacadas y afectadas por la gestión de los embalses son el Aiguabarreig del Segre, Cinca y Ebro (en la cola del embalse de Riba-Roja d'Ebre remontando el Segre), la Reserva Natural de Sebes (aguas arriba del embalse de Flix) y el Meandro de Flix (aguas abajo de la misma presa). En la Fig. 18 se observa la ubicación de estas zonas:

-ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ARRASTRE HIDRÁULICO Y CORRIENTES DE TURBIDEZ EN EL SISTEMA DE EMBALSES MEQUINENZA-RIBA-ROJA D'EBRE-FLIX: VIABILIDAD TÉCNICA Y PERCEPCIÓN SOCIAL-

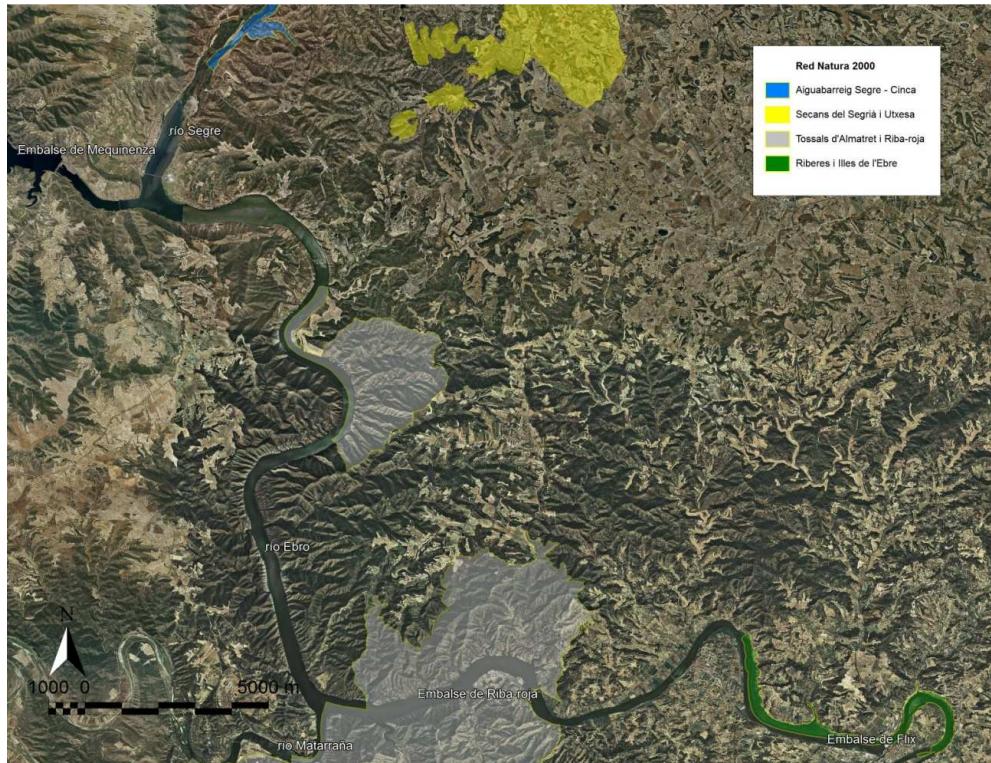


Fig. 18. Ubicación de las zonas protegidas entre el Aiguabarreig del Segre, Cinca y Ebro, y el meandro de Flix (Fuente: ICC 2011).

Los dos primeros se clasifican como masas de agua fuertemente transformadas, según contempla la Directiva Marco del Agua. Ciertamente, tienen (en parte) un origen derivado de la acumulación de sedimentos por la construcción de dichos embalses, pero su base está en las zonas de ribera antaño naturales sobre las que recrece un humedal estabilizado por la nueva dinámica fluvial y con tendencia a convertirse en un bosque de ribera consolidado. Ambos espacios naturales conservan una elevada biodiversidad, especialmente por lo que se refiere a aves y a vegetación ribereña, y tienen los más altos grados de protección. He aquí un choque de intereses, ya que parte de los sedimentos retenidos y que podrían ser susceptibles de ser liberados son la base de dichos humedales.

El Aiguabarreig (*Fig. 19*) comprende tanto los espacios fluviales propiamente dichos de la confluencia del Segre, Cinca y Ebro, con sus islas fluviales, como los márgenes y sierras que vierten al espacio fluvial. El margen izquierdo corresponde administrativamente a Catalunya, mientras que el derecho a la Comunidad de Aragón. En la parte de Catalunya se integran bajo la figura de protección del PEIN y de la Red Natura 2000 los Tossals d'Almatret y Montmeneu y el macizo de Montllober, mientras que en la parte de Aragón dentro de las comarcas del Bajo Cinca y Matarraña se encuentra la ZEPA Matarraña-

Aiguabarreig. En medio queda el espacio fluvial propiamente dicho. En conjunto ocupa 761 hectáreas.



Fig. 19. Imagen de l'aiguabarreig con sus islas fluviales, carrizales y bosque de ribera que albergan colonias de reproducción de diversas especies de ardeidas (Foto: P.J. Jiménez).

La peculiaridad de la zona fluvial convierte a esta zona en una especie de delta interior que alberga grandes extensiones de bosque de ribera, carrizales e islas fluviales. Las peculiaridades administrativas de ésta zona fronteriza entre Aragón y Catalunya añaden un grado más de complejidad a su gestión coordinada. La gestión del embalse de Riba-Roja d'Ebre, destinado eminentemente a la producción hidroeléctrica hace que se mantenga la mayor parte del año un nivel prácticamente constante que favorece la dinámica de estabilización antes señalada.

En relación con la zona de Flix, la Reserva Natural de Sebes y el Meandro de Flix son dos espacios fluviales separados por la presa (Fig. 20). En éste caso la presa, que genera un salto de tan solo 12 m de altura, no cumple ninguna función de regulación ni de reserva; en consecuencia mantiene un nivel prácticamente constante con oscilaciones máximas de 1 m.



Fig. 20. Detalle zona protegida de Sebes y meandro de Flix (Fuente: archivo Reserva Natural de Sebes).

Otra de las peculiaridades de la zona de Sebes es que está situada justo enfrente del complejo electroquímico establecido en 1898, que como es conocido tiene una problemática específica por la contaminación química acumulada en el fondo fruto de los vertidos de residuos desde esa época.



Fig. 21. Imagen de las antiguas zonas de cultivo situadas aguas arriba del embalse de Flix. En la actualidad una franja de más de 100 m es zona inundable recubierta por carrizales (Fuente: Archivo municipal de Flix).

Estas peculiaridades tienen efectos diferenciados en cada una de las zonas. En el caso de Sebes, la zona de ribera y de antiguos cultivos (*Fig. 21*) que quedaron inundados por esta nueva presa y que se cubrieron de los sedimentos aportados por el río. Sobre ellos se ha consolidado un extenso humedal donde destacan los carrizales. Las antiguas islas de cantos rodados quedaron parcialmente inundadas y sobre las zonas emergidas se depositaron limos donde actualmente crece el bosque de ribera (*Fig. 22*).



Fig. 22. Imagen de la misma zona con el margen derecho del Ebro cubierto por vegetación de ribera (Fuente: Archivo municipal de Flix)..

La sobrelevación originada por la pequeña presa y su efecto de retención, así como la falta de grandes avenidas ha propiciado la consolidación de la vegetación de ribera.

El caso del meandro merece especial atención ya que la falta de caudales permanentes hace que funcione la mayor parte del año como un meandro abandonado, con problemas de calidad de agua. La falta de crecidas también ha contribuido a la consolidación bajo la presa de un bosque de ribera, y que antiguas islas fluviales, antaño separadas de la orilla y libres de vegetación alberguen actualmente bosque de ribera y queden prácticamente unidas al margen. En las *Fig. 23* y *Fig. 24* se observan los cambios geomorfológicos en la zona:



Fig. 23. Cambios hidrogeomorfológicos en el meandro de Flix (Fuente: Archivo municipal de Flix)..

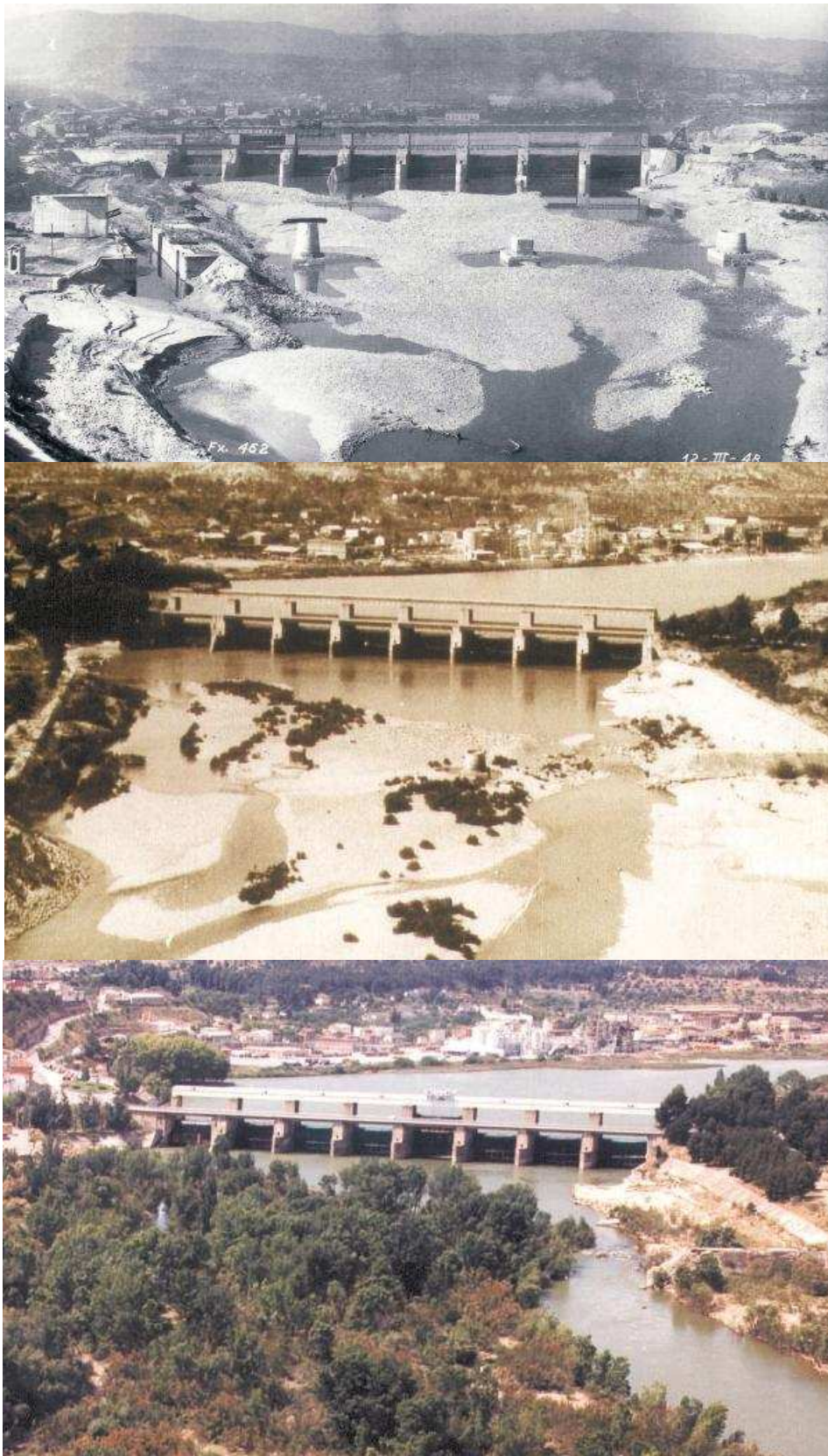


Fig. 24. Estabilización y colonización por bosque de ribera de antiguas barras de cantos rodados (Fuente: Archivo municipal de Flix).

Aguas abajo del embalse de Flix y bajo la denominación de “Riberes i illes de l’Ebre”, existen otras zonas fluviales protegidas incluidas en la Red Natura 2000 que se reflejan en el siguiente mapa (Fig. 25):

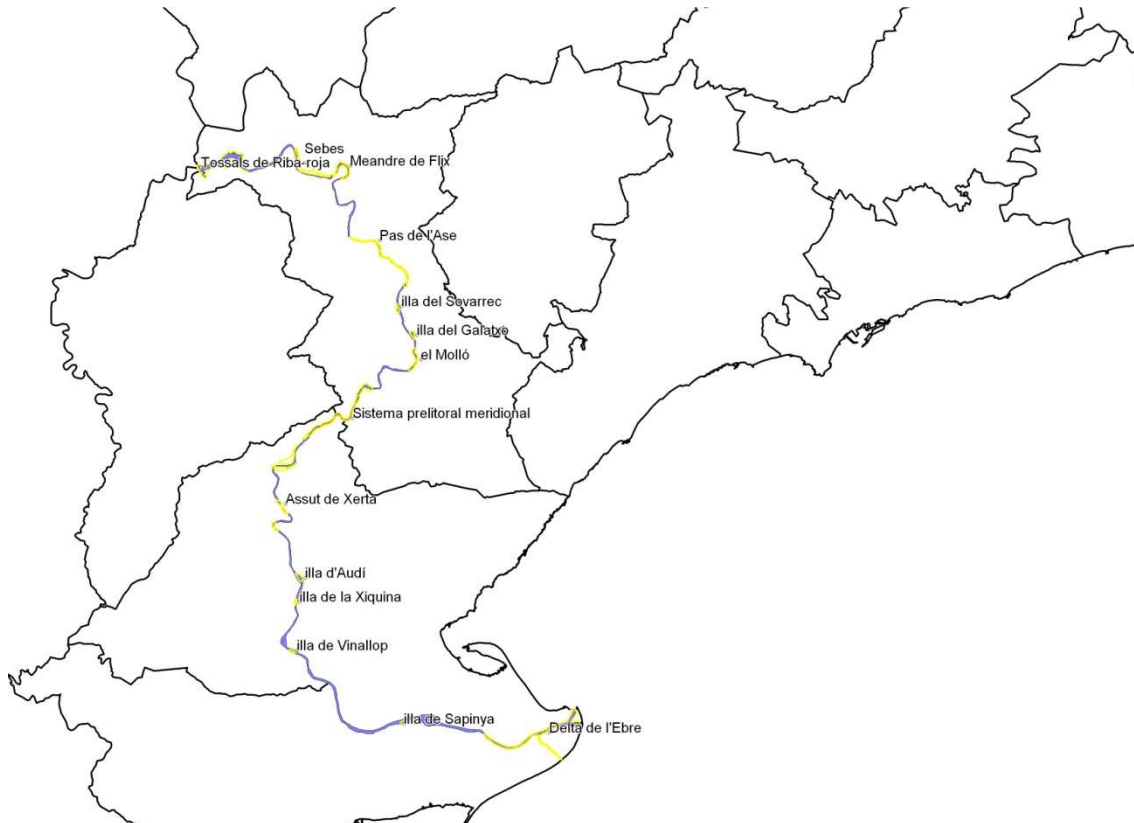


Fig. 25. Espacios fluviales protegidos aguas abajo del embalse de Flix (Fuente: ICC, 2011).

4.3 Sedimentación de los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d’Ebre

En cuanto a las fuentes de sedimento que se encuentran en la zona, podemos distinguir básicamente cuatro fuentes de sedimento principales:

- Los depósitos contenidos en el embalse de Riba-Roja d’Ebre.
- Los depósitos contenidos en el embalse de Mequinenza.
- Los depósitos contenidos en el embalse de Flix.
- Los depósitos aluviales y el transporte sólido de los ríos Matarraña, afluente por el margen derecha, y el Segre con el Cinca, afluentes por el margen izquierda, en el área próxima a la desembocadura en el embalse de Riba-Roja d’Ebre.
- Los derrubios o residuos mineros que se encuentran en la zona minera alrededor del embalse de Riba-Roja d’Ebre. En la actualidad se está ejecutando un proyecto de



eliminación de la contaminación de estos derrubios, que contempla la retirada y tratamiento de 600.000 m³ de materiales depositados en el lecho del río.

Para determinar la entrada de sedimento en la zona de estudio, se separa la entrada de sedimentos mediante el aporte de sólidos en suspensión y el aporte de sólidos mediante carga de fondo. Todos los datos que se mencionan en éste trabajo han sido extraídos del “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Riba-Roja d’Ebre”, realizado por el grupo Flumen, Dinámica fluvial e ingeniería hidrológica, en el año 2009.

La serie de datos que se utilizó en el proyecto corresponde al periodo comprendido entre el mes de noviembre del año 1997 y el mes de agosto del año 1999.

1) Aporte de sólidos en suspensión

En la entrada del embalse de Mequinenza, la concentración de sólidos en suspensión muestra una variación temporal muy importante, asociada a los cambios de caudal y a la estacionalidad de los aportes de sedimentos. En el período de estudio la concentración media de sedimentos fue de 96 mg/l, oscilando entre un máximo de 896 y un mínimo de 13,5 mg/l.

Las concentraciones más importantes se observaron en otoño, siendo ésta la época la que presenta mayores precipitaciones. También se observaron datos elevados de concentración en las crecidas correspondientes a los meses de primavera, dónde en algunos casos se llegaron a valores de hasta 700 mg/l (mayo 1999). En cambio, en las crecidas invernales las concentraciones de sedimento fueron en términos generales menores, situándose por debajo de los 500 mg/l.

En relación a la salida del embalse de Mequinenza, los datos de las concentraciones fueron significativamente más bajos (entre los 1,7 y 14,7 mg/l) y la variabilidad escasa. Como se puede observar, comparando los valores de concentración en la entrada y en la salida de Mequinenza, los valores de salida son mucho menores que los de la entrada. Los valores medios de concentración son de 5,93 mg/l, lo cual representa tan solo aproximadamente el 6 % de la media de la entrada del embalse. La reducción de la concentración de los sólidos en suspensión a la salida del embalse se debe a la sedimentación de las partículas en suspensión dentro del embalse de Mequinenza y se traduce en un desequilibrio entre el caudal líquido y el caudal sólido aportado por el Ebro en el embalse de Riba-Roja d’Ebre.

Referente al cálculo de la concentración de sólidos en suspensión del río Segre en la localidad de Serós y del Cinca en Fraga, éste parámetro presenta una escasez

importante de datos, con lo cual, se extrapolan los valores que faltan a partir de los datos de caudal. Así pues, durante el período de estudio, se estimó una concentración media de sólidos en el río Cinca de 262 mg/l, estableciéndose una concentración mínima de 6,3 mg/l y una concentración máxima de 1.710 mg/l. Por otro lado, la concentración de sólidos en suspensión en el río Segre fue más baja que la del Cinca y la media se estimó en 45,3 mg/l, donde la variación de concentraciones fluctuó entre los 422 y los 5 mg/l, este último valor similar a la mínima obtenida en el río Cinca.

