



**MINISTERIO PARA  
LA TRANSICIÓN  
ECOLÓGICA**

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

**Q 5017001 H  
CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO**

OFICINA DE PLANIFICACION HIDROLOGICA

**TRABAJOS DE CONSULTORIA Y ASISTENCIA**

**PRESUPUESTO DEL  
ORGANISMO**

CLAVE:  
**2018-PH-02.I**

REF. CRONOLOGICA:  
**12/2018**

TIPO:

**ASISTENCIA TÉCNICA**

TITULO:

**EVALUACIÓN PRELIMILAR SOBRE LAS POSIBILIDADES DE RESTAURACIÓN DEL  
TRÁNSITO SEDIMENTARIO EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA-RIBARROJA-  
FLIX**

PRESUPUESTO DE CONTRATA:

**21.771,29 euros**

PRESUPUESTO DE ADJUDICACION:

**21.771,29 euros**

SERVICIO:

**OFICINA DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA**

DIRECTOR:

**MIGUEL ÁNGEL GARCÍA VERA**

CONSULTOR:

**FUNDACIÓN AGUSTÍN DE BETANCOURT (Profesor responsable D. LUIS  
GARROTE DE MARCOS)**

TOMO:

**TOMO ÚNICO**

EJEMPLAR:

**EJEMPLAR 1 DE 4**

CONTENIDO:

**MEMORIA Y ANEJOS**

NUMERO ARCHIVO O P H:

**OFICINA DE PLANIFICACION HIDROLOGICA**  
**TRABAJOS DE CONSULTORIA Y ASISTENCIA**

---

CLAVE: 2018-PH-02.I

TITULO: EVALUACIÓN PRELIMILAR SOBRE LAS POSIBILIDADES DE RESTAURACIÓN DEL  
TRÁNSITO SEDIMENTARIO EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX

---

---

Zaragoza, a 31 de diciembre de 2018

El Director de los trabajos

El Consultor:

Fdo.: Miguel A. García Vera

Fdo.: Luis Garrote de Marcos

Examinado:  
El Jefe de la O P H

Fdo.: Manuel Omedas Margelí

## INDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.2 Antecedentes	1
1.2 Objeto del trabajo y contenido del documento	1
<b>2. Recopilación de información</b>	<b>3</b>
2.1 Información bibliográfica	3
2.2 Datos disponibles	4
<b>3. Caracterización del flujo sedimentario</b>	<b>5</b>
3.1 Alteración hidrológica producida por los embalses	5
3.2 Transporte de sedimentos	6
3.3 Acumulación de sedimentos en los embalses	6
<b>4. Recopilación de experiencias</b>	<b>8</b>
4.1 Alternativas para la gestión de sedimentos	8
4.2 Elección de las técnicas más apropiadas	9
4.3 Experiencias de casos similares	10
<b>5. Posibilidades de movilización de sedimentos</b>	<b>12</b>
5.1 Análisis de posibilidades de lavado	12
5.2 Consideraciones ambientales, económicas y sociales	13
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>15</b>
6.1 Conclusiones	15
6.2 Recomendaciones	17
<b>PRIMERA PARTE: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA, RIBARROJA Y FLIX</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Estudios promovidos por la CHE</b>	<b>2</b>
2.1 Dinámica sedimentaria y batimetría de Ribarroja	2
2.2 Hidrodinámica del Segre	4
2.3 Lodos acumulados en Mequinenza	5
2.4 Volumen de sedimentos en Mequinenza en 2008	6
2.5 Nivelación y estimación de sedimentos Mequinenza	7
<b>3. Trabajos publicados por la comunidad científica</b>	<b>10</b>
3.1 Grupo RIUS de la Universidad de Lérida	10
3.2 Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña	17
3.3 Programa de aguas marinas y continentales del IRTA	21
3.4 División de Erosión y Sedimentación del CEH	25
3.5 Instituto de Ciencias del Mar de CSIC	27
<b>4. Vaciado del embalse de Barasona</b>	<b>29</b>
<b>SEGUNDA PARTE: RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EN EL SISTEMA MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Datos de estaciones de aforo</b>	<b>2</b>

3. Datos de estaciones de calidad de agua	6
4. Datos de presas y embalses	9
5. Datos hidrológicos de embalses	11
6. Datos hidrodinámicos de embalses	13
<b>TERCERA PARTE: CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO SEDIMENTARIO EN EL SISTEMA MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX</b>	
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Alteración hidrológica producida por los embalses</b>	<b>2</b>
2.1 Desarrollo de embalses en la cuenca	2
2.2 Alteraciones hidrológicas	3
2.3 Efecto de los embalses	8
2.4 Conclusión	11
<b>3. Campañas de toma de datos de transporte de sedimentos</b>	<b>12</b>
3.1 Estimaciones directas	14
3.2 Estimaciones indirectas	21
3.3 Conclusión	25
<b>4. Análisis de datos de transporte de sedimentos</b>	<b>28</b>
4.1 Datos de caudal y turbidez	28
4.2 Estimación del transporte sólido	30
<b>5. Acumulación de sedimentos observada en los embalses</b>	<b>32</b>
5.1 Análisis del tránsito sedimentario	32
5.2 Sedimentación en Mequinenza	32
5.3 Sedimentación en Ribarroja	38
<b>6. Conclusiones sobre el tránsito sedimentario</b>	<b>41</b>
<b>CUARTA PARTE: RECOPIACIÓN DE EXPERIENCIAS DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS</b>	
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Alternativas para la gestión de sedimentos</b>	<b>2</b>
2.1 Medidas de protección frente al aporte de sedimentos	3
2.2 Medidas de evacuación de sedimentos	5
2.3 Medidas de recuperación de capacidad de embalse	12
2.4 Medidas de recirculación del sedimento	19
<b>3. Elección de las técnicas más apropiadas</b>	<b>21</b>
3.1 Estudios globales de comparación de técnicas	21
3.2 Técnicas adecuadas en los embalses del sistema MRF	24
<b>4. Experiencias en casos similares al sistema MRF</b>	<b>27</b>
3.1 Experiencias de lavado	27
3.2 Experiencias de by-pass	33
3.3 Experiencias de evacuación de corrientes de turbidez	34
3.4 Experiencias de dragado y excavación	35
3.5 Experiencias de inyección de sedimentos	38
3.6 Experiencias similares a partir de $K_w$ y $K_t$	38
3.7 Experiencias similares a partir de $K_w$ y pendiente	44
<b>QUINTA PARTE: ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES REALES DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL SISTEMA MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX</b>	
	<b>1</b>

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Datos básicos de los embalses</b>	<b>2</b>
2.1 Embalse de Mequinenza	2
2.2 Embalse de Ribarroja	2
2.3 Embalse de Flix	3
2.4 Resumen de datos	3
<b>3. Análisis de las posibilidades de lavado</b>	<b>5</b>
3.1 Condiciones que determinan el éxito del lavado	5
3.2 Análisis a partir de fórmulas empíricas	7
3.3 Análisis del embalse de Mequinenza	11
3.4 Análisis del embalse de Ribarroja	15
3.5 Análisis del embalse de Flix	18
3.5 Análisis del embalse de Barasona	19
<b>4. Consideraciones medioambientales, económicas y sociales</b>	<b>27</b>
4.1 Consideraciones medioambientales	27
4.2 Consideraciones económicas	29
4.3 Consideraciones sociales	32
<b>SEXTA PARTE: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>1</b>
<b>1. Conclusiones</b>	<b>1</b>
1.2 Conclusiones sobre el tránsito sedimentario	1
1.2 Conclusiones sobre las alternativas de movilización de sedimentos	5
<b>2. Recomendaciones</b>	<b>10</b>
2.1 Recomendaciones sobre monitorización	10
2.2 Recomendaciones sobre plan de acción	11
2.3 Recomendaciones sobre integración de actores	15
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>1</b>
<b>ANEJO 1: BASE DE DATOS DE ACTUACIONES</b>	<b>1</b>
<b>ANEJO 2: DATOS DE LAS REDES DE MEDIDA</b>	<b>1</b>
<b>Datos de estaciones de aforo</b>	<b>3</b>
<b>Datos de estaciones de calidad de agua</b>	<b>43</b>
<b>Datos de embalses</b>	<b>55</b>



## RESUMEN

### 1. Introducción

En enero de 2018 la Confederación Hidrográfica del Ebro redactó un Pliego de Prescripciones Técnicas para la realización del estudio “Evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix”. El trabajo fue adjudicado a la Fundación Agustín de Betancourt, que delegó para su ejecución en el Grupo de Investigación en Hidroinformática y Gestión del Agua de la Universidad Politécnica de Madrid. En el presente documento se describen los trabajos realizados como desarrollo del contrato y las conclusiones obtenidas.

#### 1.2 Antecedentes

El programa de medidas del plan hidrológico 2015-2021, aprobado mediante el Real Decreto 1/2016 recoge la medida “Plan de actuaciones de I+D+i relacionadas con el cumplimiento de los objetivos ambientales” en cuya ficha descriptiva se contempla la actuación “Estudio e investigación sobre sedimentos y morfodinámica en el Bajo Ebro, tanto de medición como de modelización”. El presente trabajo es uno de los desarrollos de dicha actuación.

En los últimos años la Confederación Hidrográfica del Ebro ha elaborado algunos estudios dirigidos a la caracterización de los sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Estos estudios han sido:

- “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja”. 2009.
- “Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza”. 2011.
- “Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008”. 2012.
- “Nivelación y estimación de la acumulación de sedimentos en el embalse de Mequinenza”. 2012.

Las principales conclusiones de estos estudios apuntan a que los sedimentos de estos embalses se acumulan principalmente en su cola y se estima un volumen acumulado en torno a 100 hm<sup>3</sup> en el embalse de Mequinenza y 15 hm<sup>3</sup> en el embalse de Ribarroja.

#### 1.2 Objeto del trabajo y contenido del documento

El objeto del estudio es realizar una evaluación preliminar sobre las posibilidades de restauración del tránsito sedimentario en los embalses de Mequinenza-Ribarroja-Flix mediante la integración de los datos de sedimentos acumulados y las características del flujo hidrológico que se dan en estos en estos embalses.

El trabajo se ha estructurado siguiendo los epígrafes del Pliego de Prescripciones Técnicas, que contemplaba el desarrollo de seis fases. Cada una de estas fases se ha desarrollado en una parte de este documento. En este resumen se presentan en primer lugar los datos de partida: la información bibliográfica sobre el flujo de sedimentos en el bajo Ebro y los datos hidrológicos y sedimentológicos disponibles en las redes oficiales de medida. A partir de esta información se realiza la caracterización del flujo de sedimentos en el bajo Ebro, con énfasis especial en la acumulación observada en los embalses del sistema. A continuación, se presentan de modo sucinto las técnicas más habituales de gestión de sedimentos en los embalses y se pasa revista a las experiencias internacionales de movilización de sedimentos en embalses de características similares a los del sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix. A partir de estas experiencias se discuten las posibilidades reales de movilización de sedimentos en los tres embalses del sistema. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio y se hace una serie de recomendaciones de cara al futuro.

El trabajo consta de seis partes:

- Primera parte: Recopilación de información de sedimentos en los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix
- Segunda parte: Recopilación de información hidrológica del sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix
- Tercera parte: Caracterización del flujo sedimentario en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix
- Cuarta parte: Recopilación de experiencias de movilización de sedimentos
- Quinta parte: Análisis de las posibilidades reales de movilización de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix
- Sexta parte: Conclusiones y recomendaciones.



## 2. Recopilación de información

La primera fase del trabajo es la recopilación de información sobre el flujo hidrológico y sedimentológico en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF). La búsqueda de información se ha estructurado en dos partes: la recopilación de información bibliográfica y la recopilación de los datos disponibles en las redes oficiales de medida. A continuación, se describen estas dos actividades, que están detalladas en las partes primera y segunda del trabajo.

### 2.1 Información bibliográfica

El objetivo de la información bibliográfica es recopilar información que permita caracterizar el tránsito sedimentario en el Ebro, antes y después de la construcción de las presas, y específicamente determinar las tasas de sedimentación observadas en los embalses. Se han revisado cinco trabajos recientemente promovidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), como antecedente inmediato de este estudio. También se han recopilado y analizado 73 publicaciones científicas sobre el tránsito sedimentario en el bajo Ebro. Finalmente, se ha recopilado la experiencia que supuso el vaciado del embalse de Barasona para la limpieza de sus lodos, y las conclusiones que se pudieron obtener.

Los cinco trabajos promovidos por la CHE en los últimos años han permitido determinar con precisión el volumen de sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. La acumulación de sedimentos en Mequinenza se ha analizado en tres estudios realizados por la CHE en 2011-2012. En estos estudios se realizaron visitas de campo y se comparó el vaso descrito mediante la cartografía original elaborada para la construcción de la presa con perfiles transversales tomados en la zona emergida y la reconstrucción batimétrica de la zona sumergida. El primer estudio realizado se limitó a los últimos 35 km de la cola del embalse, donde se estimó una acumulación de sedimentos de 4,91 hm<sup>3</sup>. Los dos estudios realizados en el vaso completo en el periodo 2011-2012 estimaron cifras de 133 hm<sup>3</sup> en el año 2008 y 76,9 hm<sup>3</sup> en 2011. Se han comparado los tres estudios, analizando sus discrepancias, y se ha llegado a una estimación entre 75 hm<sup>3</sup> y 100 hm<sup>3</sup>, que supone una retención media anual entre 1,5 hm<sup>3</sup>/a y 2 hm<sup>3</sup>/a en los 48 años transcurridos desde la puesta en explotación del embalse de Mequinenza. En Ribarroja se utilizaron dos estudios del grupo FLUMEN, que analizó datos del periodo 1997-1999 y realizó una restitución batimétrica del vaso. La sedimentación acumulada en Ribarroja en 2007 se estimó en 13,1 hm<sup>3</sup>, que corresponde a una tasa media de 0,34 hm<sup>3</sup>/a desde su puesta en explotación en 1968.

La amplia revisión bibliográfica realizada ha permitido caracterizar el tránsito de sedimentos en el bajo Ebro con bastante precisión. Se han identificado todas las campañas de toma de datos directos e indirectos y se han recopilado los valores medios obtenidos. El fenómeno se ha estudiado desde una gran diversidad de puntos de vista y con distintas técnicas experimentales y analíticas. Las cifras aportadas por los distintos investigadores presentan una lógica dispersión, consecuencia de las distintas técnicas empleadas y de la falta de representatividad de los periodos analizados. Sin embargo, permiten obtener una imagen global bastante precisa, ya que los órdenes de magnitud de los distintos trabajos son concordantes. El flujo de sedimentos en el periodo anterior a la construcción de los embalses se estima entre 10 Mt/a y 20 Mt/a. Esta estimación es concordante con los valores que se deducen del estudio de la tasa de erosión de suelo en la cuenca. En la actualidad este flujo se ha reducido de manera considerable, tanto aguas arriba como aguas abajo de los embalses del sistema MRF. Las entradas al sistema están en torno a 1 Mt/a, que es menos de la décima parte del flujo inicial. La mayor parte de los sedimentos (80%) entran al sistema por el río

Ebro. El río Cinca aporta un 15% del total y el resto de la cuenca del Segre, otro 5%. Se estima que Mequinenza retiene el 95% del sedimento en suspensión y Ribarroja el 40%. La carga media anual aguas abajo de las presas es inferior a 0,5 Mt/a, con el 60% transportado en suspensión y el 40% como carga de fondo. Según los investigadores, la mayor parte de este material procede de la erosión en el lecho del propio río.

Los tres vaciados del embalse de Barasona en 1995-1997 también proporcionan una valiosa información para conocer de primera mano qué sucede cuando se efectúa una operación de vaciado y lavado en un embalse para evacuar sedimentos. El proceso fue cuidadosamente planificado por la Confederación, involucrando a todos los agentes interesados para cooperar en minimizar los efectos negativos. La experiencia está muy bien documentada, lo que ha permitido extraer conclusiones útiles de cara a futuras operaciones. Por término medio, cada lavado permitió evacuar aproximadamente 3 hm<sup>3</sup> de sedimentos, lo que supone en total un tercio del volumen de sedimentos que se había acumulado en el embalse. Se alcanzaron concentraciones superiores a los 100 g/l en los tres vaciados, con picos próximos a los 500 g/l. Esto originó que se produjeran impactos ambientales significativos, pero también se constató que los efectos son reversibles, gracias a las medidas complementarias que se adoptaron.

## 2.2 Datos disponibles

Se ha recopilado la información disponible en las redes oficiales de medida: el Anuario de Aforos y el sistema SAICA. También se ha recopilado la información sobre las tres presas, su explotación y los estudios hidrodinámicos realizados en sus embalses.

El Anuario de Aforos incluye datos de caudal diario registrado en 13 estaciones de aforo situadas en el curso bajo del Ebro. Las series con más información son las correspondientes a las estaciones de Zaragoza y Tortosa, que comenzaron a medir en 1912. Las estaciones de Gelsa y Ribarroja sólo disponen de 5 años de datos. En la década de 1930 a 1940 prácticamente no se dispone de datos en ninguna estación. Se han recopilado también datos de siete estaciones del sistema SAICA. En estas series es relevante la variable turbidez, medida en unidades NTU, ya que presenta una correlación significativa con la carga de sedimentos en suspensión. Las estaciones con series más largas son las de Zaragoza, Presa Pina, Ascó y Xerta, con datos desde 1995-96. Las estaciones de Gelsa, Tortosa y Fraga comenzaron a medir en 2011-12. Todas las series presentan numerosos huecos, y los años completos son excepcionales.

En las presas se ha recopilado la información correspondiente a su tipología, niveles de operación, órganos de desagüe y explotación hidroeléctrica. En el Anuario de Aforo se han obtenido los datos de reservas y caudal medio desaguado, que han permitido reconstruir aproximadamente la serie de caudales de entrada a los embalses. Estos datos permiten valorar el grado de alteración hidrológica inducido por los embalses del sistema MRF. También se han recopilado datos de comportamiento hidrodinámico de los embalses, a través de los resultados de modelos hidrodinámicos que se han ajustado con datos de campo. Estos modelos proporcionan información sobre el estado de estratificación térmica, la intensidad de los procesos de mezcla y la dinámica del arrastre y deposición de sedimentos.

### 3. Caracterización del flujo sedimentario

A partir de la información y de los datos recopilados se ha realizado una caracterización del modelo de funcionamiento observado del flujo sedimentario en el curso bajo del Ebro. El objetivo es contrastar y estructurar la información disponible para presentar una descripción lo más correcta posible de las alteraciones que ha sufrido el tránsito sedimentario en el Ebro como consecuencia de la construcción de las presas en la cuenca. El análisis, que se presenta en la tercera parte, se ha estructurado en tres aspectos: la alteración del régimen hidrológico, el análisis del transporte de sedimentos y el estudio de la acumulación de sedimentos en los embalses.

#### 3.1 Alteración hidrológica producida por los embalses

Se ha realizado un análisis específico de la alteración hidrológica de los flujos de agua en la cuenca. Para ello se han seleccionado las dos estaciones de aforo más representativas y con series más largas: Zaragoza y Tortosa. Se han considerado tres periodos de referencia: 1913-14 a 1930-31; 1947-48 a 1964-65 y 1997-98 a 2014-15. El régimen hidrológico se ha caracterizado a través de las curvas de caudales clasificados medias de cada periodo. Al objeto de facilitar la comparación entre las estaciones, las curvas se han normalizado por el caudal medio de cada estación. La comparación de las curvas de caudales clasificados ha permitido deducir que la alteración ha consistido fundamentalmente en una reducción del caudal medio y ha sido mucho mayor en Tortosa (45%) que en Zaragoza (15%). Si se analizan las curvas de caudales clasificados normalizadas por el caudal medio de cada periodo se comprueba que el reparto de caudales con relación a la media ha permanecido prácticamente inalterado en las dos estaciones.

Se ha realizado un análisis similar en las estaciones de Fraga y Serós, aunque limitado a los dos últimos periodos: 1947-48 a 1964-65 y 1997-98 a 2014-15. Las dos presentan alteraciones significativas por reducción de caudal medio (un 25% en Fraga y un 45% en Serós). Las curvas de caudales clasificados normalizadas por el caudal medio de cada periodo indican que se el reparto de caudales con relación a la media ha permanecido inalterado en Fraga, mientras que en Serós se ha reducido la variabilidad, con menos presencia de caudales altos.

Para analizar en qué medida la alteración es atribuible a los embalses del sistema MRF se han comparado las curvas de caudales clasificados de entrada y salida de Mequinenza y Ribarroja. Se ha comprobado que la alteración en Mequinenza afecta a los caudales superiores a 400 m<sup>3</sup>/s, superados aproximadamente unos 50 días al año. Estos caudales altos resultan atenuados por la operación del embalse hidroeléctrico, mientras que los caudales bajos se incrementan ligeramente. La alteración en Ribarroja es mínima, puesto que las curvas de entrada y salida son prácticamente coincidentes.

La conclusión del análisis realizado es que la alteración del flujo hidrológico observada en la cuenca es debida fundamentalmente a la reducción de las aportaciones medias anuales, ya que el reparto de caudales dentro de cada año muestra unos patrones similares en todos los periodos analizados, excepto en el caso de la estación de Serós en el Segre, que corresponde a menos de un 15% de la cuenca total. La alteración específica producida por la operación hidroeléctrica del embalse de Mequinenza tiene, comparativamente, una importancia mucho menor que la reducción del caudal medio.

La reducción de caudales circulantes es, en gran medida, atribuible al desarrollo de los usos del agua en la cuenca, aunque no son descartables efectos debidos a una posible no estacionariedad de los caudales naturales como consecuencia de los cambios experimentados en los usos del suelo de la cuenca o de un posible cambio climático.

### 3.2 Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos en el bajo Ebro se ha caracterizado a partir de las campañas de toma de datos documentadas en la literatura y a partir de los datos de turbidez medidos en las estaciones de la red SAICA.

Las campañas de toma de datos identificadas en la literatura se pueden dividir en tres grandes grupos. El primer grupo está formado por los datos muy antiguos, que corresponden a observaciones cuya metodología no se conoce con precisión. Estos datos han llevado a algunos investigadores a cifrar el transporte de sedimentos en 20 Mt/a, pero las observaciones están caracterizadas por una gran incertidumbre y no se consideran muy fiables. Se considera que la estimación de Catalán (1969), entre 2 Mt/a y 3 Mt/a, es más fiable, aunque corresponde a un periodo (1962-63) donde ya había una capacidad de embalse significativa.

El segundo grupo lo integran un conjunto de trabajos doctorales que tomaron muestras de agua para caracterizar el comportamiento bioquímico del río. En estas muestras se midió la concentración de sedimentos y por ello se han incluido en la recopilación. Proporcionan estimaciones del flujo de sedimentos aguas abajo de los embalses que oscilan entre 0,15 Mt/a y 0,4 Mt/a. Sin embargo, el objetivo principal de estos trabajos no era la caracterización del flujo de sedimentos ni su acumulación en los embalses.

El tercer grupo lo integran fundamentalmente los trabajos específicamente diseñados para medir el tránsito sedimentario, bien mediante medidas directas o mediante estimaciones a partir de la turbidez. Estas campañas se consideran las más fiables, por su planteamiento metodológico, su representatividad espacial y su duración. A partir de ellas se puede estimar que el flujo de sedimentos aguas arriba del embalse de Mequinenza oscila entre 0,6 Mt/a y 1,6 Mt/año. La estimación tras Ribarroja ha ido disminuyendo en el tiempo, desde los 0,4 Mt/año estimada en las campañas de finales del siglo XX hasta cifras inferiores a 0,1 Mt/año deducidas en las campañas más recientes. Esta cifra se incrementa hacia aguas abajo. Los investigadores coinciden en que una parte significativa del transporte de sedimentos en la desembocadura procede del propio material del lecho del río y se realiza mediante carga de fondo.

Estos valores se pueden contrastar con los obtenidos a partir de la turbidez medida en las estaciones del SAICA. Se ha aplicado una función empírica (Tena et al., 2011) que relaciona la turbidez en unidades NTU con la concentración en mg/l, determinando el transporte de carga en suspensión a partir de la medida de caudal. No se han obtenido series continuas, puesto que los periodos de solape de datos de caudal y turbidez son intermitentes, pero los valores medios calculados se pueden utilizar como contraste. Los valores medios obtenidos son del mismo orden de magnitud que los resultados presentados por los investigadores. Se obtuvieron cargas de sedimento de 0,329 Mt/a en Zaragoza, aguas arriba de los embalses MRF, y de 0,120 Mt/a en Ascó y 0,5 Mt/año en Tortosa.

### 3.3 Acumulación de sedimentos en los embalses

La acumulación de sedimentos en los embalses se ha estimado a partir de tres fuentes de información: los estudios del CEDEX, los realizados por el grupo FLUMEN y los trabajos promovidos por la CHE.

En el estudio del CEDEX de 1980 se estimó una acumulación de sedimentos en Mequinenza de 95,8 hm<sup>3</sup> en los 16 años transcurridos desde la puesta en servicio del embalse, que corresponde a una acumulación media de sedimentos de 5,8 hm<sup>3</sup>/a. Suponiendo un peso específico de 1,6 t/m<sup>3</sup>, supone un flujo retenido de 9,28 Mt/a. En los estudios realizados recientemente por la CHE (hasta 2012) se estimó una cifra muy similar de acumulación de sedimentos: entre 75 y 100 hm<sup>3</sup> en 48 años. La media de acumulación de sedimentos ha bajado hasta 1,5-2 hm<sup>3</sup>/año, que corresponde a

2,4-3,2 Mt/a. Esto sugiere que la mayor parte de la acumulación de sedimentos se produjo en los primeros años tras la puesta en servicio del embalse. El balance específico realizado por el grupo FLUMEN en 1997-1999 así lo corrobora, ya que se obtuvo una acumulación muy inferior a la media, 0,45 hm<sup>3</sup>/a.

La mayor parte de los sedimentos de Mequinenza se encuentra en una zona muy alejada de la presa, en una franja de 40 km situada entre 45 km y 85 km de la presa. Esta zona pudo caracterizarse muy bien puesto que quedó al descubierto al situarse el nivel del embalse por debajo de la cota 100,5 m, lo que permitió la toma directa de datos de nivelación desde aproximadamente 50 km de la presa.

En el embalse de Ribarroja, el CEDEX estimó una acumulación de sedimentos de 12,22 hm<sup>3</sup> en 1982, lo que supone una retención media de 0,87 hm<sup>3</sup>/a en los 14 años que llevaba el embalse en explotación. El grupo FLUMEN obtuvo una sedimentación neta de 13,1 hm<sup>3</sup> mediante la comparación de la cartografía del vaso antes de la construcción y la batimetría realizada en 2007, lo que supone una tasa media de acumulación de 0,34 hm<sup>3</sup>/a. El balance directo realizado en 1997-1999 dio una tasa anual de acumulación de 0,27 Mt/a, que corresponde a un volumen de 0,17 hm<sup>3</sup>/a. Al igual que sucede en Mequinenza, una parte importante de los sedimentos se encuentra lejos de la presa. En la cola del embalse, a una distancia de la presa entre 25 y 30 km, se estimó una acumulación de 5 hm<sup>3</sup>. En el segundo tramo, entre 15 y 25 km de la presa, existe un equilibrio entre erosión y sedimentación. En los 15 km más próximos a la presa se acumulan unos 8 hm<sup>3</sup>.

## 4. Recopilación de experiencias

Se ha realizado una revisión bibliográfica de la literatura de gestión de sedimentos para recopilar las experiencias a nivel mundial en zonas de características similares al sistema MRF que puedan aportar metodologías de éxito para favorecer la evacuación de sedimentos de los embalses. El trabajo, que se presenta en la cuarta parte, se ha estructurado en tres fases. En la primera fase se han revisado las mejores técnicas disponibles para la gestión de sedimentos en embalses, identificando las características más destacadas de cada una de ellas. En la segunda fase se han recopilado estudios globales comparativos, donde se establecen las condiciones adecuadas para aplicar cada una de las técnicas disponibles. Esto ha permitido encajar el problema para las presas del sistema MRF. En la tercera fase se ha elaborado una base de datos de casos internacionales de gestión de sedimentos en embalses, identificando los casos más próximos a las características de las presas del sistema MRF según distintos parámetros de comparación.

### 4.1 Alternativas para la gestión de sedimentos

Las técnicas disponibles para la gestión de sedimentos en embalses se clasifican en tres grandes grupos: las medidas de protección, que reducen la entrada de sedimento al embalse, las medidas de evacuación, que conducen los sedimentos a través o alrededor del embalse, y las medidas de recuperación, que retiran los sedimentos del embalse. A continuación, se presenta brevemente cada uno de estos grupos.

Las técnicas que reducen la aportación de sedimentos al embalse desde la cuenca de aguas arriba se clasifican en dos grupos: control de la erosión en la cuenca y retención de los sedimentos antes de que entren al embalse. El control de la erosión incluye actividades como la reducción de la erosión de la superficie del suelo, el control de la erosión en los cauces y la gestión de los deslizamientos de ladera. La retención de sedimentos se consigue mediante técnicas de corrección hidrológica, entre las que destacan los diques de contención de sedimentos, que pueden tener una variedad de tipologías y tamaños dependiendo de la función para la que estén concebidos.

Las medidas de evacuación de sedimentos tienen como objetivo evitar que los sedimentos asociados a los episodios de crecidas se depositen en el embalse. La estrategia consiste en dejar pasar rápidamente los flujos de caudal con alta carga de sedimentos, para evitar que puedan depositarse en el embalse. Existen dos grandes grupos: las medidas de evacuación directa, que dejan pasar el sedimento a través del embalse, y los dispositivos de by-pass, que producen una derivación de los flujos a lo largo de un conducto alternativo.

Las principales medidas de evacuación directa son el *sluicing* y la evacuación de corrientes turbias de densidad. El *sluicing* consiste en vaciar preventivamente el embalse y dejar pasar el episodio de crecida con los desagües abiertos. Una vez ha pasado la punta del hidrograma (y la mayor parte del sedimento), las compuertas se cierran para volver a llenar el embalse. En el caso de la evacuación de corrientes turbias de densidad, los sedimentos pueden atravesar el embalse sin necesidad de vaciarlo, puesto que se concentran en una zona restringida que, por su mayor densidad relativa, se mueve por la zona inferior del vaso. Si se abren unos desagües profundos que selectivamente permitan evacuar agua de la zona de mayor carga de sedimentos, se puede evacuar una parte importante de la aportación sólida de la crecida.

Los dispositivos de by-pass permiten derivar el agua cargada de sedimentos a una conducción alternativa, evitando que pasen por el embalse. La mayor parte de las conducciones de by-pass se hace en túnel, ya que sólo se puede aplicar la derivación a cielo abierto cuando la topografía es muy

favorable. Normalmente se trata de túneles de gran pendiente, donde el agua circula a gran velocidad. Se trata de una solución muy cara.

Las medidas de recuperación de la capacidad del embalse tienen como objetivo retirar parte del sedimento ya depositado en el embalse. Se pueden agrupar en dos grandes categorías: la evacuación hidrodinámica y la evacuación directa mediante excavado. En el caso de la evacuación hidrodinámica se aprovecha la capacidad erosiva del agua cuando los calados son bajos y el caudal de circulación es elevado, lo que permite arrastrar material a lo largo del embalse y evacuarlo por los órganos de desagüe. La técnica más aplicada es el lavado, bien en superficie, vaciando previamente el embalse, o en presión, sin necesidad de vaciarlo completamente. El lavado en superficie consiste en arrastrar el material depositado en el embalse aprovechando el caudal de avenida. Para poder erosionar el material depositado es necesario vaciar previamente el embalse. Debe existir un desagüe operativo a cota suficientemente baja y con capacidad de evacuación a baja carga hidráulica como para que el vaciado resulte efectivo. La realización de operaciones de lavado vierte al cauce caudales con una alta concentración de materia en suspensión, lo que ocasiona problemas medioambientales significativos: reducción del oxígeno disuelto, reducción de la visibilidad y penetración de la luz y alteraciones en la morfología del cauce debidas al depósito del material liberado del embalse. El lavado puede realizarse también sin necesidad de vaciar el embalse. En este caso se conoce como lavado en presión. La efectividad de la operación es mucho menor, puesto que únicamente se puede movilizar un pequeño cono de erosión en las inmediaciones del desagüe que se abre.

Las técnicas de evacuación mediante excavado consisten en retirar mecánicamente los sedimentos del embalse y conducirlos a otro lugar. Según la técnica de excavación y transporte se distingue entre el dragado y la excavación y transporte en camiones. El dragado es la operación de retirada de sedimento bajo el agua. Los sistemas de dragado suelen constar de una barcaza provista de una pluma que acciona una cabeza de cortado y un sistema de tuberías y bombas que conduce el material a una zona de depósito. En la excavación a cielo abierto se emplean medios mecánicos convencionales para la excavación y transporte del sedimento. Tiene un coste muy significativo y además requiere que el embalse se vacíe para dejar libre el sedimento y permitir trabajar sobre él. Tanto el dragado como la excavación a cielo abierto requieren un espacio donde poder acopiar y tratar el sedimento antes de trasladarlo a un lugar donde pueda ser asimilado.

En algunos casos se ha pretendido restablecer la dinámica de transporte de sedimentos mediante la inyección al río de material extraído del propio embalse o de otra procedencia. En este método, el sedimento que se retira mediante excavación se coloca temporalmente aguas abajo de la presa, en un lugar inundable en las crecidas, de forma que pueda retornar al cauce en los procesos de inundación natural.

#### **4.2 Elección de las técnicas más apropiadas**

Se han revisado varios estudios globales donde se han comparado las distintas técnicas de gestión de sedimentos disponibles en la práctica: los diagramas de Basson, Kimbrel, Sumi y Annandale. Todos los estudios globales en los que se analiza la gestión de sedimentos en múltiples embalses emplean dos índices básicos para su clasificación:  $K_w$  y  $K_t$ . El índice  $K_w$  es el cociente entre la capacidad de embalse y la aportación media anual y puede interpretarse como el tiempo de retención del embalse (en años). El índice  $K_t$  es el cociente entre la capacidad de embalse y la tasa de sedimentación anual y puede interpretarse como la vida útil del embalse (en años). Los distintos autores delimitan zonas en un gráfico doblemente logarítmico donde se representan estos dos índices, indicando las alternativas de gestión que son más frecuentes en cada caso.

Se han situado los embalses del sistema MRF en los gráficos propuestos por los distintos autores, para identificar las técnicas más adecuadas. Con los datos disponibles, a Mequinenza le corresponde un valor de  $K_w$  de 0,21 y un valor de  $K_t$  de 876. Ribarroja tiene un valor de  $K_w$  de 0,03 y un valor de  $K_t$  de 882. A Flix le corresponde un valor de  $K_w$  de 0,001 y un valor de  $K_t$  de 1141. En los gráficos, Mequinenza queda encuadrado en la zona donde se recomiendan diques de retención de sedimentos, operación del embalse y aporte de sedimentos aguas abajo. Los embalses de Ribarroja y Flix quedan fuera de las zonas de recomendación, debido a que la vida útil de los embalses (880 y 1150 años) es muy grande en comparación con su tiempo de retención (0,03 y 0,001 años). Si seguimos la línea vertical correspondiente al valor del tiempo de residencia de cada embalse, Ribarroja queda en la zona donde se recomienda lavado, by-pass, *sluicing* y excavación. En el caso de Flix, la recomendación sería lavado, *sluicing*, dragado e hidrosucción.

### 4.3 Experiencias de casos similares

Se ha realizado una revisión exhaustiva de las experiencias de casos de gestión de sedimentos que son relevantes para el sistema MRF. En una primera fase se han clasificado las experiencias en función de las distintas técnicas identificadas: lavado, by-pass, evacuación de corrientes turbias de densidad, dragado y excavación. En una segunda fase se han identificado los casos más similares a las presas del sistema MRF.

Ninguna de las presas donde el lavado ha tenido éxito tiene condiciones similares a las del tramo bajo del Ebro. Se trata de embalses mucho más pequeños. La longitud y la anchura del vaso del embalse son mucho más cortas (todas las longitudes inferiores a 5 km y todas las alturas de presa, excepto una, inferiores a 25 m). Solo hay tres embalses de tamaños similares a los del bajo Ebro y en todos ellos la operación de lavado no ha resultado efectiva. Los embalses de Guanting y Sefid-Rud tienen capacidades algo mayores que la de Mequinenza, pero menor aportación y una carga de transporte sólido muchísimo mayor. El embalse de Sanmenxia es mucho mayor que los del Ebro.

La mayor parte de las experiencias mundiales de túneles de by-pass de sedimentos se encuentran en Japón y Austria. Esta solución es adecuada esta solución para un tipo de presa muy distinto del de las presas del sistema MRF. Son zonas de alta montaña, donde las fuertes pendientes permiten la evacuación de una cantidad significativa de agua y sedimento a través de un túnel. Todas las pendientes son superiores al 1%. Actualmente, el túnel más largo de by-pass es el de la presa Miwa en Japón, de 4,3 km de longitud, diseñado para un caudal de 300 m<sup>3</sup>/s.

La literatura sobre corrientes turbias de densidad es abundante. Existen numerosos ejemplos de embalses donde se produce el fenómeno y en varios de ellos se han organizado medidas para poder evacuar las corrientes que llegan al embalse sin dar tiempo a que se deposite el sedimento. Sin embargo, en los embalses del sistema MRF no se han observado corrientes turbias de densidad, posiblemente porque no se alcanza suficiente concentración de sedimentos para que se produzca el fenómeno, por lo que esta alternativa no sería de aplicación.

Las experiencias de dragado y excavación son muy numerosas, puesto que este recurso es muy versátil y únicamente está limitado por consideraciones económicas. Las condiciones que determinan la excavación o el dragado dependen en menor medida de la naturaleza del embalse que en otros casos de gestión de sedimento, ya que se emplean medios externos para actuar sobre el sedimento acumulado. En este caso, resulta difícil trasladar las experiencias de otras realizaciones al caso del sistema MRF, porque las características del embalse (ubicación, accesos, profundidad, posibilidad de acopio, etc.) y del sedimento (granulometría, compactación, erosionabilidad, etc.) son determinantes del coste.



A partir de la revisión de la literatura consultada se ha recopilado una base de datos de 137 embalses en los que se cita algún modo de gestión de sedimentos. De estos embalses se ha obtenido información suficiente como para determinar los valores de los índices  $K_w$  y  $K_t$  en 61 casos, que se han representado en un gráfico doblemente logarítmico junto con los embalses del bajo Ebro. También se ha elaborado un gráfico alternativo sustituyendo la variable  $K_t$ , que es poco relevante en el sistema MRF, por la pendiente (estimada como cociente entre la altura de presa y la longitud del vado). Se han seleccionado las experiencias que quedan más próximas a cada una de las tres presas en ambos gráficos, que se comentan a continuación.

Los embalses cuyas características son más próximas a las del embalse de Mequinenza son Sefid Rud, Sanmenxia, Liujiaxia, Xiaolangdi, Tarbela, Shihmen, Naodehai, Kamishiiba, Miure y Makio. El más similar desde el punto de vista hidrodinámico es el de Sefid Rud, en Irán, aunque desde el punto de vista sedimentológico su tasa anual de sedimentación es mucho mayor. Del resto de embalses, hay cuatro cuya capacidad y aportación son mucho mayores (al menos cinco veces) y cinco mucho menores (cinco veces menores), por lo que no resulta muy adecuado establecer una analogía. En tres de estos embalses la principal medida de gestión del sedimento es la evacuación de corrientes de densidad. En otros cinco embalses se aplican medidas de evacuación hidrodinámica: lavado y *sluicing*. En otros dos embalses se aplican medidas de retirada mecánica del sedimento o de control de producción de sedimentos en la cuenca.

Los embalses más similares a Ribarroja son Sakuma, Guernsey, Hiraoka, Tsukabaru, Shuicaozi, Ronghua, Wujie, Mapragg, Morotsuka y Palagnedra. El más similar desde el punto de vista hidrodinámico es el de Sakuma, en Japón, aunque la gran altura de la presa hace que la pendiente del cauce sea mucho mayor que en Ribarroja. La tasa de sedimentación es seis veces superior a la de Ribarroja. El embalse de Guernsey tiene una pendiente similar a la de Ribarroja, aunque su capacidad es un tercio y su aportación la quinta parte. El resto de embalses son mucho menores que Ribarroja y sus pendientes son considerablemente mayores, por lo que la analogía es mucho menor. En cinco embalses se emplean medidas de gestión de sedimentos basadas en la evacuación hidrodinámica: tres mediante lavado y dos mediante *sluicing*. Hay un embalse donde es posible la evacuación mediante corrientes de densidad. En los otros cuatro embalses las medidas que se aplican son la retirada mecánica del sedimento o de control de producción de sedimentos en la cuenca.

Los embalses más similares a Flix son: Ouchi Kurgan, Ichari, Yasuoka, Ouchibaru, Kasagi, Saigo, Asahi, Tokiwa y Barenburg. El más similar es el embalse de Ouchi-Kurgan, cuya aportación y pendiente son similares a las de Flix, aunque su capacidad es cuatro veces mayor y su altura de presa el doble. Desde el punto de vista sedimentológico, su tasa de sedimentación es casi mil veces superior. Los embalses de Yasuoka, Ichari, Ouchibaru y Kasagi tienen capacidades similares, pero sus aportaciones son menos de la mitad y sus pendientes son el doble de las de Flix. El resto de embalses, excepto Asahi, son mucho más pequeños que Flix y tienen pendientes considerablemente mayores. Excepto en el caso de Asahi, donde existe un túnel de by-pass, en el resto de embalses la gestión de sedimentos se realiza principalmente mediante evacuación hidrodinámica: lavado y *sluicing*.

## 5. Posibilidades de movilización de sedimentos

El análisis de las posibilidades reales de movilización de sedimentos en el sistema MRF se basa en el estudio de las alternativas metodológicas y en la recopilación de experiencias similares. De ambos se deduce que las únicas posibilidades reales de movilización de sedimentos son la retirada hidrodinámica mediante lavado y la retirada mecánica mediante excavación o dragado. La retirada mecánica siempre es factible técnicamente, y su única limitación es el coste. El estudio específico de opciones de excavación en los embalses excede el alcance del presente trabajo. Los datos recopilados en experiencias mundiales arrojan unos resultados de coste muy elevados, superiores a los 2\$/m<sup>3</sup>, que difícilmente justificarían contemplar esta alternativa a gran escala. En consecuencia, el estudio, que se presenta en la quinta parte, se ha centrado en el análisis de las posibilidades de retirada de sedimento mediante lavado en las tres presas.

### 5.1 Análisis de posibilidades de lavado

Se ha realizado un estudio específico de las posibilidades de lavado en cada uno de los tres embalses en el sistema MRF. El procedimiento más adecuado es la estimación mediante el modelo de Tsinghua, que es un procedimiento empírico que permite estimar el resultado de la operación de lavado a partir de las características geométricas del embalse. El método se basa en la recopilación de un conjunto de experiencias en China donde se ha practicado lavado con éxito. Como contraste, se ha aplicado el método al caso del embalse de Barasona, donde se dispone de información relativa a tres operaciones de lavado, con resultados satisfactorios, ya que tanto las concentraciones como los volúmenes evacuados están dentro del orden de magnitud de los valores proporcionados por las fórmulas empíricas.

Las condiciones del embalse de Mequinenza no son favorables al lavado, porque el vaso es muy largo y la capacidad de los desagües de fondo (160 m<sup>3</sup>/s) es muy pequeña. Aunque las fórmulas empíricas del método de Tsinghua proporcionan resultados aceptables, los niveles de embalse que son necesarios para poder evacuar los caudales de lavado suponen que todavía quedaría una gran cantidad de agua embalsada en el vaso durante el lavado, de 100 a 200 hm<sup>3</sup>. El sedimento arrastrado en la cola del embalse tendría que entrar al vaso y recorrer distancias entre 35 y 40 km para poder llegar hasta el desagüe de fondo. Aplicando el procedimiento de Churchill se puede estimar que el sedimento movilizado sería depositado en el embalse prácticamente en su totalidad antes de poder ser evacuado por el desagüe de fondo. En consecuencia, puede concluirse que la operación de lavado con vaciado del embalse no es técnicamente viable en el embalse de Mequinenza.

Las fórmulas empíricas del método de Tsinghua dan resultados favorables en el caso de Ribarroja. Por ejemplo, con un caudal de lavado de 200 m<sup>3</sup>/s se podría esperar una concentración de sedimento de unos 60 kg/m<sup>3</sup>, lo que permitiría evacuar 1 Mt en un día. Esta concentración es inferior a las concentraciones medidas en los vaciados de Barasona. Como resultado del análisis realizado se puede concluir que, en principio, la operación de lavado es técnicamente posible en Ribarroja, siempre que los desagües de fondo estén operativos. Sin embargo, pueden plantearse dudas sobre la viabilidad de la operación en Ribarroja, ya que la situación de los sedimentos es muy desfavorable. Las presas donde se dedujeron las fórmulas del método de Tsinghua presentaban un grado de colmatación mucho mayor que Ribarroja, y disponían de abundante cantidad de sedimento en las proximidades de la presa. En Ribarroja el grado de colmatación no llega al 5% y la situación

de los sedimentos es muy desfavorable, puesto que están distribuidos a lo largo de los 30 km del vaso. Esto dificulta considerablemente las operaciones de lavado.

Los resultados de la aplicación de las fórmulas empíricas al embalse de Flix son muy similares a los de Ribarroja, ya que se ha supuesto las mismas condiciones del sedimento y las pendientes de los vasos son muy similares. Por tanto, el lavado es técnicamente viable en Flix. En este caso no serían de aplicación los inconvenientes mencionados en el caso de Ribarroja, ya que la evacuación se realizaría por el aliviadero, cuya cota de labio se encuentra próxima al cauce, y el vaso es mucho más corto. El principal problema planteado el Flix es la posible contaminación del sedimento, que no se encuentra totalmente resuelto.

## 5.2 Consideraciones ambientales, económicas y sociales

Además de las cuestiones hidrodinámicas, la operación de lavado está condicionada por otros factores de distinta naturaleza. Para tenerlos en cuenta, se han valorado las implicaciones ambientales, económicas y sociales de la operación de lavado.

La operación de lavado requiere un vaciado prácticamente total del embalse, seguido de un periodo de evacuación de sedimentos y un periodo en el que se recupera el volumen embalsado inicial. Estos tres procesos pueden producir efectos medioambientales significativos en el embalse y en tramo aguas abajo. El agua liberada durante el vaciado del embalse procede de las capas inferiores, que suele tener menos calidad que el agua superficial. También es frecuente que el material sedimentado en el fondo del vaso sea activo desde el punto de vista bioquímico, por lo que el agua de las capas inferiores está expuesta a la resuspensión de este material. El vaciado del embalse tiene también su efecto en el vaso. La reducción del volumen embalsado y la superficie inundada producen cambios sustanciales en las comunidades biológicas. El proceso de lavado vierte al río de agua con una muy alta concentración de sedimentos. Esto produciría indudablemente efectos ambientales de gran importancia, tanto sobre la vegetación riparia como sobre fauna de ribera. La experiencia del vaciado de Barasona indica que los efectos son reversibles a medio plazo, pero esta capacidad de recuperación resultaría muy comprometida si los lavados se realizan de forma periódica, como debería ser si se pretende restituir el flujo original de sedimentos en el río.

Desde el punto de vista económico la principal afección es la correspondiente a la producción hidroeléctrica. La afección a la producción hidroeléctrica se compone de dos factores: la pérdida de producción por el volumen de agua no turbinado o por menor salto bruto y la afección al esquema de producción por la no disponibilidad de la central hidroeléctrica. En este estudio se ha realizado una estimación simplificada de la afección producida por el primero de estos dos factores. El análisis del segundo factor queda fuera del ámbito de este estudio, ya que requiere el conocimiento del sistema regional de producción de energía eléctrica.

En el embalse de Ribarroja se ha estimado una pérdida de energía durante el vaciado de 3800 MWh. La pérdida de energía durante el lavado se estima en 66 MWh por cada  $\text{hm}^3$  empleado en el lavado. El volumen necesario para evacuar 1Mt se ha estimado entre 12  $\text{hm}^3$  y 24  $\text{hm}^3$  aplicando el método de Tsinghua, lo que daría una pérdida de energía entre 800 GWh y 1600 MWh, pero es muy posible que el rendimiento sea muy inferior al teórico, por lo que la pérdida de energía podría superar los 3000 MWh. Para el llenado resulta más difícil hacer una estimación, ya que depende del caudal mínimo que se vertiera al río, pero se ha supuesto que la pérdida de energía sería similar a la producida durante el vaciado. En total, se ha estimado una pérdida de energía de unos 10000 MWh, que corresponderían a unos 0,5 M€ En el caso de Flix se ha estimado una pérdida de energía total podría llegar a los 800 MWh, que supondrían 0,04 M€ Estas cantidades son muy inferiores a las obtenidas para el embalse de Ribarroja.

A este coste habría que añadir las afecciones al esquema de producción por la no disponibilidad de la central hidroeléctrica y las afecciones a otros usuarios del agua. Por ejemplo, si las condiciones del agua de lavado fueran incompatibles con la refrigeración de la central de Ascó la afección económica por la parada de esta central sería mucho mayor.

Se pueden identificar además importantes afecciones sociales, ya que existe un gran número de intereses vinculados a la gestión de los embalses del sistema MRF. Los usos del agua del tramo fluvial situado aguas abajo del embalse se verían alterados por la alta concentración de sólidos en suspensión y por la posible movilización de sustancias tóxicas acumuladas en los lodos del embalse. Los puntos de abastecimiento del bajo Ebro, los usos recreativos o la central nuclear de Ascó son las afecciones más evidentes. La movilización de sedimentos también afectaría a los usuarios de la red de riego, puesto que tendrían que gestionar el paso del agua con una alta carga de sedimentos en suspensión a través de su infraestructura. La imputación de costes de la operación afectaría a la práctica totalidad de usuarios del agua en la cuenca, ya que la alteración del régimen hidrológico y del tránsito de sedimentos no puede atribuirse exclusivamente a los tres embalses del bajo Ebro, sino que es consecuencia de los usos aguas arriba de los embalses. En resumen, existe una gran variedad de afecciones sociales que se deben tener en cuenta en la planificación de las operaciones.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Como recapitulación general, se han extraído las principales conclusiones del estudio y se realizan una serie de recomendaciones de cara al futuro, que se presentan en la sexta parte. A continuación, se incluye un resumen de las más relevantes.

### 6.1 Conclusiones

La finalidad de este estudio es realizar una caracterización del tránsito de sedimentos en el curso bajo del río Ebro y un análisis de las alternativas técnicas para la posible movilización de los sedimentos acumulados en los embalses. A continuación, se presenta un resumen de las conclusiones extraídas en cada uno de estos dos apartados.

- El sedimento acumulado en Mequinenza probablemente se encuentra en el rango comprendido entre 75 hm<sup>3</sup> y 100 hm<sup>3</sup>, lo que supone entre un 5% y un 6,5% de su capacidad original. La acumulación en Ribarroja es de unos 13,1 hm<sup>3</sup>, un 4,5% de su capacidad original.
- El 80% del sedimento de Mequinenza se encuentra a más de 50 km de la presa. En 60% del sedimento de Ribarroja se encuentra a más de 15 km de la presa.
- Partiendo de los valores medios calculados desde su construcción la vida útil de Mequinenza se estimaría en unos 750-1.000 años. Si se toma la cifra de acumulación estimada en el periodo 1982-2012 esta cifra sube hasta cerca de los 3.000 años. Las cifras de Ribarroja son similares: vida útil de 644 años en 2007, y de más de 5.000 años tomando la tasa media del periodo 1982-2007.
- Las cifras obtenidas de acumulación de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja son perfectamente compatibles con su explotación para uso hidroeléctrico y no justificarían, desde ese punto de vista, realizar en este momento ninguna actuación para su movilización
- El análisis directo del flujo de sedimentos permite estimar las entradas al sistema MRF entre 0,6 Mt/a y 1,6 Mt/a. La mayor parte de los sedimentos (80%) entran al sistema por el río Ebro. El río Cinca aporta un 15% del total y el resto de la cuenca del Segre, otro 5%. Se estima que Mequinenza retiene el 95% del sedimento en suspensión y Ribarroja el 40%. La carga media anual aguas abajo de las presas es inferior a 0,5 Mt/a, con el 60% transportado en suspensión y el 40% como carga de fondo. Según los investigadores, la mayor parte de este material procede de la erosión en el lecho del propio río.
- La acumulación actual en Mequinenza y Ribarroja calculada a partir de los flujos de sedimentos se estima entre unos 0,5 hm<sup>3</sup>/a y 1 hm<sup>3</sup>/a. Estas cifras son concordantes con las que se han obtenido a partir de la acumulación de sedimentos en los embalses.

- Todos los estudios globales en los que se analiza la gestión de sedimentos en múltiples embalses emplean dos índices básicos para su clasificación:  $K_w$  y  $K_t$ . El índice  $K_w$  puede interpretarse como el tiempo de retención del embalse (en años). El índice  $K_t$  puede interpretarse como la vida útil del embalse (en años).
- Los valores de  $K_w$  y  $K_t$  correspondiente al embalse de Mequinenza lo sitúan en la zona donde se recomiendan diques de contención de sedimentos, gestión del nivel de embalse o inyección de sedimentos. Los valores de  $K_w$  y  $K_t$  correspondientes a los embalses de Ribarroja y Flix los sitúan fuera de las zonas donde se han reportado experiencias en la literatura, debido a la baja tasa de sedimentación que presentan en comparación con el volumen de embalse.
- Entre los embalses cuyas características son más próximas a las del embalse de Mequinenza, el más similar es el de Sefid Rud, aunque su tasa anual de sedimentación es mucho mayor. Del resto de embalses, hay cuatro cuya capacidad y aportación son mucho mayores (al menos cinco veces) y cinco mucho menores (cinco veces menores), por lo que no resulta muy adecuado establecer una analogía.
- Entre los embalses semejantes a Ribarroja el más similar es el de Sakuma, aunque su pendiente es mucho mayor y la tasa de sedimentación es seis veces superior a la de Ribarroja. El embalse de Guernsey tiene una pendiente similar a la de Ribarroja, aunque su capacidad es un tercio y su aportación la quinta parte. El resto de embalses son mucho menores que Ribarroja y sus pendientes son considerablemente mayores, por lo que la analogía es mucho menor.
- El embalse más parecido a Flix es Ouchi-Kurgan, cuya aportación y pendiente son similares a las de Flix, aunque su capacidad es cuatro veces mayor y su altura de presa el doble. Sin embargo, su tasa de sedimentación es casi mil veces superior. Los embalses de Yasuoka, Ichari, Ouchibaru y Kasagi tienen capacidades similares, pero sus aportaciones son menos de la mitad y sus pendientes son el doble de las de Flix. El resto de embalses, excepto Asahi, son mucho más pequeños que Flix y tienen pendientes considerablemente mayores.
- En conjunto, las únicas alternativas técnicamente viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema MRF son la retirada mecánica mediante excavación en seco o dragado (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix).
- La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados.
- El lavado es técnicamente factible en Ribarroja, pero su efectividad estaría seriamente limitada por una serie de circunstancias desfavorables: la escasa acumulación de sedimentos, la situación de los sedimentos, distribuidos a lo largo de los 30 km de vaso, la escasa pendiente o la probable compactación de los sedimentos tras haber transcurrido varias décadas sin ninguna acción de lavado. Entre los embalses similares a Ribarroja se aplica lavado en Guernsey, Shuicaozi y

Palagnedra. En los dos primeros, el lavado no ha resultado satisfactorio y el tercero tiene una pendiente del vaso mucho mayor.

- El embalse de Flix es el que presenta mejores condiciones para el lavado, pero existen dudas sobre la posible contaminación de sus sedimentos, por lo que su movilización mediante el lavado podría suponer un riesgo importante.
- Junto a las dificultades técnicas deben considerarse también otros factores, como el efecto del pulso de alta concentración de sedimentos en el cauce aguas abajo, la propagación hacia el Delta o la incidencia sobre la explotación de la central hidroeléctrica y otros usuarios del agua.

## 6.2 Recomendaciones

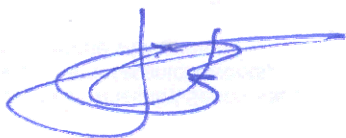
Las recomendaciones que se proponen para afrontar la gestión de sedimentos del bajo Ebro en el futuro se han dividido en tres grandes grupos: monitorización, plan de acción e integración de actores. Las más significativas se relacionan a continuación.

- Continuar las actividades de monitorización hidrológica, garantizando la operatividad de las estaciones de medida y evitando periodos de ausencia de datos.
- Mantener operativas estas estaciones de calidad de agua, evitando que se produzcan interrupciones en su funcionamiento y reduciendo, en la medida de lo posible, el porcentaje de huecos.
- Trabajar en la elaboración y validación de curvas de tarado que relacionen la turbidez con la carga en suspensión.
- Caracterizar la influencia que tiene el tránsito sedimentario en los embalses sobre la erosión en el cauce del bajo Ebro y sobre la subsidencia del Delta, para valorar la conveniencia de acometer la tarea de movilizar los sedimentos.
- Realizar una monitorización de los episodios de erosión en el cauce, identificando las zonas expuestas y cuantificando su importancia.
- Realizar una monitorización de la red de referencias topográficas del PIPDE mediante nivelación de alta precisión con una cierta periodicidad (por ejemplo, cada diez años) como paso previo al planteamiento de cualquier medida de actuación.
- Realizar un estudio de viabilidad de la solución propuesta para la aplicación de sedimentos al Delta a través de la red de canales de riego.
- Elaborar un plan de acción escalonado, en el que las tareas se acometan de forma progresiva, validando cada etapa antes de pasar a la etapa siguiente. Se proponen cinco fases: caracterización, identificación de objetivos, estudios técnicos, implantación experimental, implantación definitiva
- Realizar una caracterización cuantitativa de la situación actual del sistema MRF, basándose en datos objetivos.

- Identificar los objetivos de la actuación, definidos para conseguir un fin específico. Para ello se deben elaborar los estudios técnicos que resulten necesarios para establecer las relaciones causales que permitan atribuir al déficit de sedimentos los efectos adversos que se quiere corregir.
- Procurar que los objetivos que se formulen sean necesarios para conseguir el fin, sean factibles técnicamente y sean viables desde el punto de vista de los costes que comportan, entendiendo éstos en su triple dimensión ambiental, económica y social.
- Continuar con el desarrollo de modelos hidrodinámicos con transporte de sedimentos para ganar conocimiento sobre el alcance cuantitativo de estos procesos, mediante el contraste de sus resultados con las observaciones de la red de monitorización.
- Ampliar el ámbito de aplicación de estos modelos para incluir todo el tramo de río Ebro hasta la desembocadura en el Delta, incluyendo la red de canales de riego.
- Recopilar todas las experiencias de vaciado de embalses de la cuenca del Ebro y utilizarlas para la validación de los estudios técnicos que se realicen.
- Si se decide acometer alguna actuación de gestión de sedimentos, comenzar a pequeña escala y con carácter experimental, evaluando cuidadosamente sus efectos.
- Acometer la fase de implantación definitiva sólo si los estudios técnicos y la implantación experimental proporcionan resultados favorables y existe un consenso entre todos los actores involucrados para poner en marcha el proceso.
- Si se decide plantear la posibilidad de un plan de actuación para la gestión de sedimentos en el bajo Ebro, involucrar a los actores afectados para recoger todos los puntos de vista.
- Establecer un procedimiento para identificar a los actores y canalizar su participación en el proceso.
- Asegurar el adecuado estado de mantenimiento de los desagües de fondo de las presas de la cuenca del Ebro y su gestión eficaz para evacuar los sedimentos que son susceptibles de ser movilizados mediante este mecanismo.

Madrid, 4 de diciembre de 2018

Por la Fundación Agustín de Betancourt



Fdo: Luis Garrote de Marcos



# **PRIMERA PARTE: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS EMBALSES DE MEQUINENZA, RIBARROJA Y FLIX**

## **1. Introducción**

En esta parte se presenta un resumen de los estudios realizados sobre el tránsito sedimentario en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF). El objetivo es recopilar información que permita caracterizar el tránsito sedimentario en el Ebro, antes y después de la construcción de las presas, y específicamente determinar las tasas de sedimentación observadas en los embalses. En primer lugar, se presentan los trabajos promovidos por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). A continuación, se incluye un resumen de las publicaciones realizadas por la comunidad científica sobre el tema. Finalmente, se presenta un resumen de la experiencia que supuso el vaciado del embalse de Barasona para la limpieza de sus lodos, y las conclusiones que se pudieron obtener.

## 2. Estudios promovidos por la CHE

En los últimos años la Confederación Hidrográfica del Ebro ha elaborado algunos estudios dirigidos a la caracterización de los sedimentos acumulados en los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Estos estudios se presentan en la Tabla 1.1:

*Tabla 1.1. Estudios promovidos por la CHE sobre la dinámica sedimentaria del bajo Ebro.*

Estudio	Entidad colaboradora	Año
Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja	Grupo FLUMEN (UPC y UAB)	2009
Estudio de hidrodinámica del Segre	Grupo FLUMEN (UPC y UAB)	2010
Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza	Control de Obra Civil	2011
Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008	Tragsatec	2012
Nivelación de Precisión y Estimación de la Acumulación de Sedimentos en el Embalse de Mequinenza	Control de Obra Civil	2012

A continuación, se presenta un resumen de cada uno de ellos

### 2.1 Dinámica sedimentaria y batimetría de Ribarroja

El trabajo “Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja” fue realizado por el grupo Flumen (de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Universidad Autónoma de Barcelona) en noviembre de 2009. El estudio fijaba cuatro objetivos básicos:

- Análisis de la incidencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en tránsito sedimentario del río Ebro
- Determinación del volumen de los sedimentos depositados en el embalse de Ribarroja y análisis de su distribución espacial.
- Estudio de la dinámica de los sedimentos depositados en el extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja.
- Caracterización físico-química de los sedimentos depositados en el embalse de Ribarroja.

A continuación, se resumen las conclusiones de cada uno de estos aspectos.

#### *Tránsito sedimentario*

El trabajo se basó en la información de campo obtenida para la elaboración de la tesis doctoral de Montserrat Roura (2003). Se analizó el periodo comprendido entre el 25/11/1997 y el 19/09/1999. Se tomaron muestras de agua cada 12 horas en cinco puntos, en los ríos Ebro (entrada y

salida de Mequinenza, salida de Ribarroja), Segre (Serós) y Cinca (Fraga). El caudal sólido se determinó a partir de la concentración de sólidos en suspensión. Se obtuvo una concentración media a la entrada de Mequinenza de 96 mg/l y 5,9 mg/l a la salida. Las concentraciones a la entrada de Ribarroja fueron: 5,9 mg/l en el Ebro, 45,3 mg/l en el Segre (Serós) y 262 mg/l en el Cinca (Fraga). La concentración media a la salida de Ribarroja fue de 19 mg/l.

En Mequinenza entraron 1.400.000 toneladas de sedimento, de las cuales se depositaron el 95,5%. En Ribarroja se retuvo el 40,7% de los sedimentos, que corresponde a 510.000 toneladas.

La mayor parte del flujo sedimentario y de la retención se produce en aguas altas. El 50% de la retención se produjo en el 7% de los días en Mequinenza y en el 3% de los días en Ribarroja.

### ***Volumen de sedimento acumulado***

Durante el trabajo se realizó una batimetría de precisión mediante sonda multihaz del vaso de Ribarroja entre octubre y noviembre de 2007. Por comparación con la topografía realizada antes de la construcción de la presa se determinó el volumen de sedimento acumulado desde entonces y su localización.

En el análisis se detectó erosión en ciertas partes del embalse, cuantificada en 3,5 hm<sup>3</sup>. La sedimentación en Ribarroja se estimó en 16,6 hm<sup>3</sup> (sedimentación bruta, sin descontar la erosión) y 13 hm<sup>3</sup> (sedimentación media, descontando la erosión). El embalse se puede dividir en cuatro tramos, de acuerdo con distribución de sedimentos. En el primer tramo, de 5 km, se produce una gran acumulación de sedimentos (5 hm<sup>3</sup>), casi sin erosión. En el segundo tramo, entre los km 5 y 15, existe una dinámica entre erosión y sedimentación, con un resultado próximo al equilibrio. En el tercer tramo, del km 15 hasta el km 22,5, donde desemboca el Matarraña, la erosión se estabiliza y la sedimentación vuelve a ser dominante. En el último tramo, desde el km 22,5 hasta la presa, la sedimentación es importante, acumulándose unos 5 hm<sup>3</sup>, posiblemente debido al aporte del afluente. La tabla 1.2 presenta un detalle del cálculo de la sedimentación y la figura 1.1 muestra su representación gráfica.

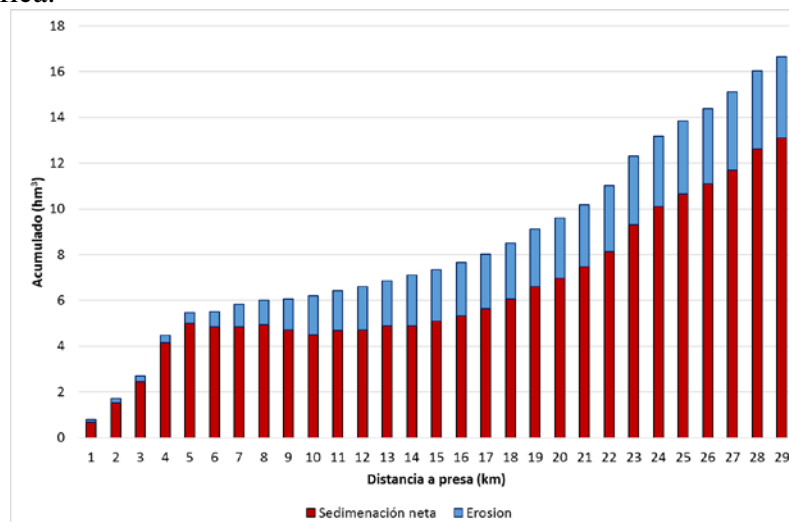


Figura 1.1. Acumulación de sedimentación y erosión en el embalse de Ribarroja. Tomada del estudio de UPC.

Tabla 1.2. Cálculo del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Ribarroja en el estudio de UPC.

PK	Tasa erosión (m <sup>3</sup> /m)	Tasa sedimentación (m <sup>3</sup> /m)	Erosión acumulada (hm <sup>3</sup> )	Sedimentación acumulada (hm <sup>3</sup> )	Sedimentación neta (hm <sup>3</sup> )
1	122	796	0.12	0.80	0.67
2	61	918	0.18	1.71	1.53
3	61	980	0.24	2.69	2.45
4	73	1776	0.32	4.47	4.15
5	135	980	0.45	5.45	5.00
6	220	61	0.67	5.51	4.84
7	306	306	0.98	5.82	4.84
8	86	184	1.07	6.00	4.93
9	282	61	1.35	6.06	4.71
10	331	122	1.68	6.18	4.51
11	73	245	1.75	6.43	4.68
12	147	184	1.90	6.61	4.71
13	61	245	1.96	6.86	4.90
14	245	245	2.20	7.10	4.90
15	61	245	2.27	7.35	5.08
16	61	306	2.33	7.65	5.33
17	61	367	2.39	8.02	5.63
18	61	490	2.45	8.51	6.06
19	61	612	2.51	9.12	6.61
20	122	490	2.63	9.61	6.98
21	61	551	2.69	10.16	7.47
22	184	857	2.88	11.02	8.14
23	122	1286	3.00	12.31	9.31
24	61	857	3.06	13.16	10.10
25	122	673	3.18	13.84	10.65
26	122	551	3.31	14.39	11.08
27	122	735	3.43	15.12	11.69
28	0	918	3.43	16.04	12.61
29	122	612	3.55	16.65	13.10

### *Dinámica de sedimentos aguas arriba de Ribarroja*

La dinámica de sedimentos en la cola del embalse de Ribarroja se caracterizó mediante una segunda batimetría realizada un año después de la inicial. Por comparación entre ambas barimetrías se pudo detectar la evolución en un periodo relativamente corto. El resultado del análisis indica que unos 150.000 m<sup>3</sup> de sedimento se desplazaron unos 3 km hacia aguas abajo. Este movimiento se atribuyó a la única crecida acaecida durante el periodo de estudio, en mayo-junio de 2008.

### *Caracterización físico-química de los sedimentos*

Durante el trabajo se tomaron muestras en dieciséis puntos y se analizó la estructura física (granulometría) y composición química del sedimento. El sedimento depositado en el embalse es de textura limo-arcillosa con un tamaño medio inferior a 25 micras, aunque en algunas zonas se detecta una mayor presencia de arenas. La composición química es homogénea, con una mayor presencia de nutrientes en el tramo próximo a la presa, que se puede considerar en estado moderadamente eutrófico. También se detectan concentraciones apreciables de algunos metales pesados, como cromo, sin llegar a umbrales peligrosos.

## **2.2 Hidrodinámica del Segre**

Se trata del Anejo nº 7 del estudio “Recuperación del lecho y mejora del estado ecológico del río Segre en la confluencia con el Ebro. T.M. de Mequinenza (Zaragoza), realizado en 2010 por Ingeniería 75 en el marco de la “Consultoría y asistencia para el apoyo al desarrollo de la estrategia nacional de restauración de ríos en la cuenca del Ebro”. El trabajo fue realizado por el Grupo Flumen. El objetivo de los trabajos era proporcionar apoyo técnico a la empresa encargada del

contrato mediante el desarrollo de un modelo numérico de hidrodinámica y transporte de sólidos del río Segre en el entorno de Mequinenza.

En el trabajo se realizó una batimetría del tramo en estudio, que comprende 4 km del río Segre aguas arriba del puente de Mequinenza. La batimetría se obtuvo mediante una combinación de sonda monohaz y sonda multihaz. Este trabajo se realizó en 2009 y completaba los estudios batimétricos realizados en 2007 y 2008 en la cola del embalse de Ribarroja.

Además, se puso a punto un modelo numérico de circulación hidrodinámica y transporte de sedimentos en el tramo. El modelo se calibró con la información disponible, empleando para ello las conclusiones del análisis del movimiento de sedimentos durante la avenida de mayo-junio de 2008, que permitía caracterizar las zonas de erosión y sedimentación. La calibración del modelo se centró en la tensión tangencial crítica de erosión, estimada en  $1 \text{ N/m}^2$ . El modelo se empleó para analizar la circulación de agua y transporte de sedimento para dos caudales ( $500 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $2862 \text{ m}^3/\text{s}$ ) en distintas condiciones de contorno y configuraciones de las obras de defensa propuestas. En el análisis se comprobó que, para el caudal mayor de los dos estudiados, correspondiente a un periodo de retorno de 10 años, se producía erosión en todo el tramo en estudio, arrastrando el sedimento hasta el embalse de Ribarroja.

### **2.3 Lodos acumulados en Mequinenza**

El trabajo “Evaluación preliminar de los lodos acumulados en la cola del embalse de Mequinenza” fue elaborado en 2011 por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro. El tramo objeto de estudio fueron los últimos 35 km de la cola del embalse de Mequinenza.

Durante el verano de 2011 se realizaron seis visitas al embalse con el objeto de inspeccionar los sedimentos, conocer su dinámica y su posible erosión en la zona que dejaba libre el embalse. En esas fechas la cota del embalse osciló entre la 116 m y la 111 m. Se comprobó que el funcionamiento hidráulico de la cola del embalse en esas condiciones corresponde a la circulación de agua por el cauce en lámina libre. El sedimento se encontró compacto y tapizado con una vegetación espesa que dificulta su erosión.

La caracterización del volumen de sedimento se realizó sobre seis zonas representativas con distintas formas en planta, sectores de meandro, tramos curvos y tramos entre meandros casi rectos en planta. Las zonas abarcaban desde el PK 16,3 hasta el PK 34,9, con longitudes comprendidas entre 500 m y 3900 m y anchuras entre 110 m y 280 m. En total se analizaron 9800 m de embalse. En la zona anterior al PK 16,3 se estimó que el volumen de sedimento era despreciable. Se realizaron 27 catas y 10 sondeos, que permitieron estimar el espesor de sedimentos en las zonas en estudio, que osciló entre 0 y 10,80 m.

A partir de la información obtenida se realizó una reconstrucción del volumen de sedimentos observado en el vaso del embalse. En la zona analizada se obtuvo un volumen de sedimentos de  $3,98 \text{ hm}^3$ , que supone un depósito medio de  $400 \text{ m}^3/\text{m}$  en los 9800 m estudiados.

A partir de este valor se estimó el depósito en la zona no analizada directamente, concluyendo en la siguiente valoración:

- Del 0+000 al 16+300: cantidad despreciable.
- Del 16+300 al 34+900: 9.800 m analizados, con  $3,983 \text{ hm}^3$  a  $400 \text{ m}^3/\text{m}$
- Del 16+300 al 34+900: 8.800 m estimados, 4.400 m con una cantidad despreciable y los 4.400 m restantes a  $200 \text{ m}^3/\text{m}$ , totalizando otros  $0,888 \text{ hm}^3$ .

Este cálculo tiene un pequeño error, puesto que en los 9800 m analizados hay dos tramos que están solapados: el comprendido entre el PK 25+100 y el PK 25+900 tiene 500 m de solape con el tramo comprendido entre el PK 25+400 y el PK 25+900. Por tanto, el tramo restante tiene una longitud de 9300 m, no 8800 m como se había supuesto. Haciendo la misma hipótesis que en el estudio, se llega a una cifra de 0,930 hm<sup>3</sup>. El cálculo realizado se presenta en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Cálculo del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza en el estudio de la OPH.

Perfil	Ancho medio (m)	Espesor ponderado (m)	Tasa calculada (m <sup>3</sup> /m)	Tasa estimada (m <sup>3</sup> /m)	Distancia (km)	Distancia Acumulada a presa (km)	Distancia Acumulada a cola (km)	Volumen parcial calculado (hm <sup>3</sup> )	Volumen parcial estimado (hm <sup>3</sup> )	Volumen acumulado desde presa (hm <sup>3</sup> )	Volumen acumulado desde cola (hm <sup>3</sup> )
16+300-17+200	110	1.63	179.3		0.9	85.9	17.2	0.161		4.913	0.161
17+200-20+800				200	1.8	84.1	19		0.360	4.752	0.521
17+200-20+800				0	1.8	82.3	20.8		0.000	4.392	0.521
20+800-24+700	170	3.05	518.5		3.9	78.4	24.7	2.022		4.392	2.544
24+700-25+100				200	0.2	78.2	24.9		0.040	2.370	2.584
24+700-25+100				0	0.2	78.0	25.1		0.000	2.330	2.584
25+100-25+900	150	1.7	255		0.8	77.2	25.9	0.204		2.330	2.788
25+400-25+900	180	0.95	171		0.5	77.2	25.9	0.086		2.126	2.873
25+900-27+000				200	0.55	76.7	26.45		0.110	2.040	2.983
25+900-27+000				0	0.55	76.1	27		0.000	1.930	2.983
27+000-29+800	200	1.81	362		2.8	73.3	29.8	1.014		1.930	3.997
29+800-34+000				200	2.1	71.2	31.9		0.420	0.916	4.417
29+800-34+000				0	2.1	69.1	34		0.000	0.496	4.417
34+000-34+900	280	1.97	551.6		0.9	68.2	34.9	0.496		0.496	4.913
				<b>TOTAL</b>	<b>18.6</b>			<b>3.983</b>	<b>0.930</b>		

Como conclusiones significativas del trabajo de campo, no se detectaron fenómenos de dinámica fluvial en planta y se constató que los lodos están en equilibrio, sin muestras de erosión ni sedimentación recientes.

## 2.4 Volumen de sedimentos en Mequinenza en 2008

El trabajo se titula “Aproximación al volumen de sedimentos del embalse de Mequinenza en 2008” y fue elaborado en 2012 por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro con la colaboración de Tragsatec. Su objetivo era la evaluación del volumen de sedimentos acumulados en el embalse desde su construcción hasta 2008. Para ello se comparó la cartografía del vaso realizada en 1961 para la construcción de la presa con una batimetría realizada en 2008 por la empresa Ecohydros, dentro del trabajo “Estudio censal de las comunidades de peces en el embalse de Mequinenza”.

La topografía original del vaso se realizó a escala 1:5000, con la zona de la presa a escala 1:1000. La batimetría se obtuvo como resultado complementario de un procedimiento de muestreo sistemático mediante ecosondeo vertical y horizontal con el objetivo del censo de la ictiofauna. También se emplearon los datos de los diez sondeos realizados en la valoración preliminar de los lodos de la cola del embalse.

Se trabajó en 17 perfiles transversales, de los cuales cuatro se dieron en la herradura alrededor de la isla Mediana. Se contrastaron todos los datos disponibles para determinar el espesor de sedimentos en cada perfil. El resultado de los análisis reforzó la confianza en los datos de partida. A partir de esta estimación se dedujo la tasa de sedimentación en cada perfil, en m<sup>3</sup>/m, y el volumen acumulado de sedimentos, por integración. Se descartaron los cuatro perfiles dados en la herradura, puesto que en ellos no se apreció acumulación de sedimentos. Los resultados se presentan en la tabla 1.4.

En total se estimó un volumen de sedimentos de 133 hm<sup>3</sup>, de los cuales más de la mitad se encuentran en la zona central del embalse. En el primer tercio, en los 35 km más próximos a la presa, se estima una acumulación de 14, 5 hm<sup>3</sup>. En el tercio central, entre 35 y 70 km de la presa, la

acumulación es de 78 hm<sup>3</sup>. En el tercio final se estiman unos 40,8 hm<sup>3</sup>. En este tramo se supuso que la estimación correspondiente en el último perfil analizado, el P-13, situado a 72,5 km de la presa, afectaba a todo el tramo hasta la cola del embalse, en una longitud de 32,615 m. En realidad, otros estudios han constatado que los últimos 16 km de la cola del embalse están libres de sedimento, por lo que se podría reducir esta estimación en los 20 hm<sup>3</sup> que corresponden a ese tramo con una tasa media de 1.250 m<sup>3</sup>/m.

Tabla 1.4. Cálculo del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza en el estudio de Tragsatec.

Perfil	Distancia (km)	Tasa (m <sup>3</sup> /m)	Longitud (km)	Distancia Acumulada a presa (km)	Distancia Acumulada a cola (km)	Longitud Acumulada a presa (km)	Longitud Acumulada a cola (km)	Volumen parcial (hm <sup>3</sup> )	Volumen acumulado desde presa (hm <sup>3</sup> )	Volumen acumulado desde cola (hm <sup>3</sup> )
Presa	0			0	102.615					
P-1	0.375	1995	0.775	0.375	102.24	0.775	102.615	1.5	1.5	133.2
P-2	1.925	580	3.635	2.3	100.315	4.41	101.84	2.1	3.6	131.7
P-3	4.22	546	6.31	6.52	96.095	10.72	98.205	3.4	7	129.6
P-4	8.4	256	8.165	14.92	87.695	18.885	91.895	2.1	9.1	126.2
P-5	7.93	391	8.155	22.85	79.765	27.04	83.73	3.2	12.3	124.1
P-6	8.38	285	7.42	31.23	71.385	34.46	75.575	2.1	14.4	120.9
P-7	6.46	1250	7.19	37.69	64.925	41.65	68.155	9	23.4	118.8
P-8	7.92	1073	5.335	45.61	57.005	46.985	60.965	5.7	29.1	109.8
P-9	2.75	650	5.375	48.36	54.255	52.36	55.63	3.5	32.6	104.1
P-10	8	2640	9.075	56.36	46.255	61.435	50.255	24	56.6	100.6
P-11	10.15	5000	5.475	66.51	36.105	66.91	41.18	27.4	84	76.6
P-12	0.925	2730	3.09	67.435	35.18	70	35.705	8.4	92.4	49.2
P-13	5.13	1250	32.615	72.565	30.05	102.615	32.615	40.8	133.2	40.8
Cola	30.05			102.615	0					
<b>TOTAL</b>	<b>102.62</b>		<b>102.62</b>					<b>133.20</b>		

## 2.5 Nivelación y estimación de sedimentos Mequinenza

El trabajo “Nivelación de Precisión y Estimación de la Acumulación de Sedimentos en el Embalse de Mequinenza” fue realizado en 2012 por la empresa Control de Obra Civil S.L. El año hidrológico 2011-2012 fue muy seco y la lámina de agua en Mequinenza bajó hasta cota 100,5 m. Esta cota deja descubiertos unos 55 km de la cola del embalse. Aprovechando esta circunstancia, se realizaron trece visitas al vaso de Mequinenza con el objetivo de conocer las zonas de sedimentación y la morfología de los sedimentos.

Se realizó una nivelación de precisión de la zona, comparándola con la cartografía original del proyecto de la presa, realizada en 1961. Se elaboraron sendos modelos digitales del terreno de la cartografía original de 1961 y de la nivelación de 2012, obteniendo el volumen de sedimentación por comparación. La estimación del volumen se obtuvo dando perfiles sobre los modelos cada 20 m.

En la zona bajo el agua, a partir del PK 55, se utilizó la batimetría de 2008 para su comparación con la cartografía de 1961. Se realizaron 10 perfiles transversales, separados una distancia de 5000 m en ambos casos y se procedió a su comparación.

En las conclusiones del estudio se dividió el vaso del embalse en cuatro tramos.

En el tramo hasta el PK 15, la cola del vaso presenta un comportamiento típicamente fluvial, con el lecho del cauce ocupado por cantos rodados. No se han encontrado sedimentos en la zona.

En el tramo desde el PK 15 al PK 29 el fondo del antiguo cauce está ocupado por sedimentos muy compactados. También hay sedimentos fuera del cauce, en una superficie que en la actualidad se encuentra en equilibrio con el río, sin arrastres ni sedimentaciones significativas. Esta configuración es debida a la combinación del cambio de pendiente del cauce originado por la deposición de sedimentos y el remanso de la cola del embalse, unido a la rápida aparición de

vegetación al descender el nivel de agua. Esta circunstancia queda confirmada mediante el análisis de la acumulación de sedimentos que provocó la construcción del puente de Chiprana en 1969, ya que el espesor de sedimentos que se obtuvo en los sondeos realizados para la construcción del puente no ha variado desde entonces. En este tramo se ha estimado una acumulación de sedimentos de  $8,57 \text{ hm}^3$ .

El tramo entre el PK 29 y el PK 55 es el que concentra la mayor parte de la deposición de sedimentos. La mayor parte de los años la cola del embalse llega hasta el dique de Caspe y es la zona donde se produce la decantación más efectiva. Se aprecia una sección transversal en forma de V muy tendida con un gran espesor de sedimentos, de casi  $2 \text{ hm}^3$  por cada km de embalse. La acumulación estimada de sedimentos en esta zona es de  $47,14 \text{ hm}^3$ .

El último tramo comprende del PK 55 hasta la presa. En él el río va muy encajado en una garganta de laderas escarpadas y sólo se aprecia acumulación de 3 a 5 m de sedimentos en el fondo del cauce. En esta zona se estima una acumulación de sedimentos de  $21,26 \text{ hm}^3$ .

El cálculo del volumen de sedimentos se dividió en dos partes. En la primera parte, basada en la nivelación de precisión, se trabajó con perfiles cada 20 m. En la segunda parte, basada en la batimetría de 2008, se trabajó con perfiles cada 5000 m. El análisis es muy prolijo para poder ser reproducido en este informe. Por ello, se presenta la tabla siguiente, donde se consignan los resultados en ambos informes cada 5000 m.

En total, la estimación de volumen de sedimentos en el vaso de Mequinenza es de  $76,888 \text{ hm}^3$ . Además de esta estimación, el trabajo presenta un análisis cualitativo de la dinámica de sedimentos en el vaso del embalse, ilustrado por fotografías tomadas en las zonas que quedaron al descubierto en 2012. En ellas se aprecian muchas zonas donde, a pesar de darse las circunstancias favorables para la decantación, no se ha detectado acumulación significativa de sedimentos en los años en que el embalse lleva en explotación. En el estudio se concluye que hay muchas zonas del embalse donde los sedimentos se encuentran en aparente equilibrio, ya que no son erosionados y no se ha encontrado evidencia de su acumulación en ningún lugar.



Tabla 1.5. Cálculo del volumen de sedimento acumulado en el embalse de Mequinenza en el estudio de COC.

Perfil	Tasa erosión (m <sup>3</sup> /m)	Tasa depósito (m <sup>3</sup> /m)	Distancia (km)	Distancia Acumulada a presa (km)	Distancia Acumulada a cola (km)	Volumen parcial erosión (hm <sup>3</sup> )	Volumen parcial depósito (hm <sup>3</sup> )	Volumen erosión desde cola (hm <sup>3</sup> )	Volumen depósito desde cola (hm <sup>3</sup> )
PK-15				91.0	15.0	0.003	0.000	0.003	0.000
PK-20.24	4.60	74	5.24	85.8	20.2	0.341	0.389	0.344	0.389
PK-25	0.11	416	4.76	81.0	25.0	0.047	1.980	0.391	2.368
PK-30	0.15	1528	5	76.0	30.0	0.232	7.639	0.623	10.008
PK-35	0.16	1262	5	71.0	35.0	0.200	6.312	0.824	16.320
PK-40	0.19	2310	5	66.0	40.0	0.442	11.549	1.266	27.869
PK-45	0.17	2027	5	61.0	45.0	0.348	10.134	1.614	38.002
PK-50	0.05	1940	5	56.0	50.0	0.106	9.699	1.720	47.702
PK-55.36	0.01	1487	5.36	50.6	55.4	0.012	7.970	1.732	55.672
PK-55	0.00	1971	1	51.0	55.0	0.000	1.971	1.732	57.643
PK-56.7	0.00	467	1.7	49.3	56.7	0.000	0.795	1.732	58.437
PK-57.6	0.00	1917	0.9	48.4	57.6	0.000	1.726	1.732	60.163
PK-60	0.00	790	2.4	46.0	60.0	0.000	1.895	1.732	62.058
PK-65	0.00	227	5	41.0	65.0	0.000	1.133	1.732	63.190
PK-70	0.00	285	5	36.0	70.0	0.000	1.425	1.732	64.615
PK-75	0.00	250	5	31.0	75.0	0.000	1.250	1.732	65.865
PK-80	0.00	258	5	26.0	80.0	0.000	1.290	1.732	67.155
PK-85	0.00	282	5	21.0	85.0	0.000	1.408	1.732	68.563
PK-90	0.00	235	5	16.0	90.0	0.000	1.175	1.732	69.738
PK-95	0.00	381	5	11.0	95.0	0.000	1.903	1.732	71.640
PK-100	0.00	590	5	6.0	100.0	0.000	2.950	1.732	74.590
PK-105	0.00	71	5	1.0	105.0	0.000	0.356	1.732	74.947
PK-105.5	0.00	718	0.5	0.5	105.5	0.000	0.359	1.732	75.305
PK-106	0.00	3165	0.5	0.0	106.0	0.000	1.583	1.732	76.888

### 3. Trabajos publicados por la comunidad científica

En este apartado se revisan los trabajos más importantes que han sido publicados por la comunidad científica con relación al tránsito sedimentario en el bajo Ebro. Se trata de un tema que con frecuencia ha centrado la atención de los investigadores desde la última década del siglo XX. La presentación de la literatura recopilada y revisada se ha estructurado agrupando los resultados obtenidos por los principales grupos de investigación que han trabajado sobre el tema:

- Grupo de investigación en dinámica fluvial de la Universidad de Lérida
- Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña
- Programa de aguas marinas y continentales del IRTA
- División de erosión y sedimentación del Centro de Estudios Hidrográficos
- Instituto de Ciencias del Mar del CSIC

Seguidamente se analizan los trabajos publicados por estos grupos de investigación que han trabajado sobre el tema.

#### 3.1 Grupo RIUS de la Universidad de Lérida

El Grupo de Investigación en Dinámica Fluvial liderado por el Prof. Ramón Batalla ha realizado numerosas investigaciones sobre el tránsito sedimentario en el bajo Ebro. Gran parte de su trabajo se ha centrado en el análisis de la influencia del sistema de presas MRF sobre el comportamiento hidrológico, mecánico y ecológico del tramo del Ebro situado aguas abajo. Uno de los fines perseguidos ha sido definir un régimen de crecidas controladas que permitan controlar el crecimiento de la vegetación acuática y restaurar el tránsito de sedimentos del curso bajo del río.

A continuación, se presenta la documentación recopilada.

##### ***Batalla, 2003***

*Batalla RJ (2003): Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain. Rev. C. & G., 17 (3-4): 79-91.*

Revisión del déficit de sedimento ocasionado por las presas y la extracción de áridos. Se discuten las causas y los efectos del déficit de sedimento con ejemplos del NE de España. A largo plazo se proponen programas de control de sedimento en sistemas fluviales. A corto plazo se propone la prohibición de extracción de áridos en tramos deficitarios y la gestión de sedimento en embalses durante las crecidas.

##### ***Batalla et al., 2004***

*Batalla RJ, Kondolf GM, Gomez CM (2004): Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin, NE Spain. Journal of Hydrology 290: 117-136*

Análisis de las alteraciones del régimen hidrológico aguas abajo de los embalses de la cuenca del Ebro. Se estudian 38 estaciones de medida en 22 ríos. Se obtiene una reducción del régimen de crecidas. No se observan tendencias en escorrentía anual, pero sí una reducción de la variabilidad del caudal diario.

#### ***Vericat y Batalla, 2004***

*Vericat D, Batalla RJ (2004): Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro. Revista C&G, 18 (1-2), pp 37-50.*

Se estudia la alteración del régimen de crecidas por las presas y el consiguiente ajuste del balance sedimentario y la morfología del río Ebro aguas abajo de Flix. Se utilizan datos hidrológicos, trabajos de campo y fotografías aéreas. La capacidad de transporte de sedimentos se estima a partir del caudal mediante las fórmulas de Schoklitsch y Engelund y Hansen, que corresponde a carga de fondo. Antes de la construcción de embalses se estima una carga de sedimentos de 15 Mt/año, de los que se supone el 10% corresponden a carga de fondo. La disminución de magnitud de las crecidas ha reducido la capacidad de transporte del río, pasando de 0,4 Mt/año entre 1950 y 1975 a 0,1 Mt/año en la década de los noventa. El río ha respondido a esta situación con cambios morfológicos.

#### ***Vericat y Batalla, 2005***

*Vericat D, Batalla RJ (2005): Sediment transport in a highly regulated fluvial system during two consecutive floods (lower Ebro River, NE Spain). Earth Surface Processes and Landforms 30:255–272*

Se midió el caudal y el transporte de sedimentos (carga de fondo y suspensión) aguas arriba (Zaragoza y Sástago) y aguas abajo (Ascó, Mora de Ebro y Tortosa) de las presas en dos avenidas consecutivas en el bajo Ebro, en febrero y marzo de 2003. La carga en suspensión fue de 1,7 Mt, que correspondía casi al 99% de la carga total. La concentración media fue de 500 mg/l. La carga total aguas abajo de las presas fue un orden de magnitud menor (0,173 Mt), con concentraciones de 50 mg/l. En los tramos posteriores, el río movilizó 0,35 Mt, que no fueron reemplazados por sedimento proveniente de aguas arriba, sino que provocaron una incisión de 0,33 mm en los 27 km de río analizados.

#### ***Batalla et al, 2006***

*Batalla RJ, Vericat 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: 37-44.*

Describe el transporte de sedimento que tuvo lugar durante la crecida controlada de noviembre de 2003 en el río Ebro, que tuvo dos puntas. El objetivo era la eliminación del exceso de vegetación aguas abajo de las presas. Se apreció movimiento de gravas, pero no se produjo incisión porque la duración fue breve. Se consiguieron los objetivos de gestión sin producir impactos geomorfológicos negativos.