Finalmente, la serie de sólidos en suspensión a la salida del embalse de Riba-Roja d'Ebre está relativamente completa. Se observa que a la salida del embalse la concentración de sólidos aumenta en comparación a la salida del embalse de Mequinenza gracias a los aportes del Cinca, y en menor medida, del Segre. La media de los datos registrados da un valor de concentración de 19 mg/l, y el rango de concentraciones se sitúa entre los 1,7 y los 1.251 mg/l.

En la Fig. 26 se representan los valores de concentración medios descritos:

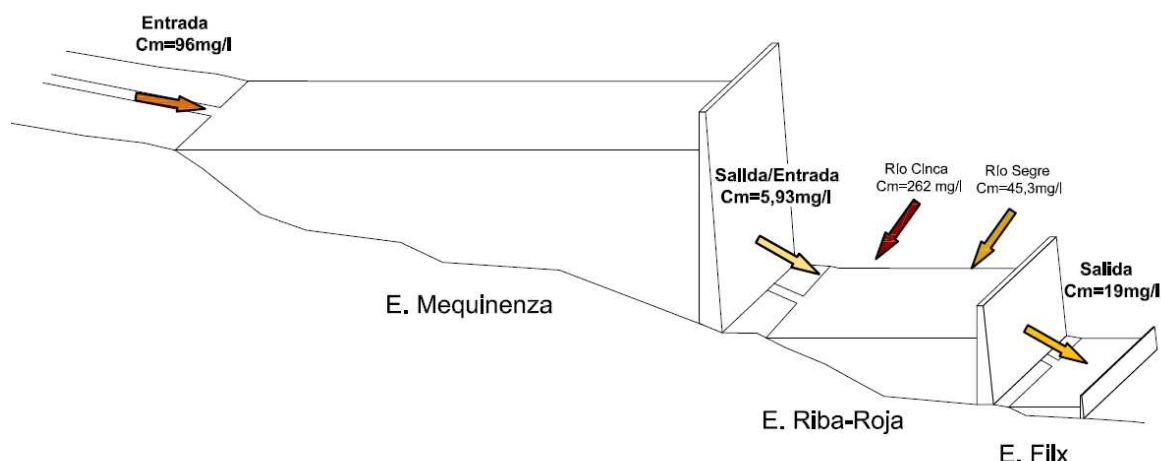


Fig. 26. Diagrama conceptual de los valores de concentración media presentados en el estudio realizado por FLUMEN en 2009 (elaboración propia).

A partir de los datos presentados en éste apartado, se observa que dentro del embalse de Mequinenza se produce una importante reducción del caudal sólido transportado por el río Ebro. A la entrada del embalse la carga sólida fue de 2.100 t/día mientras que a la salida este valor fue de 103 t/día. En total la aportación sólida a la salida del embalse fue de 64.500 t/año que en relación al 1.401.100 t/año de la entrada supone una retención del 95,4%. Por otra parte, la entrada de sedimento en el embalse de Riba-Roja d'Ebre (considerando los aportes del embalse de Mequinenza y de los ríos Cinca y Segre) fue de 1.875 t/día y de 1.111 t/día a la salida. Se obtiene un valor de entrada de 1.251.045 t/año,



y en valor de salida de 742.400 t/año, con lo cual el porcentaje de retención es del 41%, valor muy inferior al del embalse de Mequinenza. Esto se debe a que el tiempo de residencia en el embalse de Riba-Roja d'Ebre es corto, especialmente durante las crecidas, cuando el aporte de sólidos es mayor.

Cuando se habla de sólidos en suspensión, hay que distinguir entre la fracción orgánica e inorgánica. Se ha cuantificado que en el río Ebro en la entrada de Mequinenza, en el Cinca (Fraga) y en el Segre (Serós) los sólidos en suspensión son mayoritariamente de origen inorgánico, ya que la fracción orgánica representa solamente entre el 11%, 9% y 22% respectivamente. Los sólidos en suspensión con mayor contenido orgánico corresponden a los analizados en la salida de Mequinenza dónde el 47% es de origen orgánico; en cambio, a la salida del embalse de Riba-Roja d'Ebre, el contenido orgánico es del 30% en promedio. El incremento en el porcentaje del contenido orgánico dentro de los embalses se debe por una parte, a la sedimentación diferencial de la porción inorgánica más densa y, por otra parte, al desarrollo de fitoplancton dentro de los embalses.

2) Carga de fondo

Los materiales transportados como carga de fondo del río quedan en su totalidad retenidos en los embalses.

En los estudios realizados por Batalla y Vericat (2.006), en la entrada del embalse de Mequinenza, la carga de fondo representó para el año 2003-2004 el 0,02% del total de sedimentos transportados por el río Ebro, tal y como se observa en la *Tabla 6*:

Tabla 6. Retención de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre, teniendo en cuenta el balance de entradas y salidas de material en suspensión en el período 1.997-1.999. Extraído del informe realizado por FLUMEN en el año 2009 y teniendo en cuenta que un 99,5 % del sedimento es transportado en suspensión y un 0,5% como carga de fondo según Vericat y Batalla en 2006 en el período 2.002-2.004 (elaboración propia).

	Mequinenza				Riba-Roja			
	Entradas (tn/año)	Salidas (tn/año)	Retención (tn/año)	Retención (%)	Entradas (tn/año)	Salidas (tn/año)	Retención (tn/año)	Retención (%)
Material en suspensión	1.401.100	64.500	1.336.600	95%	1.251.045	742.400	508.645,00	41%
Carga de fondo	280	0	280	100%	250	0	250,26	100%
Total sedimento	1.401.380	64.500	1.336.880		1.251.295	742.400	508.895	

4.4 Batimetría del embalse de Riba-Roja d'Ebre

En el estudio de la "Dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Riba-Roja d'Ebre", elaborado por el grupo Flumen en el año 2009, se realizó una batimetría en

detalle de los sedimentos depositados en el embalse de Riba-Roja d'Ebre, que se denominó **Batimetría 07** y que fue utilizada para determinar el volumen de material retenido en el embalse durante el periodo 1960-2007. Paralelamente, se disponía una batimetría de los años 60(denominada **Topografía 60s**), correspondiente al periodo anterior a la construcción del embalse, y que se utilizó para compararla con el modelo digital del año 2007 y estudiar la sedimentación que se ha producido en el embalse.

Para la realización de la batimetría 07, se diferenciaron las siguientes zonas, tal y como se observa en la *Fig. 27*:

- Tramo 1: Cola del embalse, con una longitud aproximada de 12 km.
- Tramo 2: Parte central del embalse, con una longitud aproximada de 9 km.
- Tramo 3: Situado desde el final del tramo 2 hasta la presa, con una longitud aproximada de 10 km.
- Matarraña: Confluencia del río Ebro con el Matarraña.
- Riba-Roja d'Ebre: Inmediatamente aguas arriba de la presa de Riba-Roja d'Ebre.

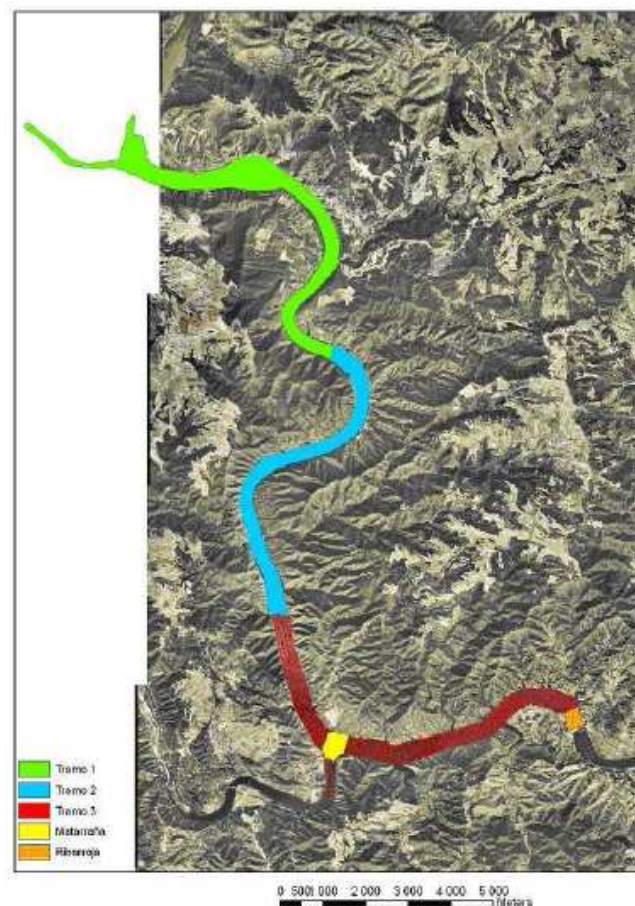


Fig. 27. Tramos considerados en la batimetría (FLUMEN 2009).

En el modelo digital de la confluencia de los ríos Ebro y Segre, se presentaban una serie de elementos que eran dudosos para la interpretación del modelo, causado por la escasez de datos en ésta zona debido a su difícil navegabilidad (escaso calado y presencia de numerosos restos de árboles y vegetación sumergida). En concreto, las tres zonas afectadas eran una pequeña parte de la confluencia del río Matarraña con Riba-Roja d'Ebre; una pequeña parte de la confluencia del Segre con Riba-Roja d'Ebre y finalmente, una pequeña parte de la zona comprendida entre la desembocadura del Segre y la presa de Mequinenza.

En la *Fig. 28* se observa el modelo batimétrico del embalse:

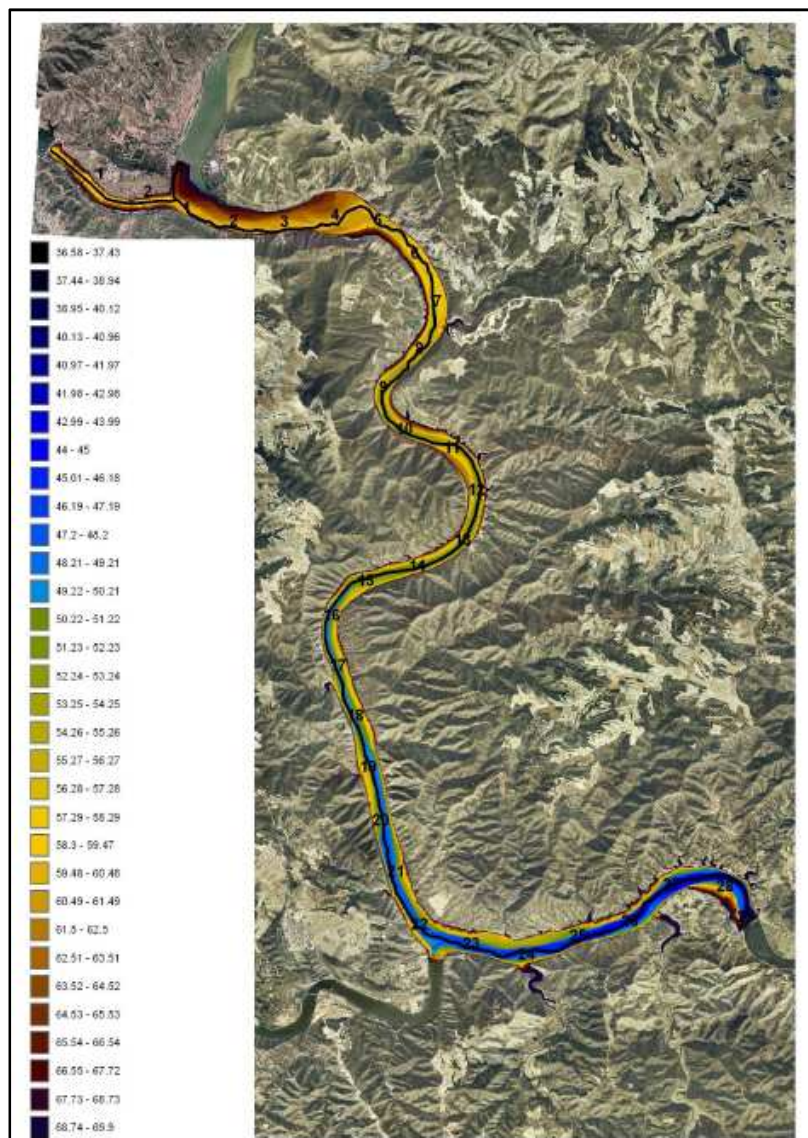


Fig. 28. Modelo definitivo de la Batimetría 07. Se indica el PK, el eje y la cota del fondo (FLUMEN 2009).

Para poder realizar la correcta interpretación de éstas tres zonas en el modelo se utilizaron las curvas de nivel correspondientes a la topografía del entorno del embalse, y mediante la interpolación de estas curvas de nivel y la información batimétrica se completó el modelo definitivo.

En éste nuevo modelo se obtuvo una aproximación de la altura de sedimento acumulado, para analizar cuáles eran las zonas con sedimentación y erosión mediante la comparación de los dos modelos (*Fig. 29*).

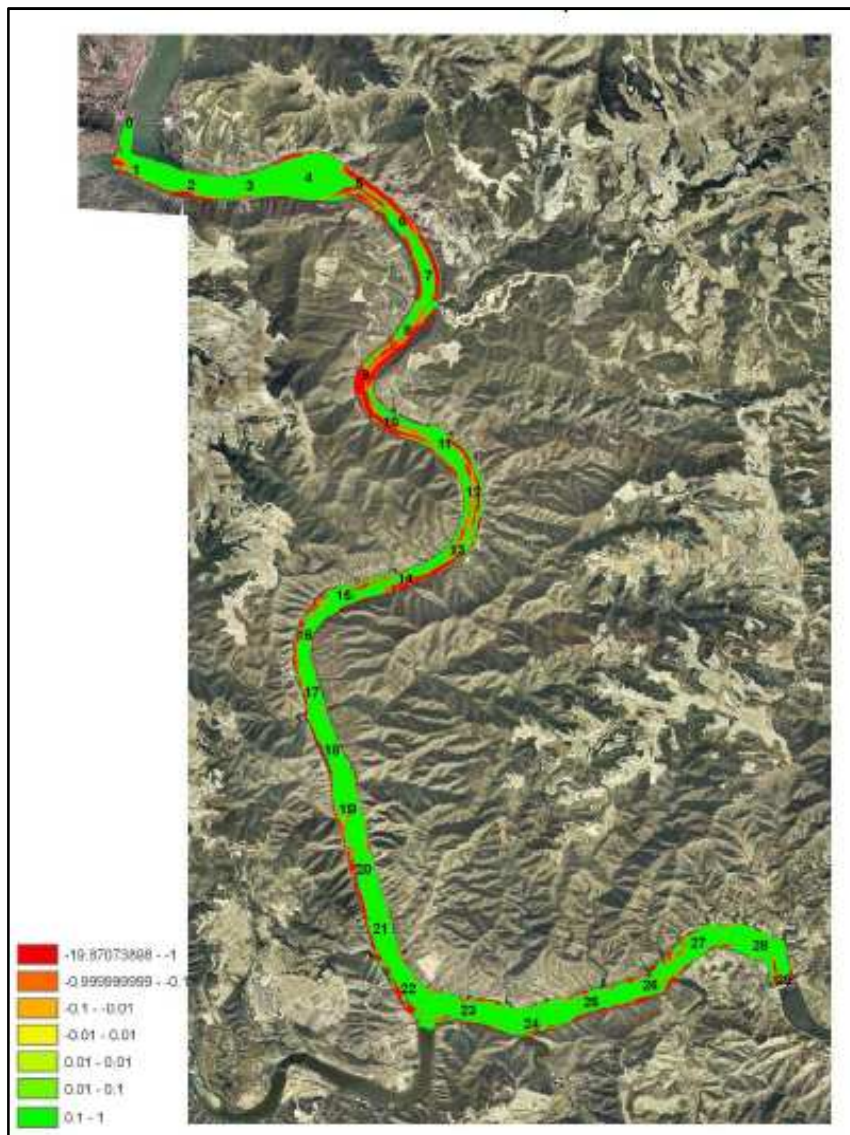


Fig. 29. Comparativa de sedimentación-erosión. En tono rojizo se indica la erosión. Las cifras se refieren a los PK. (FLUMEN 2009).

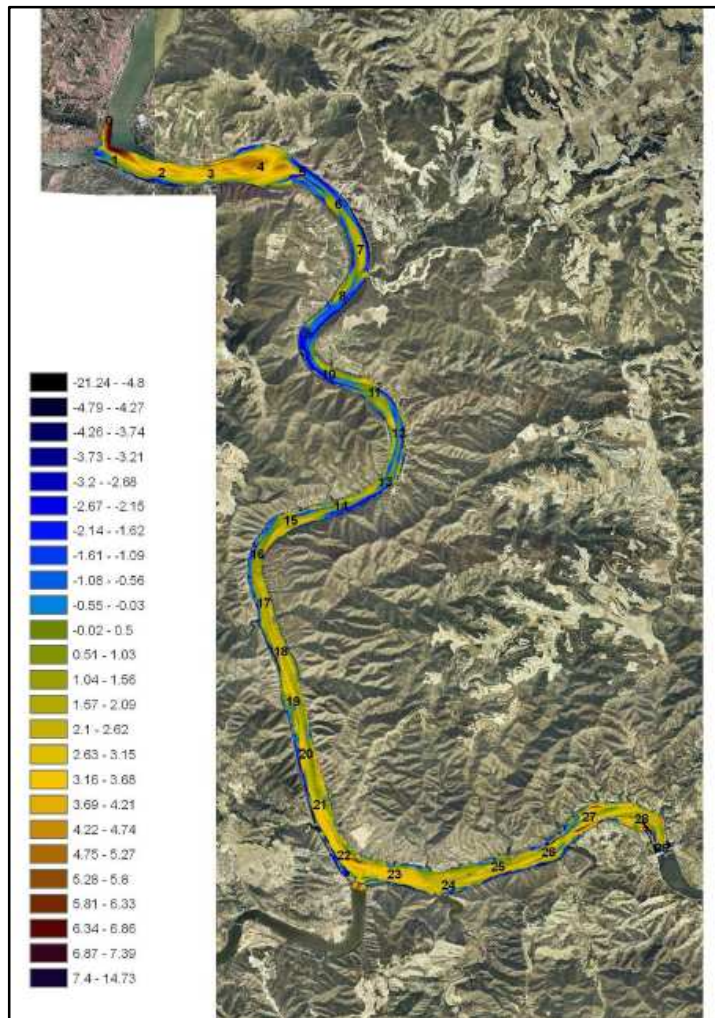


Fig. 30. Altura del sedimento (m) depositado en el embalse. Se indica el PK, el eje y la cota del fondo. (FLUMEN 2009).