#### ***Vericat, 2006***

*Vericat D (2006): Sediment Transport and Processes in a Highly Regulated River. The Lower Ebro, NE Iberian Peninsula. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida.*

Presenta el estudio del transporte de sedimentos en el río Ebro en dos años hidrológicos representativos: 2002-2004. La carga total aguas arriba de las presas MRF es 1,64 Mt/a, con el 99% de carga en suspensión. La carga media anual aguas abajo de las presas es 0,45 Mt/a, con el 60% de la carga en suspensión y el 40% carga de fondo. Los embalses retienen el 95% del sedimento transportado en suspensión por el río. La carga actual representa el 3% de lo que se transportaba al principio del siglo XX. En la actualidad casi todo el transporte de sedimentos del curso bajo proviene del lecho del río, originando una incisión de 30 mm/a. El transporte es especialmente intenso en avenidas. Durante las de febrero y marzo de 2003 se transportaron 1,7 Mt con una concentración media de 500 mg/l. El lavado originado por la erosión del material más fino dio lugar a un fenómeno de acorazamiento del lecho. También se han observado cambios morfológicos en el río a lo largo del siglo XX.

#### ***Vericat et al., 2006***

*Vericat D, Batalla RJ, Garcia C (2006) Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: the lower Ebro. Geomorphology 76: 122–136*

Se describe el proceso de rotura y restablecimiento de la capa de acorazamiento del lecho observado durante crecidas en el bajo Ebro (Flix-Mora de Ebro) en el periodo 2002-2004. Se tomaron muestras del material del lecho en varias barras expuestas con vegetación escasa. También se tomaron muestras de la carga de fondo en Mora de Ebro. Se observó una alternancia entre la capa de acorazamiento del lecho con caudales bajos y situaciones de caudales altos, donde se rompía el acorazamiento y se producía arrastre de material, provocando incisión.

#### ***Vericat y Batalla, 2006***

*Vericat D, Batalla RJ (2006): Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula. Geomorphology 79: 72–92*

Se estudia el transporte de sedimentos en el Bajo Ebro durante la campaña de toma de datos en el periodo 2002-2004. Se midió la carga de fondo y la carga en suspensión aguas arriba y aguas abajo de Mequinenza-Ribarroja. Aguas arriba de Mequinenza se estimó una carga de sedimentos de 1,64 Mt/año, de los que el 99% se transportaba en suspensión. La carga aguas abajo de las presas se estimó en 0,45 Mt/año, de los que el 60% se transporta en suspensión y el 40% como carga de fondo. Se estima una retención en las presas del 90% de la carga en suspensión y el 100% de la carga de fondo. El sedimento que se transporta aguas abajo procede de la erosión del fondo del cauce y las riberas, originando una incisión de 30 mm/año. Esta incisión continuará a menos que se adopten medidas para evitarlo.

#### ***Vericat y Batalla, 2007***

*Vericat D, Batalla RJ (2007): Transport de sediments i processos morfosedimentaris en el tram baix del riu Ebre. Miscel·lània del CERE 18, pp 189-208*

Se presenta el análisis del transporte de sedimentos entre Sástago y Mora de Ebro a partir de las medidas tomadas en el periodo 2002-2004. Aguas arriba de Mequinenza se midió una carga de 3,3 Mt en el periodo de 2 años, de los que el 99% se transportaba en suspensión. Aguas abajo de la presa de Flix se midió una carga de 0,91 Mt/año, de los que el 60% se transporta en suspensión y el 40% como carga de fondo. La diferencia se atribuye a la retención en las presas y a la alteración del régimen hidrológico. El acorazamiento de la capa superior de sedimento se relaciona con el caudal del río. En episodios de caudales altos el material superficial se moviliza y se reduce el

acorazamiento, provocando incisión. Con caudales bajos el material fino es arrastrado y el material grueso remanente produce un efecto de acorazamiento, reduciendo la incisión.

***Balasch et al., 2007***

*Balasch JC, Vericat D, Batalla RJ (2007): Deposición de sedimentos finos durante una crecida en un tramo del Ebro medio. Rev. C & G., 21 (1-2): 41-55.*

Balance sedimentario del tramo Monzalbarba-Sástago (106 km) durante la crecida de febrero de 2003. Se tomaron datos hidrológicos, muestras directas de agua y sedimento en suspensión en cinco secciones de control. El tramo se comportó como sumidero de sedimentos (pérdida del 19%).

***Vericat et al., 2008***

*Vericat D, Batalla RJ, Garcia C (2008): Bed-material mobility in a large river below dams, Geodinamica Acta, 21(1-2), pp 3-10*

Se estudia la movilidad del material del lecho a partir de las medidas tomadas en la campaña 2002-2004 en el tramo del bajo Ebro. Se analizó la granulometría del material, concluyendo que existe una falta de equilibrio entre el material erosionado y el que se transporta desde aguas arriba, debido a la retención originadas en las presas. Las gravas de tamaño medio y grueso (8 a 26 mm) se movilizan en todas las secciones. Sin embargo, las avenidas no pueden movilizar la fracción muy gruesa (mayor de 32 mm), produciendo acorazamiento.

***Batalla et al., 2008***

*Batalla RJ, Vericat D, Palau A (2008): Efectos de las presas en la dinámica geomorfológica del tramo bajo del Ebro. Crecidas controladas. Ingeniería del Agua, 15, pp 243-255*

Proporciona datos de transporte de sedimentos en el bajo Ebro en el periodo 2002-2004. Aguas arriba de Mequinenza 3,28 Mt y aguas abajo de Flix, 0,91 Mt. Se retiene 1,4 Mt/año. Aguas abajo de Flix se produce una exportación neta de 0,18 Mt/año, lo que origina una incisión de 30 mm al año. Todavía no se ha alcanzado el equilibrio. Las crecidas controladas permiten mantener la capacidad de regeneración del cauce.

***Batalla y Vericat 2009***

*Batalla RJ, Vericat D (2009): Hydrological and sediment transport dynamics of flushing flows: implications for river management in large Mediterranean rivers. River Research and Applications 25, pp 297-31*

Se describe la hidrología y el transporte de sedimento durante las crecidas controladas en el río Ebro desde 2003. Se trata de un importante instrumento de gestión fluvial. Mediante esta práctica los macrófitos se reducen hasta un 95%. Las crecidas controladas son más efectivas que las naturales en el transporte de sedimentos. La concentración de sedimento es el doble, aunque su caudal es menor. Constituyen una opción para proporcionar sedimento al Delta.

***Batalla y Vericat, 2011a***

*Batalla RJ, Vericat D (2011a): An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro Basin. Journal of Soils and Sediments, 11, pp 1070-1081*

Se presenta una estimación del aporte de sedimentos en la Cuenca del Ebro durante el siglo XX, a partir de los datos de acumulación en embalses. La sedimentación en embalses es de 670 Mt. En Mequinenza se estiman 5,8 hm<sup>3</sup>/año y en Ribarroja, 0,94 hm<sup>3</sup>/año. Utilizan una densidad entre 1.1 t/m<sup>3</sup> y 1.56 t/m<sup>3</sup>. La tasa de producción de sedimentos antes de la construcción de embalses se estima en 20 Mt/año.

#### **Batalla y Vericat, 2011b**

*Batalla RJ, Vericat D (2011b): Hydrology and Sediment Transport. The Ebro River Basin, D. Barcelo and M. Petrovic (eds.), Handbook of Environmental Chemistry 13: 21–46*

Presenta un resumen de las observaciones hidrológicas y de transporte de sedimentos en el curso bajo del Ebro. Los embalses y cambios de uso del suelo han alterado los patrones de comportamiento hidrológico y sedimentológico y han alterado los procesos geomorfológicos del río. Cita una media de 0,45 Mt/año de carga observada en Mora de Ebro. El curso bajo cede sedimentos actualmente al Delta, por lo que se observa un proceso de erosión, que se contrarresta con un proceso de acorazamiento que facilita la colonización por vegetación acuática.

#### **Batalla y Vericat, 2011c**

*Batalla RJ, Vericat D (2011c): A Review of Sediment Quantity Issues: Examples from the River Ebro and Adjacent Basins (Northeastern Spain). Integrated Environmental Assessment and Management, 7(2), pp 256–268*

El artículo proporciona una panorámica general del problema del déficit de sedimentos en el curso bajo del Ebro. Se estudian los procesos, se caracterizan las consecuencias y se proponen medidas de gestión para mejorar la dinámica morfosedimentaria de los ríos.

#### **Tena et al., 2011**

*Tena A, Batalla RJ, Vericat D, Lopez–Tarazón JA (2011): Suspended sediment dynamics in a large regulated river over a 10-year period (the lower Ebro, NE Iberian Peninsula). Geomorphology 125:73–84*

Se presenta el análisis de la carga de sedimento en suspensión en el bajo Ebro durante el periodo 1998-2008, basado en la medida de caudal y turbidez en Ascó, Pas de l’Ase y Mora de Ebro. La carga media es 0,092 Mt/año, con concentraciones oscilando entre 9 mg/l y 270 mg/l. En algunos casos, las avenidas transportan más del 80% de la carga anual, pero los caudales de magnitud moderada y frecuencia alta (450 m<sup>3</sup>/s) son los que transportan la mayor cantidad de sedimento. Se obtuvo una relación lineal entre concentración de sedimento en suspensión y caudal, lo que permitiría estimar la carga de sedimento en función de la curva de caudales clasificados.

#### **Tena et al., 2012a**

*Tena A, Książek L, Batalla RJ, Vericat D (2012a): Assessing the geomorphic effects of a flushing flow in a large regulated river. River Research and Applications 29, pp 876–890*

Estudio del efecto de las crecidas controladas en el funcionamiento ecológico del tramo bajo del Ebro. Se emplea un modelo hidrodinámico (CCHE2D), comparando sus resultados con observaciones realizadas en la crecida artificial de mayo de 2008, de 13 h de duración y 1350 m<sup>3</sup>/s de caudal punta, que movilizó 3375 t de sedimento. El modelo permitió el estudio detallado de los procesos de erosión y deposición.

#### **Tena et al., 2012b**

*Tena A, Batalla RJ, Vericat D (2012b): Reach-scale suspended sediment balance downstream from dams in a large Mediterranean river. Hydrological Sciences Journal 57, pp 1–19*

Se presenta el balance de sedimento en el bajo Ebro durante el periodo 1998-2008, basado en la medida de caudal y turbidez en Ascó, Pas de l'Ase, Mora de Ebro, Xerta y Tortosa. La carga media en Xerta es 0,12 Mt/año, con una concentración media de 13 mg/l y máxima de 274 mg/l. La mayor parte del sedimento se transporta durante las avenidas. Se constata un proceso de erosión, con pérdida neta de material durante el periodo. Los cauces afluentes intermitentes contribuyeron hasta el 5% de la carga total.

#### **Tena et al., 2013**

*Tena A, Batalla RJ (2013): The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain). Journal of Soils and Sediments 13, pp 966–980*

Se presenta el balance de sedimento en el bajo Ebro durante el periodo 2008-2011, basado en la medida de caudal y turbidez en diez estaciones de la cuenca. Aguas arriba de Mequinenza (Sástago) se estima una carga de 0,6 Mt/año. La carga en el Segre-Cinca es de 0,49 Mt/año, mientras que en el Matarraña se midieron 0,002 Mt/año. La acumulación en el sistema MRF se estimó en 2,3 Mt en el periodo. Aguas abajo de las presas la carga se reduce en un 95% pero se incrementa en el último tramo debido a procesos erosivos en el río.

#### **Batalla et al., 2014**

*Batalla RJ, Vericat D, Tena A (2014): The fluvial geomorphology of the lower Ebro (2002-2013): Bridging gaps between management and research. Cuadernos de Investigación Geográfica 40(1): 29-51*

Presenta un resumen de las investigaciones sobre los procesos fluviales del bajo Ebro. La regulación ha alterado el régimen hidrológico y sedimentario afectando al comportamiento físico y biológico del río. El curso bajo está actualmente en desequilibrio porque cede sedimentos al Delta. Las crecidas de mantenimiento muestran una fuerte capacidad de transporte, sugiriendo que podrían ser un método, combinado con otras medidas como inyección de sedimentos, para mejorar el ecosistema, reduciendo la población de macrófitos y aumentando la transferencia de sedimentos al sistema deltaico.

#### **Tena et al., 2014**

*Tena A, Vericat D, Batalla RJ (2014): Suspended sediment dynamics during flushing flows in a large impounded river (the lower River Ebro). Journal of Soils and Sediments 14, pp 2057–2069*

Se estudió la relación entre caudal y carga de sedimentos en seis crecidas controladas en el bajo Ebro. La carga de sedimentos se estimó a partir de las medidas de caudal y turbidez en seis estaciones de medida en el periodo 2008-2011. La relación entre caudal y concentración de sólidos en suspensión se caracteriza por la diferente velocidad de propagación de las ondas de caudal y sedimento. En las secciones de aguas arriba el sedimento generalmente precede al caudal, mientras que 85 km aguas abajo la relación se invierte. La estacionalidad es también importante, con mayor carga de sedimento en otoño que en primavera, debido a la disponibilidad de material.

#### **López-Tarazón et al., 2014**

*López-Tarazón JA, Batalla RJ (2014): Dominant discharges for suspended sediment transport in a highly active Pyrenean river. Journal of Soils and Sediments 14, pp 2019–2030*

Es un estudio de la producción de sedimentos en la cuenca del río Isábena. Se estimó la carga en suspensión midiendo caudal y turbidez en el periodo 2005-2010. La distribución de la carga de sedimentos es bimodal, con una punta correspondiente a caudales bajos y otra a avenidas. Estos resultados están condicionados por las características de la cuenca, con gran potencial erosivo.

***Lobera et al., 2015***

*Lobera G, Besné P, Vericat, D, López-Tarazón, JA, Tena A, Aristi I, Díez JR, Ibisate A, Larrañaga A, Elozegi A, Batalla RJ (2015): Geomorphic status of regulated rivers in the Iberian Peninsula. Science of the Total Environment 508, 101–114.*

Es un estudio de las alteraciones geomorfológicas en 74 emplazamientos fluviales situados en cuatro cuencas de la península ibérica (Ebro, Llobregat, Júcar y Guadalquivir). Se propone un índice de estado geomorfológico del cauce. La alteración producida por la regulación reduce la variabilidad del flujo, lo que origina reducción de la dinámica del sistema fluvial.

***Buendía et al., 2016***

*Buendia C, Herrero A, Sabater S, Batalla RJ (2016): An appraisal of the sediment yield in western Mediterranean river basins. Science of the Total Environment 572: 538-553*

Se han recopilado datos de producción de sedimentos y características de la cuenca en más de 100 cuencas en el oeste del Mediterráneo. Se ha modelado la relación entre las características de las cuencas y la producción de sedimento mediante regresión múltiple. El modelo obtenido presenta gran incertidumbre.

***Lobera et al., 2016***

*Lobera G, Batalla RJ, Vericat D, López-Tarazón JA, Tena A (2016): Sediment transport in two Mediterranean regulated rivers. Science of the Total Environment 540, 101–113*

Se analiza el flujo de sedimentos en los ríos Ésera y Ciurana. Se tomaron medidas de caudal y turbidez entre octubre de 2011 y octubre de 2013, aguas arriba y aguas abajo de los embalses de Barasona y Ciurana. Los embalses reducen el flujo de sedimentos en dos órdenes de magnitud. En Barasona se cita una acumulación de sedimento de 0,3-0,5 hm<sup>3</sup>/año. El vaciado liberó 9 hm<sup>3</sup>.

***Piqué et al., 2016***

*Piqué G, Batalla RJ, Sabater S (2016): Hydrological characterization of dammed rivers in the NW Mediterranean region. Hydrological Processes Journal 30, pp 1691–1707*

Se estudia la alteración del régimen hidrológico producida por los embalses en doce cuencas del NW del Mediterráneo. Se obtiene una reducción del régimen de crecidas y una alteración de los valores mensuales.

***Herrero et al., 2018***

*Herrero A, Vila J, Eljarrat E, Ginebreda A, Sabater S, Batalla RJ, Barceló D (2018): Transport of sediment borne contaminants in a Mediterranean river during a high flow event. Science of the Total Environment 633: 1392-1402*

Se estudió el transporte de contaminantes vinculados al sedimento en un episodio en el río Cinca en noviembre de 2016. Se observó un fenómeno de histéresis en el transporte de sedimentos.



El proceso tiende a desplazar los contaminantes desde los tramos centrales a los tramos bajos del río.

### **3.2 Grupo Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña**

El Instituto Flumen da continuidad al Grupo de Investigación Flumen cuya actividad se inició en la década de los ochenta. Desarrolla su actividad de investigación en las áreas de modelación hidrodinámica e ingeniería hidrológica, incorporando investigadores procedentes de la ingeniería y de las ciencias ambientales. Está liderado por los profesores José Dolz y Joan Armengol, y ha establecido colaboraciones frecuentes con otros muchos grupos de trabajo. Su actividad en el bajo Ebro se ha centrado en el análisis del comportamiento hidrodinámico del río y los embalses, realizando campañas de toma de datos y elaborando modelos numéricos que caracterizan distintos aspectos del movimiento del agua, el transporte de sedimentos y fenómenos térmicos. Sus contribuciones más importantes se presentan a continuación.

#### ***Dolz et al, 1997***

*Dolz Ripollés J, Gómez Valentín M, Nieto Romeral J (1997): El Ebro en el Delta. Revista de Obras Públicas 3368, pp 7-14.*

Es un artículo descriptivo que presenta las características del río Ebro en sus últimos 30 km antes de la desembocadura. El régimen de caudales está alterado por la presencia de embalses y el transporte sólido ha decrecido, originando problemas de estabilidad en el cauce y afectando la dinámica costera. También se ve afectada la cuña salina, que depende en gran medida del régimen de caudales.

#### ***Sánchez Arcilla et al., 1997***

*Sánchez Arcilla A, Jiménez JA, Geronch G, Nieto Romeral J (1997): El problema erosivo en el Delta del Ebro. Revista de Obras Públicas 3368, pp 23-32.*

Se presenta un análisis descriptivo de la dinámica costera en el Delta del Ebro en tres escalas de tiempo: largo plazo, medio plazo y fenómenos episódicos. Se concluye que, si bien pueden apreciarse procesos erosivos locales de cierta magnitud, éstos se compensan con procesos de acumulación en otras zonas, por lo que el sistema puede considerarse en equilibrio a largo plazo.

#### ***Val 2003***

*Val R (2003): Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix en el río Ebro.*

Se estudia la influencia de los embalses y otros factores en el comportamiento térmico de un río, con aplicación al tramo bajo del río Ebro. Desde el punto de vista teórico se formula una ecuación de balance térmico, incorporando el intercambio de calor con el lecho. La tesis se apoya en amplio banco de datos de campo. Las principales conclusiones se refieren el efecto térmico de los embalses, que producen un enfriamiento de unos 4 °C en verano y un calentamiento en invierno, y al efecto regulador que juega el lecho del río, que gana calor durante el día y lo cede durante la noche.

### **Roura 2003**

*Roura M (2003): Incidencia de l'embassament de Mequinenza en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'aigua del riu Ebre. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona*

El objetivo de la tesis era la determinación del efecto del embalse de Mequinenza en el transporte de sólidos en suspensión y la calidad del agua. El transporte en suspensión se caracterizó a partir de una campaña de datos tomados entre noviembre de 1997 y septiembre de 1999. Se estudia el balance de sedimentos en el embalse y su composición química.

### **Palau 2006**

*Palau A (2006): Integrated environmental management of current reservoirs and regulated rivers. Limnetica, 25(1-2): 287-302*

Es un artículo de revisión donde se analizan los principales problemas ambientales identificados en los sistemas río embalse: alteración del régimen de caudales, eutrofización, interrupción del transporte de sedimentos e introducción de especies exóticas. Se plantean estrategias de gestión ambiental encaminadas a atenuar estos problemas aprovechando la capacidad de control que se tiene sobre los caudales y la posibilidad de establecer unos objetivos ambientales para la gestión del embalse.

### **Prats et al., 2007**

*Prats J, Val R, Armengol J, Dolz J (2007): A methodological approach to the reconstruction of the 1949–2000 water temperature series in the Ebro River at Escatrón. Limnetica 26:293–306*

El artículo presenta el procedimiento empleado para la reconstrucción de la serie de temperatura media anual en el río Ebro en Escatrón durante el periodo 1949-2000. Como conclusión se ha estimado un aumento de 2 a 3° en el periodo 1955-2000.

### **Roura et al., 2008a**

*Roura, M.; Jaime, F.; Armengol, J.; Dolz, J. (2008a): Incidencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. VIII Jornadas Españolas de Presas. CNEGP.*

Se presenta el trabajo realizado a partir de la campaña de campo que tuvo lugar entre noviembre de 1997 y diciembre de 1999 en el tramo del río Ebro comprendido entre Escatrón y Ribarroja. Se tomaron automáticamente muestras de agua cada 12 horas en cinco puntos, en los ríos Ebro (Escatrón, Mequinenza y Ribarroja), Cinca (Fraga) y Segre (Serós). En las muestras de agua se determinó la concentración de sólidos en suspensión y se analizó su composición química. Se midió una retención de sedimentos del 95% en Mequinenza y del 41% en Ribarroja. Se comprobó que la calidad del sedimento en suspensión se ve alterada a su paso por el embalse, incrementado la fracción orgánica.

### **Roura et al., 2008b**

*Roura, M.; Armengol, J.; Jaime, F.; Dolz, J. (2008b): Incidencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. Ingeniería del Agua 15(4): 221-229.*

Este artículo describe el mismo trabajo que la comunicación anterior.

***Bladé et al., 2010***

*Bladé Castellet E, Arbat-Bofill M, Sánchez-Juny M, Dolz Ripollés J, Cobos Campos G, Polanco Fernández, L (2010): Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro) XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta Del Este, Uruguay*

Se presenta un modelo numérico del transporte en suspensión en el río Segre en la cola del embalse de Ribarroja. El modelo se calibró mediante la comparación de las batimétricas de 2007 y 2008. Con ayuda del modelo se analizaron varias alternativas de actuación propuestas para el río Segre.

***Prats, 2011***

*Prats J (2011): El règim tèrmic del tram inferior de l'Ebre i les seues alteracions. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.*

Se estudia el régimen térmico del tramo inferior del Ebro entre Escatrón y Miravent. Para ello se realiza un examen de las medidas in situ de temperatura y nivel de agua, se reconstruye la serie de temperatura media anual a partir de datos de temperatura y se elabora un modelo numérico que tiene en cuenta los procesos de transporte e intercambio de calor entre el agua del río y el medio. También se realiza un análisis numérico del embalse de Ribarroja mediante el modelo DYRESM. La temperatura en Escatrón ha aumentado 2,3 °C en el periodo 1955-2000. La central de Ascó produce un incremento de temperatura medio de 3 °C. La explotación hidroeléctrica de los embalses origina cambios bruscos de la temperatura del agua.

***Prats et al., 2011***

*Prats J, Armengol J, Marcé R, Sánchez-Juny M, Dolz J (2011): Dams and reservoirs in the lower Ebro River and its effects on the river thermal cycle. In: Barceló D, Petrovich M (eds) The Handbook of Environmental Chemistry, vol 13. The Ebro River Basin. Springer, Berlin, pp 77-95*

Se estudia el efecto que tienen los embalses y las derivaciones sobre la temperatura del agua en el curso bajo del Ebro. Presenta un estudio interesante de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja, donde los flujos de agua dependen del estado de estratificación térmica del embalse y de la influencia del embalse de Mequinenza sobre la temperatura del agua del Ebro. En invierno y comienzo de primavera el agua está mezclada, pero en el resto de la primavera y el verano las aguas precedentes del Segre circulan sobre las del Ebro, mientras que el final del verano y otoño son las aguas del Ebro las que circulan sobre las del Segre.

***López et al., 2012***

*López P, Dolz J, Arbat M, Armengol J (2012): Physical and chemical characterisation of superficial sediment of the Ribarroja Reservoir (River Ebro, NE Spain). Limnetica, 31 (2): 327-340*

Se estudian las características físicas y químicas del sedimento acumulado en el embalse de Ribarroja a partir de 16 muestras. El sedimento es bastante homogéneo, con mayoría de limos y arcillas y composición formada por carbonatos y silicatos meteorizados, con niveles moderados de nitrógeno y fósforo.

#### **Arbat-Bofill et al., 2014a**

Arbat-Bofill, M.; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Niñerola D.; Dolz, J.; Palau, A. (2014a): *Hydrodynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain): Water temperature, water velocities and water age. River Flow 2014, Schleiss et al. (eds), Taylor & Francis, pp 1737-1744.*

Se presenta un modelo hidrodinámico del embalse de Ribarroja con CE-QUAL-W2, caracterizando su comportamiento en los años 2009 y 2010. El modelo se calibró con datos de una plataforma multiparamétrica instalada en el embalse. El año 2009 fue estable y el embalse mantuvo su estratificación. Sin embargo, durante el año 2010 se produjeron varios episodios que rompieron la termoclina en primavera y dio lugar a dos episodios de estratificación. Para caudales superiores a 80 m<sup>3</sup>/s el tiempo de viaje de la onda se estimó en 2-3 días, aunque resulta sensible a la estructura térmica del embalse. Con ayuda del modelo se construyó un gráfico de la edad del agua en función de la profundidad y del tiempo.

#### **Arbat-Bofill et al., 2014a**

Arbat-Bofill, M.; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Niñerola D.; Dolz, J. (2014b): *Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain). Reservoir Sedimentation, Schleiss et al. (eds), Taylor & Francis, pp 99-107.*

Presenta el análisis del movimiento del sedimento durante una crecida en la cola de Ribarroja. El estudio se basa en un modelo hidrodinámico (Iber) y la comparación entre las dos campañas batimétricas de 2007 y 2008. Se obtuvo que 170.000 m<sup>3</sup> de sedimento presente en la cola se desplazaron unos 4 km aguas abajo.

#### **Prats et al., 2014**

Prats J, Morales-Baquero R, Dolz J, Armengol J (2014): *Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. Ingeniería del Agua 18.1: 83-97*

Se plantean posibles aportaciones de la limnología para adaptar la gestión de los embalses al cumplimiento de objetivos ambientales. Como punto de partida se identifican los retos principales a los que se enfrentan los gestores de embalses: modificación de caudales, eutrofización, interrupción del transporte de sedimentos, introducción de especies exóticas e invasoras, modificación del régimen térmico fluvial y cambio climático. A continuación, se presentan estrategias de gestión ambiental en función de la escala temporal y espacial de gestión. Finalmente, se comentan cuestiones metodológicas relacionadas con la clasificación de embalses y la modelación numérica de su comportamiento.

#### **Arbat-Bofill, 2015**

Arbat-Bofill M (2015): *Distribución de Temperatura y Velocidad en Embalses. Análisis numérico-experimental aplicado a los embalses de Sau (Ter) y Ribarroja (Ebro). Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.*

Se presenta un estudio del comportamiento hidrodinámico y térmico de los embalses de Sau y Ribarroja, realizado mediante la combinación de una campaña de toma de datos de campo y modelación hidrodinámica 2D (CE-QUAL-W2) y 3D (FreeFlow).

### ***Prats et al., 2015***

*Prats Rodríguez J, Val Segura R, Arbat-Bofill M, Martí Cardona B, Ninyerola Chifoni D, Armengol Bachero J, Dolz Ripollés J (2015): Trabajos de seguimiento de la temperatura del agua en el curso inferior del río Ebro (España), 1<sup>er</sup> Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología, Querétaro, México.*

Se describen los trabajos realizados para caracterizar el régimen térmico del río Ebro entre Escatrón y Tortosa. Se combinó la información procedente de sensores de temperatura en el río con la proporcionada por estaciones meteorológicas. Los aspectos más interesantes son el efecto del embalse de Mequinenza y la refrigeración de la central nuclear de Ascó. Mientras que el efecto de la refrigeración es siempre positivo, la inercia térmica de Mequinenza origina un descenso de temperatura en primavera y verano y un incremento en otoño e invierno, llegando a cuantificarse su impacto en 6 °C.

### ***Ribé Forn et al., 2017***

*Ribé Forn M, Bladé Castellet E, Dolz Ripollès, J (2017): Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón. Jornadas de Ingeniería del Agua, Coruña.*

Se presenta un modelo numérico (Iber) del transporte en suspensión en el río Ebro en Castejón. Se realizaron dos batimetrías en el tramo entre enero y marzo de 2015, antes y después de una avenida de consideración, de caudal punta próximo a 2500 m<sup>3</sup>/s. La comparación de batimetrías permitió estimar las zonas de erosión y sedimentación y calibrar el modelo. Una vez ajustado, el modelo pudo reproducir los fenómenos observados más importantes, demostrando su utilidad para estudiar este tipo de procesos.

## **3.3 Programa de aguas marinas y continentales del IRTA**

El programa de Aguas Marinas y Continentales del IRTA investiga los procesos fluviales, estuarios, deltaicos y costeros, centrandó su actividad en los ríos, las zonas húmedas (Delta del Ebro) y las lagunas costeras. Realiza investigaciones sobre la gestión sostenible de los recursos hídricos, los recursos de pesca y acuicultura y las interacciones entre la agricultura y la biodiversidad, así como la conservación de especies protegidas y la restauración de áreas naturales. También estudia los efectos de la contaminación, los peligros naturales, incluido el fitoplancton tóxico, el uso intensivo de agua y las especies invasoras. Su actividad en el bajo Ebro se inició con la tesis doctoral de Carles Ibàñez, que en la actualidad dirige esta línea de trabajo. Incluimos en este grupo también a los investigadores del Departamento de Ecología de la Universidad de Barcelona, liderado por el profesor Narcis Prat, que han colaborado ocasionalmente con el IRTA. Las principales aportaciones localizadas son las siguientes:

### ***Prat et al., 1988***

*Prat N, Muñoz I, Camp J, Comin FA, Lucena JR, Romero J, Vidal M (1989) Seasonal changes in particulate organic carbon and nitrogen in the river and drainage channels of the Ebro Delta (N.E. Spain). Verh. Internat. Verein. Limnol, 23, pp 1344-1349.*

Se utilizan los datos recopilados por Isabel Muñoz para realizar un estudio del flujo de nutrientes en el curso bajo del Ebro, aunque se centra fundamentalmente en el análisis del contenido orgánico.

### ***Muñoz y Prat, 1989***

*Muñoz, I. y Prat, N. (1989): Effects of river regulation on the lower Ebro river. Regulated Rivers, 3, pp 345-354.*

Se presenta el seguimiento realizado en el tramo bajo del río Ebro en los años 1986 y 1987. El objetivo era la descripción del transporte de sedimento orgánico e inorgánico y su variación estacional. Se tomaron muestras del sedimento en suspensión en superficie y en profundidad en cuatro puntos aguas abajo de Xerta con frecuencia mensual o bimensual. Se caracteriza el efecto de la regulación sobre la composición química del sedimento, detectando un alto contenido en nutrientes que da lugar a una elevada producción de biomasa en el tramo bajo del río, especialmente en verano. El artículo presenta una figura donde se compara la distribución mensual de concentración de sólidos en suspensión en tres periodos (1961-63, 1972-80 y 1980-87), pero no se indica la fuente de datos. En la figura se aprecia una reducción de concentraciones medias de unos 100 mg/l en el primer periodo a unos 10 mg/l en el último periodo.

### ***Ibàñez, 1993***

*Ibàñez, C. (1993): Dinàmica hidrològica i funcionament ecològic del tram estuari del Ebre. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.*

Se estudia el tramo bajo del río Ebro con la finalidad de caracterizar el funcionamiento hidrológico y ecológico del sistema de estuario. El régimen hidrológico y la estratificación de la cuña salina determinan las características de los procesos físico-químicos observados, la producción biológica y la composición específica del tramo en el espacio y en el tiempo. Se establecen relaciones entre la dinámica hidrológica de la cuña salina y la dinámica ecológica del estuario, elaborando un modelo conceptual del funcionamiento hidrológico y ecológico del sistema. El tramo se divide en tres zonas: la desembocadura, donde la cuña salina está presente casi todo el año, la zona fluvio-marina, donde la cuña salina sólo está presente la mitad del año, y la zona fluvio-deltaica, donde la cuña salina permanece sólo uno o dos meses.

### ***Ibàñez et al., 1996***

*Ibàñez C, Prat N, Canicio A (1996): Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. Regulated Rivers: Research and Management, 12, pp 51-62.*

Se realiza un balance de las aportaciones del río Ebro antes y después del desarrollo de la cuenca, indicando que se ha perdido el 29% de la aportación media. Un 74% es atribuible al riego y un 22% a las pérdidas por evaporación en los embalses. Se presenta una recopilación de datos de transporte de sedimentos en el Ebro. Cita una estimación de 30 Mt/año, aunque fija la cifra antes de la construcción de embalses en 10 Mt/año, indicando que se ha reducido a 0,3 Mt/año tras la construcción de Mequinenza. Actualmente oscila entre 0,1 y 0,2 Mt/año.

### ***Ibàñez et al., 1997***

*Ibàñez C, Canicio A, Day JW, Curcó A (1997): Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain. Journal of Coastal Conservation 3, pp 191-202*

Se analiza la problemática del Delta del Ebro. Se estima una elevación del nivel de mar y una subsidencia de 1-2 mm/año, lo que supone una elevación relativa del nivel del mar de unos 3

mm/año. La tasa de deposición es de unos 4 mm/año en las inmediaciones de la desembocadura a inferior a 0,1 mm/año en la marisma y los campos de arroz. Antes de la construcción de las presas, las tasas de deposición en los campos de arroz se estiman en 3-15 mm/año. Sugiere emplear los sedimentos retenidos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja para contrarrestar la subsidencia, estimando que podrían corresponder a 50 cm si se repartieran por la llanura deltaica.

#### **Muñoz, 1998**

*Muñoz, I.: Carbono, nitrógeno y fósforo en la parte baja del río Ebro y en los canales de riego del Delta. Oecología Aquatica 11: 23-53. 1998.*

Se presenta un estudio de la dinámica espacio-temporal de nutrientes en el tramo final del Ebro y en los canales de riego, analizando también la cuña salina. Se incluye un análisis de los sólidos en suspensión en el río, realizado a partir de los datos tomados en la campaña de campo, entre 1986 y 1987 y de datos anteriores de otros autores. Estimó que la concentración de sólidos en suspensión se había reducido un 80% con relación a los valores anteriores a la construcción de los embalses. En los canales de riego encontró que la concentración de material en suspensión total aumenta desde el canal principal hasta su salida a las bahías. El incremento se debe a la fracción de material ultrafino (<50µm) que supone más del 90% del total en casi todos los canales. La concentración del material fino y grueso disminuye respecto de las entradas.

#### **Day et al., 2006**

*Day JW, Maltby E, Ibàñez C: River basin management and delta sustainability: A commentary on the Ebro Delta and the Spanish National Hydrological Plan. Ecological Engineering 26:85-99.*

Se trata de un editorial donde se contribuye a la discusión suscitada por la propuesta de Plan Hidrológico Nacional, abogando por un nuevo enfoque para la gestión integrada y sostenible del agua, reconociendo los requerimientos de la legislación ambiental europea para satisfacer los intereses económicos legítimos a la vez que se mantiene la integridad ambiental y la biodiversidad. Se indica que si se lleva a cabo el Plan Hidrológico Nacional será imposible plantear una gestión sostenible del Delta en un escenario de ascenso del nivel del mar. Se propone la elaboración de un plan alternativo que reconozca las obligaciones de la Convención Ramsar y las conclusiones y recomendaciones de la World Commision on Dams.

#### **Rovira e Ibàñez, 2007**

*Rovira A, Ibàñez C: Sediment Management Options for the Lower Ebro River and its Delta. Journal of Soils and Sediments 7(5), 285-295.*

Se presenta la problemática de la subsidencia del Delta del Ebro y se propone un plan de gestión del sedimento encaminado a compensar los efectos del déficit sedimentario en el Delta. El plan consiste en la retirada de los sedimentos acumulados en los embalses y su transporte hacia la desembocadura y la llanura del Delta. Se propone aplicar el método de lavado en el embalse de Ribarroja, encomendar su transporte al propio río y distribuirlo a la llanura del Delta mediante los canales de riego, señalando que ese era el procedimiento de reparto empleado antes de la construcción de los embalses. Se indica que la cantidad de sedimento que se necesita para evitar la degradación del Delta es diez veces superior al flujo actual, pero también diez veces inferior al flujo que habría en condiciones naturales. Se concluye que la restauración parcial del flujo de sedimentos

en el bajo Ebro es técnicamente posible y ambientalmente deseable, aunque todavía son necesarios más estudios antes de poder poner en marcha el plan.

***Ibàñez et al., 2010***

*Ibàñez C, Sharpe PJ, Day JW, Day JN, Prat N (2010): Vertical Accretion and Relative Sea Level Rise in the Ebro Delta Wetlands (Catalonia, Spain). Wetlands 30, pp 979-988*

Se comparan distintos emplazamientos en el Delta del Ebro para analizar la influencia de la conectividad con el río sobre la tasa de acreción. Los emplazamientos en los que existe interacción con el río mostraron tasas de acreción significativamente mayores que los emplazamientos aislados, pudiendo compensar la tasa prevista de elevación del nivel del mar, estimada en 5-8 mm/a.

***Day et al., 2011***

*Day J, Ibàñez C, Scarton F, Pont D, Hensel P, Day J, Lane R: Sustainability of Mediterranean Deltaic and Lagoon Wetlands with Sea-Level Rise: The Importance of River Input. Estuaries and Coasts 34:483-493.*

Se presenta un estudio de la tendencia a largo plazo de la dinámica de acreción en varios deltas del Noroeste del Mediterráneo. Se midió la acreción vertical y el cambio de elevación vertical en 55 puntos situados en las desembocaduras del Ebro, Ródano y Po y en la laguna de Venecia, encontrando que ambas variables están fuertemente correladas. Se identificaron patrones de comportamiento comunes en las áreas analizadas, que comparten problemas similares. El ascenso esperado del nivel del mar sólo podrá compensarse en las áreas fluviales que reciben aportación de sedimento.

***Ibàñez et al., 2012***

*Ibàñez C, Alcaraz C, Caiola N, Rovira A, Trobajo R, Alonso M, Duran C, Jiménez PJ, Munné A, Prat N (2012): Regime shift from phytoplankton to macrophyte dominance in a large river: top-down versus bottom-up effects. Science of the Total Environment 416, pp 314-322*

Se postula que el río Ebro ha experimentado un cambio de régimen, pasando de un ecosistema dominado por el fitoplancton a un ecosistema dominado por las macrófitas. Se atribuye a un descenso en la disponibilidad de fósforo, que ha reducido el contenido de clorofila del agua, incrementando su transparencia y posibilitando la colonización del fondo por macrófitas.

***Rovira et al., 2012***

*Rovira A, Alcaraz C, Ibàñez C (2012): Spatial and temporal dynamics of suspended load at-a-crosssection: The lowermost Ebro River (Catalonia, Spain). Water Research 46, pp 3671-3681*

Se estudia el comportamiento de la carga en suspensión medida en una sección del río Ebro en Tortosa en el periodo 2007-2009. Se tomaron muestras discontinuas, con periodicidad mensual para caudales inferiores a 600 m<sup>3</sup>/s y periodicidad diaria para caudales superiores a 600 m<sup>3</sup>/s. Se estudiaba la distribución en la sección transversal de la carga orgánica e inorgánica, con la intención de determinar la procedencia de la materia orgánica.



### ***Rovira et al., 2015***

*Rovira A, Ibàñez C, Martín-Vide JP (2015): Suspended sediment load at the lowermost Ebro River (Catalonia, Spain). Quaternary International, 388, pp 188-198*

Se estudia el transporte de sedimentos en el curso bajo del Ebro a partir de datos obtenidos en una sección en Tortosa a lo largo de tres años. Se tomó un total de 448 muestras. A partir de la serie de caudales en Tortosa se determinó la carga en suspensión, que se estimó en 0,08 Mt/año en el periodo 2007-2010. También se reconstruye la serie diaria de carga en suspensión en los últimos 30 años, obteniendo una media de 0,099 Mt/año en 1981-2010. Aproximadamente el 80% del sedimento es inorgánico. Se sugiere un ciclo estacional que produce histéresis en la relación entre caudal y concentración, aunque en los gráficos no se aprecia claramente.

### ***Polo et al., 2016***

*Polo MJ, Rovira A, García-Contreras D, Contreras E, Millares A, Aguilar C, Losada MA (2016): Reservoir impacts downstream in highly regulated river basins: the Ebro Delta and the Guadalquivir estuary in Spain. Proc. IAHS, 373, pp 45–49*

Resumen los efectos de la regulación en las cuencas del Ebro y Guadalquivir. En el Guadalquivir el efecto es un incremento del 1000% de la carga de sedimentos, mientras que en el Ebro se trata de una reducción del 99%. En el Ebro se hace una revisión de la literatura sobre el tema, sin realizar ningún análisis adicional. La diferencia de comportamiento entre las dos cuencas se atribuye fundamentalmente al hecho de que los embalses del Guadalquivir se sitúan en afluentes, mientras que en el Ebro ocupan el cauce principal.

## **3.4 División de Erosión y Sedimentación del CEH**

La División de Erosión y Sedimentación del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX desarrolló un programa de medida de sedimentación en embalses mediante la realización de batimetrías y su comparación con la topografía original del vaso. En este programase realizó el reconocimiento sedimentológico de 121 embalses españoles. Las principales aportaciones localizadas son las siguientes:

### ***Avendaño et al., 1997a***

*Avendaño Salas, C.; Cobo Rayán, R.; Sanz Montero, E.; Gómez Montaña, J.L (1997): Capacity situation in Spanish reservoirs. Proceedings XIX ICOLD World Congress, Q 74, R.53, pp 849-862.*

Se presentan los resultados de los trabajos realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos para el levantamiento batimétrico de vasos de embalse y la estimación de datos de acumulación de sedimentos. Se incluyen tablas de los embalses analizados, clasificados por Confederaciones Hidrográficas. En el Ebro se analizaron 17 embalses, entre los que se encontraban Mequinenza y Ribarroja. En Mequinenza se estimó una acumulación de sedimentos de 92,8 hm<sup>3</sup> entre 1966 y 1982, con una tasa de 5,8 hm<sup>3</sup>/año. En Ribarroja se estimó una acumulación de sedimentos de 12,2 hm<sup>3</sup> entre 1969 y 1982, con una tasa de 0,94 hm<sup>3</sup>/año.

***Avendaño et al., 1997b***

*Avendaño Salas, C.; Sanz Montero, E.; Cobo Rayán, R.; Gómez Montaña, J.L (1997): Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area. Proceedings XIX ICOLD World Congress, Q 74, R.53, pp 863-874.*

Se estudia la relación entre producción anual de sedimentos y cuenca vertiente para los embalses de cabecera analizados por el Centro de Estudios Hidrográficos. En el Ebro se estudian 9 embalses, que corresponden al 12% de la cuenca vertiente. Se obtuvo una tasa media de producción de sedimentos 423 t/km<sup>2</sup>año, con valores en el rango 8,4-1293 t/km<sup>2</sup>año. Se ajustaron modelos de regresión de la producción de sedimentos en función de la cuenca vertiente para tres grupos de datos.

***Sanz Montero et al., 1998***

*Sanz Montero, M.E.; Cobo Rayán, R.; Gómez Montaña, J.L.; Avendaño Salas, C. (1998): Composición de los sedimentos acumulados en embalses españoles. Ingeniería del Agua, 5 (4), pp 21-28.*

Se presenta un análisis de la composición de los sedimentos en 51 embalses españoles. La mayor parte de los sedimentos refleja las características de la cuenca vertiente.

***Avendaño et al., 2000***

*Avendaño-Salas C, Sanz Montero E, Cobo-Rayán R: State of the art of reservoir sedimentation management in Spain. Proceedings of International Workshop and Symposium on Sedimentation Management. 135-1426.*

Se presenta una panorámica general de la situación de sedimentación en los embalses españoles, indicando las medidas de gestión más aplicadas, que se dividen en dos grandes grupos: control de la producción de sedimento en la cuenca y retirada de los sedimentos acumulados en los embalses. La gestión del sedimento en la cuenca incluye tareas de control de la erosión y diques de contención de sedimentos. La retirada se basa en el vaciado de embalses donde el sedimento se ha convertido en un problema para proceder al lavado. Se discute el ejemplo del embalse de Barasona, el primero donde se ha realizado un lavado controlado en España, indicando que la experiencia fue positiva, por lo que se está planteando su aplicación sistemática en otros casos.

***Sanz Montero et al., 1999***

*Sanz M E, Avendaño C, Cobo R (1999). Influencia de los embalses en el transporte de sedimento hasta el Delta del Ebro (España). Proceedings of Hydrological and Geochemical Processes in Large-Scale River Basins, Manaus 1999, p 1-6.*

No se ha podido obtener esta publicación, pero es citada por varios autores indicando que utilizaron una densidad media del sedimento de 1,1 t/m<sup>3</sup> para calcular la aportación de sedimentos en la cuenca a partir de la retención en los embalses.

***Sanz Montero et al., 2001***

*Sanz Montero ME, Avendaño Salas C, Cobo Rayán R (2001): Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo. Revista de la Sociedad Geológica de España, 14(1-2), pp 3-17*

Es una descripción de los efectos morfológicos observados en el tramo aguas abajo del complejo MRF desde la construcción de los embalses. Se constatan: ausencia de sedimentación, degradación de barras, revegetación de barras y orillas y pérdida de sedimentos finos con acorazamiento del lecho. Se indica que la evolución morfosedimentaria del río en las décadas previas a la construcción de las presas estaba controlada por crecidas catastróficas y se señala el ejemplo de la crecida de 1937, con una punta de 10.000 m<sup>3</sup>/s.