La Fig. 30 muestra una distribución desigual de sedimentos a lo largo del embalse, donde se observa una mayor acumulación de éstos en las desembocaduras del río Segre (situada a la cabecera del embalse) y Matarraña (situada en la parte baja del embalse). Así mismo, desde el punto de vista del almacenamiento de sedimento, existen tres zonas bien diferenciadas desde aguas arriba aguas hacia aguas abajo:

- En los 5 primeros kilómetros el volumen de sedimentos depositados es muy importante. Aproximadamente 4 hm³ de sedimentos (un 30 % del total retenido).
- En el tramo situado entre los 5 y 15 kilómetros existe una zona de baja sedimentación. En éste tramo se localizan las mayores zonas de erosión en el fondo del embalse.

- En los últimos 16 kilómetros se produce una sedimentación moderada. Es notable la acumulación de sedimentos en el entorno del desagüe del Matarraña. En el tramo de unos 7 km comprendido entre la desembocadura del Matarraña y la presa de Mequinenza, se almacena un volumen de unos 8 hm³ de sedimentos que corresponden aproximadamente al 60 % del total retenido.

Para estudiar la supuesta erosión en cada tramo, se hizo un análisis por separado de la sedimentación neta (sin considerar zonas de erosión), de la erosión neta (sin contar con zonas de sedimentación) y de la sedimentación media considerando ambas (Fig. 31 y Fig. 32).

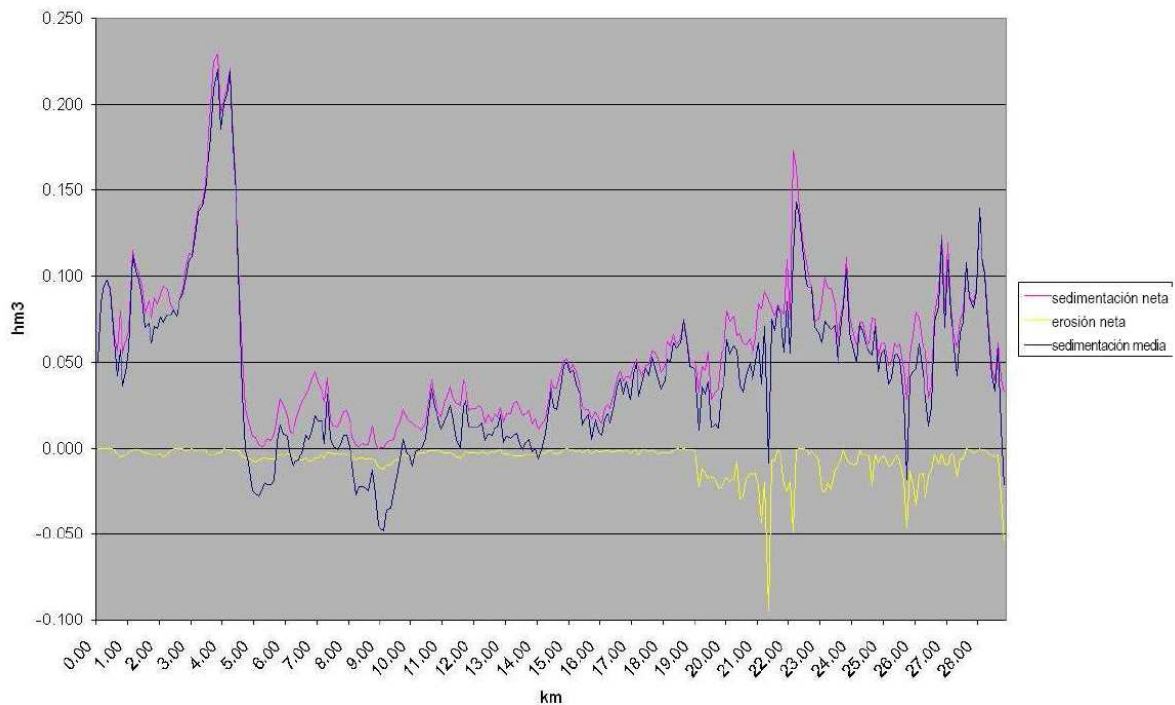


Fig. 31. Para cada tramo de 1.000 metros, volúmenes de sedimentación neta, de erosión neta y de sedimentación media (FLUMEN en 2009).

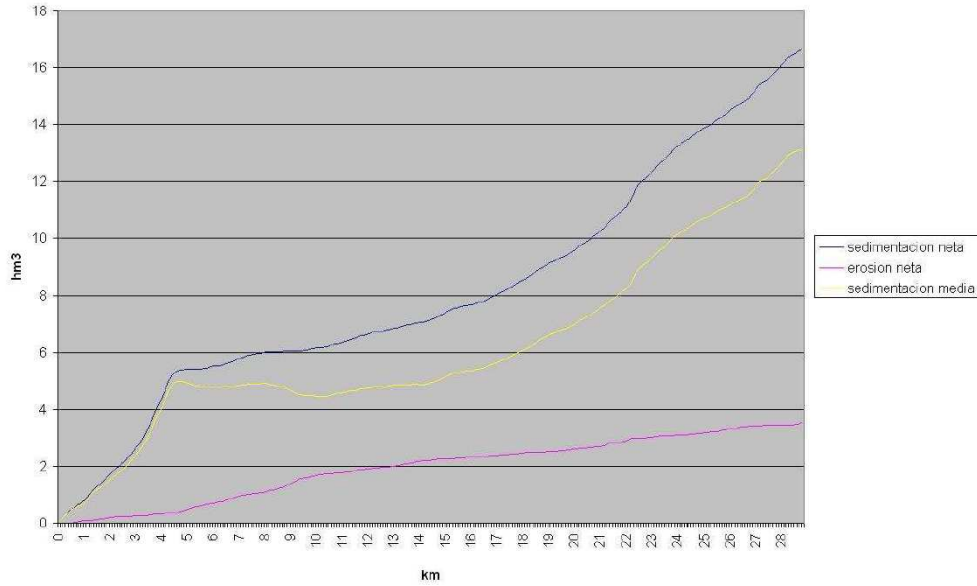


Fig. 32. Volumen acumulado de sedimentación media, neta y erosión neta (FLUMEN en 2009).

Estos volúmenes de sedimento dan los valores aproximados de sedimento acumulado en el embalse en cada punto, que una vez llegada a la cola del embalse, dan un valor de sedimentación media de 13 hm³.

Éste cálculo se realizó sin tener en cuenta las confluencias del río Ebro con el Matarraña, parte del Segre y de la zona comprendida entre la presa de Mequinzenza y la confluencia con el Segre, así como algunos márgenes de los embalses.

Paralelamente, en este estudio se realizó otra topografía en el año 2008, denominado Batimetría 08, que sirvió para compararlo con el modelo digital Batimetría 07 y poder estudiar la dinámica de los sedimentos depositados en el extremo superior del embalse de Riba-Roja d'Ebre y evaluar tanto el sedimento acumulado y/o erosionado en el periodo comprendido entre ambas batimetrías así como su distribución espacial.

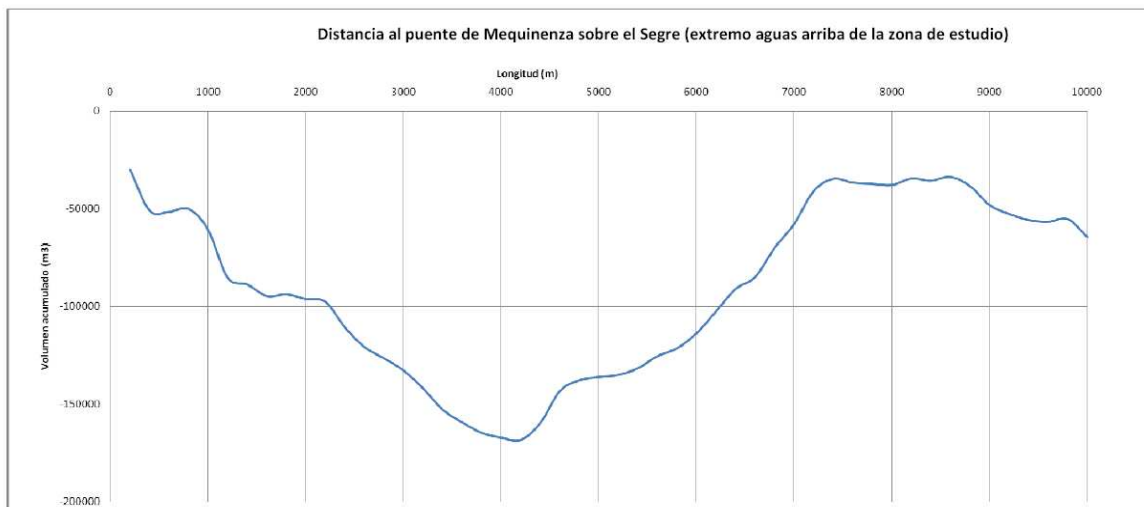


Fig. 33. Volumen de sedimento acumulado en el periodo noviembre 2007-diciembre 2008 (FLUMEN en 2009).



Tal y como se puede observar en la *Fig. 33*, en los primeros 4.000 metros se produce un volumen de erosión sensiblemente igual al que se sedimenta en los siguientes 3.000 metros, con lo que se deduce que en esta zona del embalse el volumen de unos 150.000 m³ de sedimento ha sido desplazados unos 3 km aguas abajo. Esto está directamente relacionado con el avance del frente de sedimentos situado en los primeros 4-5 km del embalse.

Este avance del frente de sedimentos de cabecera el embalse estaría causado por los episodios de avenida comprendido entre los dos periodos de finales de mayo y principios de junio de 2008, donde hubo una muy baja carga sólida procedente del embalse de Mequinzenza y que desplazó los sedimentos depositados en la confluencia del Ebro con el Segre y también los existentes inmediatamente aguas abajo. Ello se produjo sin que el sedimento erosionado fuera reemplazado por aportaciones del Segre.

4.5 Caracterización físico-química de los sedimentos

En el presente apartado se proporciona una caracterización físico-química de la parte más superficial del sedimento depositado en el fondo del embalse (de 4 a 10 cm. de profundidad) de Riba-Roja d'Ebre, el cual aportará una información muy útil para proponer estrategias de gestión sedimentaria dentro de éste.

Al estar éste embalse ubicado bajo la presa de Mequinzenza, no recibe prácticamente aportes sólidos del río Ebro, sino que la mayoría del sedimento que recibe es procedente del río Segre y Cinca y en menor parte del río Matarraña, los cuales han sido poco estudiados desde el punto de vista cualitativo hasta el momento. Junto con el estudio batimétrico, este apartado permite tener una buena caracterización tanto cualitativa como cuantitativa de los sedimentos que forman parte del embalse.

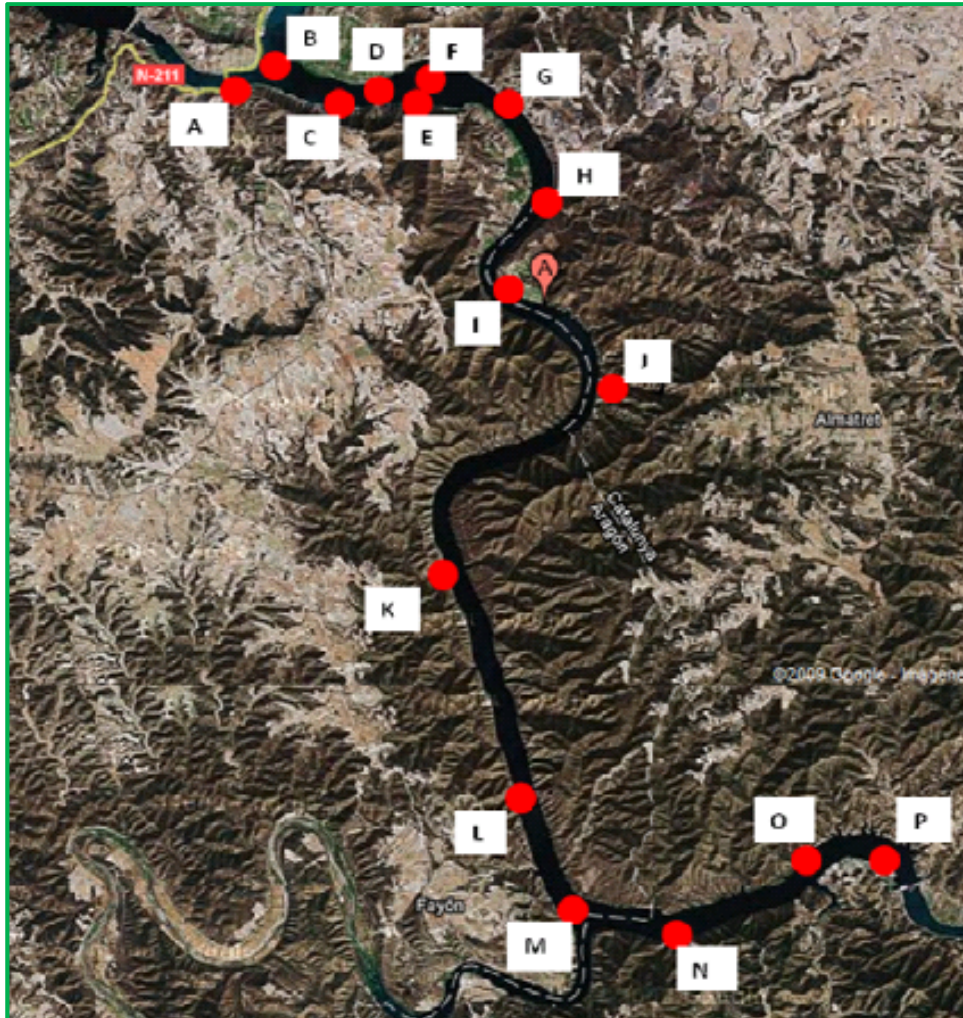


Fig. 34. Ubicación de los puntos de muestreo de sedimento en el embalse de Riba-Roja d'Ebre (FLUMEN en 2009).

En la Fig. 34 se muestra la ubicación de los puntos de muestreo de sedimento y agua intersticial que se tuvieron en cuenta dentro del estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Riba-Roja d'Ebre realizado el año 2007. En total se seleccionaron 16 estaciones de muestreo, de las cuales 7 se encontraban en el tramo superior; cinco entre la entrada de sedimento de los ríos Segre y Cinca y el río Matarraña, una en la entrada del río Matarraña y finalmente tres desde la desembocadura del Matarraña hasta la presa.

4.5.1 Caracterización física

Uno de los aspectos que hay que tener en cuenta para la caracterización de los sedimentos es la textura. En función de cuál sea el tamaño de las partículas que forman el sedimento, se pueden clasificar en arcillas ($\phi < 4 \mu\text{m}$), limos ($4\mu\text{m} < \phi < 63 \mu\text{m}$) y arenas ($63\mu\text{m} < \phi < 2000 \mu\text{m}$).

En el diagrama de Shepard, se representa la composición porcentual de las muestras obtenidas en la campaña de campo.

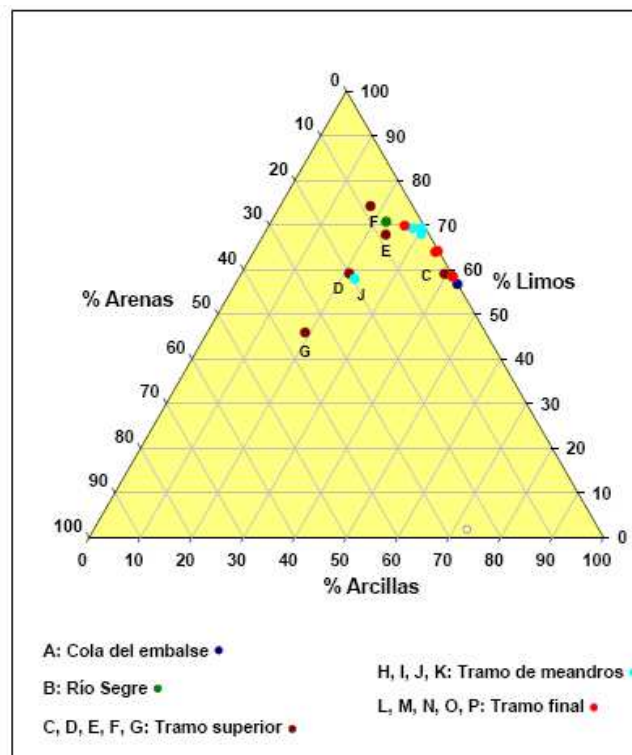


Fig. 35. Diagrama de Shepard que indica la composición porcentual de arcillas, limos y arenas en los sedimentos superficiales del embalse de Riba-Roja d'Ebre. Se han representado los distintos tramos del embalse con diferente color. Se indica también el código correspondiente a las estaciones del tramo superior dada su gran variabilidad (FLUMEN en 2009).

Tal y como se observa en la Fig. 35, la fracción que domina la granulometría de las muestras en la confluencia del Segre con el embalse es fina, formada esencialmente por limos y arcillas, con valores que van entre el 45,7% y el 75%. En este mismo sector, la presencia de arcilla es también bastante abundante (17,7 %) pero inferior al valor obtenido cerca de la presa de Mequinenza y antigua confluencia del río Segre (estimado en un 43,4 %). Así, los sedimentos de Riba-Roja d'Ebre en estas aéreas se clasifican como de textura limoso-arcillosa. Por el contrario, en la zona localizada en la confluencia del río Segre con el embalse y en algunos sectores someros y cercanos al contorno de éste (estaciones G y D), la proporción de arenas es superior (>20%) indicando una mayor



capacidad del flujo para transportar partículas más gruesas. Por otro lado, se observa cierta similitud entre los sedimentos depositados en los tramos próximos a la presa (estaciones L a P) y la estación más próxima a la presa de Mequinenza en la cola del embalse (estación A). En estas áreas, las muestras presentan una proporción de limos superior a las anteriores y a las situadas en el tramo de meandros (H a K).

En el tramo correspondiente a la intersección del embalse con el río Segre hasta el inicio de la zona meandriforme (estaciones C a K), es donde hay una mayor variabilidad granulométrica, con sectores con textura limoso-arcillosa (p.e. estación C) y con una composición similar a la que aparece cerca de la presa de Riba-Roja d'Ebre, y puntos con una textura arcillo-arenoso (como la estación G), que puede identificarse como la zona más frontal de la lengua de sedimentos de la entrada del río Segre.

La zona situada en el frente anterior de la lengua de sedimento (estación G) presenta una mayor proporción de materiales más gruesos debido a que éste punto se encuentra en el canal meandriforme, donde el flujo es más energético. No obstante, al encontrarse también en esta zona las fracciones más finas indica que este lugar pertenece a un ambiente sedimentario complejo y variable.

Finalmente, en la zona más cercana a la presa dominan las fracciones finas (Estaciones K a P) donde hay una gran cantidad de materia orgánica debido a la naturaleza de los sedimentos. Por el contrario, en la parte central y superior del embalse se produce la acumulación de materia orgánica de pequeño tamaño; probablemente de procedencia alóctona.

4.5.2 Caracterización química

4.5.2.1 Caracterización química del sedimento superficial: Fase sólida

Elementos mayoritarios

El sedimento que permanece en el fondo del embalse de Riba-Roja d'Ebre, está compuesto básicamente por una mezcla de silicatos además de carbonatos. Los elementos que se encuentran en mayor concentración son el silicio (Si), el aluminio (Al) y el potasio (K). Su procedencia se puede relacionar con los silicatos meteorizados. Por otra parte, la concentración de calcio (Ca), que es elemento indicador de los carbonatos, se encuentra en una concentración de alrededor del 35 %; siendo del mismo orden que el



porcentaje de silicio. Debido a esta elevada concentración de Ca, la concentración de hierro (Fe) es moderada (*Tabla 7*).

Tabla 7. Concentración media, desviación estándar y coeficiente de variación de los elementos mayoritarios en el sedimento de Riba-Roja d'Ebre. Datos en mg.g^{-1} (FLUMEN 2009).

	Fe	Mn	Ti	Ca	K	P	Si	Al	Mg
Media	32,79	0,57	3,04	137,98	21,01	1,24	171,36	69,07	12,91
Sd	4,73	0,06	0,33	13,38	3,04	0,19	15,45	11,77	1,52
CV	14,43	11,30	10,96	9,70	14,48	15,61	9,01	17,05	11,80

En el análisis de la 7 estaciones de las muestras tomadas a diferente profundidad (entre 0 y 10 cm.) muestran que no existe mucha variación en la concentración de elementos mayoritarios del sedimento superficial. Sin embargo existe una variación longitudinal de los elementos mayoritarios a lo largo del embalse, desde la zona intermedia (estación K) hasta la más cercana a la presa (P), donde el aluminio, el potasio y el hierro muestran una variación muy similar con concentraciones uniformes y elevadas. Por el contrario, se observa una mayor variabilidad de estos elementos en el tramo de cabecera (estaciones A y C) y en la zona previa a la entrada del río Segre en el embalse (estación B).

En las estaciones situadas tanto en tramos litorales como en las zonas de meandros (C y K), se obtienen las concentraciones menores de todo el embalse.

Por último, las concentraciones de silicio y calcio en el tramo situado entre la mitad del embalse hasta el pie de la presa (estaciones K y P) son homogéneas y muy parecidas a las obtenidas en la cola del embalse (estaciones A-C). La mayor concentración de estos elementos se obtiene en la zona comprendida entre la cola del embalse y la mitad de éste.

Elementos asociados a la materia Orgánica: C, N y P

Los valores de nitrógeno y fósforo en el sedimento del embalse de Riba-Roja d'Ebre presentan valores que son propios de los sistemas moderadamente eutróficos. Si comparamos las muestras superficiales tomadas se observa que los dos elementos tienden a acumularse en la parte baja del embalse más próxima a la presa, donde estos elementos tienen valores próximos a 3 mg/g de N y 1,5 mg/g de P (*Fig. 36*).

Por otro lado el carbono, que se puede asociar tanto con la fracción orgánica como con la inorgánica (procedente del sedimento carbonatado depositado), presenta una variación a

lo largo del embalse muy parecida a la del calcio, observándose las mayores concentraciones en zonas someras y cercanas al contorno del embalse (estación F) y en el sector localizado en el frente anterior de la lengua de sedimento que forma el río Segre en su confluencia con el embalse (estación G). En estos sectores las concentraciones pueden llegar a ser hasta del 6,80%.

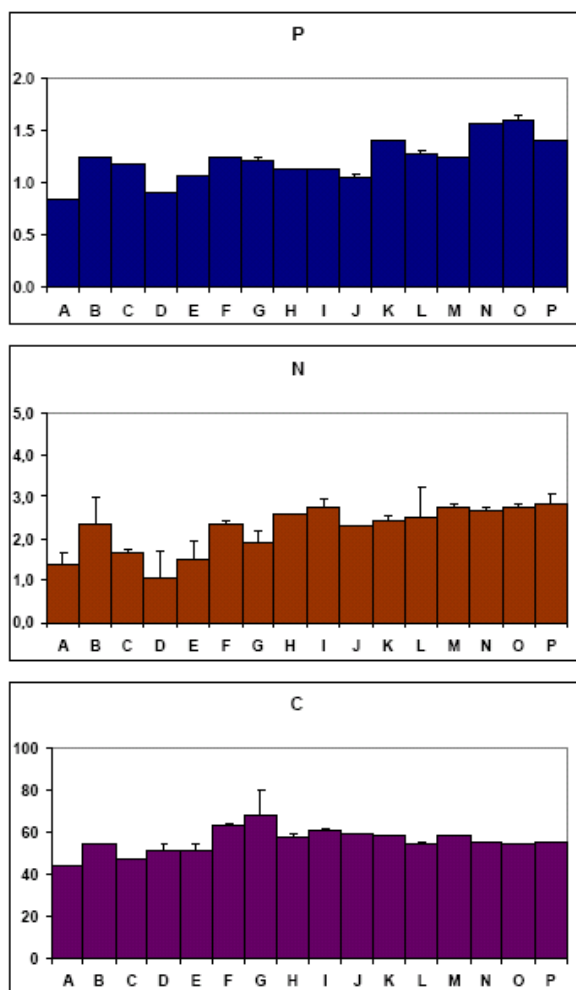


Fig. 36. Variación a lo largo del embalse de la concentración de fósforo, nitrógeno y carbono en el sedimento superficial. Concentraciones en mg.g⁻¹(FLUMEN 2009).

Elementos traza

Los metales traza se asocian con la contaminación de origen antrópico agrícola y/o industrial. Estos son el zinc (Zn), el cobre (Cu), el níquel (Ni), el plomo (Pb) y el cromo (Cr) y pueden tener un efecto negativo en el ecosistema en caso de que sus concentraciones sean elevadas.

Las concentraciones de estos elementos observadas en Riba-Roja d'Ebre muestran que éstas son inferiores a las descritas a los valores medios de los sedimentos transportados por los ríos de todo el mundo (*Tabla 8*). Este hecho es debido a la “dilución sólida” que se produce al mezclarse el material que tiene mayor concentración de metales (generalmente asociados a las fracciones más finas de sedimento) con otros materiales que forman parte de la fracción más gruesa de sedimento.

Tabla 8. Concentración media, desviación estándar y coeficiente de variación de zinc, cobre, níquel, plomo, y cromo en el sedimento superficial de Riba-Roja d'Ebre. Datos es mg.g^{-1} . Se comparan los datos con (1) concentración promedio en la corteza terrestre; (2) roca caliza; (3) promedio del sedimento en suspensión en ríos del mundo (*FLUMEN 2009*).

	Zn	Cu	Ni	Pb	Cr
Media	105,5	30,2	30,9	24,0	56,8
SD	14,0	6,2	5,8	2,5	6,4
CV	13,2	20,4	18,7	10,3	11,3
(1)	71	25	20	15	35
(2)	30	4	5	13	10
(3)	208	75,9	74,5	61,1	130

Tal y como se aprecia en la *Fig. 37*, el plomo y el zinc presentan siempre concentraciones superficiales inferiores a un nivel umbral de toxicidad. En el caso del cobre se aproximan al umbral desembocadura del Matarraña y estación inmediatamente anterior (estaciones M y L). En el caso del cromo, todos los puntos de muestro presentan concentraciones superficiales por encima del nivel umbral, aunque sin alcanzar valores de toxicidad probable. Finalmente, el níquel también supera el nivel umbral en casi todos los puntos de muestreo, y ésta casi al límite de toxicidad probable tanto en la zona de la cola (estación A) como en las estaciones ubicadas en la parte baja del embalse (estaciones K a P).

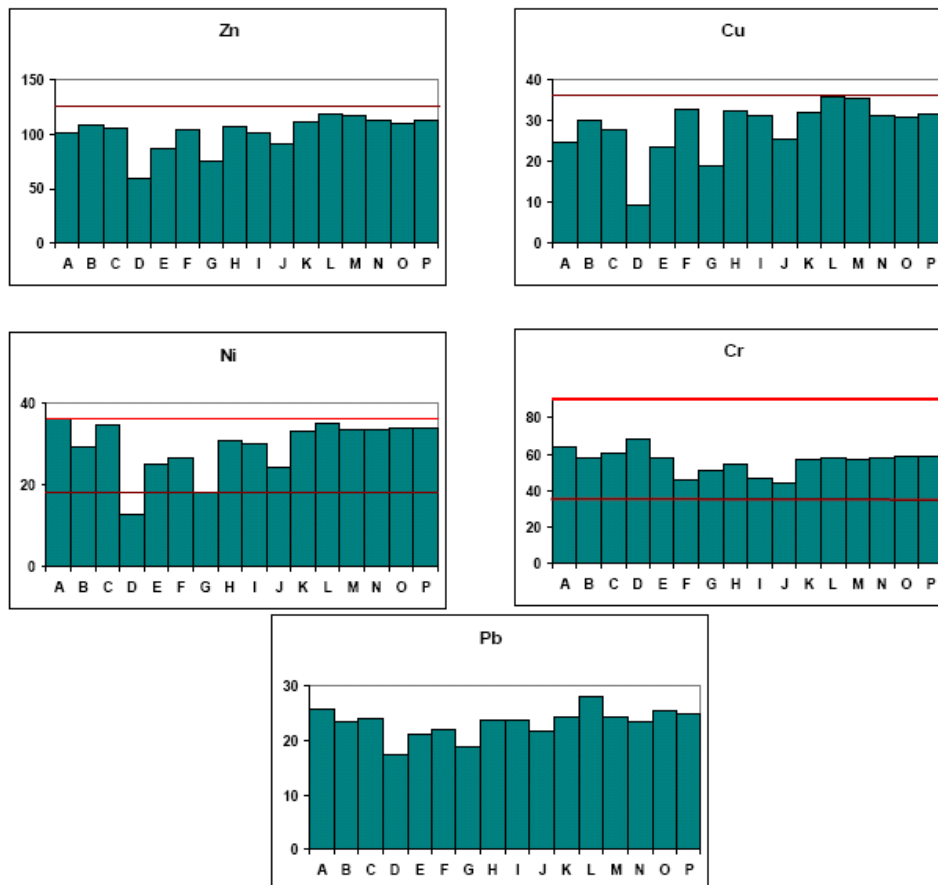


Fig. 37. Concentraciones de zinc, cobre, plomo, cromo y níquel en el sedimento superficial de Riba-Roja d'Ebre. La línea roja indica la concentración a la que la probabilidad de efectos tóxicos es elevada. La línea marrón indica el nivel considerado como umbral de toxicidad. Concentraciones en µg.g⁻¹(FLUMEN 2009).

4.5.2.2. Caracterización química del sedimento superficial: Agua intersticial

La fase líquida del sedimento que corresponde al agua intersticial situada en la porosidad de los sedimentos, propicia el transporte de materiales entre la fase sólida y la masa de agua.

La concentración de los diferentes elementos en la fase líquida depende tanto de los diferentes factores biológicos como de los diferentes procesos de adsorción-desorción o precipitación-redisolución producidos, que a su vez, vienen determinadas por el entorno químico (PH, potencial redox, oxígeno disuelto, salinidad, etc.). Es por ello que la concentración de estos elementos puede variar notablemente durante el año y en función de las condiciones; por lo que los valores analizados deben de interpretarse con precaución. Durante el período de muestreo del trabajo en que se obtiene la información, las condiciones eran de mezcla total, con oxigenación de la interfase agua-sedimento, y

una acumulación moderada-baja de materia orgánica, tal y como indican las concentraciones de carbono y nitrógeno. Así pues, estas concentraciones son una estima de los valores mínimos que podrían alcanzar valores muy superiores durante episodios de anoxia o en episodios de acumulación de materia orgánica resultado de la proliferación de plantas fitoplanctónicas.

El análisis del agua intersticial se realizó en 6 puntos (estaciones B, G, H, K, M y P), prestándose especial atención en aquellos elementos cuya presencia en el agua determinan efectos negativos: fosfatos (por su efectos de eutrofización) y metales pesados (pueden resultar tóxicos incluso abajas concentraciones).

En lo que hace referencia al **fósforo** presenta un máximo en la zona central del embalse (estación K), donde este gradiente es el más acusado. En esta misma estación la concentración de fosforo en el agua es la más elevada. En el resto de los puntos de muestreo se observan unas concentraciones de fósforo relativamente bajas, relacionado con una moderada presencia de materia orgánica (*Fig. 38*).

Hay que señalar que las concentraciones máximas de fosforo se dan en los puntos más superficiales del muestreo, asociados a la actividad descomponedora que libera fósforo disuelto a partir de la materia orgánica. Por otra parte, las condiciones anóxicas también liberan fósforo, con lo cual probablemente el agua contenida en los sedimentos en profundidad también contenga una alta concentración en fósforo.

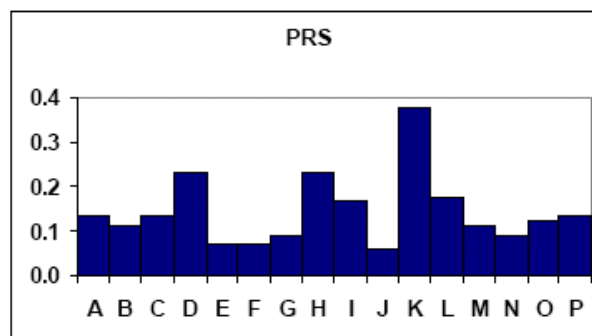


Fig. 38. Concentración de fósforo reactivo soluble en el agua profunda del embalse FLUMEN 2009).

Finalmente, en cuanto a los **metales pesados**, estos se representan los valores junto a los valores de referencia recomendados por la Agencia de Protección Ambiental Americana (USEPA). Tal y como se observa en la *Tabla 9*, las concentraciones de zinc, plomo y cobre exceden las concentraciones recomendadas mientras que el cromo y el

níquel (los que presentan una concentración en fase sólida superior a los criterios de calidad) presentan una concentración en disolución por debajo del criterio recomendado.

Tabla 9. Concentración media y desviación estándar de los metales disueltos en el perfil vertical de agua intersticial en las estaciones en que se realizó un análisis detallado en profundidad. Ref. Criterio de calidad utilizado como referencia por la Agencia Americana de Protección Ambiental (USEPA, 2006). Concentraciones en µg/l (FLUMEN 2009).

	Zn		Cr		Pb		Cu		Ni	
	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd	Media	Sd
B	385,8	138,6	18,6	3,6	6,5	2,1	44,4	17,2	12,1	2,0
G	306,0	153,3	20,3	3,4	9,1	4,3	33,6	15,4	14,5	5,8
H	730,6	811,2	16,4	2,2	6,2	7,0	37,0	10,4	12,0	3,1
K	954,4	404	21,0	3,1	113,1	53,3	35,5	6,6	15,7	2,2
M	495,0	99,06	18,7	2,7	106,2	54,4	32,3	13,6	17,0	4,2
P	614,9	182,9	19,1	2,2	90,2	5,6	25,1	14,1	17,5	3,2
Ref	120		74		2,5		9		52	

Se observa que la mayor concentración de zinc y cromo se encuentra en la parte central del embalse (estación K). Este fenómeno podría relacionarse por la presencia de materia orgánica y de complejos orgánico-metálicos. Sin embargo, la mayor concentración de cobre se encuentra en el río Segre disminuyendo hacia la presa de Riba-Roja d'Ebre.

El plomo se presenta en una concentración muy alta en el centro del embalse (estación K); concentraciones menores pero también altas en la zona de la presa, y menores en la zona de cabecera. Cabe destacar que la concentración de plomo en el agua intersticial no tiene porque tener relación con el de la fase sólida, indicando la existencia de un foco puntual de contaminación que podría estar causado por la contaminación producida por embarcaciones.

5 ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ARRASTRE Y CORRIENTES DE DENSIDAD EN LOS EMBALSES DE RIBA-ROJA D'EBRE Y MEQUINENZA

En este capítulo se realiza un ejercicio con el fin de analizar la viabilidad de implementación de las técnicas de arrastre y de las corrientes de turbidez en el sistema de embalses Mequinenza-Riba-Roja d'Ebre-Flix y removilizar tanto los sedimentos que están actualmente almacenados en el vaso del embalse de Riba-Roja d'Ebre como aquellos que entran periódicamente en el sistema de embalses. Así pues, se plantea un modelo de gestión combinada entre los dos embalses.

Se propone, para el vaciado del sedimento del embalse de Riba-Roja d'Ebre, la técnica del arrastre hidráulico, ya que ésta técnica resulta más económica que la extracción



mecánica, según el “Informe técnico-económico de alternativas del programa para corregir la subsidencia y regresión del Delta del Ebro” realizado por Martín-Vide et al. (2004) dónde se cuantifican económicamente diferentes métodos de extracción forzada y transporte de sedimentos en los embalses de la zona de estudio, con valores que oscilan entre los 5,57 y 29,2 €/m³, siendo el precio de extracción de sedimentos por arrastre controlado de 0,54 €/m³ (incluyendo los costes de pérdida energética durante el desembalse). Por otro lado cabe destacar que la presencia del embalse de Mequinenza, con una gran capacidad de almacenaje, aguas arriba de Riba-Roja d’Ebre, hace que ésta operación sea muy viable técnicamente y muy ventajosa desde el punto de vista de disponibilidad del caudal suficiente para la obtención de buenos resultados y un rellenado rápido del embalse después de la operación. Así mismo, hay un reservorio de sedimentos de aproximadamente 13 hm³ susceptible de ser arrastrado en diversas operaciones.

Por otro lado, en cuanto a las operaciones de transferencia de sedimento a través de las presas de Mequinenza y Riba-Roja d’Ebre en estadios de crecida, se ha escogido la técnica del traspaso de las corrientes de densidad en lugar de la construcción de un bypass de transferencia, ya que esta última técnica requiere unas condiciones de caudal y topográficas muy específicas, y por otra parte, al ser esta técnica muy poco usada, tampoco hay muchos casos de aplicación que hayan sido estudiados y se desconoce en gran medida su efectividad. A este hecho cabe añadir que la mayor parte de los sedimentos en suspensión que entran en el embalse de Mequinenza en épocas de crecida son retenidos en su vaso. El objetivo final es el de dar continuidad a éstos sedimentos, los cuales ayudarían a reducir el déficit sedimentario del río aguas abajo de las presas. El funcionamiento combinado de ésta técnica en los dos embalses consistiría en dar una continuidad longitudinal de las corrientes de densidad que llegan al embalse de Mequinenza, pudiendo éstas traspasar tanto la presa de éste mismo embalse como la presa de Riba-Roja d’Ebre en un mismo episodio de crecida, operando las compuertas de fondo de ambas presas de una manera conjunta y coordinada.