### ***Fernández Carrasco, 2003***

*Fernández Carrasco P, Avendaño Salas, C., Cobo Rayán, R. (2003): Gestión comparada de sedimentos en embalses. Proceedings of IWRA XI World Water Congress, Madrid*

Se trata el tema de la gestión de los sedimentos en los embalses. Se realiza una valoración del problema en España, a partir de los datos de acumulación de sedimento anual en embalses. Se plantean alternativas de gestión para la gestión de sedimentos: dragado, excavación, vaciado a través de desagües o túneles de desvío.

### ***Cobo, 2008***

*Cobo, R. (2008): Los sedimentos de los embalses españoles. Ingeniería del Agua, 15 (4), pp 231-241.*

Es una actualización del estudio presentado en 1997, con los nuevos datos disponibles. Los datos de Mequinenza y Ribarroja son los mismos que en el estudio original.

## **3.5 Instituto de Ciencias del Mar de CSIC**

El Instituto de Ciencias del Mar de CSIC realizó en la década de los 90 trabajos de estimación de los aportes sedimentarios al Delta del Ebro y caracterización de su dinámica litoral marina. Los trabajos publicados son los siguientes

### ***Palanques, 1987***

*Palanques (1987): Dinámica sedimentaria, mineralogía, y micro-contaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro. Tesis Doctoral, UPC.*

El objetivo de la tesis es el análisis de la dinámica sedimentaria y el impacto ambiental de la carga sólida en suspensión en el medio marino. Contiene una revisión de literatura de las estimaciones de la carga de sedimentos transportada por el Ebro donde se citan estudios anteriores. En la tesis se hizo una estimación del transporte de sedimentos basado en los datos de Comisaría de Aguas, que medía la carga en suspensión una vez al mes en seis puntos (Sástago, Mequinenza, Ribarroja, Ascó, Xerta y Tortosa). También se midió la carga en suspensión en el río Ebro, pero únicamente en una campaña realizada el 5 y 6 de mayo de 1986, en tres puntos (Xerta, Amposta y desembocadura). En su estudio, Palanques cifra en 4,40 Mt/año la entrada de sedimentos al sistema MRF en el periodo analizado (1983-1986), mientras que en Ascó se estima en 1,21 Mt/año

### ***Nelson 1990***

*Nelson, C.H. (1990): Estimated post-Messinian sediment supply and sedimentation rates on the Ebro continental margin, Spain. Marine Geology, 95, pp 395-418.*

Se estudia la tasa de sedimentos transportada por el río Ebro a lo largo de los últimos 4 millones de años. Para el periodo reciente se obtiene una tasa de 6,2 Mt/año. Se indica que el cambio en los usos del suelo introducido por el hombre ha intensificado la erosión en la cuenca.

***Palanques et al, 1990***

Palanques, A., Plana, F. and Maldonado, A., 1990. Recent influence of man on Ebro margin sedimentation system (Northwestern Mediterranean Sea). *Marine Geology*, 95: 247-263

Realiza un estudio sedimentológico de los arrastres del río Ebro. Indica que la tasa de transporte actual es menos del 5% de lo que era 50 años atrás. La composición del sedimento también ha variado. Ahora tiene más proporción de arcilla, porque sólo las partículas más ligeras superan los embalses. La proporción de metales pesados en el curso bajo es también mucho menor.

***Guillén et al., 1992***

Guillén, J., Díaz, J.I. y Palanques, A. (1992): *Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino.*

Se presenta un estudio de la carga de fondo transportada por el río Ebro a lo largo del siglo XX, estimada a partir de fórmulas empíricas (Meyer-Peter-Muller, Einstein, Bagnold, Yalin, Ackers y White y Van Rijn). Las fórmulas producen un resultado de 1 Mt/año en el primer tercio del siglo (1914-1935), de 0,73 Mt/año en 1950-1970 e inferior a 0,3 Mt/año de 1970 a 1990. Estos cálculos sólo tienen en cuenta la alteración del régimen hidrológico y no reflejan la retención de sedimentos en los embalses o la no disponibilidad de sedimento del tamaño arena en el curso bajo. La capacidad de transporte en la zona litoral se estima en 0,32 Mt/año, lo que indica un déficit sedimentario importante.

***Guillén y Palanques, 1992***

Guillén, J. y Palanques, A. (1992): *Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. Sedimentology* 39, 567-579.

Es un estudio de las condiciones hidrodinámicas que controlan la cuña salina en la desembocadura del Ebro a partir de datos tomados en tres secciones próximas a la desembocadura (Amposta, Deltebre y desembocadura). La concentración de sedimento en suspensión varió entre 5 mg/l y 32 mg/l. Se estima una tasa de transporte de sedimento entre 0,1 y 0,15 Mt/año. Se cita la estimación de Palanques (carga de 20 Mt/año), que equivaldría a una concentración media de 1000 mg/l.

#### 4. Vaciado del embalse de Barasona

El aterramiento del embalse de Barasona y el deterioro de los desagües de fondo obligaron a vaciar el embalse en tres ocasiones para proceder a su reparación: de las 3:00 h a las 20:00 h del día 12 de octubre de 1995, de las 12:15 h del día 1 a las 12:00 h del día 2 de octubre de 1996 y de las 12:00 h del día 3 a las 13:00 h del día 4 de octubre de 1997). El vaciado se realizó contando con la colaboración de un nutrido equipo formado por especialistas en distintos ámbitos con la doble finalidad de minimizar los impactos negativos y monitorizar el proceso para obtener información sobre sus efectos. En octubre de 1997 se organizaron unas jornadas científicas para poner en común las lecciones aprendidas. Las ponencias de dichas jornadas se publicaron en un número especial de la revista *Limnética*, que recopila el estado del conocimiento sobre la materia y documenta las experiencias acumuladas durante el proceso. La tabla 1.6 recoge las ponencias presentadas.

Tabla 1.6. Contribuciones al número especial sobre los vaciados del embalse de Barasona de la revista *Limnética* en 1998.

<b>Autores</b>	<b>Título</b>
Palau A	Estudio limnológico del ecosistema fluvial afectado por los vaciados del embalse de Barasona
Armengol J	Efectos ecológicos del dragado y vaciado del embalse de Barasona
Granado-Lorencio C, Encina I, Escot-Muñoz C, Mellado-Álvarez E, Rodríguez-Ruiz A	Estudio ictiológico en el embalse de Joaquín Costa (río Ésera, Huesca)
Morillo M, García de Jalón D	Efectos del vaciado del embalse de Barasona en las comunidades de peces fluviales
Rosell C, Nadal J, Cahill S, Campeny R, Parpal J, Pedrocchi V, Ruiz-Olmo J	Efectos del vaciado del embalse de Joaquín Costa sobre anfibios, aves y mamíferos vinculados al ambiente de ribera
Alcázar J, Ferrán I	La vegetación de ribera de los ríos Ésera y Cinca en el tramo afectado por el vaciado del embalse de Joaquín Costa
Martínez Casasnovas JA, Poch RM	Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse Joaquín Costa
Navas A, Valero B, Machín J, Walling D	Los sedimentos del embalse de Joaquín Costa y la historia de su depósito
Avendaño C, Cobo R	Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa
Peña Martínez R, Ruiz Verdú A, Serrano Pérez ML	Aplicación de la teledetección al estudio de la difusión de sólidos en suspensión en los sucesivos vaciados de Barasona

A continuación, se resumen los contenidos de los artículos más relevantes para el análisis del flujo sedimentario.

##### *Navas et al., 1998*

*Navas A, Valero B, Machín J, Walling D (1998): Los sedimentos del embalse de Joaquín Costa y la historia de su depósito. Limnética 14, pp 93-112.*

Se realiza un estudio de los sedimentos acumulados en el vaso del embalse de Barasona, estimando las tasas de aterramiento y reconstruyendo su evolución. Los sedimentos acumulados

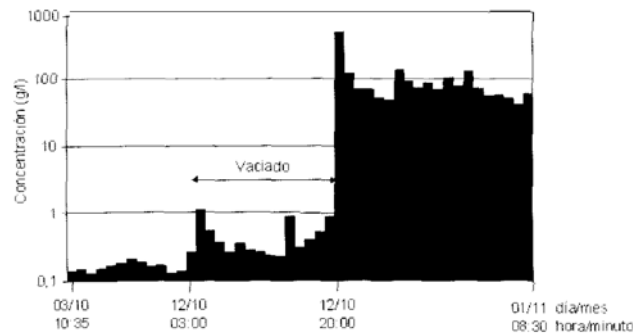
proceden en su mayor parte de episodios de crecidas. Las tasas de sedimentación media observadas son mayores en el delta de cola (10-15 cm/año) y en la zona meridional (11-13 cm/año), aunque estos valores medios han experimentado fuertes oscilaciones. La tasa de deposición en la zona meridional fue inicialmente baja y se incrementó significativamente a partir de los años cincuenta, posiblemente debido al recrecimiento del embalse y al cambio del régimen de explotación. Durante los años sesenta se produjo una disminución del aporte al delta de cola. En las últimas décadas ha aumentado, sin alcanzar los valores previos. En las zonas internas del embalse la tasa de sedimentación parece haber disminuido.

#### ***Avendaño y Cobo, 1998***

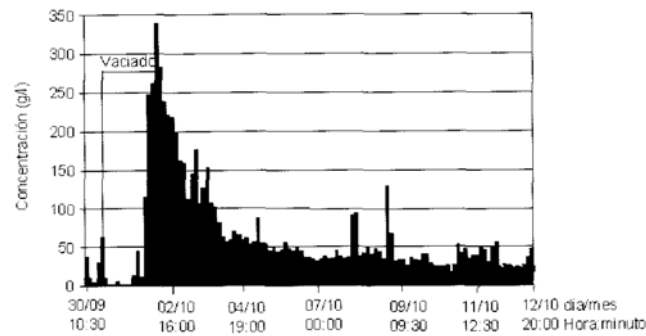
*Avendaño C, Cobo R (1998): Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa. Limnética 14, pp 113-120.*

Describe los trabajos de seguimiento realizados por el Centro de Estudios Hidrográficos. La batimetría realizada antes de los vaciados permitió estimar el volumen de sedimentos acumulados en el embalse en 24,7 hm<sup>3</sup> sobre una capacidad total de 100,7 hm<sup>3</sup>. Una vez finalizadas las operaciones se realizó otra batimetría, donde la acumulación restante de sedimentos se estimó en 15,9 hm<sup>3</sup>. También se realizó un análisis sedimentológico de los lodos, encontrando una textura limo-arcillosa y una composición carbonatada con materiales detríticos. El seguimiento de los sólidos en suspensión se realizó mediante turbidímetro y toma directa de muestras. Se establecieron tres puntos de control, en las inmediaciones de la presa, en el Ésera antes de la confluencia con el Cinca y en el Cinca en el Puente de Las Pilas. Se hizo un seguimiento de las operaciones de dragado previas al vaciado y de los tres vaciados realizados.

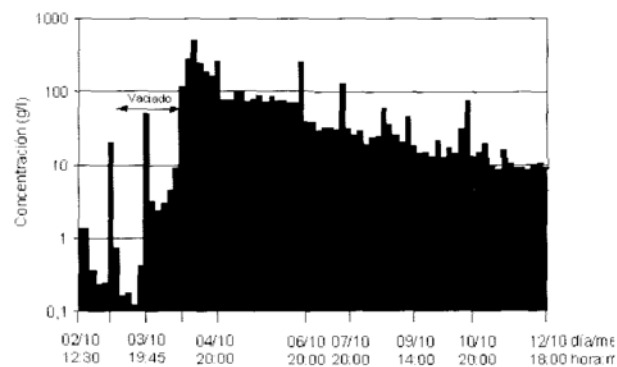
En la figura 1.2 se muestran las concentraciones medidas inmediatamente aguas abajo de la presa. Se alcanzaron concentraciones superiores a los 100 g/l en los tres vaciados, con picos de 492 g/l en el primer vaciado (la medida se interrumpió porque la colada de barro anegó el cauce del río), de 339 g/l el segundo vaciado y de 500 g/l el tercer vaciado.



**Figura 6.** Vaciado de 1995. Concentración de sólidos en suspensión en el punto de control nº1 (Pasarela, río Ésera). *Dam flushing of 1995. Concentration of suspended solids in the check point nº 1 (Pasarela, river Ésera).*



**Figura 8.-** Vaciado de 1996. Concentración de sólidos en suspensión en el punto de control nº1 (Pasarela, río Ésera). *Dam flushing of 1996. Concentration of suspended solids in the check point nº 1 (Pasarela, river Ésera).*



**Figura 10.-** Vaciado de 1997. Concentración de sólidos en suspensión en el punto de control nº 1 (Pasarela, río Ésera). *Dam flushing of 1997. Concentration of suspended solids in the check point nº 1 (Pasarela, river Ésera).*

Figura 1.2. Concentraciones medidas aguas abajo de la presa de Barasona en los tres vaciados realizados. Tomada de Avendaño et al., 1998.

**Peña et al., 1998**

Peña Martínez R, Ruiz Verdú A, Serrano Pérez ML (1998): *Aplicación de la teledetección al estudio de la difusión de sólidos en suspensión en los sucesivos vaciados de Barasona. Limnética 14, pp 121-127.*

Se presenta el estudio del transporte de sedimento en suspensión en los ríos Ésera, Cinca y Segre como consecuencia del vaciado de Barasona. Se aplicaron técnicas de teledetección para el seguimiento del proceso, produciendo mapas de sólidos en suspensión que permiten apreciar la extensión de zonas afectadas y la concentración de sólidos. El procedimiento se calibró mediante muestras tomadas en varios puntos. Se constató que la mayor concentración se produjo como consecuencia del primer vaciado en octubre de 1995, estimando concentraciones de unos 8000 mg/l. En los vaciados de 1996 y 1997 las concentraciones estimadas fueron menores, sobre 2500 mg/l (Figura 1.3). También se llegó a la conclusión de que los sedimentos en suspensión transportados acabaron depositándose en el embalse de Ribarroja.

**Tabla 3.** Reaunien de rangos de sólidos en suspensión (concentración en mg/l) obtenidos de los mapas temáticos. *Ranges of suspended solids concentrations (in mg/l) obtained from the thematic maps.*

ZONA / FECHA	27.09.95	16.10.95	28.11.95	25.09.96	10.10.96	30.09.97	08.10.97
Embalse Barasona	3.7			133.7		4.2	
Azud El Ciego	10.8	8242.4	6366	106.2	2463.5	1.6	1203.7
Zona de Monzón	17.5	7893.2	4036.4	98.5	2448.7	19.6	2728.4
Fraga - Río Cinca	49	6936.4	8816	61	2335.5	76.2	1856.8
Fraga - Río Segre	92.7	30.2	208.4	19.6	115.1	12.5	36
Ribarroja - Segre			136.5	28.8	43.7	25	63.8
Ribarroja - Ebro			24.2	7.8	11.6		3.2
Unión Ebro-Segre			30.3	16.5	24.1		8.8

Figura 1.3. Concentraciones de sólidos en suspensión estimadas a partir de teledetección. Tomada de Peña et al., 1998.

**Palau, 1998**

Palau A (1998): *Estudio limnológico del ecosistema fluvial afectado por los vaciados del embalse de Barasona. Limnética 14, pp 1-15.*

Se presenta un resumen general de los efectos producidos por los tres vaciados del embalse de Barasona, tanto en el vaso del embalse como en el cauce aguas abajo. Se apreció una reducción sustancial del oxígeno disuelto, un fuerte incremento de la concentración de amonio, una reducción moderada del pH y un ligero incremento de la conductividad. Estos efectos, en muchos aspectos similares a los de una gran crecida, se fueron amortiguando a medida que se desciende por el río Ésera. La baja carga orgánica del sedimento del embalse fue un factor favorable, que limitó las consecuencias negativas. En cualquier caso, las afecciones se calificaron como recuperables, como de hecho sucedió, aunque la realización de tres vaciados consecutivos retrasó el proceso de recuperación. La recuperada operatividad de los desagües de fondo permitió establecer un caudal mínimo de circulación en el Ésera que ha mejorado la calidad de agua y ha favorecido el desarrollo de la comunidad bentónica.



## **SEGUNDA PARTE: RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA EN EL SISTEMA MEQUINENZA-RIBARROJA- FLIX**

### **1. Introducción**

En esta parte se presenta y analiza la información recopilada para la caracterización de los flujos hidráulicos y sedimentológicos en el tramo bajo del río Ebro. Se ha recopilado información del Anuario de Aforos, del sistema SAICA, de las presas y de los estudios hidrodinámicos realizados en los embalses del tramo. Inicialmente se presenta una descripción de los datos recopilados. En el Anejo 2 se presentan gráficos ilustrativos del carácter de las series.

## 2. Datos de estaciones de aforo

Se ha recopilado información de las estaciones de aforo en las inmediaciones del sistema MRF (desde Zaragoza a la desembocadura), y de los principales afluentes (Segre, Cinca, Guadalupe y Matarraña). En la figura 2.1 se presenta el emplazamiento de las estaciones de aforo analizadas.

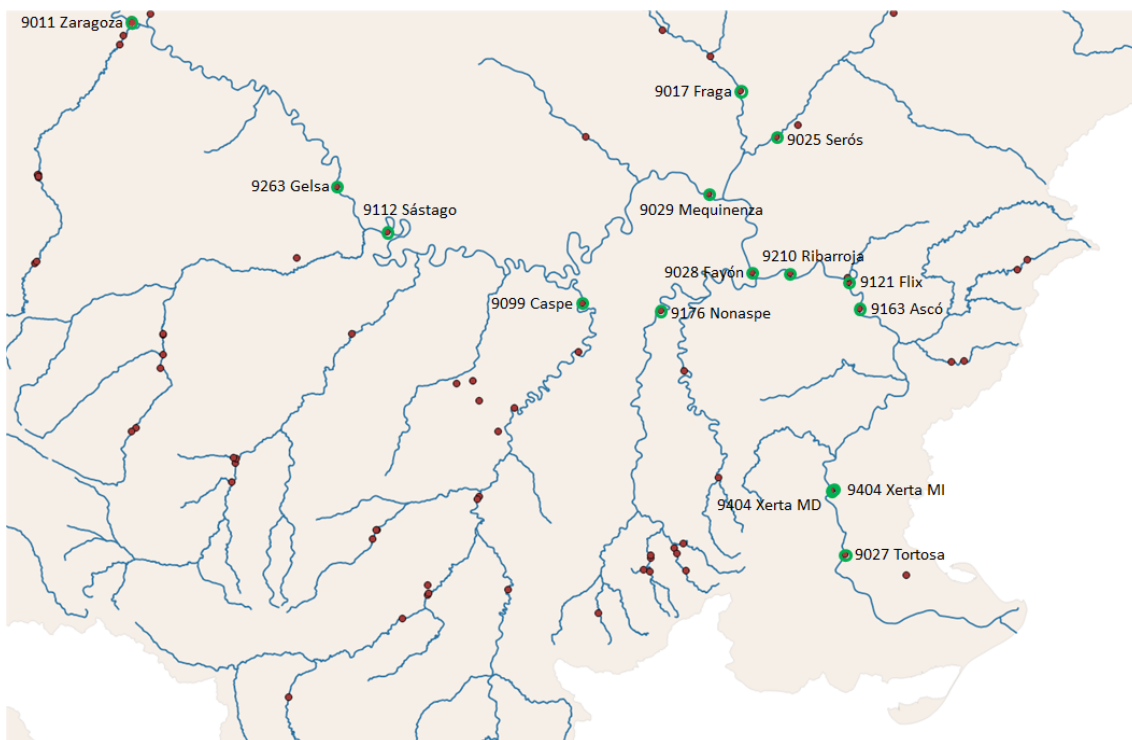


Figura 2.1 Emplazamiento de las estaciones de aforo

### ***Disponibilidad de datos de estaciones de aforo***

Los datos disponibles se resumen en la tabla 2.1, que contiene los códigos de las estaciones, la superficie de cuenca vertiente, el año de principio y final de la serie, los años completos, incompletos y sin datos, y los valores máximo, medio y mínimo de los caudales medios anuales de los años completos de la serie.

Tabla 2.1 Datos de las estaciones de aforo

Código		Denominación	Superficie Cuenca (km <sup>2</sup> )	Año		Número de años				Caudal medio anual (m <sup>3</sup> /s)		
ROEA	SAIH			Inicio	Fin	Total	Comp.	Incomp.	Sin datos	Max	Med	Min
9011	A011	Zaragoza	40434	1912-13	2014-15	103	88	4	11	434.44	222.49	72.38
9263	A263	Gelsa	47133	2010-11	2014-15	5	3	2	0	396.85	320.62	266.79
9112		Sástago	48974	1945-46	1997-98	53	52	1	0	443.00	247.41	81.61
9029		Mequinenza	57442	1916-17	1962-63	47	18	10	19	681.01	444.81	218.30
9028		Fayón	80183	1928-29	1967-68	40	21	9	10	800.52	473.79	119.78
9210		Ribarroja	81060	1980-81	1984-85	5	5	0	0	404.39	338.97	281.81
9121		Flix	82416	1948-49	1991-91	44	41	3	0	826.45	446.25	121.21
9163	A163	Ascó	82245	1984-85	2014-15	31	26	5	0	610.00	319.83	150.01
9027	A027	Tortosa	84230	1912-13	2014-15	103	73	20	10	977.34	421.23	123.48
9017	A017	Fraga	9612	1928-29	2014-15	87	53	12	22	150.49	75.43	15.32
9025	A025	Serós	12782	1925-26	2014-15	90	63	10	17	173.12	82.93	15.69
9099	A099	Caspe	3845	1973-74	2014-15	42	36	6	0	12.27	1.62	0.17
9176	A176	Nonaspe	1260	1973-74	2014-15	42	36	6	0	4.89	1.06	0.10

La disponibilidad de datos se presenta gráficamente en la figura 2.2, donde se han representado en verde los años completos, en rojo los años sin datos y con una graduación de amarillo a rojo los años incompletos.

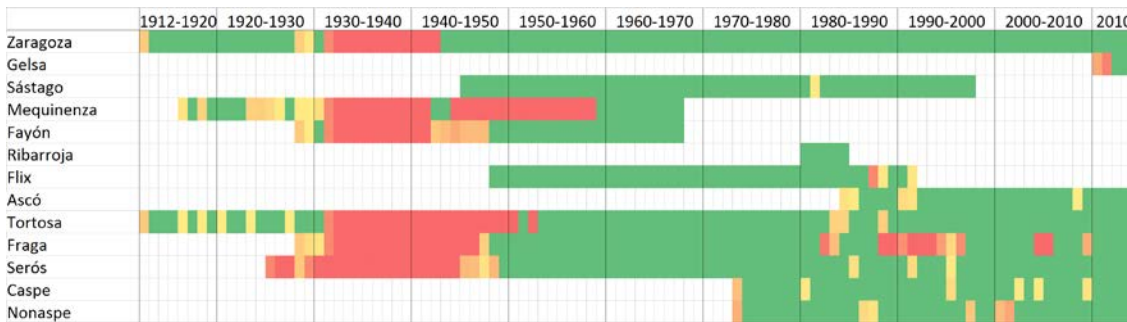


Figura 2.2 Disponibilidad de datos en las estaciones de aforo

Las estaciones de Gelsa y Ribarroja sólo disponen de 5 años de datos, mientras que en Zaragoza y Tortosa se dispone de las series más largas. En la década de 1930 a 1940 prácticamente no se dispone de datos de ninguna estación.

### Gráficos presentados de las estaciones de aforo

En el Anejo 2 se presentan los gráficos elaborados para visualizar la información contenida en las estaciones de aforo. Para cada serie de caudales de la estación de aforo se presentan los siguientes gráficos

Figura 1: Es un gráfico de serie temporal donde se presenta el registro secuencial de valores.

Figura 2: Es un gráfico de serie temporal donde se presenta el detalle de caudales bajos del registro secuencial de valores.

Figura 3: Es un gráfico de barras donde se representan los valores secuenciales de las aportaciones anuales, distinguiendo entre años secos y húmedos, según se encuentren por encima o por debajo de la media de la serie.

Figura 4: Es un gráfico de barras donde se representan los valores secuenciales de las aportaciones mensuales, distinguiendo entre meses secos y húmedos, según se encuentren por encima o por debajo de la media de la serie del mes correspondiente.

Figura 5: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, la serie temporal de valores registrados.

Figura 6: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la serie temporal de valores registrados.

Figura 7: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, el detalle de caudales bajos de la serie temporal de valores registrados.

Figura 8: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, el detalle de caudales bajos de la serie temporal de valores registrados.

Figura 9: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, la curva de caudales clasificados de los valores registrados.

Figura 10: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la curva de caudales clasificados de los valores registrados.

Figura 11: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, el detalle de caudales bajos de la curva de caudales clasificados de los valores registrados.

Figura 12: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, el detalle de caudales bajos de la curva de caudales clasificados de los valores registrados.

Figura 13: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, la curva de aportaciones acumuladas de los valores registrados.

Figura 14: Es un gráfico en cuadro a doble entrada mediante código de color en el que se representa, la distribución de los caudales clasificados de los valores registrados. En el eje horizontal se representa el porcentaje de duración del caudal en cada año y en el eje vertical, el porcentaje de los años de la serie en que se supera el valor.

Figura 15: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la curva de aportaciones acumuladas de los valores registrados.

Figura 16: Es un gráfico en cuadro a doble entrada mediante código de color en el que se representa, el detalle de la distribución de los caudales clasificados de los valores registrados. En el eje horizontal se representa el porcentaje de duración del caudal en cada año y en el eje vertical, el porcentaje de los años de la serie en que se supera el valor.

Figura 17: Es un gráfico donde se representa la función de distribución acumulada de los caudales mensuales, marcando el valor medio y los percentiles de superación del 85, 90 y 95%. Está construido sobre los años completos de toda la serie disponible.

Figura 18: Es un detalle de valores bajos del gráfico anterior, donde pueden apreciarse mejor los percentiles de caudales bajos.

Figura 19: Es un gráfico donde se representa la función de distribución acumulada de los caudales mensuales, marcando el valor medio y los percentiles de superación del 85, 90 y 95%. Está construido sobre los últimos 20 años completos de la serie disponible.

Figura 20: Es un detalle de valores bajos del gráfico anterior, donde pueden apreciarse mejor los percentiles de caudales bajos.

Figura 21: Es un gráfico donde se representa la función de distribución acumulada de los caudales medidos en el periodo húmedo (octubre a mayo) y en el periodo seco (junio a septiembre), marcando el valor medio y los percentiles de superación del 85, 90 y 95%. Está construido sobre los años completos de toda la serie disponible.

Figura 22: Es un detalle de valores bajos del gráfico anterior, donde pueden apreciarse mejor los percentiles de caudales bajos.

Figura 23: Es un gráfico donde se representa la función de distribución acumulada de los caudales medidos en el periodo húmedo (octubre a mayo) y en el periodo seco (junio a septiembre), marcando el valor medio y los percentiles de superación del 85, 90 y 95%. Está construido sobre los últimos 20 años completos de la serie disponible.

Figura 24: Es un detalle de valores bajos del gráfico anterior, donde pueden apreciarse mejor los percentiles de caudales bajos.

### 3. Datos de estaciones de calidad de agua

Los datos de la red de estaciones de alerta de calidad de agua son útiles porque incluyen la medida de la turbidez, que puede emplearse para estimar la carga en suspensión. Por este motivo se ha recopilado información de las estaciones de la red de alerta de calidad de agua en la misma zona en la que se han recopilado los datos de las estaciones de aforo. En la figura 2.3 se presenta el emplazamiento de las estaciones de red de alerta de calidad de agua analizadas.

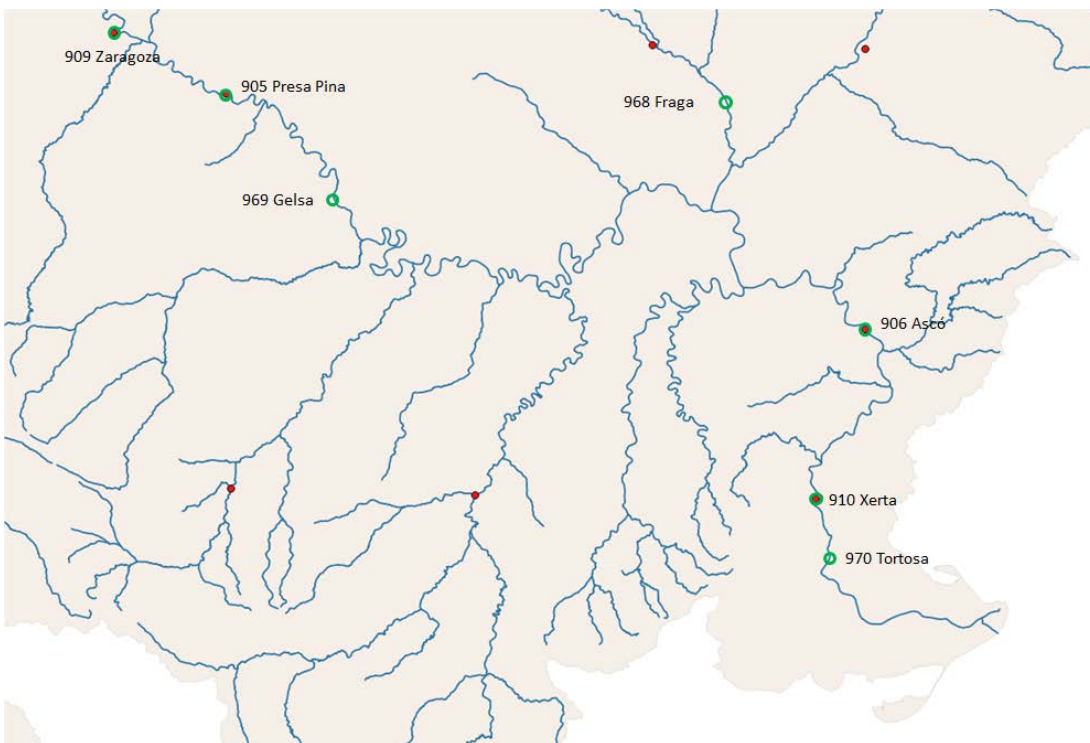


Figura 2.3 Emplazamiento de las estaciones de calidad de agua

#### Disponibilidad de datos de estaciones de calidad de agua

Los datos disponibles se resumen en la tabla 2.2, que contiene los códigos de las estaciones, la superficie de cuenca vertiente, el año de principio y final de la serie, los años completos, incompletos y sin datos, y los valores máximo, medio y mínimo de la turbidez media anual de los años completos de la serie. Dado que la medida de turbidez presenta numerosos fallos, se han considerado años o meses “completos” los que presentan un porcentaje de huecos inferior al 10%.

Tabla 2.2 Datos de las estaciones de calidad de agua

Código	Denominación	Superficie Cuenca (km <sup>2</sup> )	Año Inicio	Año Fin	Número de años			Turbidez media (NTU)			
					Total	Comp.	Incomp.	Sin datos	Max	Med	Min
909	Zaragoza	40434	1995-96	2017-18	23	8	12	3	60.27	42.81	32.21
905	Presa Pina		1995-96	2017-18	23	19	4	0	93.25	43.25	18.61
969	Gelsa	47133	2011-12	2017-18	7	0	4	3	--	--	--
906	Asco	82245	1996-97	2017-18	22	18	4	0	20.52	9.53	3.26
910	Xerta		1995-96	2017-18	23	14	9	0	26.15	13.99	4.37
970	Tortosa	84230	2011-12	2017-18	7	0	6	1	--	--	--
968	Fraga	9612	2011-12	2017-18	7	4	3	0	42.04	21.62	10.94

La disponibilidad de datos se presenta gráficamente en la figura 2.4, donde se han representado en verde los años completos (menos del 10% de huecos), en rojo los años sin datos y con una graduación de amarillo a rojo los años incompletos.

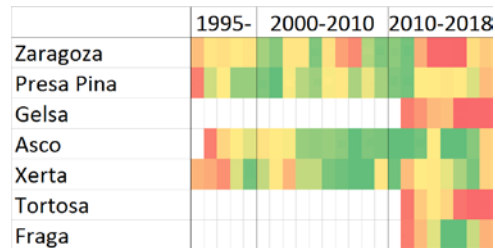


Figura 2.4 Disponibilidad de datos en las estaciones de calidad de agua

La disponibilidad de datos de turbidez en las estaciones de medida de calidad de agua es muy baja. Las series presentan numerosos huecos y los años sin fallo son excepcionales. Las series con mejores registros son las de Presa Pina, Ascó y Xerta, que miden desde 1996. También data de esa época la estación de Zaragoza-La Almozara, pero presenta un mayor porcentaje de huecos.

Hay tres series, en Gelsa, Fraga y Tortosa, que corresponden a las estaciones instaladas en el año 2012 en el marco del proyecto RIADE (Red de Indicadores Ambientales del Delta del Ebro), que incluía un sistema de control en el bajo Ebro y zona del Delta para realizar el seguimiento de los caudales y de la calidad de las aguas en río, canales, lagunas y humedales. Estas tres estaciones tienen como objetivo principal el control de sedimentos asociado a las correspondientes estaciones de aforo, aunque su funcionamiento es intermitente.

### **Gráficos presentados de las estaciones de calidad de agua**

En el Anejo 2 se presenta un conjunto de gráficos que permiten visualizar la información contenida en las series de turbidez. Para cada serie de turbidez registrada en las estaciones de control de la calidad de agua se presentan los siguientes gráficos

Figura 1: Es un gráfico de serie temporal donde se presenta el registro secuencial de datos de turbidez.

Figura 2: Es un gráfico de serie temporal donde se presenta el detalle de valores bajos del registro secuencial de datos de turbidez.

Figura 3: Es un gráfico de barras donde se representan los valores secuenciales de la turbidez media anual, calculada si se dispone al menos del 50% de los valores del año.

Figura 4: Es un gráfico de barras donde se representan los valores secuenciales de la turbidez media mensual, calculada si se dispone al menos del 50% de los valores del mes.

Figura 5: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, la serie temporal de datos de turbidez registrados.

Figura 6: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la serie temporal de datos de turbidez registrados.

Figura 7: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, el detalle de valores bajos de la serie temporal de datos de turbidez registrados.

Figura 8: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, el detalle de valores bajos de la serie temporal de datos de turbidez registrados.

Figura 9: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, la curva de valores clasificados de los datos de turbidez registrados. Sólo se han incluido los años con un porcentaje de huecos inferior al 10%.

Figura 10: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la curva de valores clasificados de los datos de turbidez registrados.

Figura 11: Es un gráfico de series temporales superpuestas en el que se representa, para cada año, el detalle de valores bajos de la curva de turbidez clasificada.

Figura 12: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, el detalle de valores bajos de la curva de turbidez clasificada.



#### 4. Datos de presas y embalses

Los datos correspondientes a los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix se han recabado del Inventario de Presas y Embalses. A continuación, se presentan los datos correspondientes a cada uno de los embalses.

##### *Embalse de Mequinenza*

La presa de Mequinenza es de gravedad, con 79 m de altura sobre cimientos y 461 m de longitud de coronación. La coronación de la presa se sitúa a cota 124,0 m y el cauce a cota 60,0 m. El nivel máximo normal está situado a cota 121 m. Al finalizar la construcción, el vaso tenía una capacidad de 1533,8 hm<sup>3</sup> a NMN, ocupando una superficie de 7.720 has. En la actualidad el volumen útil se estima en 1339,6 hm<sup>3</sup>. El embalse tiene unos 106 km de longitud, lo que supone una pendiente media de  $5,7 \cdot 10^{-4}$  y un ancho medio de 730 m. Se trata, por tanto, de un vaso de forma marcadamente alargada, en el que se aprecian múltiples meandros.

El aliviadero de Mequinenza está formado por seis vanos regulados por compuertas Taintor de 15,50 m de longitud y 14,5 m de altura. El labio está situado a la cota 106,5 m y tiene una capacidad de 11.000 m<sup>3</sup>/s. Cuenta también con unos desagües intermedios formados por dos conductos rectangulares de 4,0 por 11,0 m<sup>2</sup>, con umbral a cota 87,0 m y capacidad de 1.800 m<sup>3</sup>/s. El desagüe de fondo tiene el umbral a cota 60,0 m y está formado por dos conductos de 3 m de diámetro, que se reduce a 2,6 m tras las válvulas de mariposa. Su capacidad a embalse lleno es de 160 m<sup>3</sup>/s.

La central hidroeléctrica consta de cuatro grupos Francis Neyrpic con una capacidad total de turbinación de 700 m<sup>3</sup>/s, un salto bruto máximo de 60 m y una potencia de 324 MW. La tubería forzada tiene 6,0 m de diámetro.

##### *Embalse de Ribarroja*

La presa de Ribarroja es de gravedad. Tiene 60 m de altura sobre cimientos y 362 m de longitud de coronación. La coronación de la presa se sitúa a cota 76,0 m y el cauce a cota 37,7 m. El nivel máximo normal está situado a cota 70,0 m. Al finalizar la construcción, el vaso tenía una capacidad de 291,0 hm<sup>3</sup> a NMN, ocupando una superficie de 2.029 has. En la actualidad el volumen útil se estima en 136,0 hm<sup>3</sup>. El embalse tiene unos 29 km de longitud, lo que supone una pendiente media de  $8,3 \cdot 10^{-4}$  y un ancho medio de 700 m.

El aliviadero de Ribarroja está formado por siete vanos regulados por compuertas de 15,50 m por 10,5 m. El labio está situado a la cota 59,5 m y tiene una capacidad de evacuación de 7.756 m<sup>3</sup>/s a cota 70,0 m. Además, dispone de otras dos tomas adicionales a cota 40,0 m y dos desagües de fondo a cota 43,3 m. Estos desagües permiten evacuar 2.635 m<sup>3</sup>/s y 273 m<sup>3</sup>/s, respectivamente, totalizando 2.908 m<sup>3</sup>/s.

La central hidroeléctrica tiene cuatro turbinas Kaplan fabricadas por Escher Wyss con un caudal de equipo de 900 m<sup>3</sup>/s, suministrado por cuatro conductos cuyo umbral se sitúa a cota 41,4 m. El salto bruto máximo es 30 m y la potencia es 262,8 MW.

### ***Embalse de Flix***

La presa de Flix es de gravedad. Tiene 26,3 m de altura sobre cimientos y 400 m de longitud de coronación. La coronación de la presa se sitúa a cota 45,0 m y el cauce a cota 25,0 m. El nivel máximo normal está situado a cota 41,05 m. La capacidad del vaso es de 11,41 hm<sup>3</sup> y ocupa una superficie de 320 has.

El aliviadero de Flix está formado por siete vanos regulados por compuertas. El labio está situado a la cota 29,0 m y tiene una capacidad de 9.800 m<sup>3</sup>/s.

La central hidroeléctrica tiene cuatro grupos Kaplan fabricados por Escher Wyss con un caudal de equipo de 400 m<sup>3</sup>/s. El salto bruto máximo es 12,1 m y la potencia es 42,52 MW.

### 5. Datos hidrológicos de embalses

Se ha recopilado la información de la explotación de los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix del Anuario de Aforos. En la figura 2.5 se presenta el emplazamiento de estos embalses.

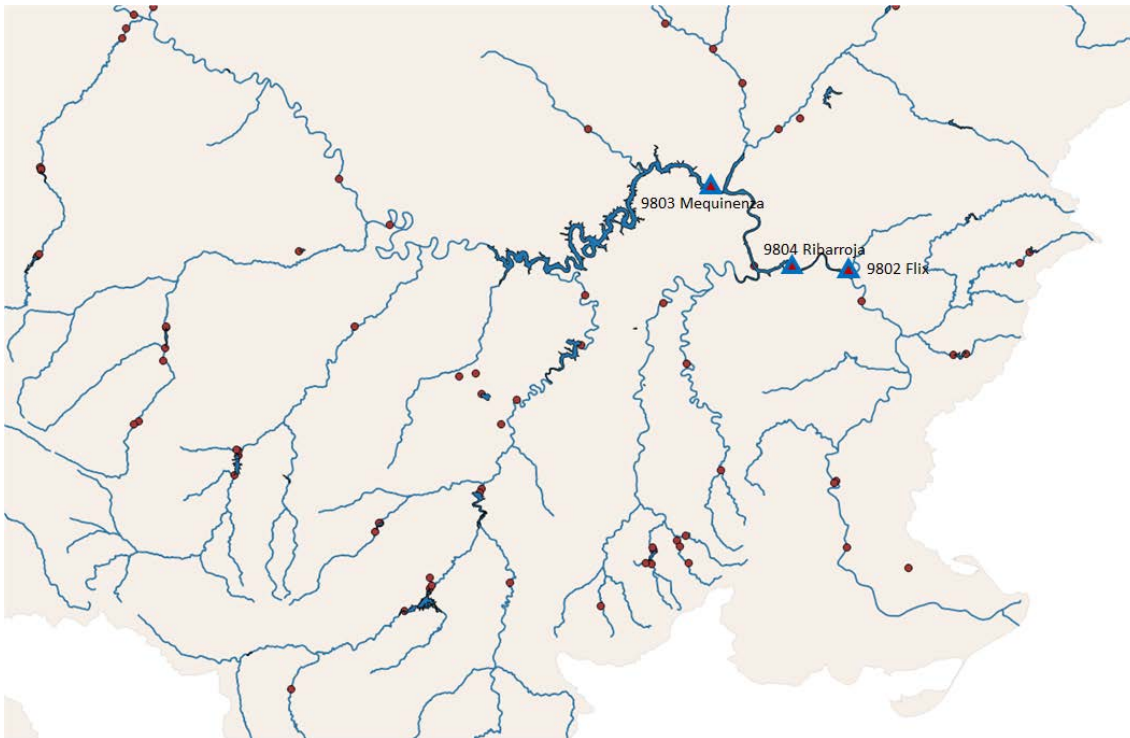


Figura 2.5 Emplazamiento de los embalses

#### Disponibilidad de datos de embalses

Los datos disponibles se resumen en la tabla 2.3, que contiene los códigos de los embalses, la superficie de cuenca vertiente, el año de principio y final de la serie, los años completos, incompletos y sin datos, y los valores máximo, medio y mínimo de la reserva y los caudales medios anuales de salida de los años completos de la serie.

Tabla 2.3 Datos de los embalses

Código		Superficie Cuenca (km <sup>2</sup> )	Año Inicio	Año Fin	Número de años				Valor medio anual (hm <sup>3</sup> o m <sup>3</sup> /s)				
ROEA	SAIH				Denominación	Total	Comp.	Incomp.	Sin datos	Max	Med	Min	
9803	E003	Mequinenza	55000	1964-65	2014-15	Reserva	51	47	3	1	1339.61	1095.08	260.68
						Caudal	51	36	14	1	371.12	232.76	1.35
9804	E004	Ribarroja	80823	1968-69	2014-15	Reserva	47	44	1	2	202.78	171.00	92.24
						Caudal	47	32	13	2	609.76	339.58	2.33
9802	E002	Flix	82300	1958-59	2009-10	Reserva	52	49	2	1	3.96	2.98	1.76
						Caudal	52	41	10	1	825.81	430.20	166.65

La disponibilidad de datos se presenta gráficamente en la figura 2.6, donde se han representado en verde los años completos, en rojo los años sin datos y con una graduación de amarillo a rojo los años incompletos.

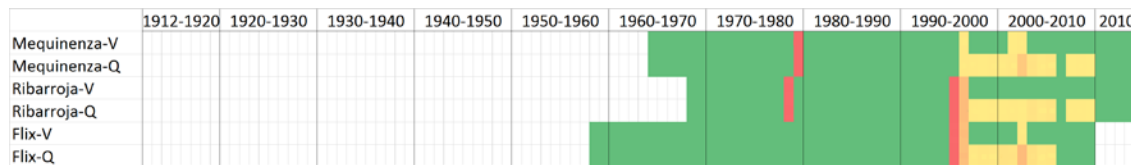


Figura 2.6 Disponibilidad de datos en los embalses

Aunque se dispone de un número suficiente de años para caracterizar el comportamiento hidrológico de los embalses, las series disponibles no son completas. Existen algunos años sin datos y en otros casos hay huecos que dificultan la utilización directa de las series.

### Gráficos presentados de los embalses

En el Anejo 2 se presentan los gráficos elaborados para visualizar la información contenida en las series de los embalses. Para cada serie de datos de embalse se presentan los siguientes gráficos:

Figura 1: Es un gráfico de serie temporal en el que se presenta el registro secuencial de valores de volumen de reserva.

Figura 2: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la serie temporal de valores registrados de volumen de reserva.

Figura 3: Es un gráfico de serie temporal en el que se presenta el registro secuencial de valores de caudal de salida.

Figura 4: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la serie temporal de valores registrados de caudal de salida.

Figura 5: Es un gráfico de serie temporal en el que se presenta la secuencia de diaria de caudales retenidos en el embalse, obtenida a partir del registro de volumen de reserva y caudal de salida. Da una idea de la alteración hidrológica producida por el embalse.

Figura 6: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la serie temporal de caudales retenidos en el embalse.

Figura 7: Es un gráfico de serie temporal en el que se presenta la secuencia de diaria de caudal de entrada al embalse, obtenida a partir del registro de volumen de reserva y caudal de salida. Debido a la imprecisión de los datos puede tomar valores negativos.

Figura 8: Es un gráfico de series temporales en cuadro mediante código de color en el que se representa, para cada año, la serie temporal de caudales de entrada al embalse.

## 6. Datos hidrodinámicos de embalses

Dado que los datos hidrodinámicos de embalses no se miden directamente, se ha obtenido esta información a partir de los modelos numéricos realizados en los embalses de la zona. Se han identificado los siguientes modelos publicados en la literatura:

### *Modelo DYRESM*

El modelo DYRESM es un modelo bidimensional en la dirección longitudinal y vertical que permite analizar la estratificación térmica. Se han elaborado modelos de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. El modelo de Mequinenza se describe en el trabajo fin de carrera de Martí (1997) y en la tesis doctoral de Montserrat Roura (2004). El modelo de Ribarroja se presenta en los trabajos fin de carrera de González (2007) y Salgado 2008.