Las dos técnicas que se explicarán a continuación han sido extraídas del Informe “Técnicas para la gestión de sedimento en los embalses: caudales de arrastre y corrientes de densidad” (Rovira & Ibáñez 2009) para la Agencia Catalana del Agua.

5.1 Aplicación de la técnica de arrastre hidráulico en el embalse de Riba-Roja d’Ebre

Los diferentes datos utilizados en éste apartado para la realización de los cálculos pertinentes se han extraído principalmente de los estudios “Tècniques per a la gestió del



sediment als embassaments: els cabals d'arrossegament i les corrents de densitat" realizado por Rovira & Ibañez (2009), y "Arrastre controlado de sedimento en el embalse de Riba-Roja d'Ebre" realizado por Roca & Martín-Vide (2005).

A continuación se detallan los pasos que se han seguido para la aplicación de esta técnica:

Estudio de viabilidad para el caso de Riba-Roja d'Ebre:

En primer lugar, para poder determinar si un arrastre controlado será viable en un embalse determinado, se utilizan los condicionantes de aplicación planteados por Sumi (2001), basados en la clasificación de los embalses de Basson & Rooseboom (1996). Estos condicionantes sirven para calcularla tasa de eficiencia de un arrastre en función de la capacidad del embalse (CAP), el volumen de escorrentía mediana anual de la cuenca de recepción (MAR) y el volumen medio entrante en el embalse (MAS). El cálculo del MAS se ha realizado en función del balance de masa sedimentaria en suspensión anual del embalse de Riba-Roja d'Ebre, teniendo en cuenta que éste representa 99,5 % y que el 0,5% restante se produce en forma de carga de fondo. Este se ha calculado a partir de los datos extraídos de Roca & Martín-Vide (2005) obteniéndose un valor de 320.000 hm³.

Los cálculos se han realizado de la siguiente manera:

Para calcular el balance de masa sedimentaria en suspensión anual se han restado las entradas y las salidas, dando un valor de almacenamiento de:

$$\text{Almacenamiento: } 1.251.045 \text{ t/año} - 742.400 \text{ t/año} = 508.545 \text{ t/año}$$

Para pasar las unidades de masa a volumen se ha dividido éste valor por la densidad, considerando que ésta es de 1,6 t/m³:

$$508.545 \text{ t/año} / 1,6 \text{ t/m}^3 = 317.840 \text{ m}^3$$

Éste volumen de sedimento representa el 99,5% ya que el resto (0,5%) se produce en forma de carga de fondo. Por lo tanto:

$$317.840 \text{ m}^3/\text{año} * 1,005 = 319.430 \text{ m}^3/\text{año}$$

Una vez se han obtenido estos parámetros (CAP: 210 hm³ (Fuente: CHE); MAR: 10.689 hm³(Fuente: CHE), y MAS: 320.000 hm³) se han establecido las siguientes relaciones que se representan en el gráfico de la Fig. 39:

$$\text{CAP/MAS}=656$$

$$\text{CAP/MAR}=0.02 \text{ (2\%)}$$

La relación CAP/MAR es inferior al 5%, que como ya se ha comentado anteriormente, es uno de los requisitos para poder realizar una operación de éste tipo.

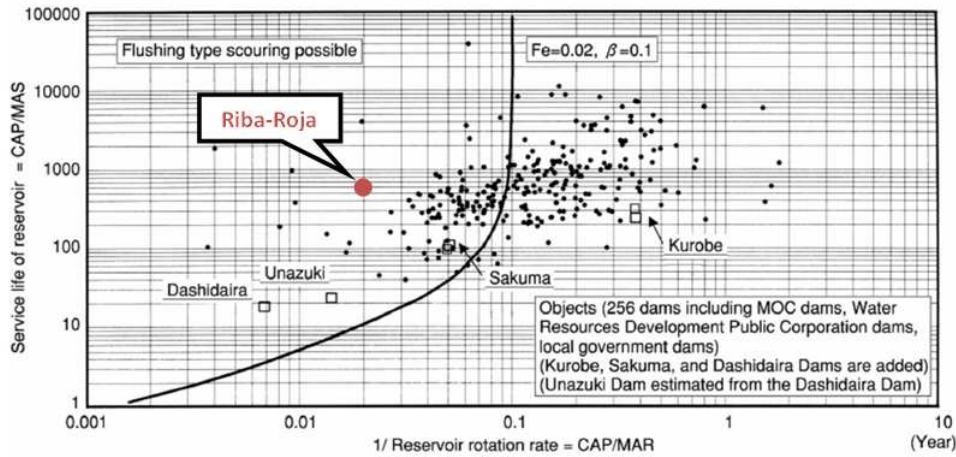


Fig. 39. Rango de aplicación de la técnica (extraído de Sumi 2003)

Según Sumi (2003), cuando el punto cae a la izquierda de la curva, la aplicación de la técnica es viable tal y como sucede en el caso del embalse de Riba-Roja d'Ebre.

Cálculo de la capacidad de los desagües de fondo de la presa de Riba-Roja d'Ebre:

Previamente al diseño del caudal que se proponen utilizar en la operación, hay que cuantificar el caudal de agua que es capaz de ser liberado a través los desagües de fondo de la presa en una operación de arrastre controlado.

La presa cuenta con dos desagües de fondo principales en forma circular situados en la parte izquierda de la presa y 5 desagües auxiliares situados en ambos lados de las tomas de turbinado de la central (vista frontal según Fig. 40).

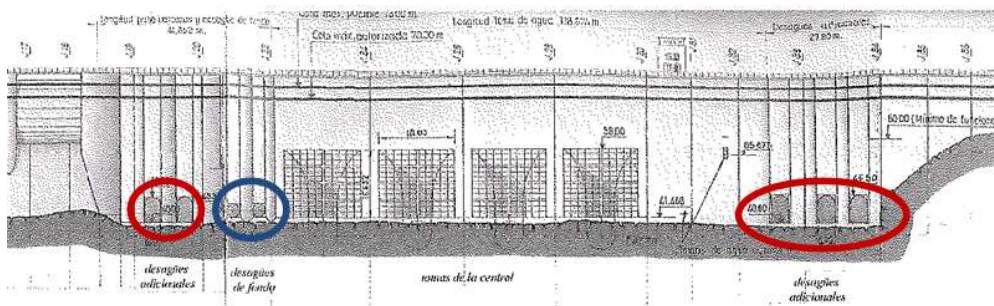


Fig. 40. Ubicación de las compuertas de fondo de la presa de Riba-Roja d'Ebre. Las compuertas principales están situadas dentro del círculo azul y las auxiliares dentro de los círculos rojos (Roca & Martín-Vide 2005)



Durante la operación éstas compuertas tendrían varias funciones; en primer lugar, tendrían la función de vaciar el embalse de forma total, dónde el vaciado se produciría desde la cota de apertura de los conductos de turbinado hasta la cota de las mismas compuertas, tardando un tiempo aproximado de unos 5 días (Roca& Martín-Vide 2005). En segundo lugar, éstas servirían como conducto de evacuación de sedimento y agua durante la propia operación.

Se cuantifica un caudal de 300 m³/s para la realización de la operación, que es aquel correspondiente al caudal medio aproximado del Ebro a la salida del embalse de Flix. Con éste caudal de arrastre, la operación sería del tipo de presión con una lámina de agua situada a menos de 4 metros por encima de las compuertas de fondo; tal y como muestran los cálculos realizados por Roca & Martín Vide (2005) en la *Tabla 10*:

Tabla 10. Caudal de desagüe en las compuertas de fondo en función del nivel de agua por encima de éstas (Roca& Martín-Vide 2005)

Altura de agua (m)	Q, 1 desagüe (m ³ /s)	Q, todos los desagües (m ³ /s)
16.5	99.2	694.1
12	84.6	591.9
8	69.0	483.3
4	48.8	341.7

Estos cálculos se han realizado según la fórmula:

$$Q = C_d \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2gH}$$



Dónde Q es el caudal (en m^3/seg), D el diámetro del desagüe (en metros), C_d el coeficiente del desagüe y H la altura de agua medida con respecto al eje del orificio (en metros).

Cálculos adicionales

Una vez sabido que es factible la aplicación de ésta técnica en Riba-Roja d'Ebre y que el caudal de arrastre que se propone aplicar es de $300 m^3/seg.$, se deben calcular otros parámetros tales como el caudal sólido aguas abajo de la presa (Q_s), la concentración de sólido a la salida de la presa (C), el tiempo que debe durar ésta operación y el volumen de agua que se requiere utilizar. Los cálculos se realizan en función de dos condicionantes. El primero es que la concentración de sedimento a la salida del embalse sea de alrededor de $10 g/l$ (concentración máxima de sedimento registrado por Gorria, 1877) para no producir excesivos daños ambientales en el río aguas abajo de la presa. El segundo, es que la cantidad de sedimento a removilizar del embalse sea de $2 \cdot 10^6 t$, que corresponde al déficit de sedimento anual que se requieren para compensar la subsidencia del delta y la subida del nivel del mar por el cambio climático.

Los cálculos se han realizado en base a la siguiente fórmula empírica:

$$Q_s = \psi \frac{Q_f^{1,6} S^{1,2}}{W^{0,6}}$$

Dónde:

Q_s (Caudal sólido) = $3,7 t/seg.$

S (Pendiente hidráulica del embalse) = $0,000473$

W (Anchura teórica del canal de arrastre obtenida a partir de la relación $W=12,8 Q_f^{0,5}$ (White 2.000) = $221,7m$

Q_f (Caudal de arrastre) = $300 m^3/seg.$

Ψ (Constante en función del sedimento) = 100 (aunque se debería utilizar el valor de 225 correspondiente a sedimentos con medida media de grano inferior a $0,1 mm$, se utiliza el valor de 100 correspondiente a las de condiciones de arrastre con caudal bajo, debido a que los sedimentos podrían mostrar un estado de consolidación superior al esperado).

Una vez determinados los valores anteriores se ha determinado la concentración del sedimento a la salida del embalse:



$$C = Q_s/Q = 12 \text{ g/l}$$

El tiempo (t) que duraría la operación de arrastre propiamente sería de 6,5 días:

$$t = \text{Masa de sedimento a removilizar}/Q_s = 6,5 \text{ días}$$

En cuanto a la eficiencia del arrastre prevista, ésta se consideraría buena debido a la pequeña anchura del embalse, dónde se podría formar un canal de erosión que ocuparía buena parte de la anchura total de éste y que cubriría gran parte de los sedimentos emergidos. En el caso que quedaran zonas de sedimentos que no fueran capaces de ser erosionados por el flujo, sería muy conveniente la apertura de canales adicionales de erosión mediante medios mecánicos. Sería muy ventajoso el hecho de poder alternar las descargas de agua a través de las diferentes compuertas de fondo del embalse de Mequinenza en las diferentes operaciones de arrastre, para poder formar diferentes canales de erosión y poder aumentar así la superficie de arrastre. Cuanto más grande fuera ésta superficie, mayor sería el volumen de arrastre de los sedimentos depositados, sobre todo en los depósitos de cabecera.

Aunque éste tipo de arrastre fuera un arrastre hidráulico a presión, considerado menos efectivo que un arrastre hidráulico libre, la cota de lámina de agua quedaría 4 metros por encima del nivel de las compuertas de fondo, quedando las principales acumulaciones de sedimentos correspondientes al delta de la cola del embalse y a las desembocaduras de los ríos Segre, Cinca y Matarraña, emergidos o parcialmente emergidos, con lo cual el canal de erosión podría removilizar éstos sedimentos de una manera efectiva. Estas acumulaciones de sedimentos situadas en las desembocaduras de los ríos estarían erosionadas tanto por el agua del canal de erosión principal procedente del embalse de Mequinenza, cómo por el agua de los propios ríos que disminuirían su cota de base y aumentarían su potencial de erosión.

Una vez finalizado el proceso de aplicación de la técnica se propondría cerrar parcialmente las compuertas de base de Riba-Roja d'Ebre y rellenar el embalse con un caudal de 600 m³/seg obtenido a partir de 400 m³/seg de agua procedente del embalse de Mequinenza y 200 m³/seg resultado de la suma de los caudales de los ríos Segre, Cinca y Matarraña.

Contando que de éstos 600 m³/seg., 300 m³/seg se utilizarían para rellenar el embalse y los otros 300 m³/seg más se dejarían como caudal base del río aguas abajo la presa de Riba-Roja d'Ebre, se obtendría un tiempo de llenado (t_{rell}) para el embalse de:

$$t_{\text{rell.}} = V_t/Q_{\text{rell}} = 8 \text{ días}$$



Así, la operación entera de arrastre teniendo en cuenta el vaciado, la propia operación y el posterior rellenado, tendría un tiempo total de 20 días.

Por otra parte, el volumen total de agua que se utilizaría para la operación (caudal para la operación de arrastre y llenado del embalse) sería de 370 hm³.

La época óptima considerada para la realización de la operación de arrastre sería durante la estación de otoño coincidiendo con el inicio del año hidrológico por los siguientes motivos:

- Las reservas de agua almacenadas se encuentran en su máximo nivel (embalse de Mequinenza).
- Mayores pueden ser los caudales de arrastre de los ríos que desembocan en el embalse.
- La columna de agua del embalse está muy mezclada, por lo que no presentaría problemas de anoxia que pudieran causar un problema ambiental para el medio, aguas abajo de la presa.
- Éste período no coincide con el periodo de regadío y por tanto no hay demanda de agua del embalse para riego.
- Las pérdidas en el sector turístico son mínimas, ya que octubre es temporada baja.

5.2 Aplicación de la técnica de corrientes de densidad a través de las compuertas de fondo

En éste caso, la utilización de la técnica de traspaso de las corrientes de densidad a través de las compuertas de fondo de las presas, serviría para traspasar los materiales finos entrantes en el embalse de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre durante los períodos de crecida pudiendo dar continuidad longitudinal a éstas corrientes, atravesando el sistema de presas.

En el caso de Mequinenza, teniendo en cuenta que la entrada media anual de sedimentos en suspensión podría ser de alrededor 1,5*10⁶ t (Roca& Martín-Vide 2005), si se pudiera pasar a liberar aproximadamente entre un 30 y un 40% de ésta cantidad a través de las compuertas de fondo (Vericat & Batalla 2.006), suponiendo que las corrientes de densidad alcanzaran una longitud suficiente como para poder llegar a la presa y duraran el tiempo suficiente como para poder traspasar buena parte del material



sedimentario, significaría que anualmente 500.000 t de sedimentos podrían ser traspasados aguas abajo de las presas. La formación de corrientes de densidad largas y continuas en el tiempo depende exclusivamente de la magnitud de las crecidas, por lo que el valor sería tomado como una aproximación media.

Una vez éste sedimento hubiera traspasado la presa de Mequinzenza sería muy importante que se estableciera este mismo procedimiento de apertura de compuertas de fondo en la presas de Riba-Roja d'Ebre y Flix coordinadamente; de tal manera que éstos sedimentos traspasaran las presas.

Para poder realizar esta operación conjunta de manera coordinada y efectiva sería esencial establecer mecanismos para predecir la llegada de avenidas en el sistema con una antelación suficiente como para operar las compuertas eficientemente. Contrariamente al proceso de desagüe de los embalses previo a la llegada de crecidas que se efectúa actualmente, se tendría que cambiar ésta dinámica desaguando las crecidas a través de las compuertas de fondo de las presas.

5.3 Resultados en la aplicación de las técnicas

Los objetivos finales de aplicación de estas dos técnicas serían los de liberar al río una cantidad anual de $2 \cdot 10^6$ t de sedimentos al año aguas abajo de la presa de Flix, que servirían para corregir al déficit sedimentario anual del delta, además de restaurar la dinámica geomorfológica del río y finalmente liberar los sedimentos depositados en el vaso del embalse de Riba-Roja d'Ebre.

Es por estos tres objetivos que se propone la ejecución conjunta de las técnicas de arrastre controlado en el embalse de Riba-Roja d'Ebre y de corrientes de densidad en los dos embalses de la siguiente manera:

- Operación de arrastre controlado en Riba-Roja d'Ebre con frecuencia bianual.
- Apertura de las compuertas de fondo combinada en las presas en cada episodio de crecida.

Las previsiones de liberación de sedimento son de $2 \cdot 10^6$ t en cada operación de arrastre controlado en el embalse de Riba-Roja d'Ebre y de aproximadamente $1 \cdot 10^6$ t/año por la liberación de corrientes de densidad (500.000 t/año provenientes de Mequinzenza y 700.000 t/año liberados en Riba-Roja d'Ebre) en los dos embalses, por tanto se cumpliría el balance anual de $2 \cdot 10^6$ t/año para conseguir los objetivos anteriormente mencionados.



Teniendo en cuenta que anualmente se produce una retención de sedimentos de aproximadamente 500.000 t en el Embalse de Riba-Roja d'Ebre y que la removilización de $2 \cdot 10^6$ t sería con carácter bianual, se necesitaría un período de 40 años para vaciar completamente los sedimentos de Riba-Roja d'Ebre, teniendo en cuenta que éstos tienen una masa de $22 \cdot 10^6$ t (13 hm^3).

Los detalles de las operaciones se detallan en la *Tabla 11*:

Tabla 11. Propuesta de combinación de las técnicas de gestión de sedimentos.

	Frecuencia	Volumen liberado en cada operación	Tiempo a realizar
Operación de arrastre controlado (Riba-Roja d'Ebre)	Bianual	$2 \cdot 10^6$ t	40 años
Corrientes de densidad (Mequinzena y Riba-Roja d'Ebre)	Periodos de crecida	$1 \cdot 10^6$ t/año (promedio)	Durante la vida útil de los embalses

Aspectos a tener en cuenta antes de la realización de las operaciones

Desde el punto de vista ecológico y socioeconómico hay algunos aspectos que deben considerarse antes de aplicar éstas técnicas, como son:

- 1) En éstas operaciones se produciría una gran concentración de sedimentos aguas abajo del sistema de presas, que a corto plazo causaría una afectación en el medio biótico produciendo una mortalidad ictícola y de invertebrados en diferente grado en función de la especie. Debido a ello, es de especial importancia predecir este efecto para llevar los controles pertinentes durante la operación. A pesar de ello, la capacidad de recuperación de ciertas especies, sobretudo las autóctonas, es muy elevada, con lo cual éstas se recuperarían relativamente rápidamente, tal y como se ha comentado en los casos del apartado 3.2. Por otro lado, las especies alóctonas, que tienen menor capacidad de recuperación, podrían ser potencialmente muy mermadas, con lo que se considera un aspecto muy positivo, poniendo como ejemplo principal la posible reducción de la población del mejillón cebrá, entre otros. Por otra parte, los macrófitos establecidos en el lecho del río también podrían ser cubiertos de sedimento y eliminados, permitiendo así a



- su vez disminuir la puesta de huevos de la mosca negra y reduciendo también su población.
- 2) Los sedimentos emergidos en la desembocadura del Segre con Riba-Roja d'Ebre forman parte de la espacio natural protegido d'Aiguabarreig. Antes de empezar cualquier operación de arrastre en éste embalse se tendría que considerar si se querría proteger ésta zona o si se preferiría remover éste paquete sedimentario aguas abajo de la presa. En caso que se quisiera proteger, habría que tomar medidas al respecto para no afectar este espacio durante el periodo de ejecución de la operación de arrastre (p.e. construcción de un dique, desvío del canal de erosión, etc.).
 - 3) Desde el punto de vista eléctrico, la población de Riba-Roja d'Ebre depende exclusivamente de la generación de energía eléctrica del salto de agua de la presa, con lo cual, para realizar el vaciado total del embalse habría que tomar una solución previa al respecto.
 - 4) El vaciado del embalse de Riba-Roja d'Ebre tendría unos costes económicos tanto para la compañía hidroeléctrica operadora de la presa como para el sector empresarial dedicado a las actividades turísticas y deportivas en el embalse, con lo cual habría un trabajo previo de mediación con todos estos agentes antes del vaciado del embalse.