Aunque el principal objetivo de los trabajos es el análisis del régimen térmico de los embalses, de ellos se pueden obtener conclusiones interesantes sobre su comportamiento hidrodinámico. Por ejemplo, en la figura 2.7, tomada del trabajo fin de carrera de González (2007), se representa la comparación entre datos simulados y observados de la evolución anual del perfil de temperaturas en Ribarroja.

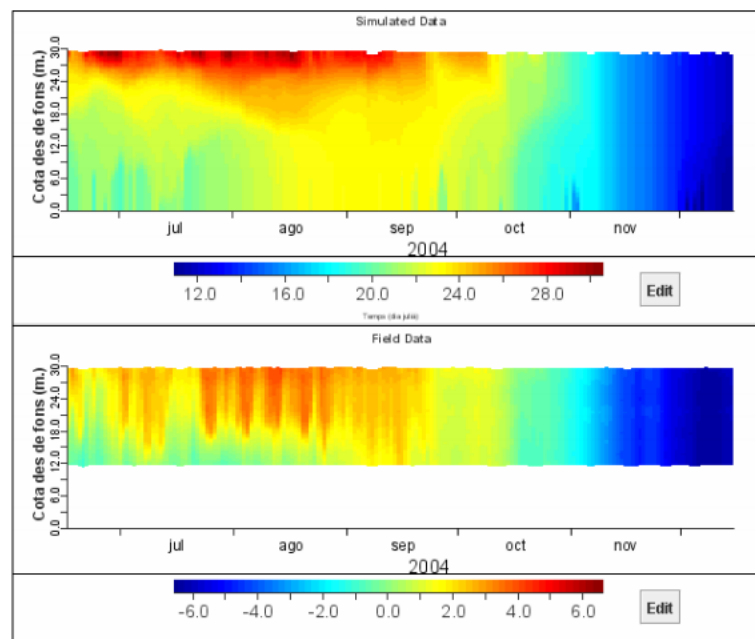
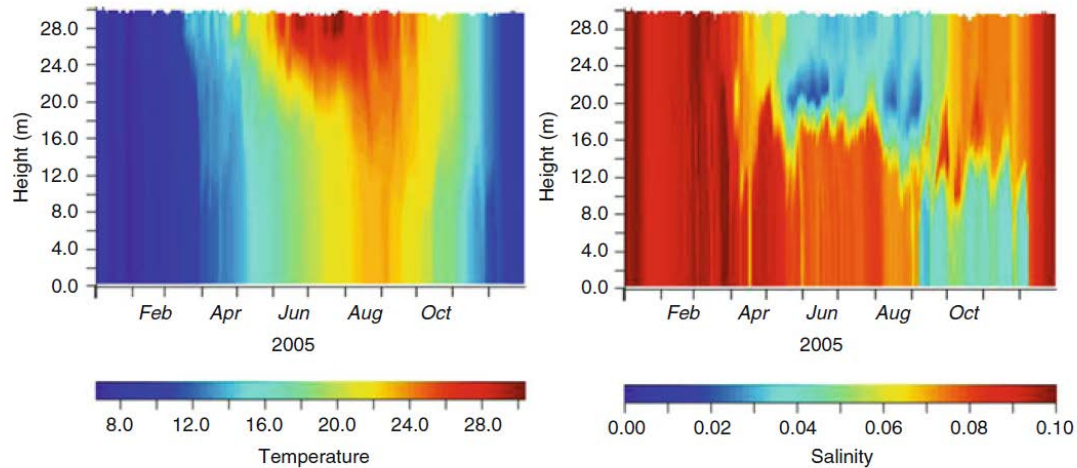


Figura 2.7 Perfil de temperaturas en el embalse de Ribarroja a lo largo del año, tomada de González, 2007.

En la figura 2.8, tomada de Prats et al., 2011, se presenta el resultado de una simulación numérica en Ribarroja donde se analiza la mezcla de aguas procedentes del Ebro y del Segre. El agua del Ebro procede del embalse de Mequinenza, cuya inercia térmica hace que esté más fría que la del Segre en verano. Además, el agua del Ebro es más salina que la del Segre.

El resultado es que el agua del Segre discurre sobre la del Ebro en los meses de verano, lo que tiene implicaciones sobre el tiempo de residencia en Ribarroja.



**Fig. 6** Numerical simulation experiment with tracer. The Ebro River water is indicated by water with salinity equal to 0.1 psu and that of the Segre River equal to 0 psu

*Figura 2.8 Simulación numérica de temperatura y salinidad en el embalse de Ribarroja, tomada de Prats et al., 2011.*

### **Modelo CE-QUAL-W2**

El modelo CE-QUAL-W2 es un modelo bidimensional en la dirección longitudinal y vertical para ríos, embalses y estuarios. Su objetivo es modelar los procesos de eutrofización teniendo en cuenta la circulación del agua, pero puede aplicarse para el estudio del transporte de cualquier contaminante. En la tesis de Arbat (2015) se elaboró un modelo CE-QUAL-W2 del embalse de Ribarroja.

En la tesis de Marina Arbat (2015) se realizó una campaña de toma de datos de campo en el embalse de Ribarroja durante 2009 y 2010. Entre otras variables, se tomaron perfiles de velocidad y temperatura en un emplazamiento próximo a la presa. El estudio de la temperatura del agua procedente de los ríos Ebro y Segre permitió discernir la posición y el efecto de los diferentes caudales de entrada y su temperatura en el embalse, como se muestra en figura 2.9: La figura presenta la línea de circulación de caudales procedentes del río Segre (rojo) y del río Ebro (azul) sobre la evolución térmica de la columna de agua. En primavera y verano el agua del Segre circula por las zonas más calientes, en el epilimnion, mientras que la del Ebro, que está más fría circula a mayor profundidad, por el hipolimnion. Al final del otoño el embalse ya se encuentra mezclado y la temperatura relativa del agua del Ebro y Segre se invierte. El agua del Ebro pasa a circular por la parte superior del embalse y la del Segre por la parte inferior.

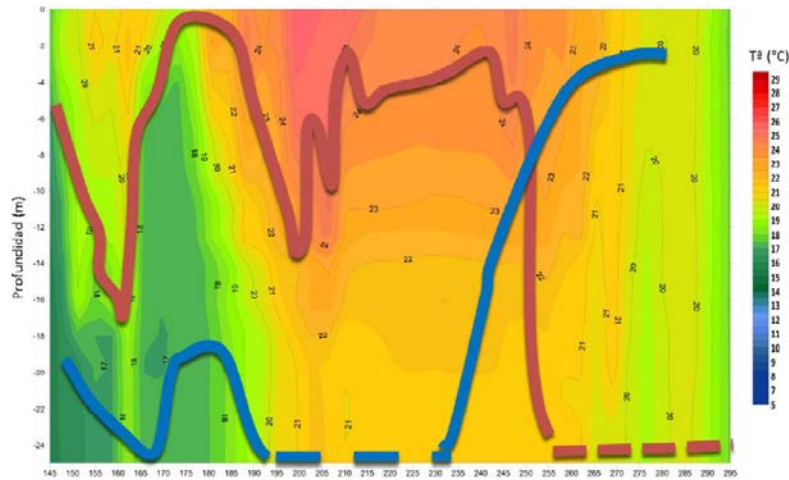


Figura 68. Suposición de la circulación de los caudales de entrada del río Ebro (azul) y del río Segre (rojo) al embalse de Ribarroja en función de su temperatura en la zona de la plataforma Flumen. Posición de la temperatura de los caudales de entrada al embalse en función de su temperatura (línea continua), agua de entrada con temperatura inferior a las del gráfico (línea discontinua). Periodo de estudio del año 2009-2010.

Figura 2.9 Circulación de agua procedente del Ebro (azul) y Segre (rojo) en el embalse de Ribarroja, tomada de Arbat (2015).

A partir de la modelación hidrodinámica se puede identificar el perfil de velocidades a lo largo del embalse. En la figura 2.10 se presenta el perfil de velocidad del agua en el embalse de Ribarroja en distintos instantes del año 2009, cuando el embalse se encuentra estratificado. Se aprecia que la circulación del agua se realiza preferentemente por debajo de la termoclina.

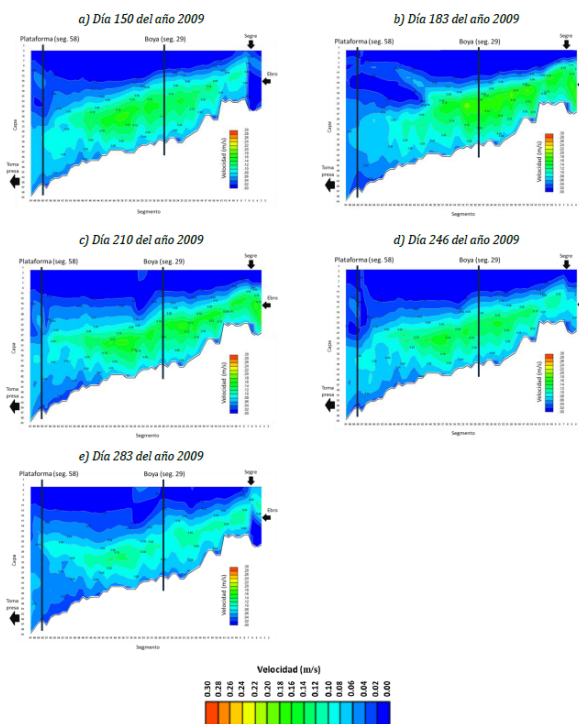


Figura 107 Perfiles longitudinales de la componente horizontal del vector de velocidad del agua en dirección del eje del cauce, en el embalse de Ribarroja de Ebro, mediante CE-QUAL-W2, para los días julianos 150, 183, 210, 246, 283.

Figura 2.10 Perfil de velocidad en distintos instantes en el embalse de Ribarroja, tomada de Arbat (2015)

El modelo CE-QUAL-W2 también permite realizar un seguimiento (tipo trazador) de la antigüedad que tiene el agua cada elemento de la malla. En la figura 2.11 se presenta el perfil de la antigüedad del agua en el embalse de Ribarroja en distintos instantes del año 2009. Cuando el embalse se encuentra estratificado, se identifican dos tendencias. En las capas superficiales, por encima de la termoclina, el tiempo de residencia va aumentando progresivamente debido al efecto de tapón que separa los dos estratos de agua. En las capas inferiores la antigüedad del agua es menor porque en esa zona tiene lugar la circulación principal de los caudales.

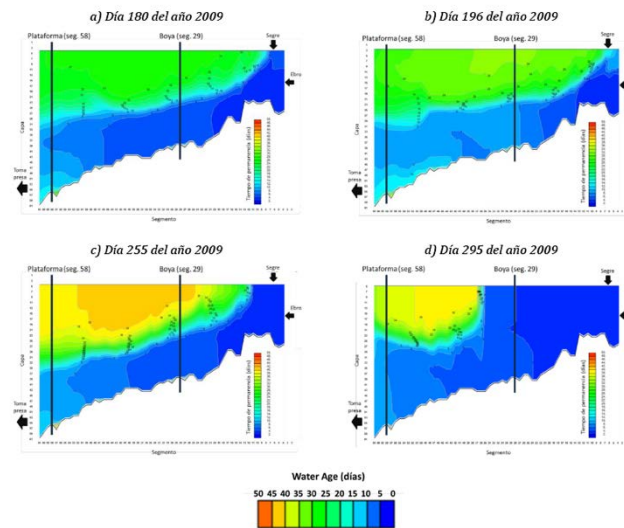


Figura 112 Perfil longitudinal del tiempo de permanencia del agua a lo largo del embalse de Ribarroja de Ebro, para los días julianos 180, 196, 255 y 295.

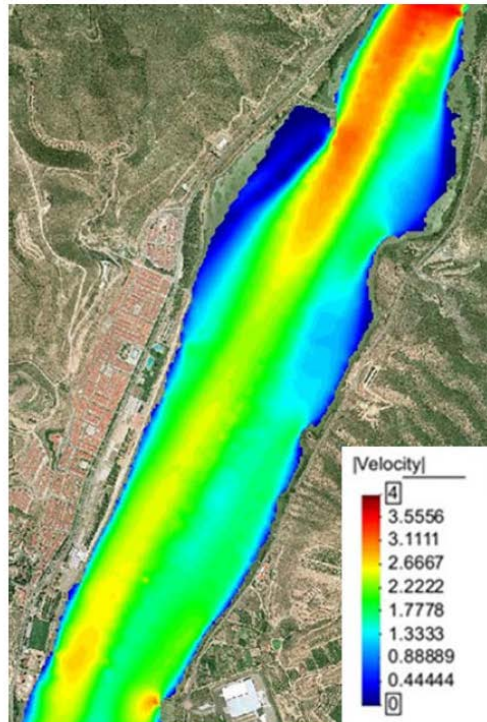
Figura 2.11 Antigüedad del agua en distintos instantes en el embalse de Ribarroja, tomada de Arbat (2015)

### Modelo Iber

El modelo Iber es un modelo hidrodinámico bidimensional en las dos direcciones horizontales (integrado en la vertical). Incorpora ecuaciones para simular el transporte de sedimentos, tanto en suspensión como por carga de fondo. El grupo FLUMEN ha elaborado modelos de varios tramos del curso bajo del Ebro que ilustran sobre el potencial de esta herramienta para analizar este tipo de problemas. A diferencia de los modelos bidimensionales en las direcciones longitudinal y vertical, el coste computacional de estos modelos impide hacer simulaciones de periodos largos de tiempo, por lo que suelen emplearse para analizar situaciones puntuales correspondientes a caudales de crecida.

Mediante este tipo de modelos puede analizarse el campo de velocidades en planta, como se muestra, por ejemplo, en la figura 2.12, tomada del análisis del tramo del Segre en la cola del embalse de Ribarroja. Mediante este tipo de análisis se puede conocer el detalle de calados, valores de acción hidrodinámica y campo de velocidades del movimiento, identificando las zonas de flujo preferente y de mayor potencial erosivo.

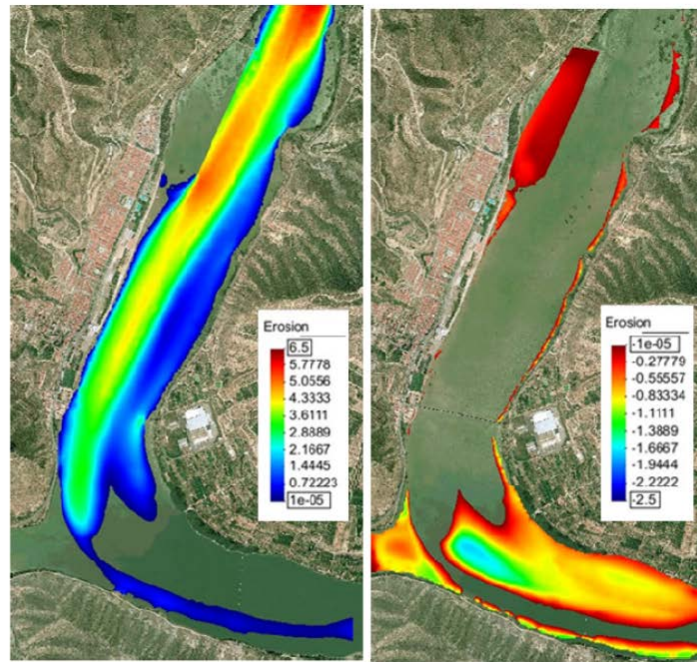




**Figura 8.-** Detalle del campo de velocidades para la situación actual, cota de embalse a 69.50 y caudal de 2682 m<sup>3</sup>/s. Velocidades en m/s.

*Figura 2.12 Campo de velocidades del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja, tomada de Bladé et al. (2010).*

Mediante la modelación hidrodinámica puede obtenerse también una descripción de la dinámica del transporte de sedimentos durante un episodio, identificando las zonas de erosión y sedimentación, como se muestra en la figura 2.13, que corresponde al campo de velocidades en la situación analizada anteriormente.



**Figura 13.-** Erosión (izquierda) y sedimentación (derecha) en la situación actual para el caudal de 2682 m<sup>3</sup>/s (24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

*Figura 2.12 E Zonas de erosión (izquierda) y sedimentación (derecha) en el río Segre en la cola del embalse de Ribarroja, tomada de Bladé et al. (2010)*

Este tipo de modelos no son muy apropiados para analizar el movimiento en embalses, ya que los calados que se producen limitan la aplicabilidad de las ecuaciones integradas en la dirección vertical. Como se ha visto con anterioridad, la estratificación térmica puede producir efectos importantes, restando validez a la hipótesis de distribución uniforme de velocidades en la vertical.

## **TERCERA PARTE: CARACTERIZACIÓN DEL FLUJO SEDIMENTARIO EN EL SISTEMA MEQUINENZA-RIBARROJA- FLIX**

### **1. Introducción**

En esta parte se presenta la caracterización del tránsito sedimentario en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF), realizada a partir de la revisión de la literatura existente y de los datos hidrológicos recopilados. El objetivo es contrastar y estructurar la información disponible para presentar una descripción lo más correcta posible de las alteraciones que ha sufrido el tránsito sedimentario en el Ebro como consecuencia de la construcción de las presas en la cuenca. En la medida de lo posible, se pretende determinar las tasas de transporte de sedimento observadas en distintos puntos del río Ebro y cuantificar las tasas de sedimentación en los embalses.

En primer lugar, se estudia la alteración del régimen hidrológico en el tramo del bajo Ebro, tanto la producida por el conjunto de embalses de la cuenca como la específicamente producida por el sistema MRF. A continuación, se presentan las campañas de toma directa de datos y las estimaciones indirectas del régimen de transporte de sedimentos en la zona de estudio. Seguidamente, se caracteriza la sedimentación directamente observada en los embalses en los estudios realizados por Confederación. Finalmente, se presentan las conclusiones más significativas que pueden extraerse sobre la influencia de los embalses en el comportamiento sedimentológico del tramo bajo del Ebro.

## 2. Alteración hidrológica producida por los embalses

La alteración hidrológica producida por los embalses de la cuenca, y en particular la producida por Mequinenza, Ribarroja y Flix, se ha vinculado a la dinámica sedimentaria en el bajo Ebro. Es un tema que aparece con frecuencia en la literatura, aunque en la mayor parte de los casos se ha tratado con cierta superficialidad, a pesar de la abundancia de datos hidrológicos disponibles.

Resulta incuestionable que los embalses producen alteraciones muy significativas de los flujos de agua. De hecho, es ese uno de los motivos fundamentales para su construcción. Pueden distinguirse dos alteraciones fundamentales: la modificación del caudal medio anual circulante, debido a las detracciones de agua facilitadas por los embalses, y la alteración del reparto del agua a lo largo del año. Estas dos alteraciones repercuten sobre el tránsito sedimentario a través de la correlación positiva que existe entre la concentración de sedimentos y el caudal. El peso que pueden tener cada uno de estos dos factores en el balance neto del transporte de sedimentos queda enmascarado por la gran variabilidad del régimen hidrológico. En este apartado se analiza la alteración hidrológica a partir de los datos disponibles.

### 2.1 Desarrollo de embalses en la cuenca

La puesta en servicio de los embalses de la cuenca del Ebro fue progresiva, al igual que el desarrollo de los usos del agua en la cuenca. La figura 3.1 representa la evolución de la capacidad de embalse en la cuenca a lo largo del tiempo (tomada de la base de datos de ICOLD), dividida en cinco zonas relevantes para el estudio: la cuenca aguas arriba de la estación de aforos de Zaragoza, la cuenca comprendida entre Zaragoza y Mequinenza, la cuenca del Cinca, la cuenca del Segre (exceptuando al Cinca) y la cuenca comprendida entre Mequinenza y la desembocadura (exceptuando al Segre).

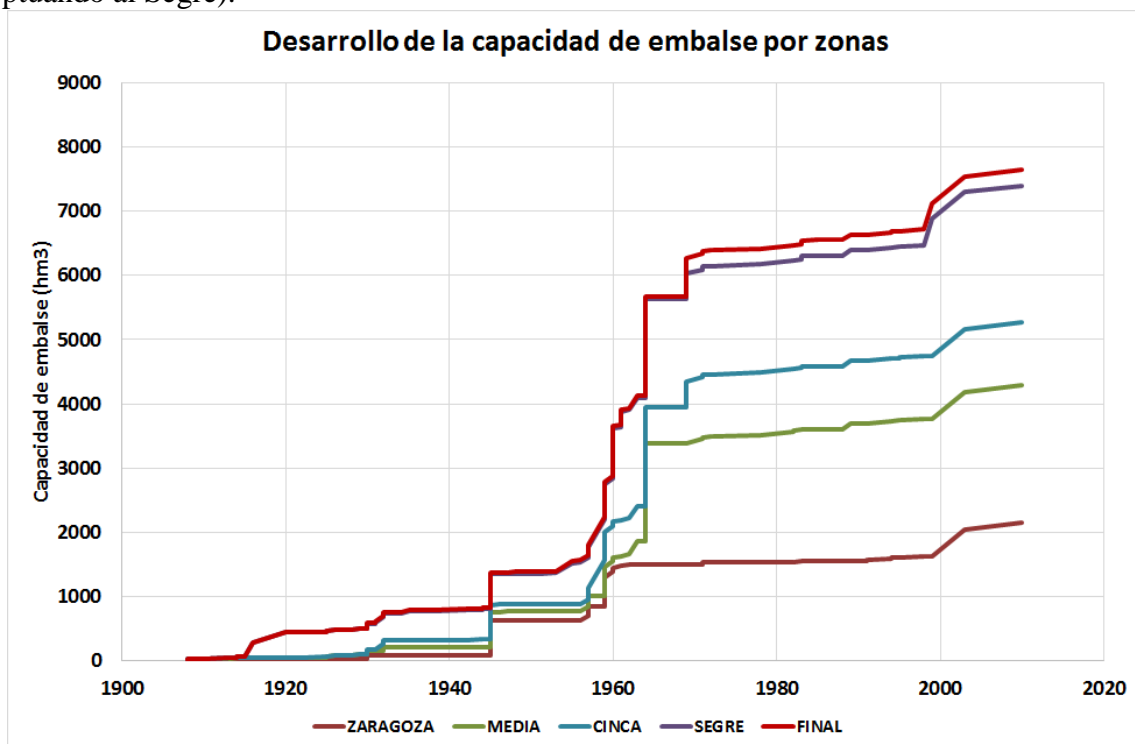


Figura 3.1. Evolución de la capacidad de embalse en la cuenca del Ebro 1900-2010.

En el gráfico destaca la puesta en servicio del embalse del Ebro (1945), la de los embalses de Mediano, Yesa y Canelles (1959-60) y la del embalse de Mequinenza (1964). Durante el periodo 1955-1965 se pusieron en servicio más de 4000 hm<sup>3</sup> de capacidad de embalse en la cuenca.

## 2.2 Alteraciones hidrológicas

Desde el punto de vista metodológico, resulta difícil comparar la situación actual con la que debió producirse antes de la construcción de los embalses. No es fácil identificar dos periodos con datos que puedan considerarse representativos de cada una de las dos situaciones, a efectos de su comparación. Las series más largas disponibles son las de Zaragoza y Tortosa. Si se considera como representativo de la situación inicial el periodo anterior a la guerra civil, se dispone en el periodo 1913-14 a 1930-31 de 16 años completos en Zaragoza y de 13 años completos en Tortosa. El resto de años el número de huecos es pequeño.

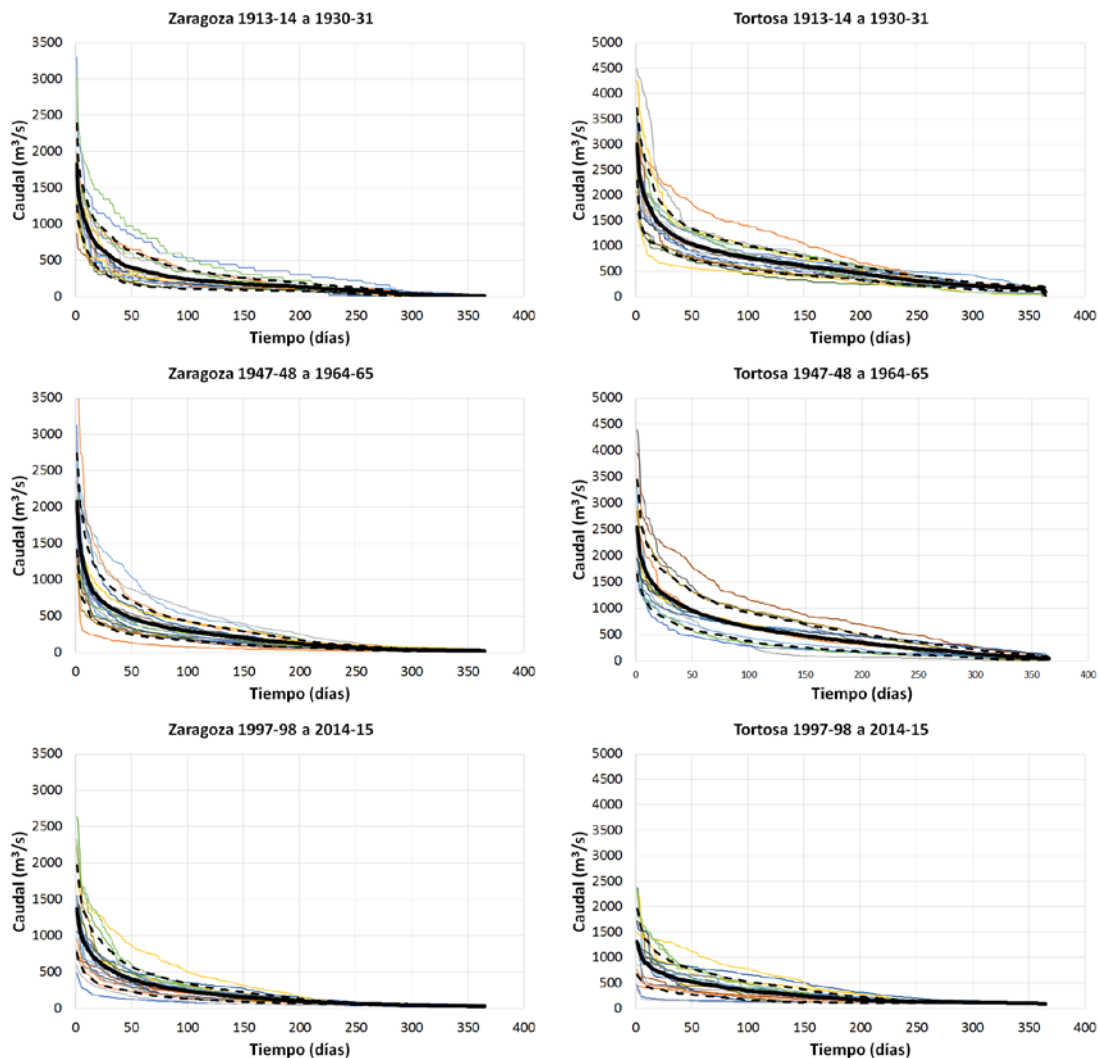


Figura 3.2. Curvas de caudales clasificados en Zaragoza (izquierda) y Tortosa (derecha) para los periodos 1913-14 a 1930-31 (arriba); 1947-48 a 1964-65 (centro) y 1997-98 a 2014-15 (abajo).

Se utilizan estas series, aunque resultan cortas para poder ser consideradas representativas del periodo. Por otra parte, durante este periodo se desarrolló una cierta capacidad de regulación en la

cuenca del Segre. Si se quiere disponer también de las series en el río Segre (estaciones de Fraga y Serós), el periodo de datos comienza a finales de los años 40. Como máximo, este segundo periodo debe durar hasta la entrada en servicio del embalse de Mequinenza, en 1965. A efectos de cuantificar la variación del régimen hidrológico se han comparado las curvas de caudales clasificados en Zaragoza y Tortosa en tres periodos de referencia de duración similar: 1913-14 a 1930-31; 1947-48 a 1964-65 y 1997-98 a 2014-15. Los resultados se presentan en la figura 3.2, que muestra las series individuales de cada año y las correspondientes a la media (en negro) más menos una desviación típica (en línea de trazos).

Las series muestran una reducción de aportaciones, pero la diferencia es mucho más acusada en la serie de Tortosa que en la de Zaragoza. La figura siguiente aclara esta cuestión. En ella se comparan las series de caudales clasificados en los tres periodos en ambos emplazamientos, normalizadas por el caudal medio de los datos de las series. Como es esperable, en el periodo inicial la serie de Zaragoza muestra una mayor variabilidad hidrológica que la de Tortosa, ya que la cuenca vertiente es menor (40.343 km<sup>2</sup> frente a 84.230 km<sup>2</sup>). Las tres series de Zaragoza muestran un comportamiento similar. En particular, las series correspondientes a los periodos 1913-1932 y 1997-2015 son casi idénticas. Sin embargo, las series en Tortosa son muy diferentes. Como se aprecia en el gráfico, la mayor parte de la alteración se ha producido con posterioridad a 1965.

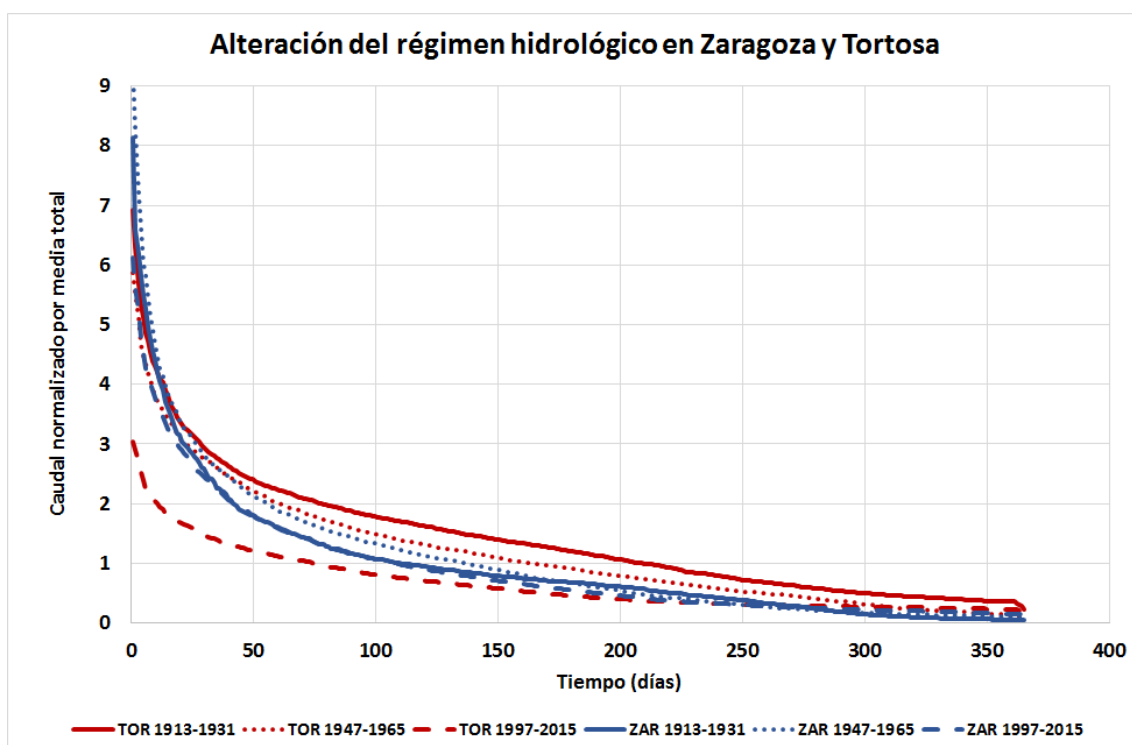


Figura 3.3. Curvas normalizadas de caudales clasificados en Zaragoza (azul) y Tortosa (rojo) para los periodos 1913-14 a 1930-31 (línea); 1947-48 a 1964-65 (puntos) y 1997-98 a 2014-15 (rayas). El caudal de normalización es el medio de la serie completa en todos los casos

Se plantea la cuestión de si la alteración es debida a las detracciones de caudal o a la modificación de la distribución anual correspondiente a la regulación originada por los embalses. Para aclararlo se ha generado la figura 3.4, donde se presentan las curvas de caudales clasificados normalizadas, pero tomando como caudal de referencia el caudal medio de cada uno de los periodos, en lugar del caudal medio total. Como puede apreciarse en el gráfico, las curvas de caudales clasificados de cada uno de los dos emplazamientos son muy similares en los tres periodos

analizados. Es decir: la forma de la curva de caudales clasificados es similar, una vez se descuenta el efecto del diferente caudal medio del periodo.

Esto indica que la operación de embalses en la cuenca no distorsiona apreciablemente la distribución de caudales a lo largo del año. Lo que sí se ha alterado, y de forma muy significativa, son los caudales medios.

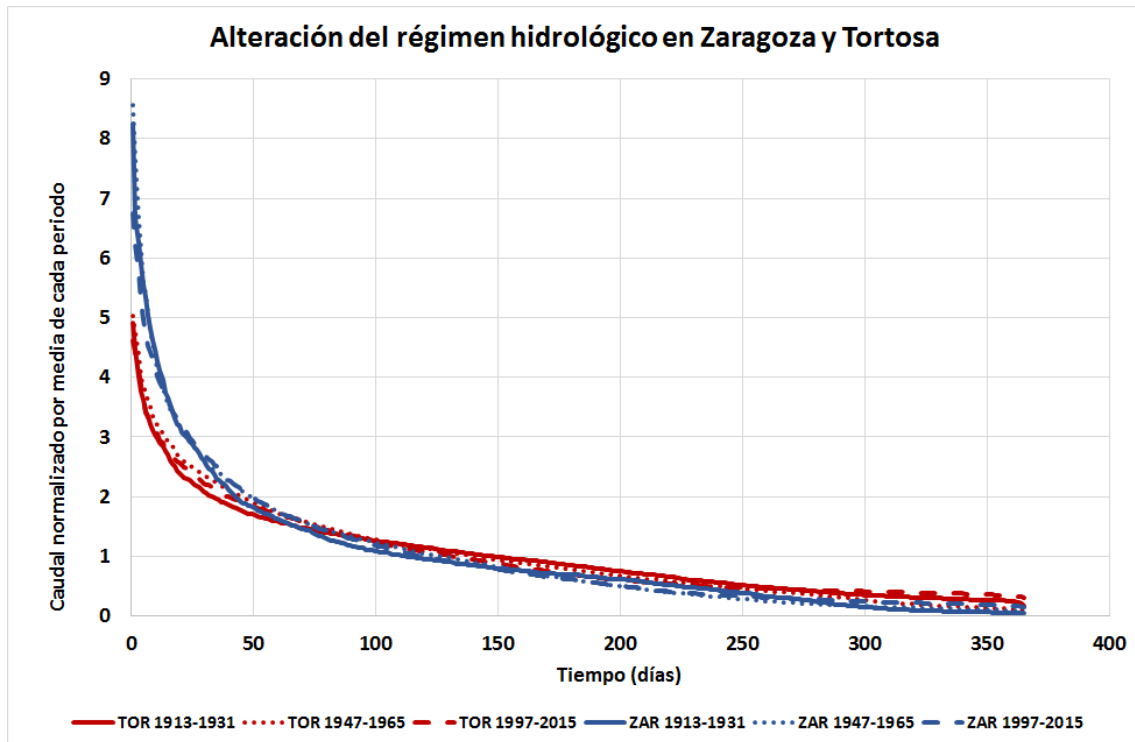


Figura 3.4. Curvas normalizadas de caudales clasificados en Zaragoza (azul) y Tortosa (rojo) para los periodos 1913-14 a 1930-31 (línea); 1947-48 a 1964-65 (puntos) y 1997-98 a 2014-15 (rayas). El caudal de normalización es el medio correspondiente a cada periodo.

Con objeto de aclarar el balance de caudales de la cuenca se ha realizado un análisis similar en la cuenca del Segre, considerando las estaciones de Fraga en el río Cinca (9.612 km<sup>2</sup> de cuenca) y Serós en el río Segre (12.782 km<sup>2</sup> de cuenca). En este caso, los periodos de referencia son 1947-49 a 1964-65 y 1997-98 a 2014-15.

Los gráficos de caudales clasificados se presentan en la figura 3.5. Las series muestran el mismo efecto que en el caso de Zaragoza y Tortosa: una reducción de aportaciones, más acusada en la estación de Fraga.

La comparación de las curvas de caudales clasificados normalizadas por el caudal medio de la serie total se presenta en la figura 3.6. Puede apreciarse que el Cinca muestra una variabilidad hidrológica mayor que el Segre antes de la confluencia y que ambos han sufrido una reducción significativa de aportaciones.

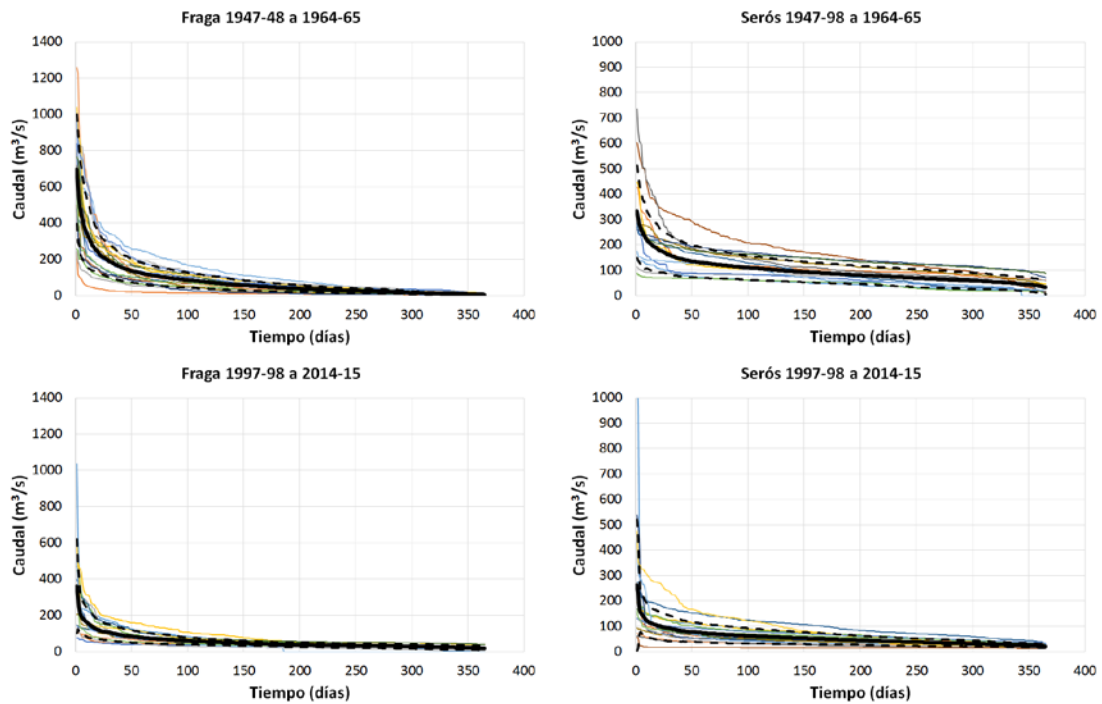


Figura 3.5. Curvas de caudales clasificados en Fraga (izquierda) y Serós (derecha) para los periodos 1947-48 a 1964-65 (arriba) y 1997-98 a 2014-15 (abajo).

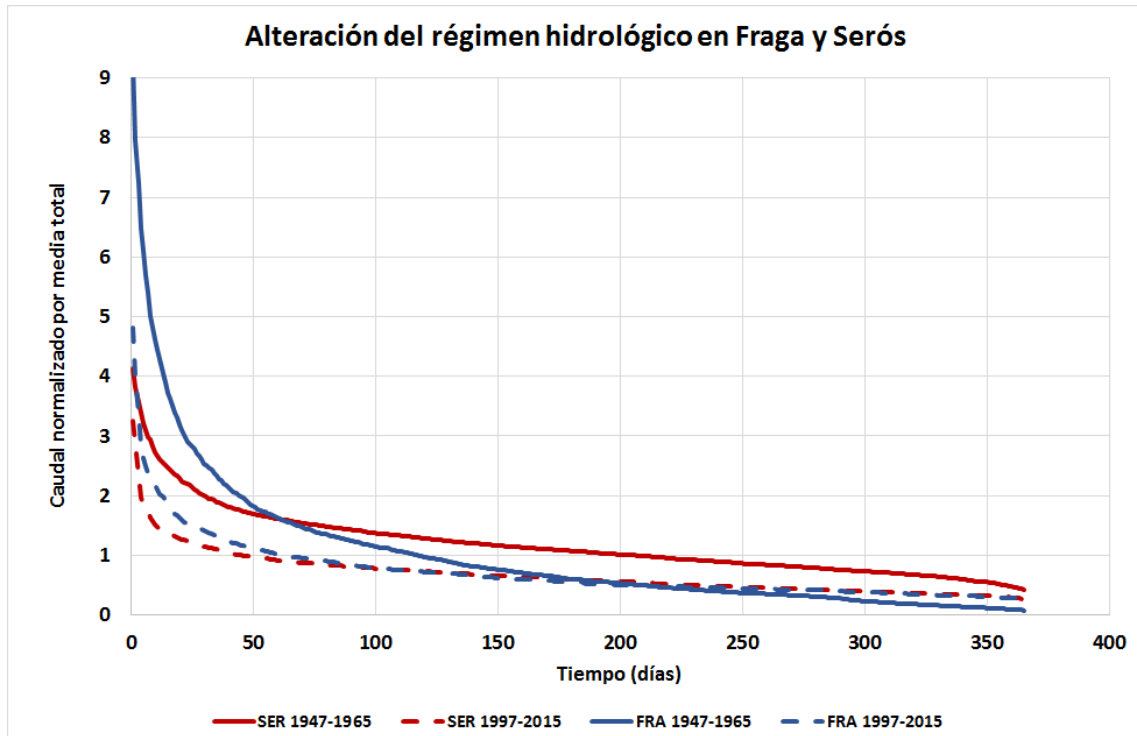


Figura 3.6. Curvas normalizadas de caudales clasificados en Fraga (azul) y Serós (rojo) para los periodos 1947-48 a 1964-65 (línea) y 1997-98 a 2014-15 (rayas). El caudal de normalización es el medio de la serie completa en todos los casos.



Las curvas de caudales clasificados normalizadas por el caudal medio de cada periodo se muestran en la figura 3.7. La distribución anual de los caudales del río Segre en Serós prácticamente no varía entre los dos periodos analizados. En el río Cinca, sin embargo, se aprecia una variación notoria. También se puede comprobar que los caudales en el Cinca son más variables que los del Segre antes de la confluencia.

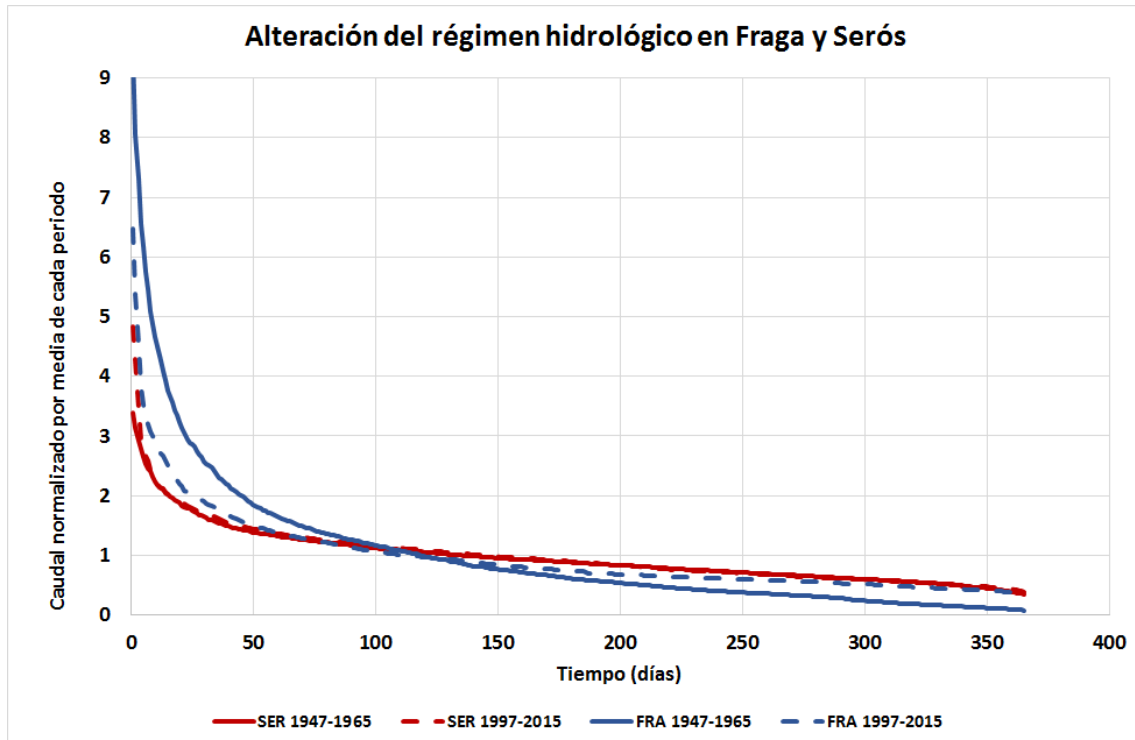


Figura 3.7. Curvas normalizadas de caudales clasificados en Fraga (azul) y Serós (rojo) para los periodos 1947-48 a 1964-65 (línea) y 1997-98 a 2014-15 (rayas). El caudal de normalización es el medio correspondiente a cada periodo.

La conclusión del análisis realizado es que la alteración del flujo hidrológico observada en la cuenca es debida fundamentalmente a la reducción de las aportaciones medias anuales, ya que el reparto de caudales dentro de cada año muestra unos patrones similares en todos los periodos analizados, excepto en el caso de la estación de Serós en el Segre, que corresponde a menos de un 15% de la cuenca total.

La tabla 3.1 resume los datos correspondientes a caudales medios en los distintos puntos y periodos analizados.

Tabla 3.1. Caudales medios en distintos emplazamientos de la cuenca para los periodos 1913-2015 (serie disponible), 1913-1931, 1947-1965 y 1997-2015.

Emplazamiento	Estación	Superficie (km <sup>2</sup> )	Caudal medio (m <sup>3</sup> /s)			
			1913-2015	1913-1931	1947-1965	1997-2015
Ebro hasta Zaragoza	9001 Zaragoza	40343	224.27	221.42	241.94	203.39
Cinca hasta Fraga	9017 Fraga	9612	75.14		74.24	55.81
Segre hasta Serós	9025 Serós	12782	80.38		98.03	54.16
Ebro hasta Tortosa	9027 Tortosa	84230	433.33	612.30	505.05	284.91
Ebro hasta Ascó	1963 Ascó	82245				320.24
Derivación en Xerta MD	9404 Xerta MD					23.30
Derivación en Xerta MI	9405 Xerta MI					16.23
Gállego hasta Zaragoza	9089 Zaragoza-G	4008	12.87			12.29
Cuenca media	Por balance	21493	53.53	218.62	90.85	11.07

Resulta llamativo el contraste entre los datos medidos en Zaragoza y Tortosa. Mientras que en Zaragoza el caudal medio de la estación se ha mantenido estable en los tres periodos comparados, en Tortosa se ha reducido prácticamente a la mitad. Debe tenerse en cuenta que la estación de Tortosa está situada aguas abajo de las derivaciones de Xerta, que totalizan unos 40 m<sup>3</sup>/s de caudal medio. Si se añaden las derivaciones, el caudal medio del Ebro en el periodo 1997-2015 es 324,44 m<sup>3</sup>/s, que concuerda con el caudal medio en Ascó (320,24 m<sup>3</sup>/s).

El balance en la cuenca intermedia entre Zaragoza y Tortosa ya no resulta tan concordante. Si restamos al caudal de Tortosa los caudales medidos en el Ebro en Zaragoza (203,39 m<sup>3</sup>/s), en el Cinca en Fraga (55,81 m<sup>3</sup>/s) y en el Segre en Serós (54,16 m<sup>3</sup>/s) resulta un caudal medio en la cuenca diferencial de 11,07 m<sup>3</sup>/s para una cuenca vertiente de 21.493 km<sup>2</sup>. Esta cuenca corresponde fundamentalmente a las aportaciones de los ríos Gállego, Huerva, Martín y Guadalupe. Aunque las aportaciones de los ríos de la margen izquierda son muy bajas, sólo en el Gállego, con 4.008 km<sup>2</sup> de cuenca, ya se ha medido un caudal medio superior, 12,87 m<sup>3</sup>/s. Más desconcertante aún es el balance entre el periodo 1913-31 y el periodo actual. En el periodo 1913-31 los datos en las estaciones del Segre son muy escasos (sólo hay datos de cuatro años en Fraga y tres años en Serós, con un gran número de huecos). Si suponemos en estas dos estaciones medias similares a las del periodo 1947-1965 (74,24 m<sup>3</sup>/s en Fraga y 98,03 m<sup>3</sup>/s en Serós) el caudal medio en la cuenca diferencial entre Zaragoza y Tortosa (exceptuando el Segre) sería 218,62 m<sup>3</sup>/s. Esta cifra se reduce a 90,85 m<sup>3</sup>/s en el periodo 1947-1965 y a 11 m<sup>3</sup>/s en el periodo 1997-2015, lo que supone una reducción del 95%.

### 2.3 Efecto de los embalses

La alteración del régimen hidrológico ha sido con frecuencia atribuida a la regulación de los embalses. En la tabla 3.2 se presenta la evolución de la capacidad de embalse de las zonas de la cuenca en los periodos analizados. La cuenca hasta Zaragoza, con una capacidad de embalse en 2015 del orden del 30% de la aportación media anual, ha presentado muy poca alteración. Las cuencas del Segre y del Cinca han presentado una alteración mucho mayor. En el caso del Cinca, con una capacidad de embalse del orden del 40% de la aportación media, se ha medido una reducción del caudal medio circulante del 25% entre el periodo 1947-1965 y 1997-2015. En el Segre la capacidad de embalse supera el 80% de la aportación media anual y la reducción medida es del 45%.

Tabla 3.2. Capacidad de embalse en distintas zonas de la cuenca para los años 1913, 1931, 1947, 1965, 1997 y 2015.

Emplazamiento	Capacidad de embalse (hm <sup>3</sup> )					
	1913	1931	1947	1965	1997	2015
Ebro hasta Zaragoza	7	87	628	1501	1604	2152
Cinca hasta Fraga	4	9	116	556	980	980
Segre hasta Serós	14	414	475	1684	1729	2132
Cuenca media	25	85	155	387	2379	2379
Ebro hasta Tortosa	49	595	1373	4128	6692	7643

Resulta interesante analizar el efecto específico de los embalses del tramo bajo. Para ello se ha estimado el caudal de entrada a partir del balance de masas en el embalse. Se trata de un procedimiento aproximado, puesto que no tiene en cuenta las pérdidas por evaporación y está sujeto a un gran error en la estimación de las variaciones diarias de volumen almacenado. Ambos factores de error son tanto mayores cuanto mayor sea la superficie inundada por el embalse. Por consistencia con el estudio anterior, los análisis se han realizado en el periodo 1997-98 a 2014-2015.

En la figura 3.8 se presentan las curvas de caudales clasificados de entrada y salida de los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Debe destacarse que este análisis es diferente de los realizados en el apartado anterior, ya que en este caso se comparan directamente las curvas de entrada y salida del embalse en el mismo periodo, mientras que en el caso anterior se comparaban las curvas correspondientes a dos periodos diferentes.

La comparación directa de las curvas de caudales clasificados de entrada y salida de los embalses en el periodo analizado se presenta en las figuras 3.9 (caudales reales) y 3.10 (caudales normalizados). Puede comprobarse que la alteración en Mequinenza afecta a los caudales superiores a 400 m<sup>3</sup>/s, superados aproximadamente unos 50 días al año. Estos caudales altos resultan atenuados por la operación del embalse hidroeléctrico, mientras que los caudales bajos se incrementan ligeramente. La alteración en Ribarroja es mínima, puesto que las curvas de entrada y salida son prácticamente coincidentes.

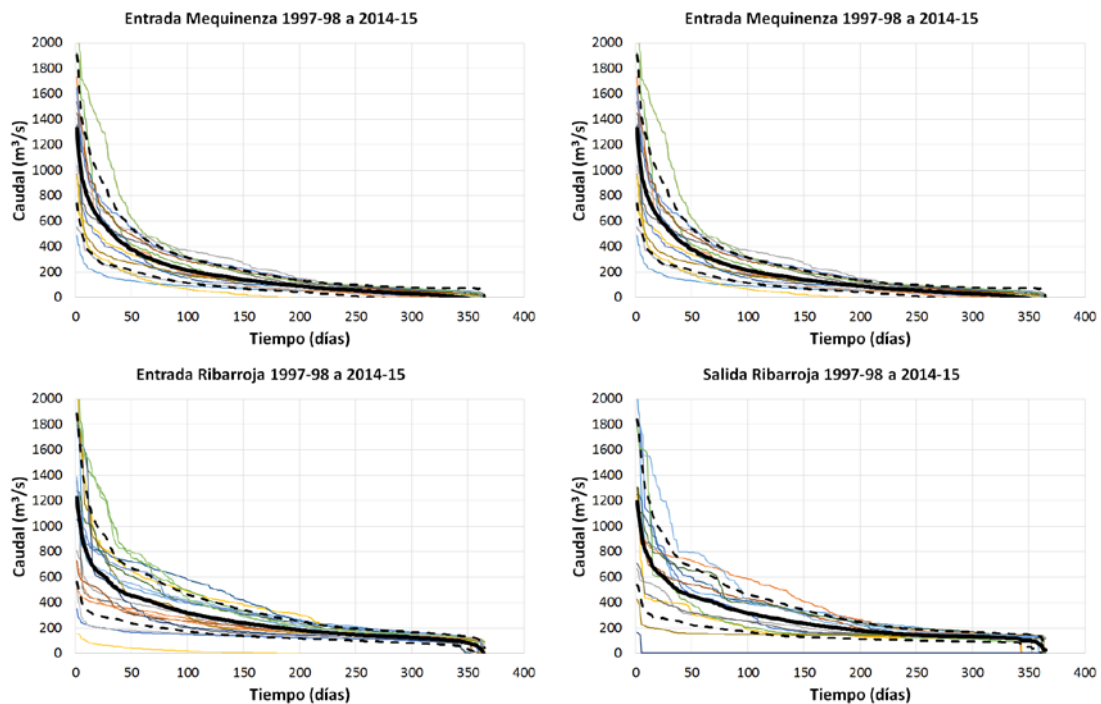


Figura 3.8. Curvas de caudales clasificados de entrada (izquierda) y salida (derecha) de los embalses de Mequinenza (arriba) y Ribarroja (abajo) para el periodo 1997-2015.

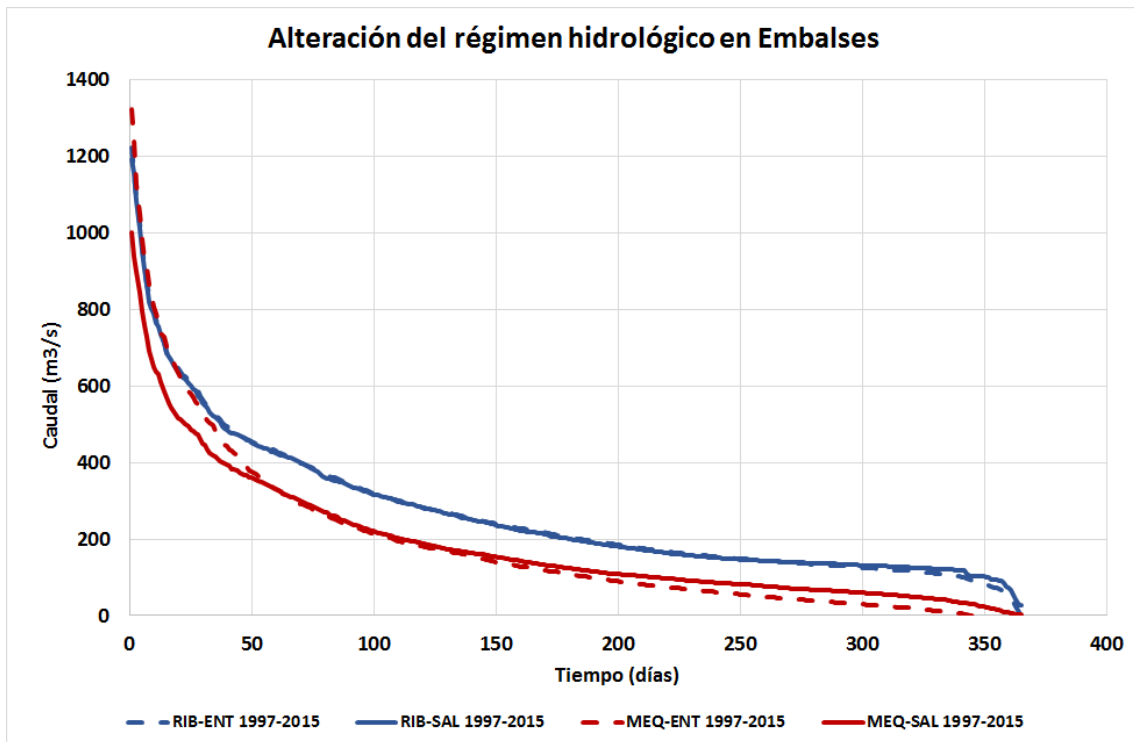


Figura 3.9. Curvas de caudales clasificados de entrada (rayas) y salida (línea) en Mequinenza (rojo) y Ribarroja (azul) para el periodo 1997-2015.

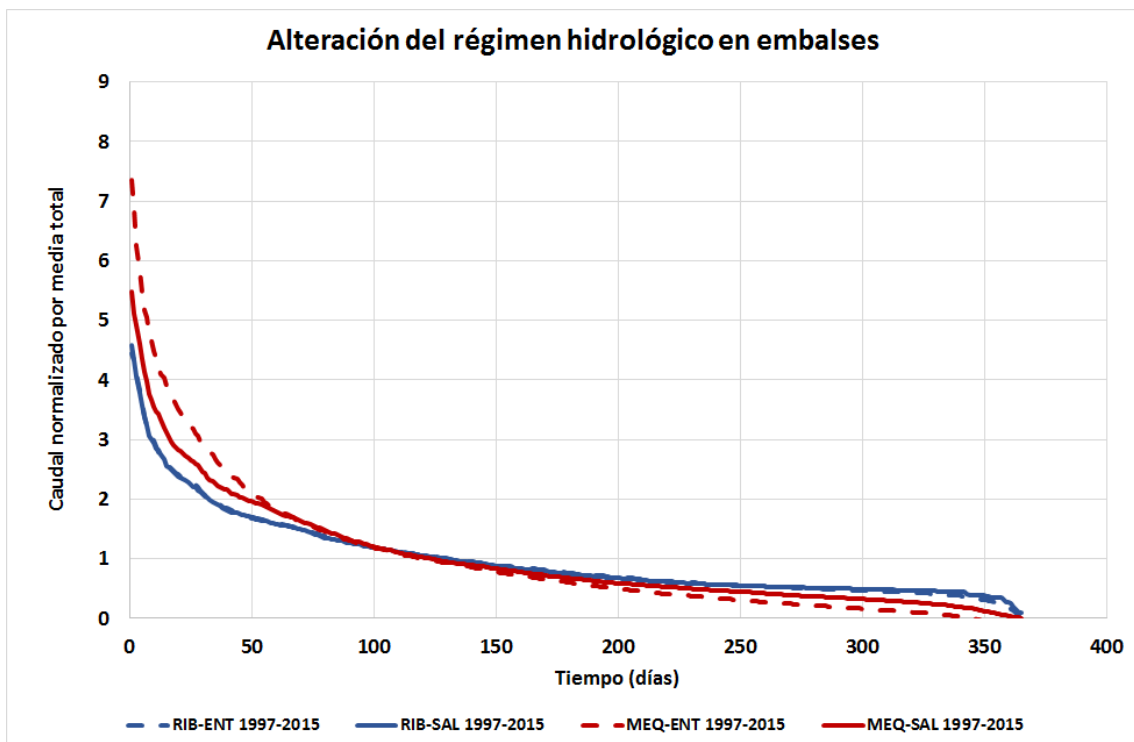


Figura 3.10. Curvas normalizadas de caudales clasificados de entrada (rayas) y salida (línea) en Mequinenza (rojo) y Ribarroja (azul) para el periodo 1997-2015. El caudal de normalización es el medio correspondiente a cada periodo.

Las curvas normalizadas permiten comparar el régimen hidrológico de salida de Mequinenza con el de entrada en Ribarroja, que resultan bastante similares. De hecho, las aportaciones del río Segre presentan una mayor regularidad que las salidas de Mequinenza y por este motivo la curva de entrada a Ribarroja presenta menor variabilidad que la curva de salida de Mequinenza.

## 2.4 Conclusión

A la vista de los análisis realizados sobre los datos disponibles se puede concluir que la alteración del régimen hidrológico en el tramo bajo del Ebro consiste fundamentalmente en una disminución de las aportaciones medias.

No se han obtenido cambios significativos de las curvas normalizadas de caudales clasificados en Tortosa. Se han obtenido alteraciones del régimen en el embalse de Mequinenza y en la cuenca del Cinca, mientras que en el río Segre antes de la confluencia con el Cinca y en el río Ebro aguas arriba de Zaragoza no se han distinguido alteraciones apreciables. El efecto de estas alteraciones sobre la curva normalizada de caudales clasificados en Tortosa es relativamente débil comparado con el efecto dominante de reducción de caudales medios.

La reducción de caudales circulantes es, en gran medida, atribuible al desarrollo de los usos del agua en la cuenca, aunque no son descartables efectos debidos a una posible no estacionariedad de los caudales naturales como consecuencia de los cambios experimentados en los usos del suelo de la cuenca o de un posible cambio climático.

Según el Plan Hidrológico del Ebro, la demanda consuntiva de la cuenca asciende a 8.190 hm<sup>3</sup>/año, siendo la demanda principal la agraria, que totaliza 7.681 hm<sup>3</sup>/año. La mayor parte de la demanda (95,9%) se atiende con aguas superficiales, que son detraídas de los cauces. A medida que se ha ido mejorando la eficiencia en el uso de agua, los retornos se han ido reduciendo significativamente. El Plan Hidrológico estima en unos 5.000 hm<sup>3</sup>/año el consumo de agua de la cuenca, que equivalen a unos 150 m<sup>3</sup>/s. Esta cifra permite cuadrar el balance global de la cuenca. Según el Plan, los caudales esperados en desembocadura con la serie corta (1980-2006) promedian 8.584 hm<sup>3</sup>/año (unos 260 m<sup>3</sup>/s), que coincide sensiblemente con lo registrado en Tortosa, unos 280 m<sup>3</sup>/s. La diferencia con el caudal registrado en el periodo 1947-1965 puede atribuirse a la merma de aportaciones naturales registrada desde 1980 y a los 150 m<sup>3</sup>/s de consumo actual de agua en la cuenca.

En cualquier caso, el efecto directo de los embalses como consecuencia de su gestión para regulación es, comparativamente, mucho menor. Obviamente, la regulación proporcionada por los embalses resulta imprescindible para posibilitar la atención de los usos consuntivos, por lo que podría concluirse que el efecto de los embalses sobre el régimen hidrológico es fundamentalmente indirecto.

### 3. Campañas de toma de datos de transporte de sedimentos

El tránsito de sedimentos en el río Ebro ha sido reportado en la literatura en numerosas ocasiones. Sin embargo, la mayor parte de las referencias se han limitado a reproducir observaciones realizadas con anterioridad. Muy pocos investigadores han medido directamente el transporte de sedimentos y en muchas ocasiones las medidas se tomaron con una finalidad distinta del análisis de la dinámica del tránsito sedimentario.

En este apartado, se pasa revista a las campañas de toma de datos que se han reflejado en la literatura, recopilando las cifras obtenidas en cada una de ellas. En este tipo de estudios se mezclan fuentes de información muy heterogéneas y de difícil accesibilidad, por lo que resulta muy complicado valorar la fiabilidad y precisión de los datos aportados. Hay varios trabajos que presentan tablas resumen con las principales fuentes de datos. Por ejemplo, se incluyen las figuras 3.11, 3.12 y 3.13, con tablas comparativas de la estimación de la carga de transporte sólido del río tomadas de distintas publicaciones.

Estas tablas comparan fuentes de datos muy heterogéneas. Los valores presentados se determinaron con distintas técnicas y frecuencia de muestreo en el contexto de trabajos que tuvieron objetivos muy diferentes, por lo que no todas ellas gozan de la misma credibilidad y utilidad a efectos de evaluar el tránsito sedimentario. Sin embargo, ofrecen una perspectiva general de los datos objetivos que se han publicado en la literatura a lo largo del último siglo.

**Table 1.** Details of the main dams located in the Ebro River drainage basin, along with historical data of suspended sediment discharge of the Ebro River during the last century.

Year	Dam	Capacity (hm <sup>3</sup> )	Sediment discharge (× 10 <sup>6</sup> tons per year)	Source
1880	—	—	25	Gorria (1880)*
1906–1930	several	0.3–200		
1911	—	—	17	Carreras Candi (1911)*
1934	—	—	14	Bayerra (1934–1935)
1940–1950	several	50–200		
1946	Ebro	540		
1959	Yesa	470		
1962	—	—	2.2	Catalán (1969)
1966	Mequinenza	1000		
1968	Mediano	436		
1969	Ribarroja	136		
1983–1986	—	—	0.15	Palanques (1987)
1988–1990	—	—	0.12	this paper

\* Cited in Arredondo (1982).

Figura 3.11. Tabla 1 de Guillén y Palanques. 1992.

Table I. Historical data on sediment transport ( $10^6 \text{ Mt yr}^{-1}$ ) in the lower Ebro River and reservoir capacity ( $\text{km}^3$ ) in the basin

Year	Capacity	Transport	Data source
1877	0	30	Gorria (1877)
1944	0.72	22	Unknown (*)
1961–1963	3.45	2.2	Catalán (1969)
1964	3.45	8.7	Varela <i>et al.</i> (1986)
1976–1982	6.24	0.32	Varela <i>et al.</i> (1986)
1983–1986	6.28	0.15	Palanques (1987)
1986–1987	6.28	0.13	Muñoz (1990)
1988–1990	6.28	0.12	Guillén and Palanques (1992)

\* Cited in Sociedad Española de Ornitología (1993)

Figura 3.12. Tabla 1 de Ibáñez, 1996.

Table 1 Summary of sediment yield estimations in the lower River Ebro (modified from [55])

Year	Sediment yield ( $10^3 \text{ t/y}$ )	Reference
1877	30,000 <sup>a</sup>	[48] <sup>k</sup>
1900	15,000 <sup>a, b</sup>	[46, 47]
1900	1,000–1,500 <sup>c</sup>	[56]
1944	22,000 <sup>a</sup>	[40]
1950–1975	400 <sup>d</sup>	[56]
1961–1963	2,200 <sup>a</sup>	[57] <sup>k</sup>
1964	8,700 <sup>a</sup>	[58] <sup>k</sup>
1975–2000	170 <sup>d</sup>	[56]
1976–1982	320 <sup>a</sup>	[58] <sup>k</sup>
1976–1990	260 <sup>e</sup>	[18]
1983–1986	150 <sup>a</sup>	[59] <sup>k</sup>
1986–1987	130 <sup>a</sup>	[60] <sup>k</sup>
1988–1990	120 <sup>a</sup>	[21]
1998–1999	500 <sup>f</sup>	[61]
1998–1999	30 <sup>g</sup>	[61]
2002–2004	455 <sup>h</sup>	[25]
2002–2004	1,650 <sup>i</sup>	[25]
2005–2008	216 <sup>j</sup>	<sup>l</sup>

<sup>a</sup>Total load downstream Riba-roja Dam (Fig. 1)

<sup>b</sup>Contribution of the Ebro to its delta at the beginning of twentieth century

<sup>c</sup>Bedload, considering the 10% of the total load estimated by Bayerri [46] and Nelson [47]

<sup>d</sup>Bedload transport capacity in Tortosa (Fig. 1)

<sup>e</sup>Suspended load downstream Flix Dam (Fig. 1)

<sup>f</sup>Suspended load upstream from Sástago (Fig. 1, SMS)

<sup>g</sup>Suspended load below Mequinenza Dam (Fig. 1)

<sup>h</sup>Mean annual load in Móra d'Ebre (Fig. 1, MEMS) during 2002–2004. The 60 and 40% of this was transported as suspended and bedload, respectively

<sup>i</sup>Mean annual load in Sástago (Fig. 1, SMS) during 2002–2004. Almost all of this was transported as suspended load

<sup>j</sup>Mean annual suspended load in Móra d'Ebre (Fig. 1, MEMS) during 2005–2008

<sup>k</sup>Source: [40]

<sup>l</sup>Data presented in this chapter. Unpublished data

Figura 3.13. Tabla 1 de Batalla y Vericat 2011

### **3.1 Estimaciones directas**

En este apartado se incluyen las estimaciones directas de la carga de sedimentos en distintas secciones del río. Tras una exhaustiva revisión de la literatura, se han identificado las fuentes de información que se citan a continuación:

#### ***Gorría 1877***

No se ha tenido acceso a los documentos originales elaborados por Gorría (Gorría 1887, 1880). De la descripción que realiza Ibáñez (1996) se deduce que se trataba de un técnico del Ministerio de Agricultura que realizó cinco tomas de muestras en un lugar próximo a la desembocadura del río Ebro en el año 1887. Ibáñez cita una concentración de sedimentos de 4100 mg/l, que es muy superior a la obtenida en todas las demás muestras analizadas en el tramo. La estimación de Gorría del transporte de sedimentos es de 25 Mt/año, que corresponde a unos 1400 mg/l de concentración media. Es muy posible que las cinco ocasiones en que se tomaron muestras correspondieran a episodios de aguas altas, por lo que este cálculo del aporte medio pudiera presentar un sesgo importante.

#### ***Carreras Candi 1911 y Bayerri 1934-35***

Los datos se presentan en Carreras Candi, 1911 y Bayerri, 1935, que no son publicaciones técnicas. Es el trabajo de dos historiadores que no tomaron datos ni son técnicos en la materia. Ibáñez (1996) indica que se limitan a transcribir cifras proporcionadas por los estudios de Gorría. No se corresponde, por tanto, con nuevas campañas de toma de datos.

#### ***Catalán 1961-63***

El libro de Catalán (1969) está dedicado al estudio de la química del agua. Contiene un capítulo sobre la materia en suspensión donde se presentan definiciones de los conceptos vinculados a la materia en suspensión y se definen procedimientos para caracterizarla. En este capítulo se incluye un apartado sobre los aportes sólidos de los ríos donde se presenta una tabla de mediciones realizadas en el periodo 1961-1963 (Figura 3.14) en 18 puntos, de los cuales hay 6 en la cuenca del Ebro. El texto no proporciona información sobre la fuente de los datos presentados. Simplemente indica que se tomaba una muestra al mes, sin día fijo, y que se encuentran sujetos a gran incertidumbre porque no se controlan muchas avenidas. Por este motivo, se considera que el transporte real de sedimentos será mayor que el medido.

El dato que se cita en muchos de los estudios del bajo Ebro es el correspondiente a Flix, donde se tomaron 15 mediciones y se obtuvo una tasa de transporte de 2,24 Mt/año. Es de destacar que en Zaragoza la estimación fue mayor, alcanzando los 3,28 Mt/año, lo que sugiere que puede existir sedimentación neta en el tramo donde se ubican los embalses del complejo MRF.



**TABLA II-3**  
*Cantidad total de materia en suspensión aportada anualmente por algunos ríos españoles*

Río	Lugar	Año	Número de muestras	Tm
Duero	S. Esteban de Gormaz (So)	oct. 61 a sep. 63	24	67.161
Duero	Peñañel (Va)	oct. 61 a sep. 63	23	218.847
Duero	Villachica (Za)	oct. 61 a sep. 63	18	486.964
Pisuerga	Alar del Rey (Pa)	oct. 61 a sep. 63	21	9.601
Pisuerga	Cabezón (Va)	oct. 61 a sep. 63	22	174.683
Arlanzón	E. de Arlanzón	oct. 61 a sep. 63	23	380
Esla	Riaño (L)	oct. 61 a sep. 63	24	7.566
Tajuña	Orusco	oct. 61 a sep. 63	28	34.589
Henares	Torre Burgo a Humanes	oct. 61 a sep. 63	28	30.420
Manzanares	Puerta de Hierro	oct. 61 a sep. 63	28	14.544
Jarama	Mejorada	oct. 61 a sep. 63	28	93.153
Tajo	Aranjuez	oct. 61 a sep. 63	28	286.000
Ebro	Miranda de Ebro (Bu)	oct. 61 a sep. 63	24	50.200
Ebro	Zaragoza	oct. 61 a sep. 63	23	3.281.000
Ebro	Flix (T)	oct. 61 a sep. 63	15	2.241.000
Aragón	Jaca (Hu)	oct. 61 a sep. 63	23	3.350
N. Ribagorzana	La Piñana (Hu)	oct. 61 a sep. 63	19	10.810
Cinca	Fraga (Hu)	oct. 61 a sep. 63	24	745.000

*Figura 3.14. Tabla 11-3 de Catalá, 1969*

#### ***Varela et al. 1976-88***

No se ha tenido acceso a la publicación Varela et al., 1986. Ibáñez (1996) indica que se realizó un estudio de varios años comparando la carga de sedimentos medida a la entrada y salida de Mequinenza y Ribarroja y mediante comparación de la cartografía del vaso con una batimétrica del embalse obtenida en 1982. Mediante balance en los embalses se estimó una carga a la entrada de 1.48 Mt/año, una carga a la salida de 0,32 Mt/año y una retención de 1.16 Mt/año. En la tabla de Ibáñez consta un periodo de toma de datos entre 1976 y 1988, aunque la publicación que cita es de 1986. La retención en el vaso se estimó en 8.38 Mt/año. Ibáñez (1996) atribuye la discrepancia a falta de precisión en la medición por baja frecuencia de muestreo.

#### ***Palanques 1983-86***

La campaña se describe en la tesis doctoral de Palanques (1987). No se ha tenido acceso a este documento. Ibáñez (1996) y Guillén y Palanques (1992) lo citan, especificando que obtiene una tasa de transporte de sedimentos de 0,15 Mt/año. No se ha podido determinar la metodología empleada, el emplazamiento de toma de datos y la frecuencia de muestreo. Del título de la tesis (“Dinámica sedimentaria, mineralogía, y micro-contaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro”) se deduce que el énfasis del trabajo no es únicamente la evaluación del transporte de sedimentos.

#### ***Muñoz y Prat 1986-87***

Se trata del resumen de resultados de la tesis doctoral de Isabel Muñoz (1990). Es un estudio de calidad de agua en el bajo Ebro orientado a la caracterización del funcionamiento ecológico del río (“Limnología de la part baixa del riu Ebre i els canals de reg: Els factors físico-químics, el

fitoplancton i els macroinvertebrats bentònics”). Por tanto, ni la toma de muestras ni los análisis de datos fueron diseñados para obtener una estimación precisa de la carga en suspensión. Se tomaron muestras mensuales en superficie en cuatro puntos de la desembocadura y muestras en profundidad en los dos últimos puntos, afectados por la cuña salina. El trabajo únicamente publica los valores de concentración media obtenidos en cada uno de los cuatro puntos de muestra. No se detallan los resultados individuales de las muestras, sino que se presentan mezclados con otros datos hidrológicos y de carga de sedimentos cuyas fuentes no se determinan con precisión. Como ejemplo se muestra la Figura 3.15, donde se compara la carga en suspensión en tres periodos, pero no se indica la fuente de datos.

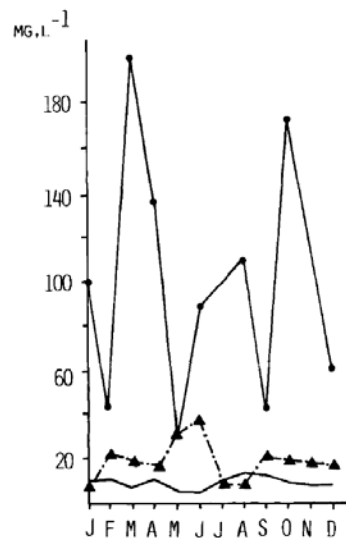


Figure 3. Mean monthly concentrations of suspended matter at station 2: (—●—) 1961–1963 (before reservoir construction). (---▲---) 1972–1980. (—■—) 1980–1987

Figura 3.15. Figura 3 de Muñoz, 1989

### Guillén 1988-90

La campaña de toma de datos está documentada en Guillén y Palanques, 1992. Se tomaron siete muestras en tres puntos situados entre Amposta y la desembocadura durante el periodo comprendido entre mayo de 1988 y febrero de 1990. Siguiendo un perfil vertical, se tomaron muestras de agua cada metro. En total se tomaron 133 muestras de agua. También se midió el perfil de velocidad y se tomó una muestra del sedimento del fondo. En Guillén et al., 1992 se presentan datos tomados mediante una trampa para la captura de la carga de fondo, en dos periodos: en mayo de 1988 y septiembre de 1988, posiblemente en combinación con las medidas documentadas en la primera publicación. En ausencia de cuña salina se midieron concentraciones relativamente constantes entre 15 y 18 mg/l en Amposta. La carga de fondo era totalmente despreciable frente a esta cifra. En la parte final del primer artículo se comparan estos datos medidos con estimaciones del posible flujo de sedimentos a comienzos del siglo XX. La estimación se basa en la posible similitud hidrológica del río Ebro con ciertos ríos del Noroeste de California y en los datos proporcionados por Bayerri, que es un historiador de Tortosa, en 1934-35.

### Roura 1997-1999

La campaña de toma de muestras corresponde a la tesis doctoral de Montserrat Roura (2003). Los trabajos están publicados en Roura et al., 2008a y Roura et al., 2008b. Se tomaron muestras

cada 12 horas en 5 estaciones (Escatrón, Mequinenza, Fraga, Serós y Ribarroja) durante el periodo comprendido entre noviembre de 1997 y septiembre de 1999. Se obtuvo una concentración media a la entrada de Mequinenza de 96 mg/l, mientras que a la salida la concentración media fue de 0,593 mg/l. En el Cinca (Fraga) se midieron 262 mg/l y en el Segre (Serós), 45,3 mg/l. En el periodo en estudio entraron en Mequinenza 1,401 Mt de sedimentos en suspensión y salieron únicamente 0,064 Mt (retención del 95,4%). En Ribarroja entraron 1,251 Mt y salieron 0,742 Mt (retención del 46%).

#### Vericat y Batalla 2002-2004

La campaña se detalla en Vericat y Batalla (2006) y se menciona en otras referencias (Batalla y Vericat, 2011b; Batalla 2014). Se estableció un programa de toma de datos en Sástago y Mora de Ebro específicamente diseñado para medir el transporte de sedimentos en suspensión y en fondo. Se tomaron 414 muestras (255 en 2002-03 y 159 en 2003-04). La muestra integraba la distribución vertical de la carga en suspensión, en el centro de la sección del río. Análisis específicos permitieron verificar que la muestra central es representativa del conjunto de la sección. Con los datos se elaboraron curvas de gasto que relacionan caudal con caudal sólido en suspensión (Figura 3.16).

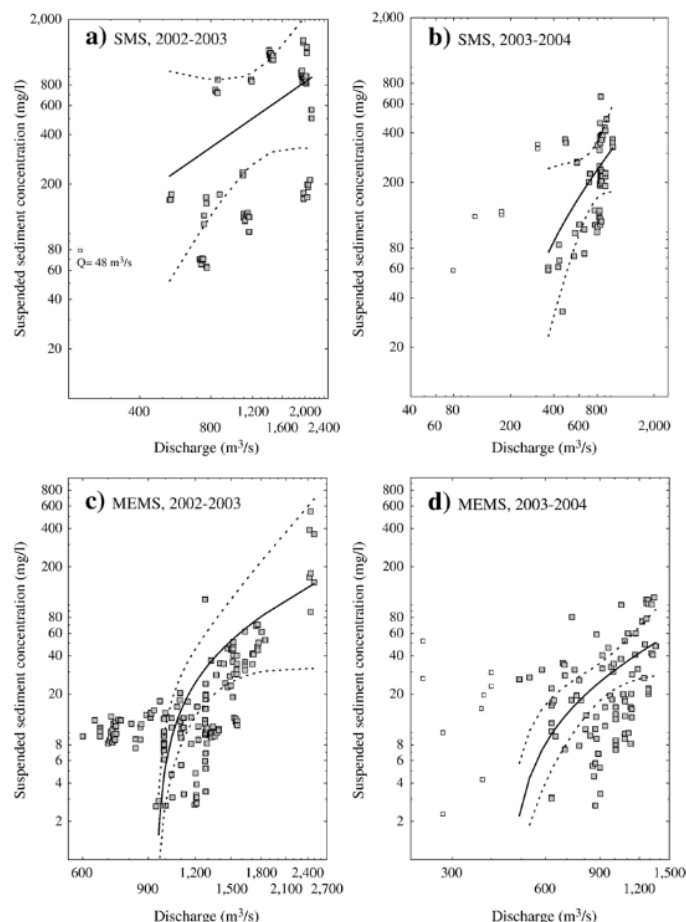


Fig. 4. Suspended sediment load rating curves at the monitoring sections (a and b at SMS and c and d at MEMS) in the lower Ebro River for the hydrological years 2002–2003 and 2003–2004. Dashed lines represent the  $\alpha=0.95$  confidence limits above and below the regression line (solid line) (see Table 2 for equations). Data represented by open squares have not been included in the analysis.

Las concentraciones medias en Sástago fueron de 530 mg/l en 2002-03 y 215 mg/l en 2003-04. La máxima concentración medida fue de 1.500 mg/l para caudales sobre 2.000 m<sup>3</sup>/s. La carga de fondo medida fue muy inferior a estos valores. La carga total de sedimentos en Sástago se estimó en 2,31 Mt para 2002-03 y 0,97 Mt para 2003-04.

Las concentraciones medias en Mora de Ebro fueron de 38 mg/l en 2002-03 y 27 mg/l en 2003-04. La máxima concentración medida fue de 550 mg/l para una punta de caudal de 2.400 m<sup>3</sup>/s. Los valores anuales estimados de transporte en suspensión fueron 0,26 Mt para 2002-03 y 0,29 Mt para 2003-04. La carga de fondo en Mora de Ebro presentó valores comparables al transporte en suspensión: 0,28 Mt para 2002-03 y 0,08 Mt para 2003-04. Los valores totales fueron de 0,54 Mt para 2002-03 y 0,37 Mt para 2003-04 (Figura 3.17). Se estimó que la mayor parte de los sedimentos medidos en Mora de Ebro procedían de la erosión en el cauce aguas abajo de las presas.

Table 3  
Sediment yield of the lower Ebro River for the period 2002–2004

Monitoring section	Sediment transport	2002–2003	2003–2004	2002–2004
Sastago bridge — SMS ( <i>section upstream dams</i> )	Suspended load (t) <sup>a</sup>	<sup>(99)</sup> 2,297,000	<sup>(99.8)</sup> 972,200	<sup>(99.5)</sup> 3,269,200
	Bedload (t)	<sup>(1)</sup> 15,300 <sup>b</sup>	<sup>(0.02)</sup> 155 <sup>c</sup>	<sup>(0.5)</sup> 15,455
	Total load (t)	2,312,300	972,355	3,284,655
Mora d'Ebre bridge — MEMS ( <i>section downstream dams</i> )	Suspended load (t) <sup>a</sup>	<sup>(48)</sup> 257,580	<sup>(79)</sup> 294,500	<sup>(60)</sup> 552,080
	Bedload (t) <sup>a</sup>	<sup>(52)</sup> 279,000	<sup>(21)</sup> 77,000	<sup>(40)</sup> 356,000
	Total load (t)	536,580	371,500	908,080

<sup>(#)</sup> Percentage of sediment load within total load.

<sup>a</sup> Calculated by means of the Flow Duration Method (Walling, 1984).

<sup>b</sup> Estimated using the Meyer-Peter et al. (1934) bedload transport formula.

<sup>c</sup> Calculated as the product of the discharge times the average bedload rate (see text for details).

Figura 3.17. Tabla 3 de Vericat y Batalla, 2006

### Vericat y Batalla 2005-2008

La campaña de toma de datos en el periodo 2005-2008 está descrita en Batalla y Vericat, 2011b y en Batalla et al., 2014. Se indica que se tomaron 200 muestras en Mora de Ebro en un periodo que abarca tres años hidrológicos.

La concentración media fue de 50 mg/l para un caudal medio de 800 m<sup>3</sup>/s en el periodo. Se utilizó la curva de gasto (Figura 3.18) para determinar la carga total durante el periodo, que se estimó en 0,65 Mt en tres años, variando de 0,065 Mt en 2005-06 (año seco) a 0,29 Mt y 0,30 Mt en 2006-07 y 2007-08, respectivamente. Estos valores son algo inferiores a los obtenidos en la campaña 2002-04, lo que se explica por la inferior aportación del Ebro.

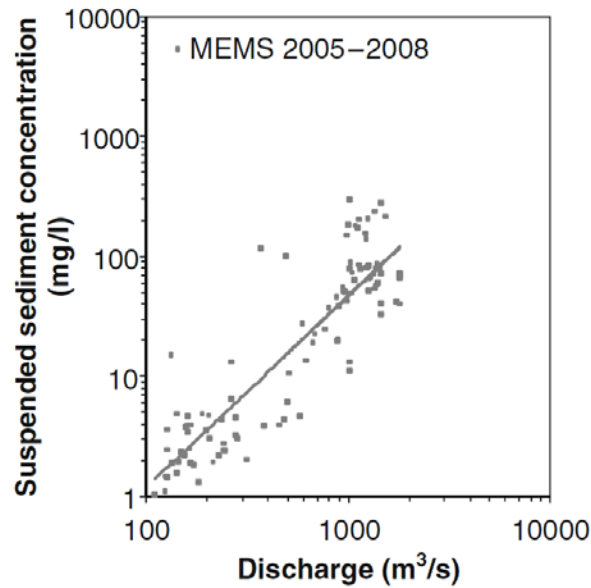


Figura 3.18. Figura 6 c de Batalla y Vericat, 2011.

**Tena et al. 2011**

Los datos recopilados en las campañas de 2002-04 y 2005-2008 fueron utilizados por Tena et al. (2011) para reconstruir una serie continua de transporte sólido a partir de las medidas de caudal en Ascó y las medidas de turbidez de la estación de alerta de calidad de Pas de L’Ase. Tena et al. (2011) encontraron una buena correlación entre la medida de turbidez (en NTU) y la concentración de sedimento en suspensión, que emplearon para obtener las series continuas de transporte en suspensión, de donde se obtuvo la curva de caudales clasificados.

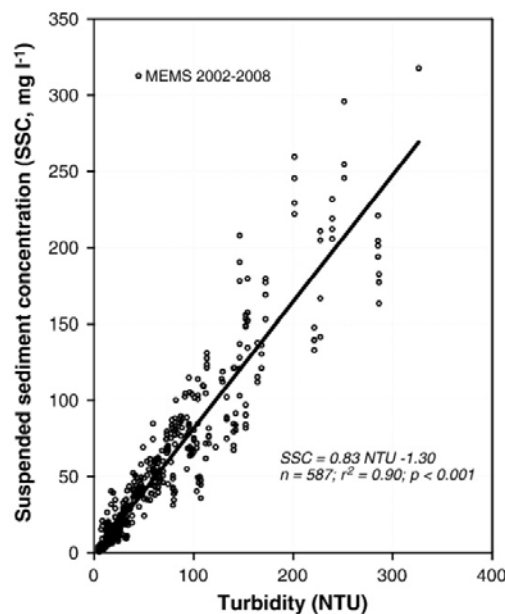


Fig. 3. Rating curve between turbidity (NTU) and suspended sediment concentration (SSC) at the Móra d'Ebre monitoring section (MEMS).

Figura 3.19. Figura 3 de Tena et al., 2011

Estimaron una concentración en la estación de Pas de l’Ase entre 0,2 y 240 mg/l, con un valor medio de 9 mg/l en el periodo 1998-2008 para un caudal medio de 316 m<sup>3</sup>/s. Estas cifras corresponden a una carga en suspensión de 0,092 Mt/año (Figura 3.20).

**Table 1**  
Annual discharge and suspended sediment data for the study period in the River Ebro.

Year	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s) <sup>a</sup>	Q <sub>mean</sub> (m <sup>3</sup> /s) <sup>b</sup>	Q <sub>min</sub> (m <sup>3</sup> /s) <sup>c</sup>	Total runoff (hm <sup>3</sup> ) <sup>d</sup>	SSC <sub>max</sub> (mg/l) <sup>e</sup>	SSC <sub>mean</sub> (mg/l) <sup>f</sup>	SSC <sub>min</sub> (mg/l) <sup>g</sup>	Total load (t) <sup>h</sup>
1998-99	760	247	128	7,782	50	15	6.4	87,393
1999-00	1,137	262	106	8,298	36	13	6.2	84,422
2000-01	2,650	420	97	13,225	118	12	2.9	151,916
2001-02	504	192	79	6,054	21	5	1.2	21,860
2002-03	2,588	474	139	14,835	227	8	0.2	176,250
2003-04	1,351	472	121	14,922	89	10	0.4	107,132
2004-05	779	299	134	9,407	25	5	0.4	34,429
2005-06	1,502	254	115	8,051	95	5	1.2	41,414
2006-07	1,897	283	112	8,895	201	7	2.0	89,451
2007-08	2,232	261	76	8,243	240	8	1.8	128,785
Complete period	2,650	316	76	9,971 <sup>i</sup>	240	9	0.2	92,305 <sup>i</sup>

- <sup>a</sup> Maximum discharge.
- <sup>b</sup> Mean discharge.
- <sup>c</sup> Minimum discharge.
- <sup>d</sup> Total runoff per year.
- <sup>e</sup> Maximum suspended sediment concentration.
- <sup>f</sup> Mean suspended sediment concentration.
- <sup>g</sup> Minimum suspended sediment concentration.
- <sup>h</sup> Total load per year.
- <sup>i</sup> Mean value.

Figura 3.20. Tabla 1 de Tena et al., 2011

### Tena et al., 2012

Esta metodología se empleó también en Tena et al. (2012) para reconstruir el tránsito sedimentario en todo el tramo del Ebro hasta la desembocadura, analizando las estaciones de Ascó, Pas de l’Ase, Mora de Ebro, Xerta y Tortosa. Se hizo un balance entre la entrada (datos de caudal en Ascó y turbidez en Pas de l’Ase) y la salida (datos de caudal de Tortosa y turbidez de Xerta) de un tramo de 46 km de río en el periodo 1998-2008.

Se obtuvo una concentración media en Xerta de 13 mg/l, que supone una carga de 0,116 Mt/año. En Pas de l’Ase la carga media en el periodo 1998-2008 fue de 0,092 Mt/año (Figura 3.21).

**Table 1** Annual discharge and suspended sediment data for the study period in the River Ebro.

Year	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>mean</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>min</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Total runoff* (hm <sup>3</sup> )	SSC <sub>max</sub> (mg/L)	SSC <sub>mean</sub> (mg/L)	SSC <sub>min</sub> (mg/L)	Total load† (t)	Total load PAMS‡ (t)
1998/99	534	205	81	6 457	79	10	1.7	49 383	87 393
1999/00	942	226	82	7 138	68	15	4.9	94 112	84 422
2000/01	2479	398	87	12 539	168	18	2.4	246 604	151 916
2001/02	539	128	57	4 049	36	4	1.6	11 745	21 860
2002/03	2468	393	82	12 381	144	9	1.6	171 598	176 250
2003/04	1206	442	92	13 964	188	12	2.4	148 879	107 132
2004/05	667	234	78	7 379	24	9	4.1	52 104	34 429
2005/06	1286	200	78	6 315	190	22	5.0	132 261	41 414
2006/07	1809	271	79	8 539	274	18	2.4	140 627	89 451
2007/08	2043	233	70	7 382	121	9	4.1	109 230	128 785
Whole period	2479	273	57	86 142	274	13	1.6	1 156 543	923 051

- Q<sub>max</sub>: maximum discharge; Q<sub>mean</sub>: mean discharge; Q<sub>min</sub>: minimum discharge; SSC<sub>max</sub>: maximum suspended sediment concentration; SSC<sub>mean</sub>: mean suspended sediment concentration; SSC<sub>min</sub>: minimum suspended sediment concentration.
- \* Total runoff per year; † Total load per year; ‡ Total load per year in PAMS.