Para calcular las pérdidas económicas de la empresa hidroeléctrica que gestiona el embalse de Riba-Roja d'Ebre durante la operación de desembalse, se han tomado como referencia los cálculos realizados por Martín-Vide et al. (2004).

La pérdida económica para la empresa hidroeléctrica se produce por el efecto de la pérdida de producción de energía eléctrica y se cuantifica en relación de la reserva útil de la energía almacenada en el embalse. La reserva de energía del embalse se calcula mediante la fórmula:

$$E_p \text{ (Reserva de energía)} = m \cdot g \cdot h$$

Dónde:

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$h = 30 \text{ m (salto hidráulico)}$$

$$m = 110 \text{ hm}^3 \cdot (10^9 \text{ kg/1hm}^3) = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Kg (masa de agua útil para ser turbinada situada por encima de las tomas de agua de la central)}$$

Por tanto,



$$E_p = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ Kg} \cdot 30 \text{ m} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 3,23 \cdot 10^{13} \text{ J} = 9 \cdot 10^6 \text{ Kwh}$$

Teniendo en cuenta que el precio medio actual del Kwh es de 0,12 € las pérdidas económicas de la empresa hidroeléctrica que gestiona Riba-Roja d'Ebre serían de 1.080.000 € en cada operación de arrastre.

- 5) Habría que dar una alternativa de suministro a aquellos usuarios que dependen exclusivamente del suministro de agua de las captaciones directas del embalse.
- 6) Las compuertas de fondo de las presas de Mequinenza y Riba-Roja d'Ebre no se han operado desde hace muchos años, con lo cual no se sabe si éstas funcionarían correctamente, por lo que habría que hacer trabajos de inspección y mantenimiento de éstos elementos antes de la realización de las operaciones.
- 7) El aumento de la concentración de sedimentos podría obstruir las captaciones de agua aguas abajo de las presas, con lo cual se tendrían que tomar soluciones al respecto antes de empezar las operaciones.
- 8) Actualmente, en la caracterización físico-química del sedimento almacenado en el embalse de Riba-Roja d'Ebre realizado por FLUMEN en el año 2009, se obtienen los datos referentes a los primeros 10 cm. de sedimento, dónde se determina un sedimento de naturaleza limoso-arcillosa y con una calidad química moderadamente eutrófica y con concentraciones de Ni y Cr que superan el nivel umbral de toxicidad.

Ésta caracterización sedimentaria es totalmente insuficiente para la realización de una operación de arrastre hidráulico controlado, ya que para llevar a cabo una operación de este tipo con éxito, es totalmente imprescindible el conocimiento de la totalidad del sedimento que hay depositado.

Éste conocimiento total es útil por dos motivos principales; en primer lugar para poder determinar el estado actual de compactación, consolidación y granulometría de los sedimentos depositados y poder de ésta manera diseñar una operación de arrastre con mayor exactitud, prediciendo las concentraciones de sedimento en la salida bajo la presa y prediciendo los impactos ambientales que se producirán. En segundo lugar, conocer el estado químico de los sedimentos en profundidad, permitiría decidir si una operación de arrastre es factible o no, en función de cuál sea el potencial de contaminación de éstos aguas abajo de la presa.

En el caso que se hiciera una caracterización más profunda de los sedimentos en profundidad mediante sondeos a rotación, se establecen varias hipótesis sobre cuál podría ser el estado químico de éstos, la viabilidad de la operación, las posibles medidas

preventivas que se deberían de llevar a término antes y durante la operación y los inconvenientes de cada caso, tal y como se muestra en la *Tabla 12*:

Tabla 12. Hipótesis sobre el estado químico de los sedimentos, medidas preventivas e inconvenientes.

Grado de contaminación	Viabilidad de la operación	Medidas preventivas	Inconvenientes
Contaminación superficial (primeros cm)	Sí	Control químico de los sedimentos que salen por las compuertas de fondo durante la operación de arrastre y parada de la operación en caso de altas concentraciones.	Tiene que haber un seguimiento continuo.
Contaminación semiprofunda (primeros metros)	Sí	Realización de un dragado del espesor contaminado y posteriormente realización del arrastre hidráulico en el resto de sedimentos en buen estado. Requiere un control de los sedimentos en las compuertas de fondo durante la operación.	Tiene que haber un seguimiento continuo y aumenta el precio de la operación (por el dragado).
Contaminación total del sedimento	No	Extracción mecánica y tratamiento de los sedimentos. La operación de arrastre significaría un desastre medioambiental aguas abajo de la presa.	La operación cambia la tipología del método y consecuentemente el precio aumenta sustancialmente.

6 PERCEPCIÓN SOCIAL

6.1 La falta de sedimento en el río Ebro: concepciones previas

Uno de los caballos de batalla en las movilizaciones en defensa del Ebro y en contra de los trasvases ha sido la demanda de unos caudales necesarios para la supervivencia del Delta del Ebro. Varios estudios científicos han demostrado que la falta de sedimentos ha representado y representa el progresivo retroceso del frente deltaico y la rotura del frágil equilibrio entre el río y el mar, y que irá a peor en los escenarios ya reales de cambio climático. Estos factores han contribuido a que se hable claramente de que la actual gestión de los embalses aboque a la pérdida irreversible del Delta del Ebro.

No es fácil transmitir la necesidad de hablar de caudales sólidos, tan importantes como los volúmenes de caudal que se fijan sin entrar en detalles. Representa por tanto un salto cualitativo incorporar éstas demandas que van más allá de valores cuantitativos. No obstante todavía existen, creemos, unas concepciones muy simplificadas en relación al transporte de sedimentos. Entre ellas:

- considerar que sedimentos es hablar de limos o arenas (no hablar de gravas ni de cantos rodados).
- creer que los sedimentos son para “salvar” al Delta (y que su gestión no tiene que ver con el tramo final del río).
- identificar como única fuente de sedimentos a los embalses, sin considerar la red tributaria lateral de barrancos, rieras y afluentes, o la existencia de barras o depósitos de cantos rodados en el cauce del propio río.

6.2 *Un río que nada tiene que ver con el actual: La pérdida de la memoria histórica*

Nuestros antepasados, a lo largo de la historia de la navegación fluvial en el Ebro tenían claro que las grandes avenidas generaban playas de cantos rodados libres de vegetación (que ahora son prácticamente inexistentes en el tramo final del Ebro), y que las avenidas no daban tiempo a la revegetación del canal, especialmente arbórea. En otros episodios dichas zonas desaparecían aguas abajo o se transformaban, e incluso se generaban tramos con entrantes o galachos separados del curso principal.

Tal y como se puede apreciar en las imágenes históricas que presentamos, los márgenes nada tenían que ver con los actuales, y la tónica general era que no existían grandes masas boscosas en sus orillas, y ni mucho menos islas fluviales cubiertas de vegetación (Fig. 41).



Fig. 41. Zona del embarcador de la Mina Virgen del Pilar, 1945 (Fuente: Archivo municipal de Flix).

La dinámica fluvial no lo permitía. A su vez, la intensa actividad de navegación fluvial, requería que para remontar el río se tuviera que tirar (“sirgar”) con fuerza humana o con la ayuda de mulas para remontar el río cuando no soplaba el viento de mar a tierra y no se podían desplegar las velas. Ello suponía la existencia de una servidumbre histórica, un camino (“camí de sirga”) que iba por una u otra orilla según el trazado del río y que se tenía que mantener libre de vegetación para no dificultar el remonte de los “llaüts” (Fig. 42 y Fig. 43).

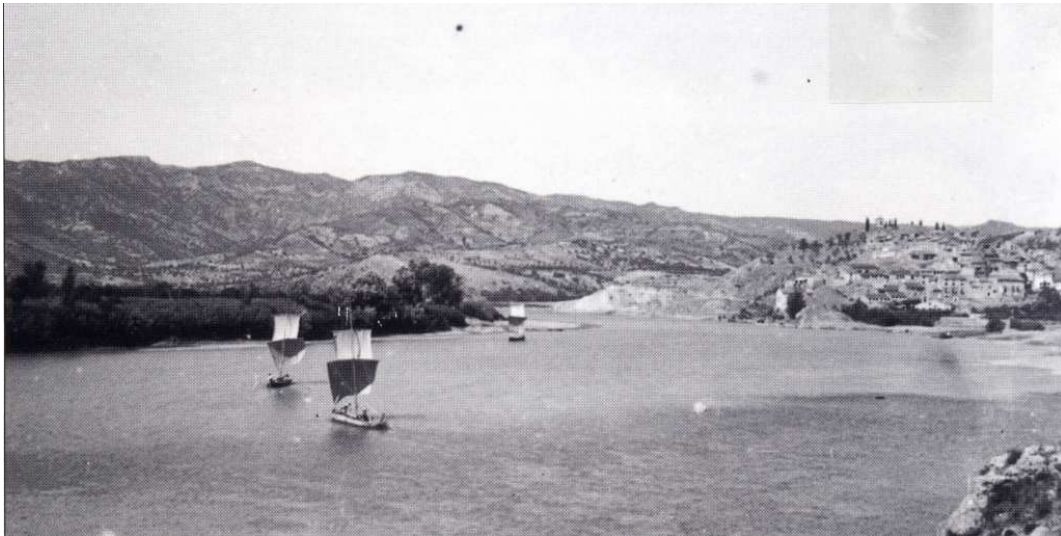


Fig. 42. “Llaüts” remontando el Ebro con las velas desplegadas para aprovechar la “garbinada” (viento de mar a tierra) a la altura de la población de García. A la derecha la desembocadura del río Siurana, libre de vegetación (Fuente: Archivo municipal de Flix).

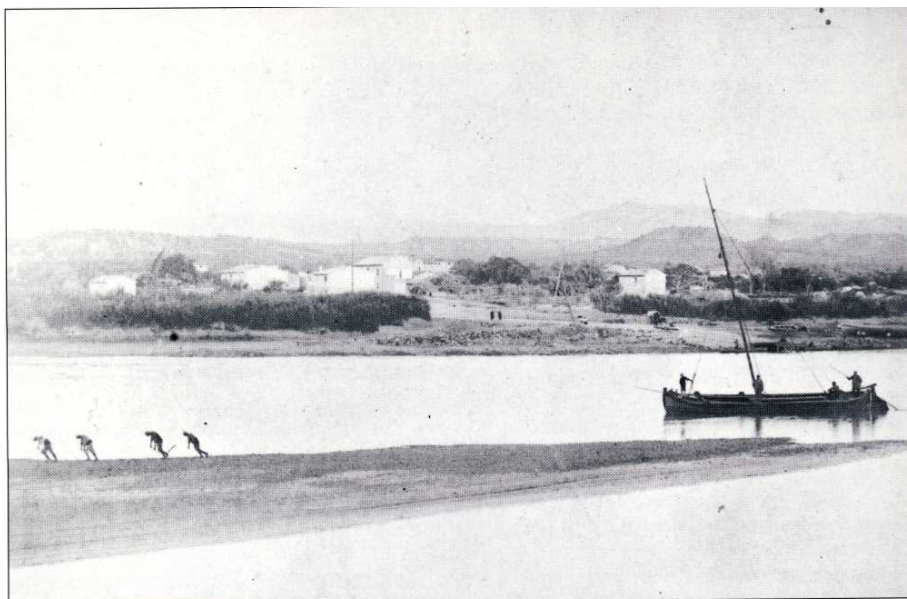


Fig. 43. “Llaguters” tirando (“sirgant”) de la embarcación por una playa de cantos rodados, a falta de viento para remontar el Ebro cerca de la población de Móra de Ebro (Fuente: Archivo municipal de Flix).

La actividad humana al entorno del río era muy intensa, centrada en la navegación fluvial con “llaüts”, robusta barcaza de poco calado adaptada a la navegación por un río de características cambiantes a lo largo del año. El río era frontera entre ambas orillas pero a su vez era la principal “autopista de comunicación” entre su desembocadura y el interior de la Península Ibérica. Para facilitar el traslado entre ambas orillas existían en la mayoría de poblaciones antiguos pasos de barca formados por dos “llaüts” unidos por una tarima que permitían la carga de gran cantidad de personas, carros, rebaños, etc. Pero también existían ya desde época árabe instalaciones de captación para regadíos con azudes, norias o molinos para elaborar harina a partir de la fuerza motriz del agua (Fig. 44 y Fig. 45). Posteriormente, con la industrialización de la zona, especialmente al entorno de Flix, las transformaciones fueron de mayor intensidad, con la construcción de la presa de Flix.

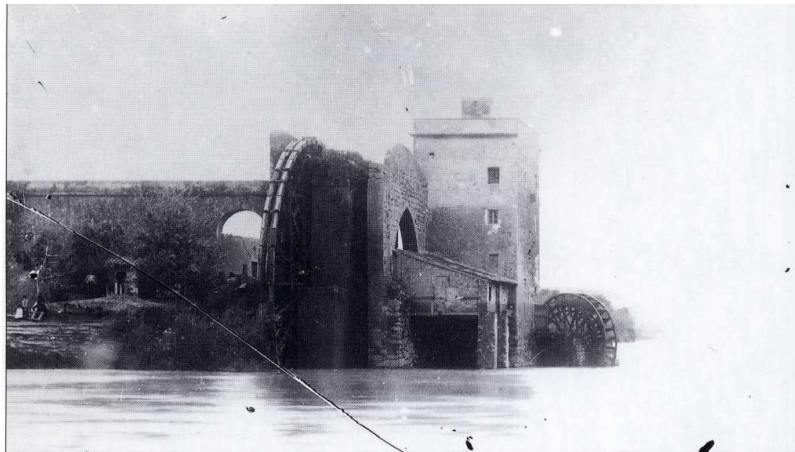


Fig. 44. Antigua noria y molino harinero de la población de Flix destruido con la construcción del complejo industrial. Foto de 1895 aprox. (Fuente: Archivo municipal de Flix).



Fig. 45. Molino harinero formado por dos “llaüts” que aprovechaba la corriente de agua (Fuente: Archivo municipal de Flix).

De la Fig. 46 a la Fig. 50 se muestran algunas fotografías históricas adicionales a la construcción de los embalses:



Fig. 46. Remonte del río con la ayuda de una mula tirando desde una playa en García (Fuente: Archivo municipal de Flix).



Fig. 47. Antiguo paso de barca de Mequinenza (Fuente: Archivo municipal de Flix).

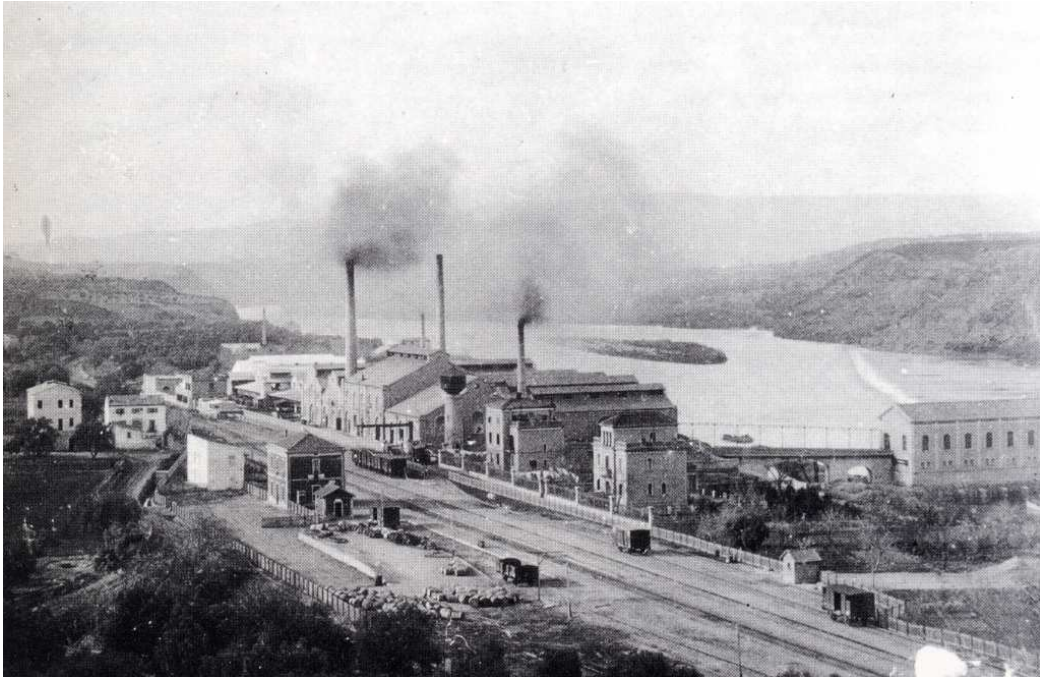


Fig. 48. Instalación del complejo Electroquímico de Flix con su azud a la derecha y la central hidroeléctrica (Casa de Turbinas) que substituyó a la antigua noria (Fuente: Archivo municipal de Flix).



Fig. 49. Detalle del azud de Flix en época de estiaje. Al fondo la Casa de Turbinas (Fuente: Archivo municipal de Flix).



Fig. 50. Embalse de Flix que substituyó al antiguo azud. A la izquierda antiguo canal de navegación con su esclusa que servía para salvar el desnivel del azud. En el curso, los pilares del puente que había proyectado el gobierno de la República y que quedó sin terminar (Fuente: Archivo municipal de Flix).

6.3 Descripción de la situación actual y percepción social

La magnitud de las avenidas históricas, que se estiman en caudales superiores a los 15.000 m³/seg, tenían una capacidad de movilización de sedimentos incomparable con las actuales avenidas que discurren aguas abajo del embalse de Mequinenza difícilmente llegan a sobrepasar los 2.500 m³/seg.

La pérdida de esa memoria histórica ha contribuido a la creencia que lo normal es la situación actual. Se perciben los embalses únicamente como elementos de seguridad o de garantía de suministro (eléctrico o de captaciones). Cierto es que si se compara la situación en la primera mitad del siglo XX con la de la segunda mitad, en cuanto al impacto sobre bienes y personas de unas avenidas libres, sin previo aviso y sin mecanismos de protección, la situación actual es percibida, objetivamente como infinitamente mejor.

El problema está en que fruto de esa seguridad se han ocupado zonas de ribera que nuestros antepasados jamás hubieran utilizado por una simple razón de sentido común: la vulnerabilidad al impacto de crecidas por encima de unos valores “estándar” que no implican inundaciones de cultivos ni afectaciones importantes, ha aumentado significativamente por la ubicación de bienes y servicios en zonas inundables.

Existe por lo tanto una reticencia social a considerar que deban de admitirse crecidas regeneradoras que tengan un impacto sobre dichos bienes. Y son éstas crecidas, de mayor caudal, pero sobretodo de mayor duración, las que mayor efectividad tienen en el transporte de sedimentos y en la removilización y regeneración del lecho del río.

Si trasladamos dicha percepción a los intereses de diferentes sectores, la prevalencia de la prestación de servicios y derechos concesionales, así como el temor a posibles impactos por el desconocimiento de problemática, nos lleva a una situación de partida poco favorable a la intervención.

Considerando diferentes sectores (p.e. población en general, sector ambiental -científico-técnico y social-, sector agrícola y pesquero, sector industrial y de forma específica sector hidroeléctrico), se resumen en el siguiente cuadro (*Tabla 13*) las concepciones generales respecto a la problemática de los sedimentos que aporta el río así como la visión de cada uno de dichos sectores:

Tabla 13. *Concepciones previas relativas a la problemática de la falta de sedimentos, tanto a nivel general como por los sectores más representativos de la zona.*

SECTOR	CONCEPCIONES	
	GENERALES	SECTORIALES
POBLACIÓN	<p>El Delta del Ebro depende de los sedimentos que lleve el río</p> <p>En el resto del río no hay impacto por la falta de sedimentos</p>	<p>El río ha cambiado mucho en los últimos años (contaminación, especies exóticas, plagas, transparencia...)</p> <p>No se resuelven los problemas</p>
AMBIENTAL	<p>Hay menos avenidas, de menor magnitud y duración por efecto de los embalses</p> <p>Su gestión es responsabilidad de las hidroeléctricas</p> <p>Llueve menos y hay menos agua disponible</p> <p>Los embalses garantizan el suministro de agua y electricidad</p> <p>Es un peligro liberar sedimentos</p>	<p>La falta de aportación de sedimentos es determinante para la conservación del Delta del Ebro</p> <p>Las hidroeléctricas determinan la gestión hidrológica</p> <p>La administraciones no garantizan la conservación del río y del Delta del Ebro</p>



<p>AGRÍCOLA Y PESQUERO</p>	<p>que pueden estar contaminados</p> <p>Experiencias anteriores no han sido positivas (Barasona)</p> <p>Temor al impacto sobre suministros (urbanos, agrícolas, industriales)</p> <p>Soluciones técnicas complejas</p> <p>Imposibilidad de retornar a un régimen natural</p> <p>El actual contexto de crisis no es el mejor para destinar recursos a actuaciones de "dudosa utilidad"</p>	<p>El sector agrícola está muy castigado y hay que protegerlo</p> <p>Liberar sedimentos puede generar problemas de contaminación de suelos</p> <p>Los cultivos de arrozales necesitan que el Delta se conserve</p> <p>La salinización por la intrusión de la cuña salina condiciona cultivos en el delta</p> <p>Las concesiones de agua deben respetarse y aumentar para garantizar regadíos</p> <p>La agricultura no es un problema para la conservación del río y el delta</p> <p>Las avenidas con su aporte de nutrientes y sedimentos mantienen la riqueza pesquera en la costa del Delta</p>
<p>HIDROELÉCTRICO</p>		<p>La gestión de sedimentos no es una prioridad ni su función</p> <p>La gestión hidroeléctrica se realiza en función de las concesiones, de acuerdo con la legislación y coordinada con la administración</p> <p>Cualquier nueva gestión representa un coste adicional de explotación</p> <p>Dificultades técnicas</p>
<p>INDUSTRIAL</p>		<p>Se deben respetar las concesiones</p> <p>La condicionalidad a temas ambientales pone en riesgo la actividad económica</p>

6.4 La problemática de la actual gestión y los impactos percibidos por los sectores sociales

La transformación debida a la gestión actual, y los problemas que originan según lo percibe cada sector pueden esquetizarse en el siguiente cuadro (*Tabla 14*):

Tabla 14. Cuadro resumen de la situación derivada de la gestión actual y problemas generados, tanto a nivel general como por los sectores más representativos de la zona.

SECTOR	SITUACIÓN ACTUAL	PROBLEMAS	
		GENERALES	SECTORIALES
POBLACIÓN	<p>Nula gestión de los sedimentos retenidos en los embalses</p> <p>Disminución en un 99% de sólidos aporta dos comparando con régimen natural</p>	<p>Subsistencia Delta del Ebro</p> <p>Pérdida dinámica natural</p> <p>Falta regeneración hábitats</p>	<p>Mosca negra, mosquitos, peces exóticos, proliferación de "algas"...</p> <p>Menor caudal y menos avenidas</p>
AMBIENTAL	<p>Nula presión de organismo de cuenca a hidroeléctricas para cumplir con dicha gestión</p> <p>Desconocimiento de las obligaciones en la gestión de caudales sólidos</p> <p>Presión social intermitente</p> <p>Importante retención de sedimentos en los embalses de la cuenca</p> <p>Riadas atenuadas y estiajes acentuados</p>	<p>Regresión del Delta del Ebro</p> <p>Intrusión salina</p> <p>Proliferación de especies exóticas</p> <p>Afectación hidromorfología (desestabilización de márgenes, sobredrenaje del acuífero, entrada de vegetación en el canal...)</p> <p>Como consecuencia afectación a la estabilidad de infraestructuras hidráulicas</p>	<p>Aceleración proceso de subsistencia y regresión del Delta del Ebro</p> <p>Impacto negativo sobre especies y hábitats del Delta</p> <p>Acorazamiento del lecho del río</p> <p>Creación de hábitats propicios para especies exóticas</p> <p>Pérdida de la funcionalidad</p>
	Menor disponibilidad de		



AGRÍCOLA Y PESQUERO	reservas por disminución pluviometría y aumento de la demanda Gestión hidrológica en manos de las hidroeléctricas y no de los Organismos de cuenca Infraestructuras no preparadas para la gestión de sedimentos Escaso o nulo mantenimiento de las compuertas de fondo en embalses	Salinización de suelos Reducción de superficies arrozales Problema de calidad en aguas de regadío Problemas en captaciones y redes de regadío por "algas" y especies exóticas Reducción de capturas pesqueras Especies de peces migradoras afectadas (caso anguila) Inundaciones de campos de frutales en avenidas poco controladas
HIDROELÉCTRICO		Problemas técnicos para activar las compuertas de fondo Problemas de garantía de suministro eléctrico Falta de garantía de disponibilidad de recursos hídricos para avenidas efectivas La acumulación de sedimentos en embalses no es un problema, todavía
INDUSTRIAL		Colapso de instalaciones por plantas acuáticas y afectación a producción



	<p>Impacto del mejillón cebra en tomas e instalaciones industriales</p> <p>Impacto en la calidad del agua</p>
--	---

Hay que recalcar que desde el punto de vista económico, la gestión de sedimentos es menos costosa que la resolución de las consecuencias sociales y ambientales derivadas de la no aplicación de éste tipo de técnicas. La enumeración de algunos de los gastos producidos por la no gestión de sedimentos incluiría:

- Las inversiones del PIPDE por Acuamed, Dirección General de Costas, ACA, etc. Para evitar el retroceso y subsidencia del delta del Ebro.
- Los gastos de tratamiento contra la mosca negra (300.000 €/año desde 2007) y el coste de las atenciones sanitarias derivadas de su proliferación.
- La retirada de macrófitos para mantener la navegación fluvial.
- Las paradas de la central nuclear de Ascó por bloqueo de macrófitos en entrada del canal de refrigeración.
- La proliferación de especies exóticas. En el caso del mejillón cebra los costes del periodo 2001-2005 en tratamientos, inversiones y estudios han sido de 2,7 M€, y se estiman en 40 M€ hasta 2025 en toda la cuenca.
- Las inversiones del ACA en la mejora de la dinámica fluvial en diferentes puntos del tramo final del Ebro.

Estos costes valorables económicamente dan una idea de lo que cuesta la no acción actual, y lo que llegará a costar en un futuro.

Sólo si se valoran todos éstos costes y si se explican a la población, se conseguirá la presión social suficiente para obtener respuestas en las políticas de gestión de embalses, que incluyan revisiones concesionales y condicionalidades con finalidades ambientales. Creemos que, por sí solo, el marco normativo derivado de la DMA no será suficiente, al no incidir directamente sobre la gestión de sedimentos y solo poderse acoger al principio general de no deterioro de las masas de agua. La valoración exhaustiva de los costes-beneficios de las actuaciones propuestas respecto a los costes-beneficios de la no actuación puede ser la herramienta necesaria para la toma de decisiones, más aún en el



actual contexto de crisis económica, que puede ayudar a aportar racionalidad a los costes socializados respecto a los beneficios privados.

6.5 Esquema conceptual según el modelo VENSIM de la problemática de la gestión de sedimentos en el tramo final del Ebro

Resumiendo las interrelaciones entre los distintos actores se definen los siguientes niveles y relaciones mostradas en la Fig. 51:

Nivel administrativo: En el que la Unión Europea, a través de sus normativas, en este caso la Directiva Marco del Agua incide sobre las administraciones con competencias en la gestión del agua. Por una parte sobre el Ministerio de Medio Ambiente, y por otra sobre el organismo de cuenca, la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). El caso de la Agencia Catalana del Agua, como organismo público encargado de la gestión del ciclo del agua en Catalunya, es peculiar. Dado que el Ebro se encuentra en una cuenca intercomunitaria, no tienen competencias directas, sino las delegadas por el organismo de cuenca a nivel de tramitación de expedientes, información, supervisión y control de actividades. En ningún caso son competencia suya la adjudicación de concesiones, o la planificación sobre el tramo del Ebro que pasa por Catalunya.

Usos derivados de los embalses: Los embalses se construyen con la concesión correspondiente de la CHE con diferentes funciones: regulación de avenidas, proporcionar reserva de agua para diferentes usos (urbanos, regadíos, etc.), y producción eléctrica. Si bien la financiación de su construcción contempla usos de interés general como los comentados, dado que al final se trata de concesiones privadas, en la práctica son las empresas hidroeléctricas las que determinan cómo debe ser su gestión; salvo en casos extremos de avenidas o sequías.

Tipología de gestión de embalses: La situación actual viene determinada por la prevalencia de las producciones eléctricas y de abastecimiento por encima de cualquier otra consideración, incluyendo evidentemente las ambientales. La no acción actual correspondería a mantener éste tipo de gestión mientras la retención de sedimentos en los embalses no represente un problema que incida en dichos objetivos, y de momento no lo es. La gestión de caudales para mantener las funcionalidades del río en el tramo inferior implicaría condicionar en algunos momentos los objetivos que proporcionan ingresos a las hidroeléctricas. Abordar la gestión de los sedimentos implicaría cumplir con una de las funciones para la que los embalses también incorporaron desde su

construcción con las infraestructuras de diseño: las compuertas de fondo. Hablar de una gestión integrada de caudales y sedimentos implicaría el uso de diferentes técnicas de gestión de éstos para aprovechar las avenidas naturales o el diseño de avenidas artificiales que incorporasen también sedimentos.

Impactos/consecuencias sobre aspectos ambientales: En éste nivel se recogen algunos de los impactos negativos o positivos que genera una tipología u otra de gestión

Usuarios y actividades económicas: El círculo se cierra con la incidencia de dichos impactos y consecuencias sobre los diferentes sectores, tanto la población en general como los sectores agrícola y pesquero. El sector hidroeléctrico como el principal responsable de la gestión hidrológica, y el sector científico/ambiental como agente de presión sobre instituciones.

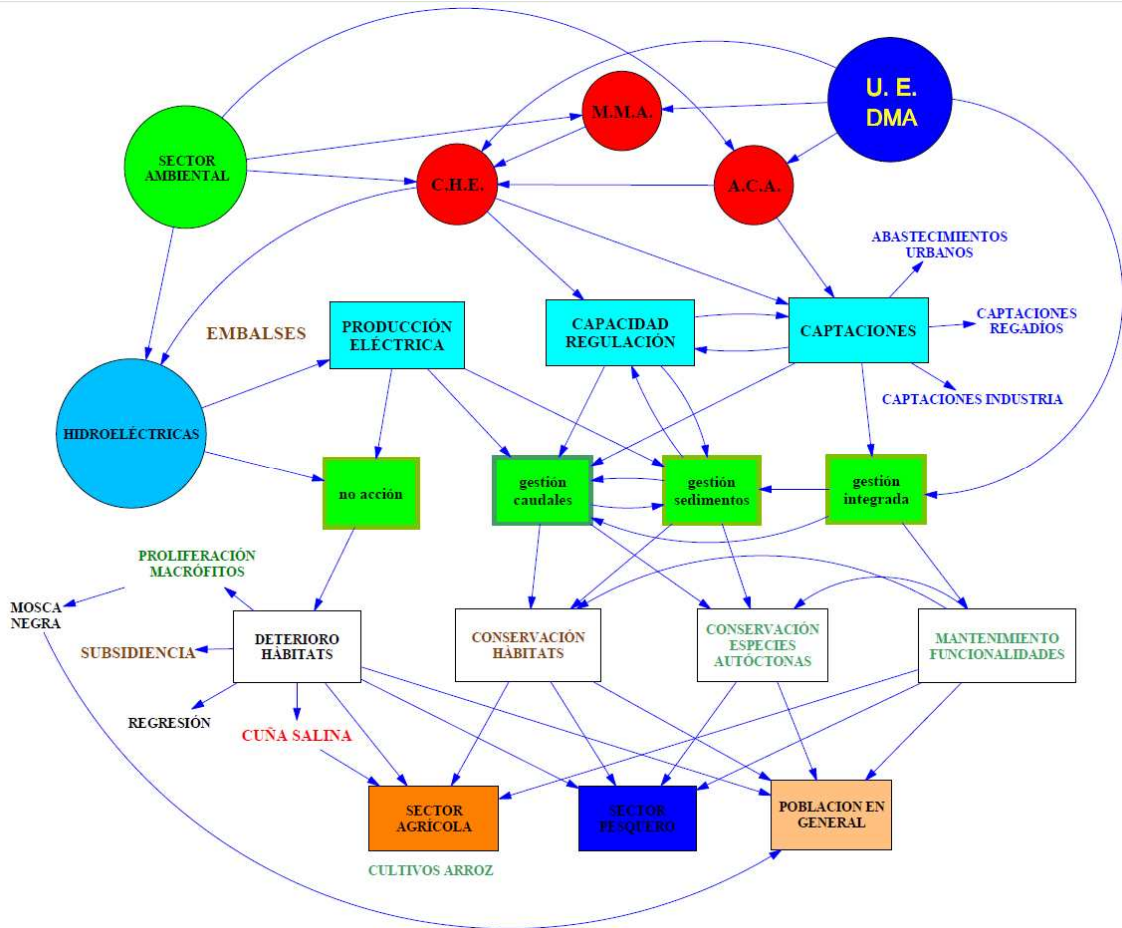


Fig. 51. Esquema conceptual de según modelo VENSIM de la problemática de gestión de sedimentos en el tramo inferior del Ebro.

6.6 Aplicación del modelo NAIADE a la propuesta de diferentes soluciones a la falta de sedimentos

A partir de la identificación de los diferentes agentes implicados y de la propuesta de cuatro opciones (1) no actuación (continuar con la situación actual); 2) gestión de los sedimentos de los embalses; 3) gestión de los caudales y, 4) gestión integrada de caudales sólidos y líquidos, se elabora la siguiente matriz (*Tabla 15*).

Se tienen en cuenta las condicionalidades que presenta cada sector. Evidentemente se trata de un ejercicio. Las entrevistas para su diseño, su debate, y su estructuración para un estudio profundo requeriría de meses de trabajo de campo.

Tabla 15. Ejercicio de valoración de las diferentes propuestas de actuación por sectores implicados.

NAIADE SEDIMENTOS_2.nd - Naiade				Naiade
Groups \ Alternatives	NO ACTUACIÓN	GESTION SEDIMENTOS EMBALSES	GESTIÓN CAUDALES	AMBOS
C.H.E.	More or Less Good	More or Less Bad	Moderate	More or Less Bad
HIDROELÉCTRICAS	Very Good	Bad	Very Bad	Extremely Bad
SECTOR AGRÍCOLA RÍO	Moderate	More or Less Bad	Bad	Bad
SECTOR AGRÍCOLA DELTA	Extremely Bad	Very Good	Very Good	Perfect
SECTOR PESQUERO	Extremely Bad	Very Good	Perfect	Perfect
SECTOR AMBIENTAL	Extremely Bad	Very Good	Very Good	Perfect
MEDI AMBIENT GENCAT	Bad	Good	Very Good	Very Good
MEDIO AMBIENTE MINISTER...	Bad	More or Less Good	More or Less Good	Good
A.C.A.	Very Bad	Very Good	Very Good	Perfect
POBLACIÓN DELTA	Extremely Bad	Perfect	Perfect	Perfect
POBLACIÓN TRAMO RÍO	Bad	More or Less Good	More or Less Good	More or Less Good

El análisis multicriterio de estos posicionamientos (*Fig. 52*) lleva a que la opción preferente se decanta hacia la gestión de los caudales. Parece lógica con la percepción social respecto al motivo de los impactos actuales en el tramo final del río y las reclamaciones de caudales ecológicos. También es coherente con la percepción que la gestión de los sedimentos es importante pero no tan conocida y aún genera reticencias.

En segundo lugar se encontraría la gestión de los sedimentos de los embalses al mismo nivel que la gestión integrada (caudales + sedimentos). Como última opción quedaría la

no actuación o mantener la situación actual. Por lo tanto se podría aventurar que el posicionamiento general deja claro que no hacer nada es la peor de las soluciones; lo cual lleva implícito el reconocimiento que se están generando impactos insostenibles.

El resultado de dicha valoración da, si cabe, más importancia a la necesidad de explicar con mayor profundidad la opción de gestión de sedimentos o de la gestión integrada para obtener un mayor grado de aceptabilidad y presión social para llevarla a cabo.