Figura 3.21. Tabla 1 de Tena et al., 2012

### Tena y Batalla 2008-2011

A partir de la relación obtenida entre concentración de sólidos en suspensión y turbidez, Tena y Batalla prepararon un juego de datos con la serie continua de carga en suspensión durante el periodo 2008-2011 en 11 estaciones de la cuenca: Batea en el Algars, Nonaspe en el Matarraña,

Torrente en el Cinca, Serós en el Segre y Sástago, Ribarroja, Ascó, Pas de l’Ase, Mora de Ebro, Xerta y Tortosa en el Ebro. Los datos de turbidez se obtuvieron de las estaciones oficiales de CHE (Pas de l’Ase y Xerta) y ACA (Serós) y mediante equipos instalados por los investigadores en el resto de los puntos, excepto en Sástago, donde se estimó el transporte sólido a partir del caudal mediante una curva de gasto directa.

Obtuvieron una tasa de transporte de 0,659 Mt/año en Sástago, aguas arriba de Mequinenza y de 0,043 Mt/año en Ribarroja, aguas abajo del embalse. Esta tasa se incrementaba hasta 0,071 Mt/año en Mora de Ebro y volvía a disminuir hasta 0,066 t/año en Tortosa.

### 3.2 Estimaciones indirectas

El balance de sedimentos en el tramo bajo del Ebro también se ha estimado a partir de datos indirectos. A continuación, se presentan los trabajos más representativos.

#### *Análisis de acumulación de sedimentos en embalses*

El Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX ha realizado estudios continuados de seguimiento de la acumulación de sedimentos en embalses mediante métodos batimétricos. Las referencias más citadas son las ponencias presentadas por Cándido Avendaño en el XIX Congreso Mundial de Grandes presas (Avendaño et al., 1997a; 1997b). En el caso de Mequinenza, por comparación entre la cartografía del vaso y una batimetría se estimó una pérdida de volumen de 92,8 hm<sup>3</sup>, que se tradujo en una retención anual de 5,8 hm<sup>3</sup>/año. De estos datos se deduce que el análisis se hizo a los 16 años de la puesta en explotación del embalse (1965), lo que indica que corresponden a finales de 1982.

H.D . Ebro

Reservoir	Height (a.s.l.) (N.W.S.)	Volumen				Capacity loss				Texture
		Initial		Bathymetry		Total		Annual		
		x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Year	x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Year	x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	%	x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	%	
Arguis	960.00	3.000	1938	2.242	1980	0.758	25.27	0.018	0.60	
Barasona	442.67	71.000	1932	46.236	1993	24.764	34.88	0.406	0.57	Clayey-Silt
Cueva Foradada	579.93	28.700	1926	22.083	1992	6.617	23.06	0.100	0.35	Clayey-Silt
Gallipué	693.46	4.000	1927	3.159	1979	0.841	21.03	0.016	0.40	
La Estanca de Alcañiz	342.00	14.000	1944	6.867	1971	7.133	50.95	0.264	1.89	
Las Torcas	726.43	9.000	1946	5.805	1979	3.195	35.50	0.097	1.08	
La Tranquera	685.50	84.380	1960	84.259	1994	0.121	0.14	0.004	0.00	Clayey-Silt
Mequinenza	121.00	1530.000	1966	1437.178	1982	92.822	6.07	5.801	0.38	
Moneva	614.67	10.000	1939	8.009	1984	1.991	19.91	0.044	0.44	
Oliana	518.30	101.000	1969	85.820	1985	15.180	15.03	0.584	0.58	
Pena	617.03	21.500	1930	17.881	1989	3.619	16.83	0.061	0.29	Clayey-Silt
Ribarroja	70.00	219.000	1969	206.776	1982	12.224	5.58	0.940	0.43	Clayey-Silt
Santa María de Belsué	895.40	13.000	1931	11.258	1980	1.742	13.40	0.036	0.27	Clayey-Silt
Santolea	583.35	48.853	1932	47.002	1993	1.851	3.79	0.030	0.06	Clayey-Silt
Sotonera	417.00	189.000	1963	181.712	1986	7.288	3.86	0.317	0.17	
Talarn-Tremp	500.92	258.000	1916	188.408	1990	69.592	26.97	0.940	0.36	
Yesa	488.78	471.000	1960	450.220	1986	20.780	4.41	0.799	0.17	Clayey-Silt

Figura 3.22. Estimación de pérdida de volumen útil en embalses del Ebro realizada por Avendaño et al., 1997b

En el caso de Ribarroja, se estimó una acumulación de sedimentos de 12,224 hm<sup>3</sup>, que corresponde a una tasa anual de 0,94 hm<sup>3</sup>/a.

Los cálculos de Avendaño fueron actualizados por Rafael Cobo (2008), pero los datos correspondientes a Mequinenza y Ribarroja eran idénticos a los presentados por Avendaño en 1997.

	Capacidad inicial (hm <sup>3</sup> )	Aterramiento (hm <sup>3</sup> )	años	% Pérdida	% Pérdida anual
<b>C.H. Ebro</b>					
Alloz	84	17,58	67	20,9	0,31
Arguis	3	0,76	42	25,3	0,60
Barasona	71	24,76	61	34,9	0,57
Cueva Foradada	28,7	6,62	66	23,1	0,35
Gallipué	4	0,84	52	21,0	0,40
La Estanca de Alcañiz	14	7,13	27	51,0	1,89
La Tranquera	84,38	0,12	34	0,1	0,00
Las Torcas	9	3,20	33	35,5	1,08
Mediano	438	12,15	37	2,8	0,07
Mequinenza	1.530	92,82	16	6,1	0,38
Moneva	8	0,63	70	7,9	0,11
Oliana	101	14,91	42	14,8	0,35
Pena	21,5	3,62	59	16,8	0,29
Ribarroja	219	12,22	13	5,6	0,43
Santa María de Belsué	13	1,74	49	13,4	0,27
Santolea	48,853	1,85	61	3,8	0,06
Sotonera	189	7,29	23	3,9	0,17
Talarn-Tremp	258	69,59	74	27,0	0,36
Valdabra	3	1,65	15	55,1	3,68
Yesa	471	20,78	26	4,4	0,17

Figura 3.23. Estimación de pérdida de volumen útil en embalses del Ebro realizada por Cobo, 2008

### ***Estimación a partir del análisis sedimentario***

El transporte de sedimentos también puede analizarse a partir de estudios de los depósitos sedimentarios. Nelson, 1990 presenta un estudio de la tasa de sedimentos transportados por el río Ebro a lo largo de los últimos 4 millones de años. Para el periodo reciente obtiene una tasa de 6,2 Mt/año. En su trabajo cita a los autores Maldonado y Palanques para estimar un transporte en el periodo 1912-1935 de 21 Mt/año, a partir de un caudal medio de 600 m<sup>3</sup>/s y una concentración de 1.143 mg/l. Esto refuerza su argumento de que el cambio en los usos del suelo introducido por el hombre ha intensificado la erosión en la cuenca. No se han podido localizar todas las referencias citadas por Nelson, pero en Palanques et al. (1990) se estima para el periodo 1912-1935 un aporte sólido entre 15 y 10 Mt/año, basado en un caudal medio de 600 m<sup>3</sup>/s y unas concentraciones medias entre 770 mg/l y 1.700 mg/l.



TABLE 1

Amount of sediment in Ebro margin depocenters and estimated minimum Ebro River sediment discharge during different post-Messinian epochs

Epoch	Depocenter	Area km <sup>2</sup>	Average thickness m	Volume of sediment km <sup>3</sup>	Average dry bulk density of sediment gr/cm <sup>3</sup>	Sediment weight Tm	Sediment proportion in depocenter %	Estimated Ebro River sediment discharge (metric tons/yr)
Holocene (0-10 ka)	Shoreline	269	15	4	1.14	4.5x10 <sup>9</sup>	7.2	6.2x10 <sup>6</sup>
	Delta	753	37	28	1.14	31.9x10 <sup>9</sup>	51.2	
	Prodelta	1602	6	10	1.14	11.4x10 <sup>9</sup>	18.3	
	Upper slope	1968	0.38	0.7	0.927	0.6x10 <sup>9</sup>	0.9	
	Mid+low slope	2398	3.32	7.9	0.992	7.8x10 <sup>9</sup>	12.5	
	Base of slope	5950	0.94	5.6	0.878	4.9x10 <sup>9</sup>	7.9	
	Valencia Fan*	10,830	0.13	1.4	0.845	1.2x10 <sup>9</sup>	1.9	
					62.3x10 <sup>9</sup>			
Late Pleistocene (10-18 ka)	Mid+out shelf	3305	8.5	28	1.14	31.9x10 <sup>9</sup>	32.9	12.1x10 <sup>6</sup>
	Upper slope	1968	3.7	7.3	1.24	9.0x10 <sup>9</sup>	9.3	
	Mid+low slope	2398	8.1	19.4	0.992	19.2x10 <sup>9</sup>	19.8	
	Base of slope	5950	1.6	9.5	1.14	10.8x10 <sup>9</sup>	11.2	
	Valencia Fan*	10,830	2.1	22.7	1.14	25.9x10 <sup>9</sup>	26.7	
					96.8x10 <sup>9</sup>			
Pleistocene ("Upper Sequence") (10 ka-1.65 Ma)	Inner shelf	2125	616	1309	1.51	1976.6x10 <sup>9</sup>	7.6	15.7x10 <sup>6</sup>
	Mid+out shelf	5625	1267	7127	1.61	11414.5x10 <sup>9</sup>	44.3	
	Slope	4050	860	3483	1.57	5468.3x10 <sup>9</sup>	21.1	
	Base of slope	5950	252	1499	1.40	2098.6x10 <sup>9</sup>	8.1	
	Valencia Fan*	10,830	310	3357	1.45	4867.6x10 <sup>9</sup>	18.8	
					25885.6x10 <sup>9</sup>			
Pliocene ("Lower Sequence") (1.65-4.8 Ma)	Inner shelf	2125	308	655	1.89	1237.9x10 <sup>9</sup>	6.1	6.5x10 <sup>6</sup>
	Mid+out shelf	5625	469	2638	2.13	5618.9x10 <sup>9</sup>	27.5	
	Slope	4050	429	1737	2.05	3360.8x10 <sup>9</sup>	17.4	
	Base of slope	5950	458	2725	1.69	4305.2x10 <sup>9</sup>	22.5	
	Valencia Fan	10,830	268	2902	1.87	5426.7x10 <sup>9</sup>	26.5	
					20449.5x10 <sup>9</sup>			
Pliocene and Pleistocene (10-ka-4.8 Ma)	Inner shelf	2124	924	1964	1.71	3358.4x10 <sup>9</sup>	7.0	10.0x10 <sup>6</sup>
	Mid+out shelf	5625	1736	9765	1.87	18260.5x10 <sup>9</sup>	38.0	
	Slope	4050	1289	5220	1.82	9500.4x10 <sup>9</sup>	19.8	
	Base of slope	5950	710	4224	1.54	6504.9x10 <sup>9</sup>	13.5	
	Valencia Fan*	10,830	578	6260	1.66	10391.6x10 <sup>9</sup>	21.6	
					48015.8x10 <sup>9</sup>			

Area and average thickness of depocenters compiled from Figs.1 and 2, Palanques and Maldonado (1983, 1985), Palanques (1984), Maldonado et al. (1985a), Alonso (1986), IGME (1986, 1987), Field and Gardner (1990), Alonso et al. (this issue), Alonso and Maldonado (this issue); Díaz et al. (this issue), and Farrán and Maldonado (this issue). Sediment bulk density is based on measurements of Baraza et al. (this issue) and tables of Hamilton's (1976) applied to lithologies compiled from Fig.2 and aforementioned sources.

\*Note that all thickness, volume, weight and percentage values shown for Valencia Fan data are two-thirds of total measured values so that only Ebro River sediment proportion is used for rate and river discharge calculations.

Figura 3.24. Tabla 1 de Nelson, 1990.

**Estimación a partir de la producción de sedimentos**

Las estimaciones de la producción de sedimentos en la cuenca permiten contrastar las cifras que se manejan de tránsito de sedimentos en el curso bajo del río Ebro. García y López, 2009, han recopilado numerosos trabajos de estimación de tasas de producción de sedimentos en la cuenca del Ebro, incluyendo datos de parcelas experimentales y datos de la producción de sedimentos a partir de las batimetrías de los embalses.

En CHE, 2013 se realizó una recopilación de los datos obtenidos en 29 parcelas experimentales con cuencas vertientes inferiores a 100 km<sup>2</sup>, que se presenta en la Figura 3.25. Las

tasas de degradación que se obtuvieron oscilan entre 60.000 t/km<sup>2</sup>a en zonas con erosión intensa por cárcavas y valores inferiores a 1 t/km<sup>2</sup>a. La mediana de los valores obtenidos es de 120 t/km<sup>2</sup>/a.

**Tabla XVI:** Tasas de degradación específica en cuencas experimentales recopiladas de García y López (2009). Elaboración propia.

Cuenca	Superficie km <sup>2</sup>	Degradación específica tn km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	Descripción
Bosc	1,6	0,5	Bosque mediterráneo
Campàs	2,4	0,7	Bosque y un 10 % de cultivos
Can Revull	Pequeña	3,1	Cultivos cerealistas junto a algunos cultivos arbóreos en bancales. Este suelo ha sido drenado desde antiguo mediante canalizaciones subsuperficiales para favorecer la aireación y el cultivo
Barrendiola	4,8	15	Elevada proporción de bosque autóctono con algunas manchas de reforestado
Riera Salada	222	20	Bosque (75 %) y áreas agrícolas (25 %)
Añarbe	48	21	Elevada proporción de bosque autóctono con algunas manchas de reforestado
Labaga	2,07	28	Ambiente cultivado, cuenca alargada y cauce cubierto de vegetación
Río Arbuçies	106	32	Afluente del Tordera
Aixola	3	35	Buena densidad de cubierta pero muy alterada por la reforestación y las frecuentes talas
Río Arbuçies	106	38	Afluente del Tordera
Río Tordera	894	50	
Cal Vila	0,56	55	Flysch eoceno. Campos abandonados y bosque (elevada cubierta vegetal)
Río Arbuçies	106	62	Afluente del Tordera
Abanilla	0,000759	84	Cuenca río Chícamo (Murcia). Vegetación dispersa y baja pendiente
San salvador	0,92	120	Flysch eoceno. Bosque
Río Arbuçies	106	132	Afluente del Tordera
La Tejería	1,69	197	Ambiente cultivado, cuenca redondeada y cauce sin vegetación
Riera Salada	222	210	Bosque (75 %) y áreas agrícolas (25 %)
Arnás	2,84	450	Cuenca abandonada en mitad siglo XX y en proceso de recolonización vegetal
Cal Rodó	4,17	710	bosques, prados y terrazas
Gudalperalón		920	Dehesa. Cubierta de encina y sitios coluviales
Gudalperalón		2210	Dehesa. Laderas
Ca l'isard	1,31	2800	cárcavas, bosques, prados y terrazas
Color	0,000328	2980	Vegetación dispersa y alta pendiente
Gudalperalón		4110	Dehesa. Cárcavas de fondo de valle
Gudalperalón		5850	Dehesa. Áreas con más del 50% de suelo desnudo
Aragüés	0,45	15300	Margas eocenas en el tramo inferior y flysch en el superior. Cárcavas que acompañan al afloramiento de margas y cabecera reforestada con pino.
Aragüés (sólo Cárcavas)		57500	Cárcavas
El Cartor	0,06	60000	cárcavas
Mediana		120	
Mediana		5308	

Figura 3.25. Tabla 16 de CHE, 2013.

Las tasas de producción de sedimentos también se pueden estimar indirectamente a partir del volumen retenido en los embalses. La Figura 3.26, tomada del CHE, 2013, presenta un resumen de valores recopilados para la cuenca del Ebro. La dispersión de valores muestra la heterogeneidad de las características de las cuencas vertientes. Los valores mayores se registran en la cuenca del Matarraña, con una producción próxima a las 1.300 t/km<sup>2</sup>a, mientras que la cuenca de la Tranquera queda por debajo de 10 t/km<sup>2</sup>a.

**Tabla XVII:** Tasa de degradación específica obtenidas a partir del análisis del aterramiento de los embalses de la cuenca del Ebro.

Sistema	Cuenca vertiente	Erosión	Tasa erosión	Fuente
	km <sup>2</sup>	tn año <sup>-1</sup>	tn km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>	
Yesa	2.185	2.240.000	1.025	López Moreno et al (2003)
Yesa	2.185	624.000	286	López Moreno et al (2003)
Barasona	1.512	437.000	289	Sanz Montero (1996)
Terradets	2.426	560.000	231	Van Deek et al (1991)
Tranquera	1.870	15.708	8	Avendaño et al (1996)
Santolea	1.221	21.978	18	Avendaño et al (1996)
Cueva Foradada	644	113.256	176	Avendaño et al (1996)
Santa María de Belsué	190	41.040	216	Avendaño et al (1996)
Oliana	2.694	662.724	246	Avendaño et al (1996)
Barasona	1.250	437.500	350	Avendaño et al (1996)
Sotonera	323	362.083	1.121	Avendaño et al (1996)
Pena	64	82.752	1.293	Avendaño et al (1996)
Mequinenza hasta 1966-1982	51.000	3.766.055	74	Varela et al (1986)
Mequinenza hasta 1983-2008	51.000	2.490.120	49	Palau (2008)
<b>Promedio ponderado por la cuenca vertiente</b>			<b>127</b>	

Nota: López Moreno et al (2003), Sanz Montero (1996) y Van Deek et al (1991) han sido consultados en García y López (2009).

*Figura 3.26. Tabla 17 de CHE, 2013.*

El promedio de los valores de deducidos de la acumulación en embalses resulta 127 t/km<sup>2</sup>a, cifra muy similar a la deducida del análisis de parcelas experimentales. Aplicado a la totalidad de la cuenca, unos 85.000 km<sup>2</sup>, resulta una producción anual de 10,8 Mt/a. Esta cifra es del mismo orden de magnitud que otras estimaciones basadas en métodos diferentes.

### 3.3 Conclusión

La tabla 3.3 resume las campañas de tomas directas de datos que se han localizado en la literatura. Éstas se pueden dividir en tres grandes grupos. El primer grupo está formado por los datos muy antiguos, que corresponden a observaciones cuya metodología no se conoce con precisión. Estos datos están caracterizados por una gran incertidumbre y no se consideran muy fiables. El segundo grupo lo integran un conjunto de trabajos doctorales que tomaron muestras de agua para caracterizar el comportamiento bioquímico del río. En estas muestras se midió la concentración de sedimentos y por ello se incluyen en esta recopilación. Sin embargo, el objetivo principal de estos trabajos no era la caracterización del flujo de sedimentos.

El tercer grupo lo integran los trabajos del grupo RIUS, que han estado específicamente diseñados para medir el tránsito sedimentario, bien mediante medidas directas o mediante estimaciones a partir de la turbidez. Estas campañas se consideran las más fiables, por planteamiento metodológico, su representatividad espacial y su duración.

Autor	Periodo	Número de medidas y frecuencia	Lugar	Tipo	Concentración (mg/l)	Estimación antes de Mequinenza (Mton/año)	Estimación tras Ribarroja (Mton/año)	Estimación retenido (Mton/año)	Publicado	Citado	Comentarios
Gorría	1877	5, instantáneos	Próximo a desembocadura	Suspensión	4100		25		Gorría, 1880	Ibáñez, 1996	Toma de datos probablemente durante crecidas
Catalán	1961-63	15, mensual	Mequinenza	Suspensión	110		2.2		Catalán, 1969	Ibáñez, 1996; Gillén 1992	Libro de texto sobre calidad de aguas
Varela	1976-1988		Antes y después de MR	Suspensión		1.48	0.32	1.16	Varela et al., 1986	Ibáñez, 1996, Palanques 1987	Sólo se ha dispuesto de referencias indirectas
Palanques	1983-86						0.15		Palanques, 1987		Énfasis en composición mineralógica
Muñoz	Feb 1986-Oct 1987	21, mensual	Cherta-Tortosa	Suspensión (fondo)	20		0.13 (Ibáñez)		Muñoz, 1989		Énfasis en ecología, muestras tomadas en el fondo
Guillén	May 1988-Feb 1990	7, instantáneos	3 puntos Amposta-desembocadura	Suspensión (perfil)	5 a 32		0.12		Guillén y Palanques, 1992; Guillén et al., 1992		Sólo se ha dispuesto de referencias indirectas
Roura	Nov 1997-Sep 1999	12 h	5 estaciones	Suspensión	96 a 19	0.76	0.4	0.36			Estudio orientado específicamente a cuantificar el balance sedimentario
Vericat	2002-2004	414	Sástago, Mora de Ebro	Suspensión y fondo	35 a 1500 (SAS); 2 a 550 (ME)	1.64	0.45	1.19	Vericat y Batalla, 2006	Batalla y Vericat 2011b; Batalla et al 2014	Cálculo de carga anual a partir de caudal mediante curva de gasto
Batalla	2005-2008	200	Mora de Ebro	Suspensión	1 a 300		0.22		Batalla y Vericat, 2011b	Tena et al 2011; Tena et al 2012; Batalla et al 2014	Cálculo de carga anual a partir de caudal mediante curva de gasto
Tena	1998-2008	15 min	Pas de l'Ase	Turbidez, 15 min	0.2 a 240		0.092		Tena et al., 2011		Concentración estimada a partir de turbidez. Curva de gasto calibrada con observaciones de carga en suspensión
Tena	1998-2008	15 min	Ascó, Pas de l'Ase, Mora de Ebro, Cherta y Tortosa	Turbidez, 15 min	1.6 a 274		0.116 (Tortosa)		Tena et al., 2012		Concentración estimada a partir de turbidez. Curva de gasto calibrada con observaciones de carga en suspensión
Tena	2008-2012	15 min	11 estaciones	Turbidez, 15 min		0.659	0.043 (Ribarroja); 0,071 (Mora); 0,066 (Tortosa)		Tena y Batalla, 2013	Batalla et al 2014	Concentración estimada a partir de turbidez. Curva de gasto calibrada con observaciones de carga en suspensión

La estimación del flujo de sedimentos aguas arriba del embalse de Mequinenza oscila entre 0,6 y 1,6 Mt/año. La estimación tras Ribarroja ha ido disminuyendo en el tiempo, desde los 0,4 Mt/año estimada en las campañas de finales del siglo XX hasta cifras inferiores a 0,1 Mt/año deducida en las campañas más recientes. El análisis del transporte de sedimentos a lo largo del tramo bajo hasta la desembocadura sugiere que parte de los sedimentos transportados procede del propio material del lecho del río.

#### 4. Análisis de datos de transporte de sedimentos

Los datos incluidos en el Anuario de aforos y en la Red de Control de la Calidad de Agua permiten realizar un análisis directo del transporte de sedimentos, con el que se pueden validar los resultados obtenidos en las distintas investigaciones. En este apartado se realiza un estudio de dichos datos.

##### 4.1 Datos de caudal y turbidez

En este apartado se comparan los datos de caudal con los datos de turbidez en los emplazamientos donde se dispone de datos de las dos variables, que son las estaciones de Zaragoza, Ascó, Tortosa y Fraga. La disponibilidad de datos de turbidez es muy baja. Las series presentan numerosos huecos y los años sin fallo son excepcionales. Las series de Zaragoza y Ascó tienen datos desde 1996, pero Tortosa y Fraga comenzaron a medir en 2011. Por tanto, los periodos de solape de datos de caudal y turbidez son intermitentes y no permiten un análisis continuo. En el estudio nos hemos limitados a analizar globalmente los datos disponibles, independientemente de la fecha a la que corresponden. La validez de este planteamiento puede verificarse mediante el contraste de los valores medios de caudal en los días analizados en comparación con las medias del periodo.

En la figura 3.25 se presentan las relaciones entre caudal (en  $\text{m}^3/\text{s}$ ) y turbidez (en unidades NTU) en las cuatro estaciones analizadas. Los gráficos de la izquierda presentan las relaciones en valores naturales y los de la derecha en escala logarítmica. Se ha añadido en ambos casos una recta de ajuste lineal. Puede apreciarse que existe una cierta tendencia a incrementar la turbidez cuando se incrementa el caudal, pero hay una gran dispersión en los datos y las tendencias no están claras. Los coeficientes  $R^2$  de las correlaciones son muy bajos, lo que indica que no puede establecerse una relación lineal entre las variables NTU y Q. La estación donde se aprecia la relación de forma más clara es la de Tortosa a escala logarítmica, aunque la ley entre variables no es lineal, sino que parece corresponder a una función logística. La estación de Ascó muestra una tendencia similar, aunque la mayor abundancia de datos produce una dispersión mucho mayor. Estos resultados contrastan con los publicados por Batalla y Vericat, 2011, que obtuvieron una clara relación lineal para los datos tomados en Mora de Ebro (Figura 3.18).

En la figura 3.26 se han representado simultáneamente los datos obtenidos en las cuatro estaciones, en escala logarítmica. Esto permite analizar las diferencias observadas de comportamiento en los cuatro emplazamientos de la cuenca. Para compensar el distinto tamaño de las cuencas se han representado los caudales normalizados por el caudal medio de los datos de cada estación. Se aprecia que la estación de Zaragoza es la que presenta los mayores valores de turbidez, sólo alcanzados por episodios aislados en las estaciones del bajo Ebro.

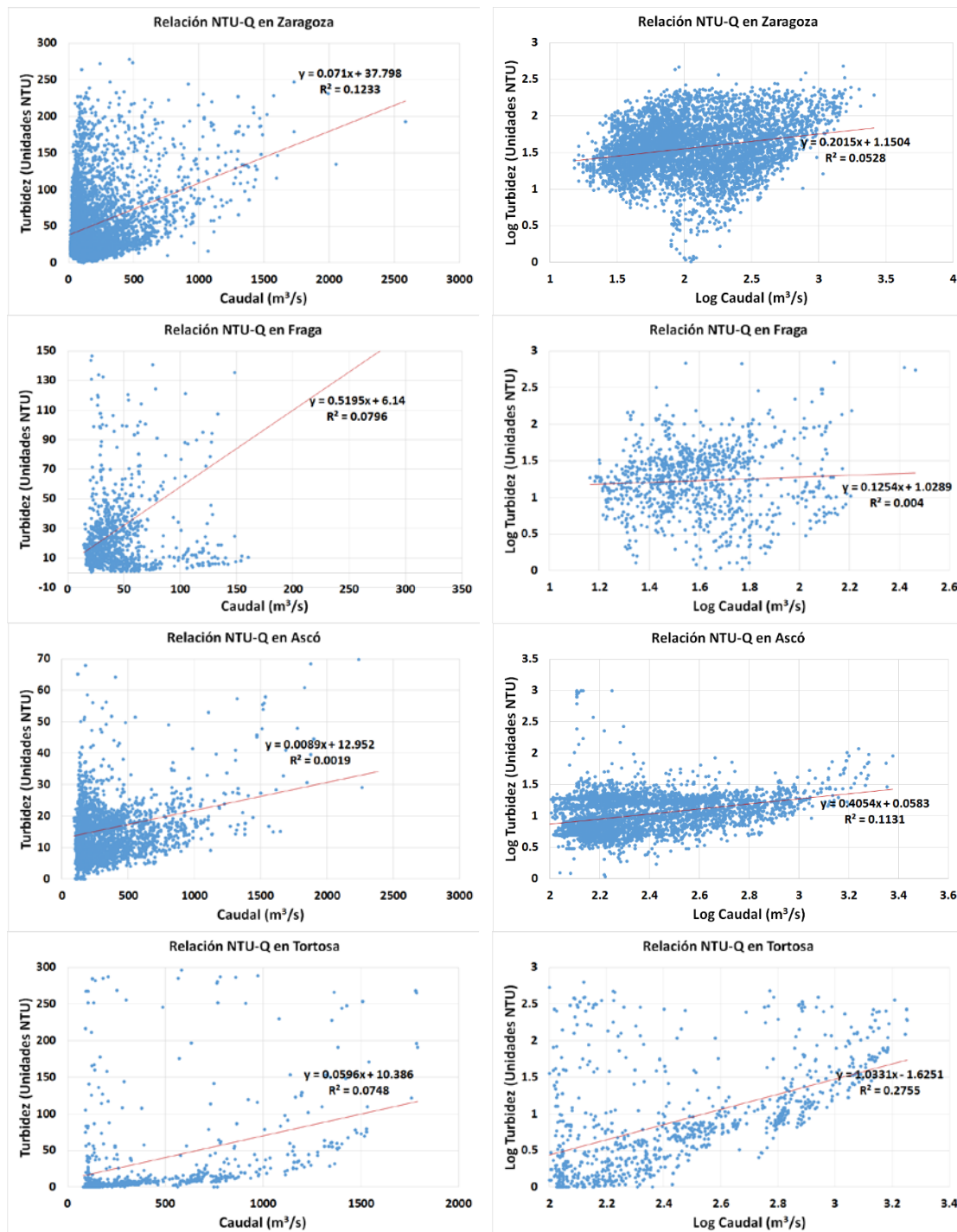


Figura 3.25. Gráficos de relación entre caudal y turbidez para las estaciones de Zaragoza, Fraga, Ascó y Tortosa. Los gráficos de la izquierda están en escala natural y los de la derecha en escala logarítmica.

Los valores de turbidez de Fraga y Ascó son menores, pero los valores de Tortosa resultan excepcionalmente bajos. La diferencia de comportamiento entre las estaciones de Ascó y Tortosa es singularmente llamativa, ya que ambas se encuentran aguas abajo de los embalses MRF y deberían presentar un régimen muy similar. Puede ser un efecto de la escasez de datos disponibles en la estación de Tortosa en comparación con la de Ascó.

En cualquier caso, el análisis de datos no permite establecer una relación clara entre caudal y turbidez. Los valores altos de turbidez corresponden a un rango muy amplio de valores de caudal y no se puede derivar la conclusión de que el transporte de la carga en suspensión se realice preferentemente con valores altos de caudal.

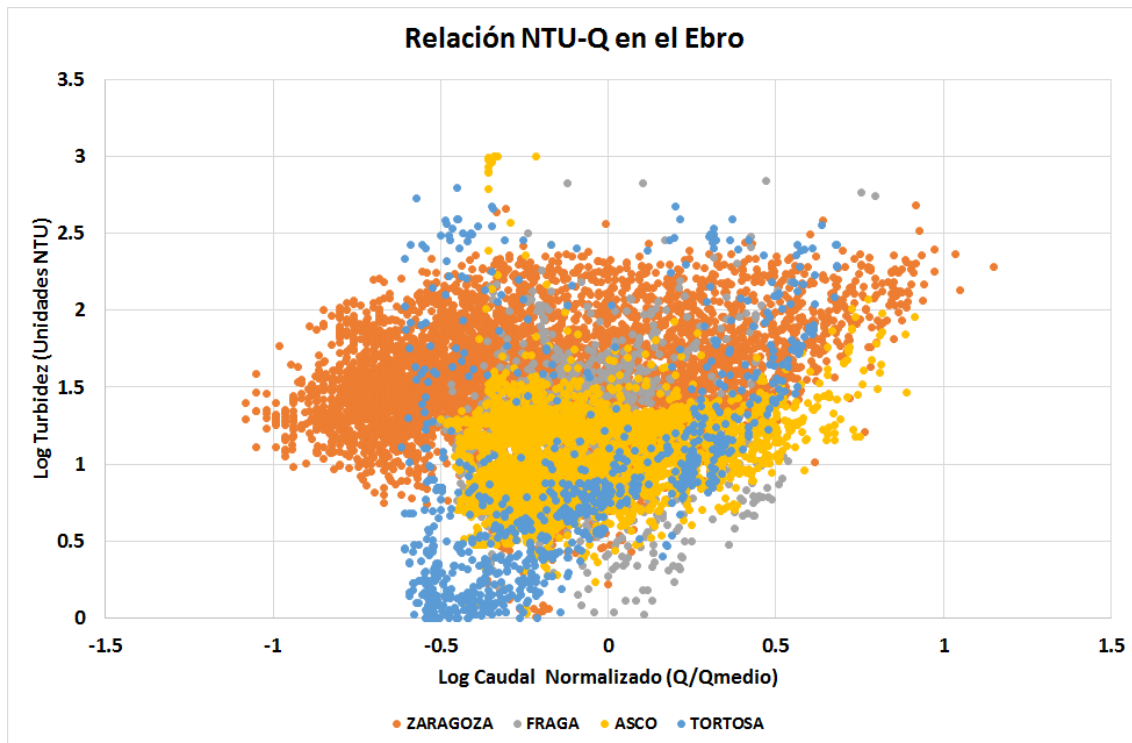


Figura 3.26. Gráficos de relación entre caudal y turbidez para las estaciones de Zaragoza, Fraga, Ascó y Tortosa. Los caudales de las estaciones están normalizados por el caudal medio de la serie.

#### 4.2 Estimación del transporte sólido

A partir de los datos de caudal y turbidez puede realizarse una primera estimación del transporte sólido. Para ello es necesario establecer una relación entre la turbidez y la concentración de sedimento en suspensión. Los autores Tena et al., 2011 presentan una excelente correlación obtenida a partir de los datos en Mora de Ebro (figura 3.19), con un valor  $R^2$  de 0,90. Aunque es posible que esta relación empírica sea específica de la estación debido a las características locales de las partículas en suspensión, puede emplearse para obtener una primera estimación de los valores de flujo de sedimentos a partir de las medidas disponibles. Se ha utilizado la ecuación:

$$SSC = 0,83NTU - 1,3$$

Donde SSC es la concentración de carga en suspensión en mg/l y NTU son las unidades de turbidez.

A partir de la concentración y el caudal medio diario se ha estimado la carga diaria de sedimentos en los días en que hay datos y se han obtenido los valores medios, que se presentan en la tabla 3.4. En ella se aprecia que algunos resultados tienen gran incertidumbre. El valor que se puede utilizar como contraste de la muestra analizada es el correspondiente al caudal. Comparando el caudal de la muestra utilizada con el caudal medio en las estaciones, se puede comprobar que el error en las estaciones con un número importante de datos (Zaragoza y Ascó) es inferior al 10%. Sin



embargo, el error en Tortosa supera el 30%. Esta circunstancia puede justificar la gran carga de sedimentos obtenida en Tortosa.

*Tabla 3.4. Valores medios estimados de transporte de sedimentos a partir de los datos de caudal y turbidez en las estaciones de Zaragoza, Fraga, Ascó y Tortosa.*

Río	Lugar	Caudal medio 1997-2015	Número de datos	Agua		Sedimentos	
				Caudal	Turbidez	Concentración	Transporte
				m3/s	NTU	mg/l	Mt/año
Ebro	Zaragoza	203.4	5375	183.7	50.8	40.9	0.329
Cinca	Fraga	55.8	973	46.4	30.3	23.8	0.047
Ebro	Ascó	320.2	3923	291.6	15.5	11.6	0.120
Ebro	Tortosa	284.9	981	372.1	32.6	25.9	0.500

Los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud que los resultados presentados por los investigadores, que obtuvieron cargas de sedimento algo mayores aguas arriba de los embalses MRF (por ejemplo, 0,659 Mt/año en Sástago) y cargas inferiores aguas abajo de los embalses (por ejemplo, 0,055 Mt/año en Ascó).

## **5. Acumulación de sedimentos observada en los embalses**

Recientemente, la Confederación Hidrográfica del Ebro ha promovido varios trabajos con la intención de caracterizar la dinámica del tránsito sedimentario del bajo Ebro (ver primera parte). Se trata de dos estudios del grupo Flumen sobre el tránsito de sedimentos y la hidrodinámica de los embalses y tres estudios promovidos por la OPH sobre la sedimentación observada en los embalses. En este apartado se resumen las conclusiones de dichos estudios.

### **5.1 Análisis del tránsito sedimentario**

El análisis del transporte de sedimentos se basa en dos fuentes de información: los datos de carga en suspensión medidos en varios puntos y los datos topográficos de los embalses.

Los datos de carga en suspensión son los ya mencionados correspondientes a la tesis de Montserrat Roura. Abarcan el periodo comprendido entre el 25/11/1997 y el 19/09/1999 y corresponden a cinco puntos de medida, en los ríos Ebro (entrada y salida de Mequinenza, salida de Ribarroja), Segre (Serós) y Cinca (Fraga). Se tomaron muestras cada 12 horas.

Los datos topográficos permiten comparar la situación inicial del embalse con su situación reciente. Los datos iniciales corresponden a las cartografías realizadas para el proyecto de las presas de Mequinenza y Ribarroja. Los datos recientes son de dos tipos: datos topográficos directos, tomados en perfiles transversales o en una red de puntos, y datos batimétricos de los embalses.

Esta información ha servido para estimar la acumulación de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja.

Utilizando los datos de concentración, se dedujo que en Mequinenza se retuvieron 1.34 Mt de sedimento y en Ribarroja, 0.51 Mt. Estas cifras corresponden al periodo analizado de 22 meses. La tasa anual sería 0,73 Mt/año en Mequinenza y 0,28 Mt/año en Ribarroja. Suponiendo que, una vez depositado, el sedimento alcanza un peso específico de  $1,6 \text{ t/m}^3$ , estas tasas corresponderían a  $0,45 \text{ hm}^3/\text{año}$  en Mequinenza y  $0,17 \text{ hm}^3/\text{año}$  en Ribarroja.

### **5.2 Sedimentación en Mequinenza**

Utilizando los datos topográficos se han realizado tres estimaciones en Mequinenza, cuyos resultados se resumen y comparan en el gráfico adjunto. El gráfico presenta la estimación de la acumulación del volumen de sedimentos (en  $\text{hm}^3$ ) desde la cola del embalse hasta la presa. Los estudios están identificados con las palabras clave “Lodos”, para el estudio de 2011, “Aproximación”, para el estudio de OPH de 2012 y “Nivelación”, para el estudio de COC de 2012. En el estudio “Aproximación” se ha corregido la estimación en la cola del embalse, restando los  $20 \text{ hm}^3$  que corresponden a los últimos 16 km de la cola, donde se ha constatado que no hay acumulación de sedimentos.

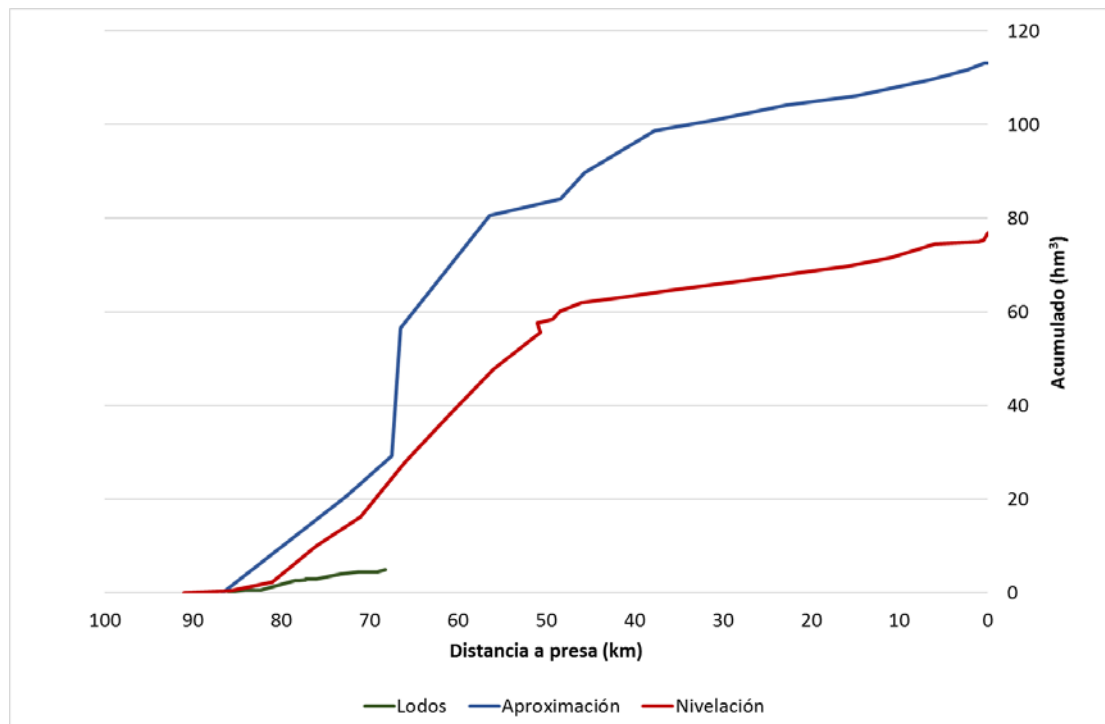


Figura 3.27. Comparación de la estimación de acumulación de sedimentos en Mequinenza según distintos estudios.

Aunque los resultados de los distintos estudios presentan discrepancias entre sí, permiten concluir una caracterización del comportamiento de los sedimentos, teniendo en cuenta la metodología y precisión de cada uno de los trabajos. Posiblemente el trabajo de nivelación sea el que proporciona resultados más fiables, puesto que se tuvo la oportunidad de realizar una campaña de toma de datos de campo con una gran zona del vaso al descubierto. En esa zona (en una distancia entre 80 km y 50 km de la presa) se estimó una acumulación de sedimentos de 55 hm<sup>3</sup>, que corresponde a una tasa de unos 1800 m<sup>3</sup>/m. En los 50 km restantes la estimación se hizo a partir de la batimetría de 2008, resultando unos 21 hm<sup>3</sup> adicionales, que corresponden a 420 m<sup>3</sup>/m. El estudio realizado en 2012 por la OPH con la colaboración Tragsatec estima una mayor acumulación de sedimentos en el tramo central (unos 85 hm<sup>3</sup>, correspondientes a 2800 m<sup>3</sup>/m). Esta discrepancia es consecuencia en gran medida de la medición directa realizada en el perfil 11 del estudio. El perfil 11 está situado en un meandro, junto al sondeo 10, que es donde se encontró el mayor espesor de sedimentos (10,3 m). Por este motivo la tasa del perfil 11 se estimó en 5000 m<sup>3</sup>/m. Esta medida se asignó a la mitad del tramo comprendido entre los perfiles 10 y 11 (5075 m). En realidad, el perfil 12 está situado sólo a 925 m del perfil 11 y en él la medición es ya muy inferior, 2.730 m<sup>3</sup>/m, al igual que sucede en el perfil 10 (2.640 m<sup>3</sup>/m), situado a 10150 m del perfil 11. En los últimos 50 km junto a la presa las estimaciones de los dos estudios de 2012 son coincidentes.



Figura 3.28. Emplazamiento de los perfiles empleados en el estudio de OPH de 2012.

Finalmente, el estudio de 2010 se centró en un tramo relativamente corto (18 km) de la cola del embalse situado en la zona donde comienza la acumulación de sedimento. La estimación se basó en medidas tomadas en una parte del tramo y se obtuvo una tasa inferior a la de los otros dos estudios.

Si se elige como más representativo y fiable el estudio de nivelación de 2012, se puede obtener una estimación de la distribución de los sedimentos en función de la distancia a la presa, que se ha representado en la Figura 3.29.

Como puede apreciarse en la figura 3.29, la mayor parte de los sedimentos se encuentra en una zona muy alejada de la presa, en una franja de 40 km situada entre 45 y 85 km de la presa. Esta zona pudo caracterizarse muy bien puesto que quedó al descubierto al situarse el nivel del embalse por debajo de la cota 100,5 m, lo que permitió la toma directa de datos de nivelación desde aproximadamente 50 km de la presa. Las fotografías de las figuras 3.30 a 3.33, tomadas en 2011 y 2012, muestran la cola del embalse de Mequinenza. En ellas se puede apreciar la acumulación de sedimentos, que se encuentran consolidados y son rápidamente colonizados por la vegetación.

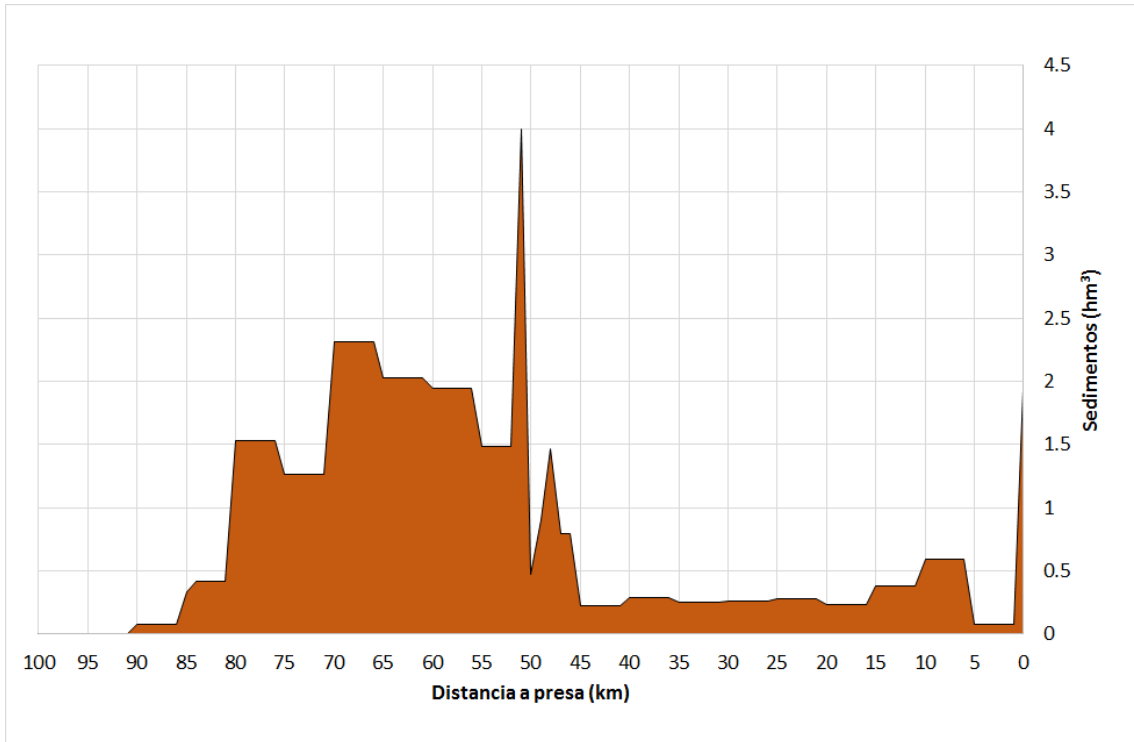


Figura 3.29. Distribución de la acumulación de sedimentos en Mequinenza según la estimación del estudio de nivelación de 2012.