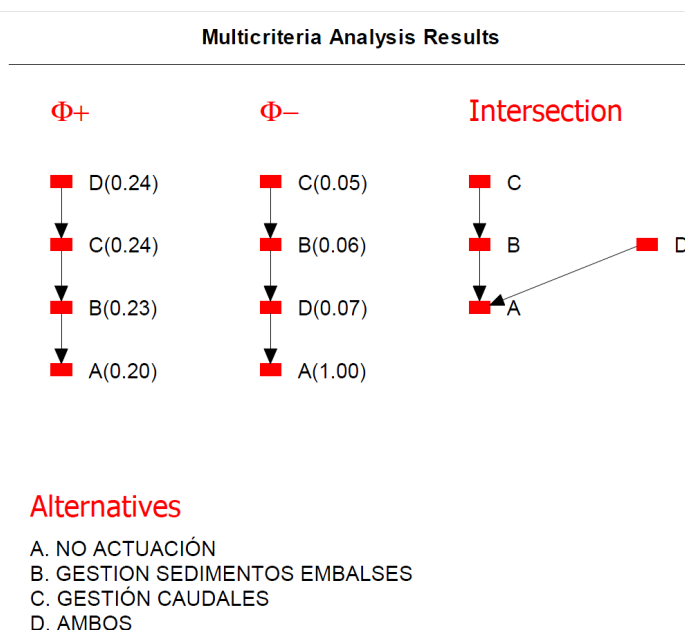


Fig. 52. Esquema del orden de prioridad de las alternativas según los intereses de los sectores.

El análisis de equidad (Fig. 53) da proximidades de intereses curiosas. El sector pesquero y la población del delta se encontrarían muy próximos en la demanda de gestión de caudales. A ellos se les añadirían el sector agrícola del delta y el sector ambiental, y algo más alejada la posición del ACA. A mayor distancia se le añadiría la posición del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. La posición del Ministerio de Medio Ambiente y la de la población del río se sumarían a esa gestión de los caudales a mayor distancia.

La Confederación Hidrográfica del Ebro y el sector agrícola del río (dependiente de la garantía de concesiones, del riesgo de inundación de campos, etc.), se sumarían mucho más tarde. Y como parece lógico en el extremo opuesto se encontraría el sector hidroeléctrico.

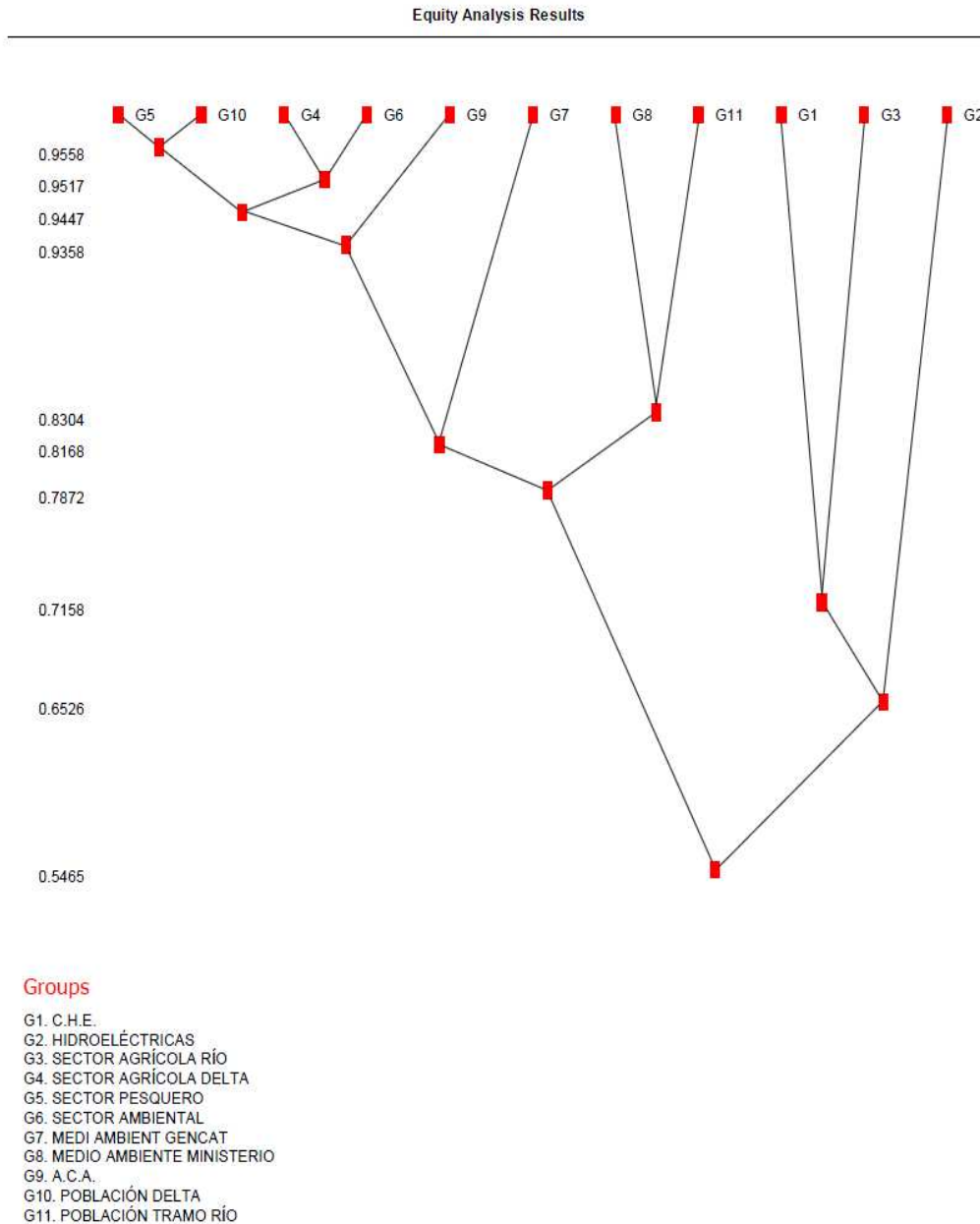


Fig. 53. Análisis de equidad.

7 MEDIDAS COMPLEMENTARIAS A LA PROPUESTA DE GESTIÓN DE SEDIMENTOS DESDE LOS EMBALSES

La propuesta de una nueva gestión específica desde los embalses debe completarse con la adopción de una serie de medidas complementarias que se esquematizan en el siguiente cuadro (*Tabla 16*):

Tabla 16. Medidas complementarias a la propuesta de gestión de sedimentos desde los embalses.

SECTOR	SOLUCIONES (PROPUESTAS)	
	GENERALES	SECTORIALES
POBLACIÓN	<p>Mayor información sobre las consecuencias de la actual gestión</p> <p>Revisión de la actual legislación de concesiones y explotación de embalses para comprobar su cumplimiento</p>	<p>Campaña de divulgación</p> <p>Jornadas de participación social en la toma de decisiones. Comunicación de las medidas a adoptar y de su efectividad</p>
AMBIENTAL	<p>Adaptación de las condiciones de explotación de embalses a lo que exige la DMA</p> <p>No abordar la gestión de sedimentos con el único propósito de su aporte al Delta del Ebro</p> <p>Participación social en toma de decisiones</p> <p>Planificación de la gestión de sedimentos a nivel de cuenca hidrográfica</p> <p>Educación y sensibilización, costes y beneficios de las medidas propuestas</p>	<p>Considerar la incorporación de los aportes de materiales de la red transversal de ríos y barrancos</p> <p>Evaluar impacto sobre espacios naturales protegidos</p> <p>Considerar otras mejoras en la recuperación de las funcionalidades del río</p> <p>Considerar previamente mejoras hidrogeomorfológicas en algunos tramos</p> <p>Monitorización a medio y largo plazo de los impactos y gestión adaptativa</p>
AGRÍCOLA Y PESQUERO		<p>Deslinde de Dominio Público Hidráulico</p> <p>Acuerdos con propietarios de campos inundables para mantenimiento de funcionalidades (PAC, Custodia del Territorio)</p> <p>Reconsideración de idoneidad de cultivos</p> <p>Expropiación o adquisición de terrenos de</p>



	especial interés
HIDROELÉCTRICO	Adaptación de la red de canales de riego del delta para la distribución de limos aportados Revisión y adaptación de infraestructuras hidroeléctricas para que permitan la gestión de sedimentos acumulados Gestión de las avenidas que permita la incorporación de caudales sólidos Incorporación de condicionalidades Retorno por tarificación eléctrica condicionado a mantenimiento de funcionalidades ambientales
INDUSTRIAL	Información y participación en la programación de medidas Aplicación de medidas preventivas para evitar el impacto de especies exóticas Adaptación de captaciones y control de efluentes



8 CONCLUSIONES

A raíz de los resultados obtenidos del análisis para la aplicación de las técnicas de arrastre y las corrientes de densidad en el sistema de embalses de Mequinzena, Riba-Roja d'Ebre y Flix se extraen las siguientes conclusiones:

- La construcción de presas para la formación de embalses en los ríos representa un grave problema al modificar el régimen hidrológico del río e interrumpir la transferencia de los sedimentos, rompiendo el equilibrio hidro-sedimentario y la alteración del ecosistemas existentes aguas abajo de las presas.
- La construcción de presas comporta una serie de impactos que afectan tanto aguas arriba como aguas abajo del embalse, así como en su interior.
- La estabilización de barras y márgenes debido a la atenuación de las avenidas y a su colonización por vegetación de ribera limitan su incorporación al flujo natural de sedimentos agravando el déficit de éstos.
- Las técnicas de gestión de sedimentos que se proponen para la aplicación en los embalses del presente trabajo corresponden a las técnicas de arrastre controlado y corrientes de densidad, ya que éstas son las que tienen un menor coste económico y requieren unas condiciones menos específicas.
- Los embalses de la zona tienen unas características específicas que permitirían la realización de éstas técnicas.
- La liberación de sedimentos en una operación de arrastre controlado produce una serie de impactos en los ecosistemas animales y vegetales (mortalidad de muchos individuos) debido a la alta concentración de sedimentos aguas abajo de la presa. No obstante, tal y como ha ocurrido en muchos casos documentados en el presente trabajo, el sistema se recupera rápidamente después de un episodio como éste. Las especies con mayor capacidad de adaptación al nuevo sistema son las especies autóctonas, quedando en muchos casos, las alóctonas altamente reducidas.
- Des del punto de vista del almacenamiento de sedimentos, los primeros 5 km del embalse tienen un importante volumen de sedimento (aproximadamente 30% del total), entre los 5 y 15 km. siguientes se produce una baja sedimentación, y en los últimos 14 km. se produce una moderada sedimentación, debida en gran parte por la desembocadura del río Matarraña.



- En la propuesta para el modelo de gestión de los embalses de Riba-Roja d'Ebre y Mequinenza se propone la aplicación de las técnicas de arrastre controlado y liberación de corrientes de densidad. En el embalse de Riba-Roja d'Ebre se aplicaría la primera técnica con un caudal de diseño de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, y la correspondiente a la liberación de corrientes de densidad se aplicaría conjuntamente y de una manera coordinada en los tres embalses del sistema, para poder dar una continuidad longitudinal a las corrientes de densidad entrantes a Mequinenza a través de todas las presas de la zona de estudio.
- Hay una serie de consideraciones a nivel técnico, social, económico y ecológico que hay que tener en cuenta antes de realizar las operaciones de gestión de sedimentos, entre las que destacan el acuerdo económico previo entre las empresas que utilizan el embalse (hidroeléctricas, turísticas y deportivas), la operatividad de las compuertas de fondo, el impacto ambiental aguas abajo de la presa de Flix, la pérdida temporal de suministro de las captaciones directas, el suministro eléctrico alternativo necesario para suplir la parada de la central de Riba-Roja d'Ebre, etc.
- Es imprescindible abordar un proceso de información, educación y participación social para poner a disposición de la población todos los conocimientos disponibles: impactos actuales y sus consecuencias, y posibles medidas a aplicar y sus consecuencias antes de ejecutar el proyecto.
- Si se pudieran llevar a cabo las operaciones de arrastre controlado en el embalse de Riba-Roja d'Ebre éstas serían en un período bianual, liberando una cantidad aproximada de $2 \cdot 10^6 \text{ t}$ de sedimentos en cada operación. Por otro lado si se liberaran aproximadamente entre el 30 y el 40 % de las corrientes de densidad provenientes de Mequinenza en cada episodio de crecida, correspondería a la liberación anual aproximada de $1 \cdot 10^6 \text{ t}$ al año bajo el sistema de presas. En éste escenario, los sedimentos depositados en el vaso del embalse de Riba-Roja d'Ebre serían arrastrados en un período de 40 años y la liberación anual de sedimentos aguas abajo de las presas sería de $2 \cdot 10^6 \text{ t}$.
- Desde un punto de vista económico, resulta más costoso la no aplicación de éstas técnicas, debido a la necesidad de tener que dar una solución a los problemas sociales y ambientales derivados, que la propia aplicación de éstas.
- La descontaminación del embalse de Flix, y la retirada de los lodos contaminados es condición indispensable para el inicio de cualquier medida de arrastre de



sedimentos. El proyecto, que está en ejecución, prevé que para 2014 ya se hayan retirado y restaurado el margen izquierdo del Ebro en el embalse de Flix.

- Monitorizar a medio y largo plazo el impacto y posterior recuperación sobre las especies autóctonas, así como la disminución de las exóticas (mortalidad de mejillón cebra por vaciado del embalse de Riba-roja d'Ebre y por arrastre aguas abajo, especies piscícolas como siluro o alburno) y el impacto en la menor transparencia del agua y su efecto sobre la proliferación de macrófitos y simúlidos (mosca negra).
- La aplicación de éste modelo no exime de la toma de medidas a largo plazo que garanticen la continuidad de las propuestas. Ello implica medidas de gobernanza relativas a la ocupación del Dominio Público Hidráulico, con acuerdos para garantizar la inundabilidad de zonas ahora ocupadas por cultivos, condicionando su acceso a ayudas (PAC) en función del cumplimiento de dichos objetivos. Garantizar la funcionalidad de las compuertas de fondo de los embalses o su gestión para favorecer el transporte de sedimentos debe de ser una prioridad. A tal efecto se propone como medida legal condicionar el retorno por parte del Estado en concepto de tarificación eléctrica a las hidroeléctricas en función al cumplimiento de funcionalidades ambientales de las fuentes productoras (presas) bajo el amparo del cumplimiento de la DMA y el principio de no deterioro.
- Uno de los aspectos más destacados debe de ser el retomar el control público sobre la gestión de los recursos hídricos con visión de cuenca, reforzando el papel de las Confederaciones Hidrográficas e incorporando a los sectores sociales en un papel relevante.



9 BIBLIOGRAFÍA

- Archivo municipal de Flix. Fotos históricas de la zona de estudio.
- Basson G., Rooseboom A. (1996). "A sediment pass-through operations in reservoirs". Proc. Int. Conf. On Reservoir Sedimentation, vol.2.
- Batalla J.R., Veicat D., Palau A. (2006). "Sediment transport during a flushing flow in the lower Ebro River". Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006). IAHS Publ. 306, 2006.
- Dolz J. y Armengol J. (2009). "Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Riba-Roja d'Ebre". Informe técnico de Flumen (Dinámica Fluvial y Ingeniería Hidrológica) para la Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Fan J. (1986). "Turbid Density Currents in Reservoirs. Water International 11(3): 107-116.
- Ford D.E., Johnson M.C. (1983). "An assessment of reservoir density currents and inflow processes". Technical Report E-83-7, U.S. Army Corps Engineers, Vicksburg, Miss.
- Generalitat de Catalunya (2003). "Projecte d'actuació global al menadre del riu Ebre a Flix".
- Gorria H. (1977). "Desecación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de los alfaques. Technical report. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Granado-Lorencio C., Encina L., Escot-Muñoz C., Mellado-Alvarez E., Rodríguez-Ruiz A. (1998). "Estudio ictiológico en el embalse de Joaquín Costa (Río Esera, Huesca)". Limnétien 14: 35-45.
- Institut Cartogràfic de Catalunya. Fotos aereas de la zona de estudio (web).
- International Commission on Large Dams (ICOLD) (1998). "World register of large dams". CD Rom.
- Kondolf G.M., Smeltzer M., Kimball L. (2001). "Freshwater Gravel Mining and Dredging Issues". White Paper.
- Martín Vide J.P. (2003). "Plan de trabajo en estudios de transporte sólido del río Ebro". Informe técnico para el Cpide.
- Martín Vide J.P. (2004). "Estudio técnico-económico de alternativas del programa para corregir la subsidencia y regresión del Delta del Ebro". Informetécnico a petición de la Universidad de Barcelona.
- Morris G.L. and Fan J. (2000). "Reservoir Sedimentation Handbook, Design and



Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use".New York, McGraw-Hill.

-Navas A., Valero B., Machín J., Walling D. (1998). "Los sedimentos del embalse de Joaquín Costa y historia de su depósito". *Limnética* 14:93-111.

-Palmieri A., Shah F., Dinar A. (2001). "Economics of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. *Journal of Environmental Management* 61, 149-163.

-Roca M. y Martín Vide J.P. (2005). "Arrastre controlado de sedimento en el embalse de Riba-Roja d'Ebre". Informe técnico realizado por la empresa U.R.S. a petición de la Universidad Politécnica de Catalunya.

-Rovira A., Ibáñez C. (2007). "Sediment management options for the lower Ebro river and its delta". *Sediment linkages between the river catchment and the sea*.

-Rovira A. y Ibáñez C. (2009). "Tècniques per a la gestió del sedimentalsembassaments: elscabalsd'arrossegament i elscorrents de densitat". Informe técnico de la Agència Catalana de l'Aigua y el Instituto de Recerca i TecnologiaAgroalimentària.

-Sabaté J., Vericat D. y Batalla R.(2011). Análisis de cambios morfológicos y de vegetación en el tramo bajo del río Ebro mediante sistemas de información geográfica. Informe del departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lleida.

-Sanz M.E., Avendaño C. y Cobo R. (2001). Influencia del complejo Mequinenza-Riba Roja- Flix en la morfología del cauce situado aguas abajo. *Rev. Soc. Geol. España* 14 (1-2).

-Vericat D., Batalla J.R.(2006). "Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian peninsula. *Geomorphology* (article in press).

-White R. (2001). *Evacuation of sediments from reservoirs*.HRWallingford.Ed. Thomas Telford.



ANEXO 1. ACCEPTABILIDAD SOCIAL A UNA NUEVA GESTIÓN HIDROLÓGICA Y A LA GESTIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES

-ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ARRASTRE HIDRÁULICO Y CORRIENTES DE TURBIDEZ EN EL SISTEMA DE EMBALSES MEQUINENZA-RIBA-ROJA D'EBRE-FLIX: VIABILIDAD TECNICA Y PERCEPCIÓN SOCIAL-