Figura 3.30. Vista de la cola del vaso de Mequinenza: Playas de Chacón. 29/08/2011. Fuente: CHE.



Figura 3.31. Vistas de la cola del vaso de Mequinenza: Sondeo en playas de Chacón. 29/08/2011. Fuente: CHE..



Figura 3.32. Vistas de la cola del vaso de Mequinenza: Restos de corrales derruidos. 21/09/2012. Fuente: CHE.

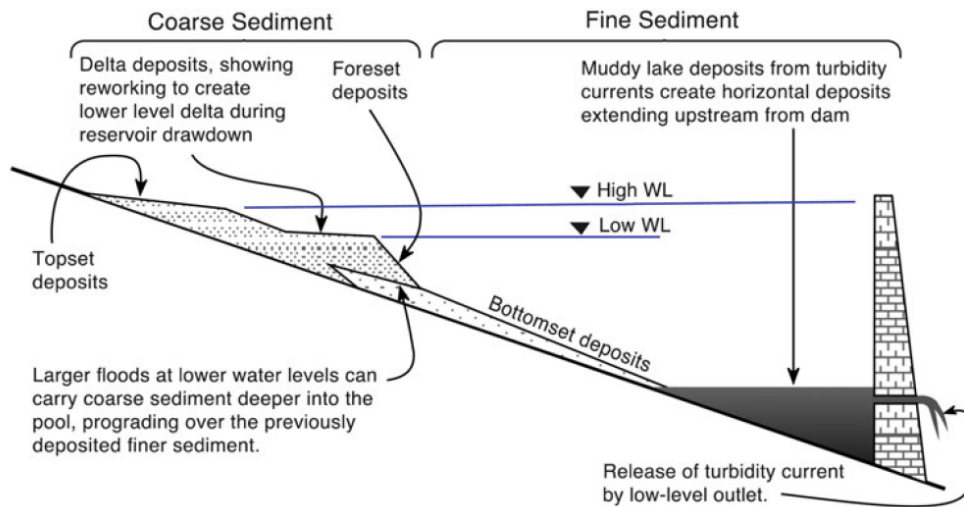


*Figura 3.33. Vista de la cola del vaso de Mequinenza: Zona de Caspe. 29/908/2011. Fuente: CHE.*

En la zona trasera del embalse de Mequinenza se acumulan unos  $60 \text{ hm}^3$  de sedimentos, el 80% del total. Puede pensarse que estos sedimentos corresponden a la fracción más gruesa, que se deposita en episodios de aguas altas nada más entrar el agua al embalse. Las oscilaciones de lámina de agua sitúan este punto de entrada a una distancia que oscila entre 50 km y 100 km de la presa. Aunque la mayor parte de sedimentos se debieron depositar al principio de este tramo, las sucesivas crecidas han podido ir desplazando el sedimento hacia el interior del embalse, pero sin superar la zona que queda delimitada por los niveles mínimos de operación del embalse

En los 45 km más próximos a la presa la acumulación de sedimentos es mucho menor, unos  $15 \text{ hm}^3$ , el 20% del total. La estimación en esta zona se hizo a partir de batimetría y coincide sensiblemente con el estudio de “Aproximación” realizado en 2008 a partir de la misma batimetría. Los sedimentos acumulados en esta zona corresponden a la fracción más fina transportada por el régimen normal de caudales, que decanta a medida que el agua transita por el embalse. En las inmediaciones de la presa (último km) hay una mayor acumulación de sedimentos, originada por la barrera que supone la presa.

Esta caracterización es consistente con lo descrito en la literatura sobre sedimentación en embalses, que se resume en la Figura 3.34.



**Fig. 5.3.** Generalized pattern of reservoir sedimentation showing development of delta containing coarse sediment at two different levels corresponding to periods of two different water levels, and the accumulation of fine-grained deposits downstream of the delta.

*Figura 3.34. Figura 5.3 de Morris, 2014, que ilustra la distribución de la acumulación de sedimentos habitualmente observada en un embalse.*

Como conclusión del análisis de los estudios realizados, se puede dividir el vaso del embalse de Mequinenza en tres tramos. En el tramo ocupado por los 50 km más próximos a la presa se ha observado una acumulación de sedimentos entre 400 y 450 m<sup>3</sup>/m, lo que corresponde a un total de 20-22,5 hm<sup>3</sup>. En el tramo central del vaso, entre 80 y 50 km de distancia de la presa, la acumulación de sedimentos se estima entre 1800 y 2000 m<sup>3</sup>/m, totalizando entre 55 y 75 hm<sup>3</sup>. Finalmente, en la cola del embalse, situada a más de 80 km de la presa, la acumulación es pequeña, pudiendo considerarse inferior a 2,5 hm<sup>3</sup>. En total, se estima una acumulación entre 75 y 100 hm<sup>3</sup>. Considerando que la explotación de Mequinenza se inició en el año 1964-65, esto supone una acumulación media entre 1,5 y 2 hm<sup>3</sup>/año en los 48 años transcurridos hasta septiembre de 2012. Esta tasa media es muy superior a la observada en el estudio realizado por el grupo Flumen a partir de datos de los años 1997-1999, donde se obtuvo una estimación de 0,45 hm<sup>3</sup>/año. Sobre una capacidad de 1.530 hm<sup>3</sup>, la acumulación de sedimentos supone entre un 5% y un 6,5% del volumen de embalse en 48 años.

### 5.3 Sedimentación en Ribarroja

En el embalse de Ribarroja se obtuvo una sedimentación neta de 13 hm<sup>3</sup> mediante la comparación de la cartografía del vaso antes de la construcción y la batimetría realizada en 2007. En la cola del embalse, a una distancia de la presa entre 25 y 30 km, se observó una tasa de sedimentación de unos 1000 m<sup>3</sup>/m, que corresponde a 5 hm<sup>3</sup>. En el segundo tramo, entre 15 y 25 km de la presa, existe un equilibrio entre erosión y sedimentación. En los 15 km más próximos a la presa se acumulan unos 8 hm<sup>3</sup>, que corresponde a una tasa de unos 500 m<sup>3</sup>/m.



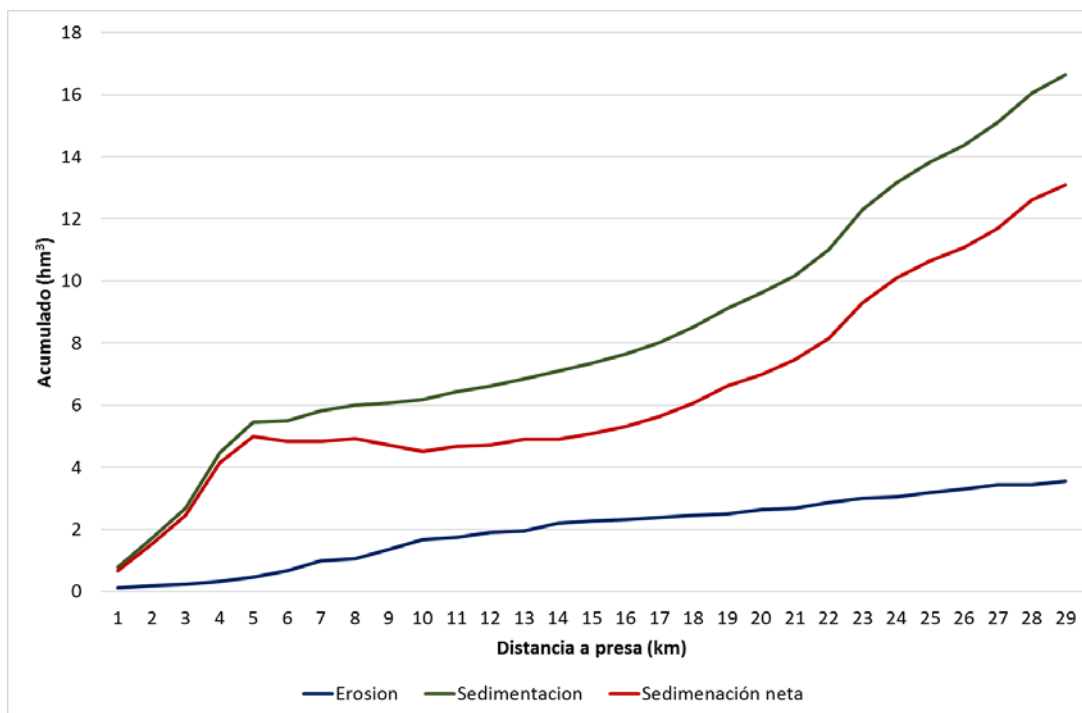


Figura 3.35. Estimación de acumulación de sedimentos en Ribarroja según el estudio de Flumen.

La distribución de la acumulación de sedimentos a lo largo del vaso de Ribarroja se presenta en la figura 3.36. Aunque con menor claridad, pueden distinguirse las tres zonas identificadas en el caso de Mequinenza: una zona de depósito inicial de sedimentos en la cola del embalse, entre 15 km de la presa y la cola del embalse; una zona central entre 5 km y 15 km, donde hay equilibrio entre erosión y sedimentación y una zona próxima a la presa, de 5 km, donde se acumulan los sedimentos debido al efecto barrera.

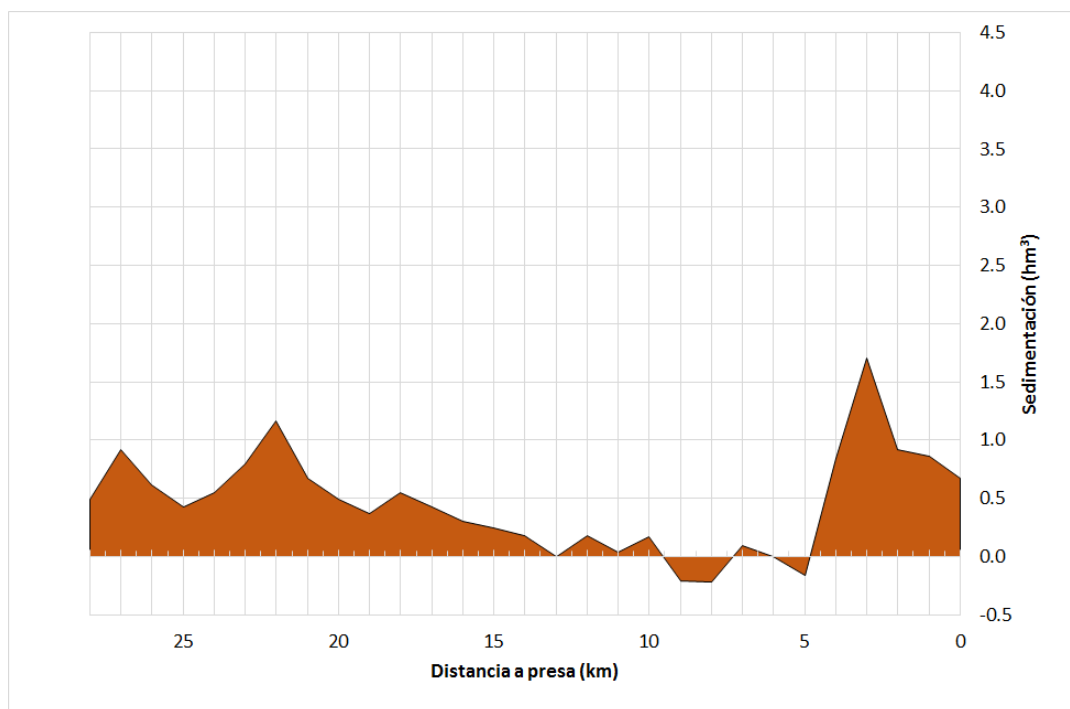


Figura 3.36. Distribución de la acumulación de sedimentos en Ribarroja según el estudio de Flumen.

Desde la puesta en explotación en el año 1968-69 hasta 2007, año en que se realizó la batimetría, la tasa de acumulación ha sido de unos  $0,33 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Sobre una capacidad de  $207 \text{ hm}^3$ , la acumulación de sedimentos supone un 6,3% del volumen de embalse en 39 años

## 6. Conclusiones sobre el tránsito sedimentario

El análisis de la información disponible permite hacer una caracterización global del tránsito sedimentario actual en el bajo Ebro. La primera conclusión que puede extraerse es que el proceso no ha sido estacionario. Los datos más contrastados son los de acumulación de sedimentos en los embalses, cuya estimación está sujeta a mucho menos error que los datos de transporte basados en medidas de caudal y concentraciones. Los datos de acumulación de sedimentos se resumen en la tabla 3.5

Tabla 3.5. Datos de acumulación de sedimentos en embalses

Emplazamiento	CEDEX 1966-1982		FLUMEN 1997-1999		CHE 1966-2012	
	Volumen	Retención	Volumen	Retención	Volumen	Retención
	hm <sup>3</sup> /a	Mt/a	hm <sup>3</sup> /a	Mt/a	hm <sup>3</sup> /a	Mt/a
Mequinenza	5.8	9.28	0.45	0.73	1.75	2.8
Ribarroja	0.94	1.50	0.17	0.28	0.33	0.52

Hay tres estudios disponibles. El estudio del CEDEX abarca desde la construcción de Mequinenza hasta 1982 (16 años). En él se estimó una acumulación de 95,8 hm<sup>3</sup> en 16 años, que corresponde a una acumulación media de sedimentos de 5,8 hm<sup>3</sup>/a. Suponiendo un peso específico de 1,6 t/m<sup>3</sup>, supone un flujo retenido de 9,28 Mt/a. En los estudios realizados recientemente por la CHE (hasta 2012) se estimó una cifra muy similar de acumulación de sedimentos: entre 75 y 100 hm<sup>3</sup> en 48 años. La media de acumulación de sedimentos ha bajado hasta 1,5-2 hm<sup>3</sup>/año, que corresponde a 2,4-3,2 Mt/a. Esto sugiere que la mayor parte de la acumulación de sedimentos se produjo en los primeros años tras la puesta en servicio del embalse. El balance específico realizado por el grupo FLUMEN en 1997-1999 así lo corrobora, ya que se obtuvo una acumulación muy inferior a la media, 0,45 hm<sup>3</sup>/a.

Esta disminución de la tasa de acumulación no se debe a que la capacidad de retención del embalse haya disminuido, sino a una reducción en la carga de sedimentos que llegan al embalse. Esto se corrobora con las estimaciones basadas en los flujos de sedimento medidos. La tabla 3.6 resume los flujos estimados en las principales campañas de toma de datos.

Tabla 3.6. Valores medios estimados de transporte de sedimentos en diversos puntos de la cuenca del Ebro según distintos autores.

Río	Emplazamiento	Transporte sólido Mt/a					
		1997-99	2002-2004	2005-2008	1998-2008	2008-2012	2008-2012
Ebro	Zaragoza						0.329
Ebro	Sástago		1.640			0.659	
Ebro	Escatrón	0.766					
Ebro	Mequinenza	0.038					
Segre	Serós	0.235				0.040	
Cinca	Fraga	0.457				0.121	0.047
Ebro	Ribarroja	0.405				0.043	
Ebro	Ascó					0.055	0.120
Ebro	Pas de l'Ase				0.092	0.056	
Ebro	Mora de Ebro		0.454	0.216		0.071	
Ebro	Xerta				0.116	0.070	
Ebro	Tortosa					0.066	0.500
	Referencia	Roura, 2008	Vericat y Batalla, 2006	Batalla y Vericat, 2011	Tena et al., 2012	Tena y Batalla, 2013	Este trabajo

En general, hay una gran dispersión entre los datos, lo que se justifica por distintas circunstancias. En primer lugar, las técnicas de medida no son muy precisas. Con frecuencia se utilizan técnicas indirectas o se recurre a regresiones para obtener los valores. Se trata de un fenómeno muy variable, que depende fuertemente de la naturaleza del año hidrológico. Como las campañas son, en general, de corta duración, los valores obtenidos pueden no ser representativos de las medias a largo plazo. Por ejemplo, la figura 3.37 presenta los datos obtenidos de transporte sólido por Tena et al., 2012 en las estaciones de Pas de l'Ase y Xerta en el periodo 1998-2008. Se comprueba que hay una gran variabilidad interanual. Existe una relación entre el transporte sólido en las dos estaciones, pero no resulta idéntico, a pesar de que se encuentran muy próximas en el mismo tramo de río.

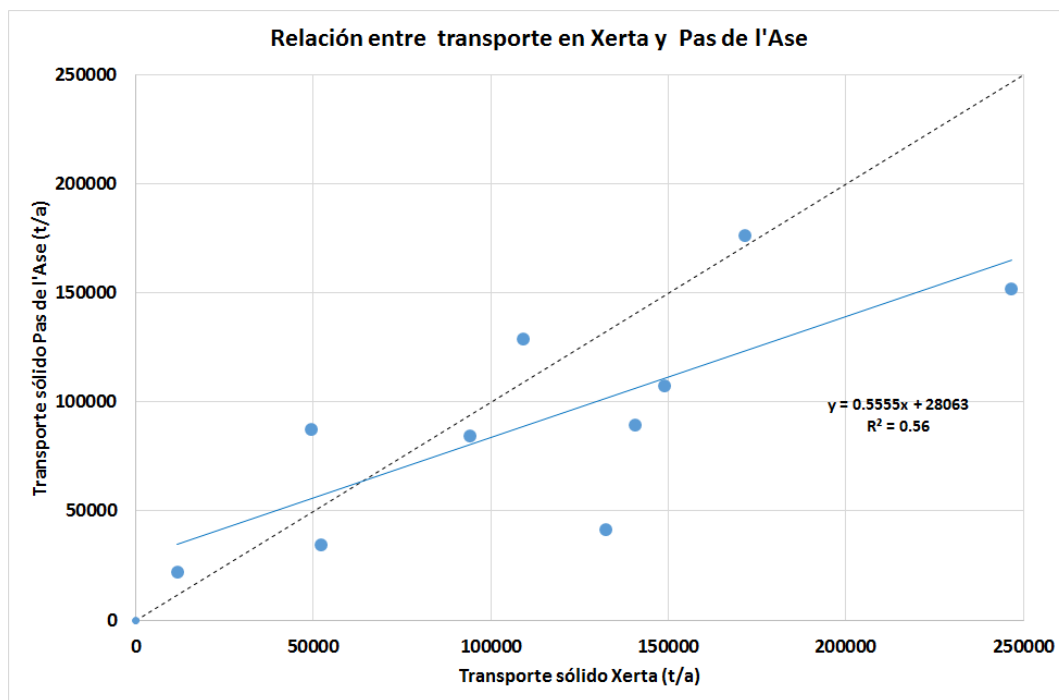


Figura 3.37. Relación entre transporte sólido medido en Xerta y en Pas de l'Ase.

En la exposición seguimos las conclusiones obtenidas por Tena y Batalla (2013) sobre el balance de sedimentos del tramo bajo del Ebro en el periodo 2008-2011, puesto que es el estudio más reciente y el que tiene un alcance más completo. En la tabla 3.7 se presenta un resumen de las medidas realizadas en dicho estudio. La carga de sedimentos se estimó a partir de la turbidez, aplicando ecuaciones empíricas que se dedujeron a partir de medidas directas. En dicha tabla se aprecia que las concentraciones estimadas de carga en suspensión en el Ebro en Sástago y en el Cinca en Fraga son similares, del orden de 50 mg/l. La concentración medida en el Segre es algo menos de la mitad, lo que se puede justificar por la mayor capacidad de embalse de la cuenca. Estas concentraciones se reducen drásticamente tras el paso por los embalses de Mequinenza y Ribarroja, quedando en menos de 5 mg/l. La baja carga de sedimentos hace que se produzcan fenómenos erosivos en el lecho, incrementando la concentración de la carga en suspensión hasta los 8,5 mg/l estimados en Tortosa.

Según el balance, la retención en los embalses de Mequinenza y Ribarroja es del orden de 0,777 Mt/año. Los datos de campo tomados en los embalses han estimado una acumulación media entre 1,5 y 2 hm<sup>3</sup>/año en Mequinenza y 0,33 hm<sup>3</sup>/año en Ribarroja. Estas cifras son superiores a la estimación basada en la medición de la carga en suspensión, puesto que suponen un peso específico del sedimento entre 0,33 y 0,44 t/m<sup>3</sup>, cuando la cifra que suele emplearse en los estudios es de 1,2-1,6 t/m<sup>3</sup>. Esta discrepancia puede explicarse por el proceso de acumulación de sedimentos en los embalses, que no debió ser constante en el tiempo.

Tabla 3.7. Flujos medidos de agua y sedimento en el periodo 2008-2011 por Tena y Batalla, 2013

Río	Lugar	Agua	Sedimentos	
		Caudal	Concentración	Transporte
		m <sup>3</sup> /s	mg/l	Mt/año
Ebro	Sástago	187.9	55.9	0.659
Segre	Serós	45.2	22.8	0.04
Cinca	Torrente	53.2	55.5	0.121
Ebro	Ribarroja	291.1	4.9	0.043
Ebro	Ascó	314.3	6	0.055
Ebro	Pas de l'Ase	308.3	6.1	0.056
Ebro	Mora de Ebro	304.2	7.9	0.071
Ebro	Xerta	282.8	8.8	0.07
Ebro	Tortosa	276.8	8.5	0.066

Desde el punto de vista hidrológico, la circulación de caudales se ha visto reducida por las detracciones realizadas en la cuenca para atender los usos consuntivos. Desde el punto de vista sedimentológico, el transporte se ha reducido significativamente por la menor erosión y la retención de sedimentos en los embalses de la cuenca. Lógicamente la retención de sedimento en los embalses sería mayor en los primeros años tras la puesta en servicio, porque puede suponerse que la carga de sedimento en suspensión sería mayor, por el menor desarrollo de los embalses de la cuenca y las menores detracciones para usos consuntivos. A medida que ha ido pasando el tiempo, los nuevos embalses que han ido entrando en servicio han reducido la carga de transporte en suspensión y los nuevos usos del agua han reducido la circulación de caudales. La combinación de estos dos factores puede explicar la reducción en la retención observada en los embalses. Además, pueden haber influido otras circunstancias como los cambios de uso del suelo de la cuenca o las correcciones hidrológico-forestales para evitar la erosión.

En cualquier caso, las cifras medias obtenidas por Tena y Batalla, 2013 tienen una gran incertidumbre, ya que corresponden a un periodo muy breve y los investigadores obtuvieron diferencias significativas entre los tres años analizados.

Como resumen final se presenta la figura 3.38, inspirada en una similar elaborada por Tena y Batalla, 2013. En ella se representa de forma esquemática el flujo medio de sedimentos en el bajo Ebro. La afluencia principal llega del curso bajo del Ebro, donde se estima un flujo de unos 0,66 Mt/a. Esta cantidad queda prácticamente retenida en el embalse de Mequinenza (supone unos 0,4 hm<sup>3</sup>/a). Al embalse de Ribarroja le entra fundamentalmente la carga de sedimentos transportada por el Segre, que se estima en 0,14 Mt/año. De estas, aproximadamente 0,10 Mt/a son retenidas en el embalse. El resto (0,04 Mt/a) pasa al río Ebro, que va incorporando material procedente del lecho del río hasta los 0,07 Mt/a que aporta en la desembocadura.

Este balance actual difiere mucho del que pudo haber antes del desarrollo de los usos del agua en la cuenca, pero resulta muy difícil especular sobre cuál pudo haber sido la situación de referencia. Hay una variedad de procesos superpuestos que han ido alterando el régimen de producción y transporte de sedimentos: usos del suelo y procesos erosivos de la cuenca, régimen hidrológico, detracción de caudales para atender los usos y retención en embalses, entre otros. Con los datos disponibles no resulta posible cuantificar, siquiera aproximadamente, el efecto que han podido tener cada uno de ellos.

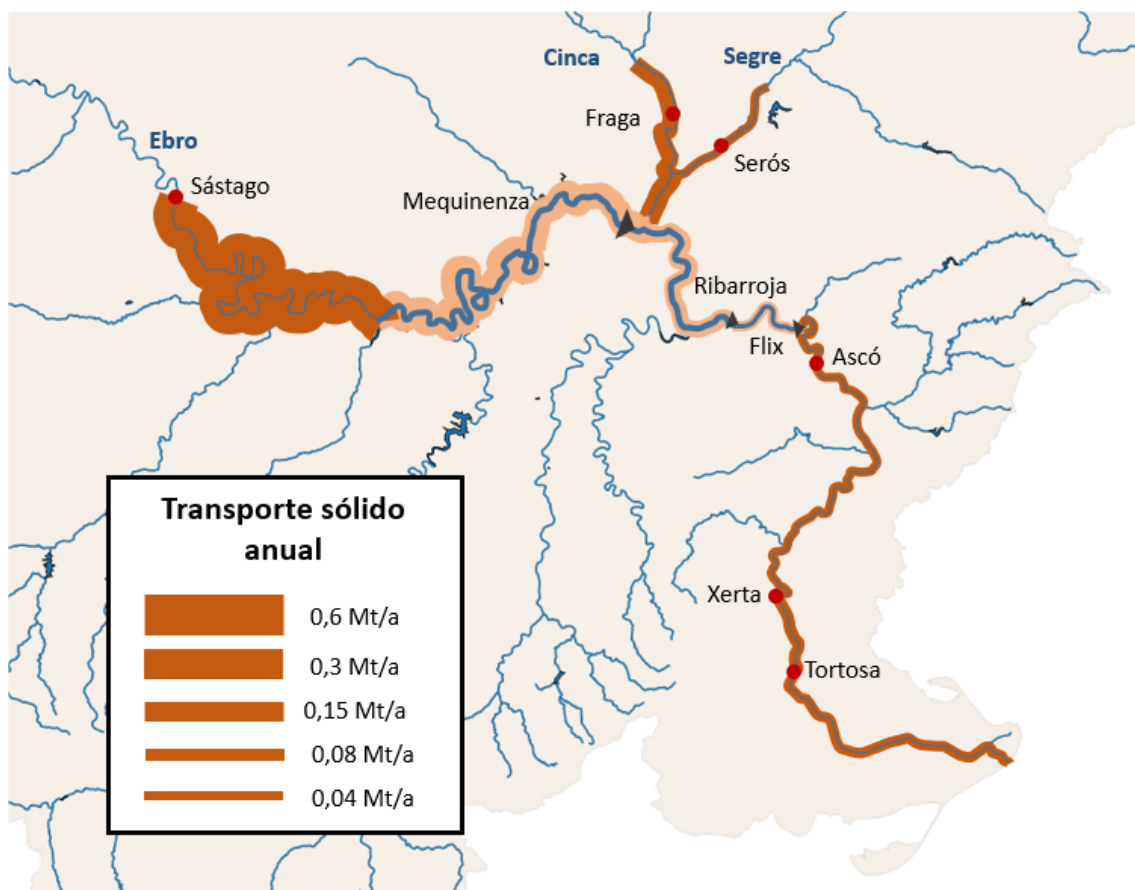


Figura 3.38. Balance esquemático del flujo de sedimentos en el bajo Ebro

## **CUARTA PARTE: RECOPIACIÓN DE EXPERIENCIAS DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS**

### **1. Introducción**

En esta parte se recopila un conjunto de experiencias de movilización de sedimentos en sistemas similares a Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF). Se comienza por un breve repaso a las alternativas metodológicas propuestas en la literatura para la gestión de sedimentos. En la revisión se tienen en cuenta los principales problemas planteados por la gestión de sedimentos en el bajo Ebro: la pérdida de capacidad útil de los embalses y el déficit de sedimentos en el tramo bajo del Ebro. Seguidamente, se identifican las variables que suelen emplearse para determinar la técnica más apropiada, y se caracterizan los embalses del sistema MRF. A continuación, se presenta una recopilación bibliográfica de experiencias a nivel mundial de los distintos tipos de medidas que se pueden adoptar. En cada grupo se resumen las principales características y se discute hasta qué grado son extrapolables a los embalses de MRF. No se han encontrado experiencias documentadas en la literatura cuyas condiciones puedan considerarse análogas a las del sistema MRF, aunque sí se ha obtenido información valiosa para poder determinar las alternativas con más posibilidades de éxito y anticipar las dificultades que pueden aparecer en el proceso.

## 2. Alternativas para la gestión de sedimentos

En este apartado se presentan las principales alternativas metodológicas para la gestión de sedimentos. Seguimos la clasificación propuesta por Morris, 2014 (Figura 4.1), que establece tres grandes categorías en función del objetivo de las medidas:

- Medidas de protección, que reducen la entrada de sedimento al embalse
- Medidas de evacuación, que conducen los sedimentos a través o alrededor del embalse
- Medidas de recuperación, que retiran los sedimentos del embalse

Otros textos clásicos, como Morris y Fan, 1998, Tigrek y Aras, 2012 o Annandale et al., 2016, proporcionan información más detallada, ilustrada con casos de estudio. La monografía del UDWR, 2010 es particularmente interesante, porque se centra en las condiciones del estado de Utah, cuyos embalses son similares a los españoles por su clima semiárido

Classification of Sediment Management Strategies

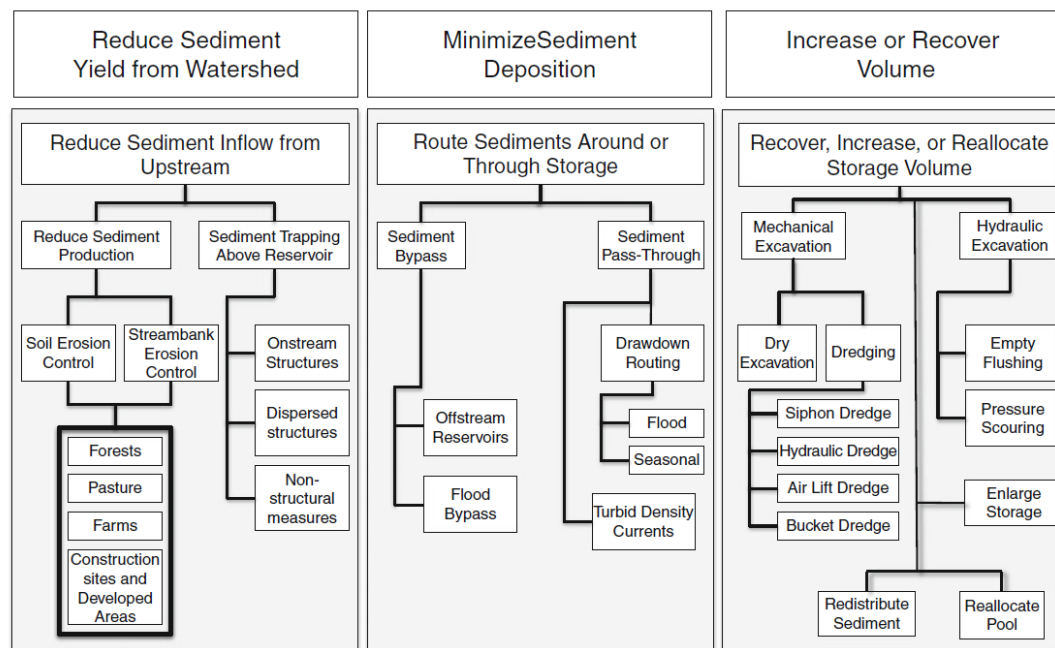


Fig. 5.11. Classification of sediment management alternatives.

Figura 4.1. Figura 5.11 de Morris, 2014 Clasificación de las estrategias de gestión de sedimentos.

Junto a estas medidas, puede identificarse un conjunto de medidas cuyo objetivo es restaurar el flujo de sedimentos aguas abajo del embalse mediante aportación externa. A continuación, se presentan brevemente estas medidas.



## **2.1 Medidas de protección frente al aporte de sedimentos**

Hay dos grupos de estrategias que reducen la aportación de sedimentos al embalse desde la cuenca de aguas arriba: (1) controlar la erosión del suelo y cauce y (2) retener los sedimentos antes de que entren al embalse.

### ***Reducción de la producción de sedimentos***

La protección frente a la erosión puede reducir significativamente el aporte de sedimentos de la cuenca. El control de la erosión incluye actividades como la reducción de la erosión de la superficie del suelo, el control de la erosión en los cauces y la gestión de los deslizamientos de ladera. En este grupo pueden incluirse medidas como la protección del suelo mediante especies vegetales o prácticas agrícolas apropiadas. Las medidas estructurales actúan sobre el movimiento del agua en la superficie para reducir su potencial erosivo, como por ejemplo el cultivo en terrazas.

Con frecuencia la erosión se produce en cárcavas o en cauces, ya que la concentración de caudal aumenta su potencial erosivo, a menudo facilitado por las actuaciones humanas, que eliminan la cubierta vegetal o concentran el flujo de agua. Hay técnicas para el control de la erosión por cárcavas mediante vegetación forestal o diques de retención, pero suele ser un tratamiento caro y no es posible aplicarlo a la totalidad del territorio, por lo que son más efectivas las medidas que actúan sobre sus causas, mejorando las condiciones de la vegetación y el suelo en la cuenca. La erosión del cauce es el resultado de procesos complejos de dinámica fluvial, donde se alternan las zonas de erosión con las de deposición. Existe una numerosa tipología de actuaciones que pueden tratar el problema (protecciones de rip-rap, gaviones, etc). Las técnicas de control deben buscar que el cauce tienda a su situación de equilibrio natural.

### ***Captura de sedimentos aguas arriba del embalse***

La mayor parte del sedimento que se produce en la cuenca no llega a ser transportado por el río hasta su desembocadura o hasta los embalses, sino que queda retenido en obstáculos naturales. Existen numerosas técnicas de corrección hidrológica que pueden aumentar la capacidad natural de retención de sedimentos y evitar su transporte hacia aguas abajo. Los más empleados son los diques de contención de sedimentos, que pueden tener una variedad de tipologías y tamaños dependiendo de la función para la que estén concebidos. Prácticamente la totalidad de diques permite retener la carga de fondo, pero para retener la carga en suspensión es necesario que su tiempo de retención permita la decantación del material. Los diques de retención de sedimentos están expuestos al riesgo de fallo, debido a una mala concepción, diseño, ejecución o conservación de la obra. El fallo del dique puede ocasionar la liberación del sedimento retenido y contrarrestar el efecto beneficioso. Por otra parte, si el dique permanece en el tiempo, puede llegar a consolidar el sedimento retenido mediante la vegetación y producir un efecto beneficioso a largo plazo.



Figura 4.2. Dique de retención de sedimentos en Santa Cruz de la Zarza (Toledo). Fuente Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Esta familia de soluciones es probablemente la más extendida en la práctica, ya que permite su aplicación en un rango muy amplio de situaciones y puede funcionar en condiciones en las que otras medidas no resultan efectivas. Numerosas presas españolas cuentan con diques de cola, que, entre otras funciones, retienen una fracción de los sedimentos antes de que entren al embalse principal. En concreto, la entrada de sedimento a los embalses del curso bajo del Ebro se ha visto reducida de forma muy significativa por la construcción de embalses en la cueca. El efecto de retención de sedimentos en los embalses puede evaluarse mediante la denominada “curva de Brune” (Figura 4.3).

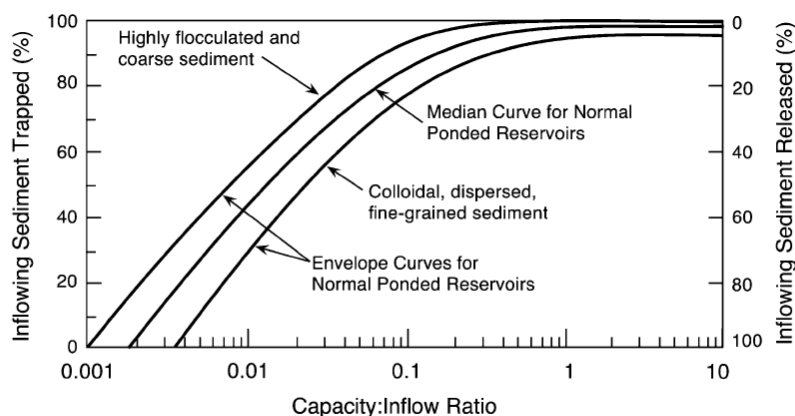


Fig. 5.10. Trap efficiency as a function of reservoir capacity:inflow ratio as proposed by Brune [44].  
Figura 4.3. Figura 5.10 de Morris, 2014, que presenta la curva de Brune.

La curva de Brune indica el potencial de retención de sedimentos de un embalse en función del tiempo de retención: el cociente entre su capacidad y su aportación media anual. Se trata en realidad de un haz de curvas que describe el rango de comportamientos en función de las condiciones del sedimento.

## 2.2 Medidas de evacuación de sedimentos

El objetivo de este tipo de medidas es evitar que se depositen en el embalse los sedimentos que están asociados a los episodios de crecidas. Se suelen aprovechar de las características de la variación del flujo de sedimentos en el tiempo, que suele concentrar la aportación sólida en periodos de corta duración y alta concentración. La estrategia consiste en dejar pasar rápidamente estos flujos de caudal con alta carga de sedimentos, para evitar que puedan depositarse en el embalse. Existen dos grandes grupos de medidas, en función de dónde circule el caudal: las medidas de evacuación directa dejan pasar el sedimento a través del embalse, mientras que los dispositivos de by-pass producen una derivación de los flujos a lo largo de un conducto alternativo.

### *Medidas de evacuación directa*

Las medidas de evacuación directa consisten en dejan pasar a través del embalse los episodios que conducen una mayor carga de sedimentos para evitar su deposición. Para ello deben producirse en el embalse velocidades suficientes para que el tiempo de tránsito sólo permita la decantación de una pequeña fracción del volumen de sedimentos. Dependiendo de las condiciones del embalse pueden distinguirse dos técnicas.

#### *Sluicing*

El término “*sluicing*” tiene una difícil traducción al español. Proviene de “*sluice*”, compuerta, y podría traducirse como “*compuerteo*”, aunque este término no está aceptado en el DRAE. Consiste en permitir que la avenida transite rápidamente por el embalse abriendo completamente las compuertas del aliviadero. Para que resulte efectivo es necesario que el aliviadero esté regulado mediante compuertas y que el umbral del labio esté lo suficientemente próximo al fondo como para conseguir que todo el perfil de agua esté en movimiento. Por este motivo, es necesario vaciar parcialmente el embalse antes de la llegada de la crecida (Figura 4.4), de forma que cuando entren al embalse los caudales altos, éstos discurren sobre el fondo del vaso, minimizando la sección útil y maximizando su velocidad. Si el vaciado es completo, puede incluso producirse un efecto de erosión y arrastre, limpiando parte del sedimento previamente acumulado. Una vez ha pasado la punta del hidrograma (y la mayor parte del sedimento) las compuertas se cierran para volver a llenar el embalse.

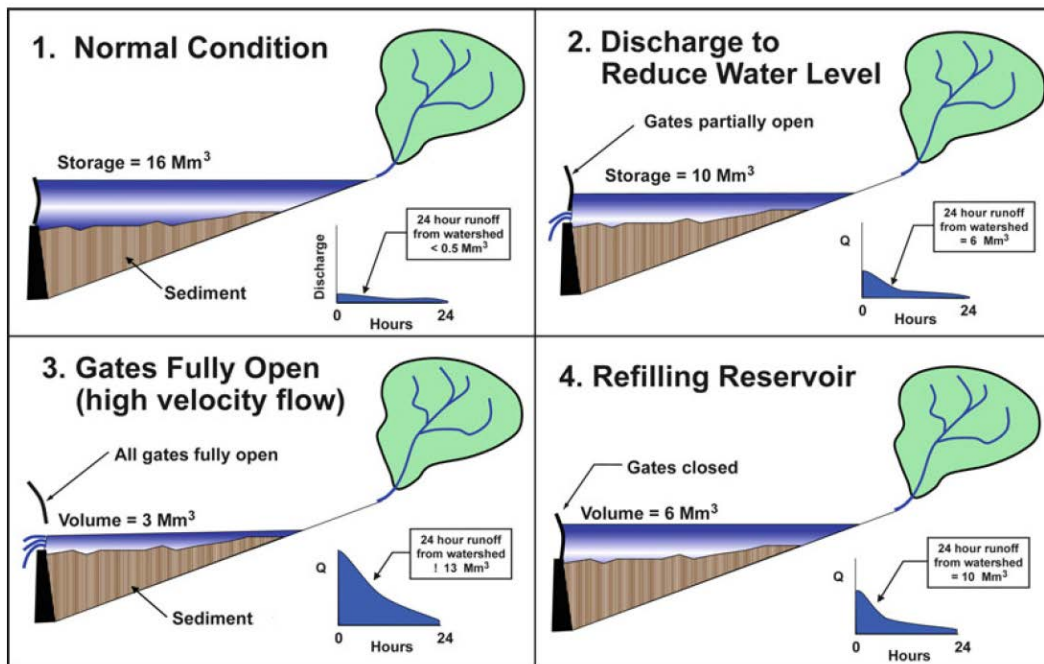


Fig. 5.17. Conceptual operation of a reservoir for sediment pass-through. (1) Normal operation, (2) initiation of drawdown as precipitation is received in the watershed, (3) gates fully open and high-velocity flow developed through the length of the reservoir, and (4) when precipitation diminishes gates are closed to refill the reservoir.

Figura 4.4. Figura 5.17 de Morris, 2014, que presenta la gestión de episodios de sedimentos mediante “sluicing”.

También es posible realizar el *sluicing* mediante los desagües en presión (Figura 4.5). En este caso puede no ser necesario vaciar completamente el embalse. El objetivo es alcanzar unas velocidades en el vaso que impidan la decantación del material en suspensión. La cota hasta la que debe vaciarse el embalse es el resultado de un análisis de coste-beneficio, teniendo en cuenta el coste del agua que se vierte y el beneficio del sedimento que se traslada hacia aguas abajo.

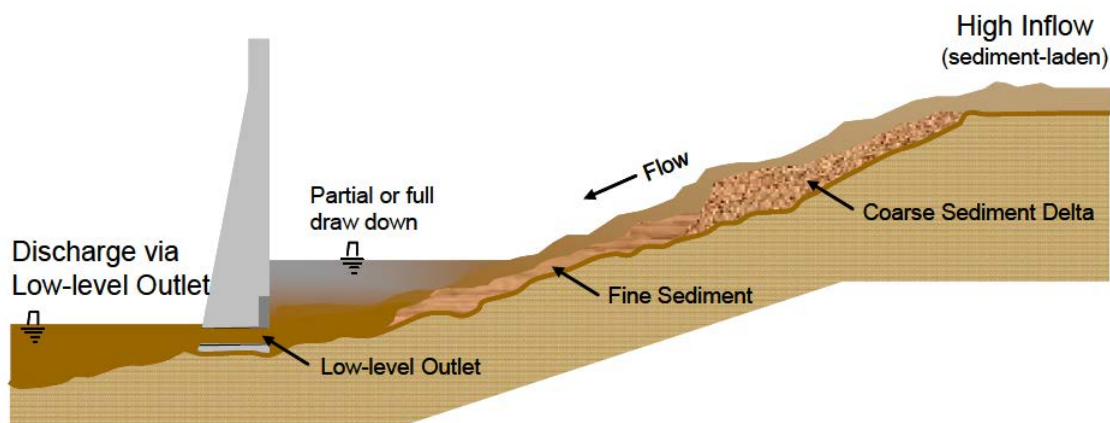


Figura 4.5. Figura 14 de UDWR, 2010, que ilustra la operación de “sluicing” mediante desagües en presión.

Las condiciones necesarias en el embalse para permitir la gestión mediante *sluicing* son muy exigentes. El embalse debe ser vaciado preventivamente, lo que requiere que el periodo de aguas altas sea fácilmente predecible (por ejemplo, porque se produce una punta estacional en una época determinada) o disponer de un sistema de alerta que avise de la llegada de episodios de crecida con

tiempo suficiente para la maniobra. Las compuertas del aliviadero o los desagües profundos que se utilicen deben tener capacidad suficiente para conseguir el vaciado del embalse en el tiempo disponible y no deben producir curvas de remanso que detengan el agua. También es necesario que el tramo de aguas abajo pueda recibir los caudales vertidos sin originar problemas. Además, el embalse debe ser pequeño en relación al volumen del episodio, para poder vaciarlo en el tiempo disponible y aprovechar la fase de recesión del hidrograma para volver a llenarlo. Si la operación se realiza en un sistema con varias estructuras en serie, es necesario coordinarla adecuadamente para evitar que la crecida rápida colmate otras obras. Como resultado, el proceso permite respetar el régimen natural de crecidas y transporte de sedimentos, con lo que se minimizan los efectos ambientales del embalse.

Adaptar una instalación existente para poder aplicar *sluicing* es todavía más difícil. Como se ilustra en la Figura 4.6, puede ser necesario modificar completamente el perfil del aliviadero y cambiar las compuertas. La figura, tomada de Sumi (2016), muestra la propuesta de actuación planteada para las presas de Yamasubarú (29 m de altura, 4,2 hm<sup>3</sup> de capacidad) y Saigou (20 m de altura, 2,5 hm<sup>3</sup> de capacidad), en Japón, que comenzó a ejecutarse en 2011. En ambos casos se trata de presas de poca altura y muy baja capacidad de embalse.

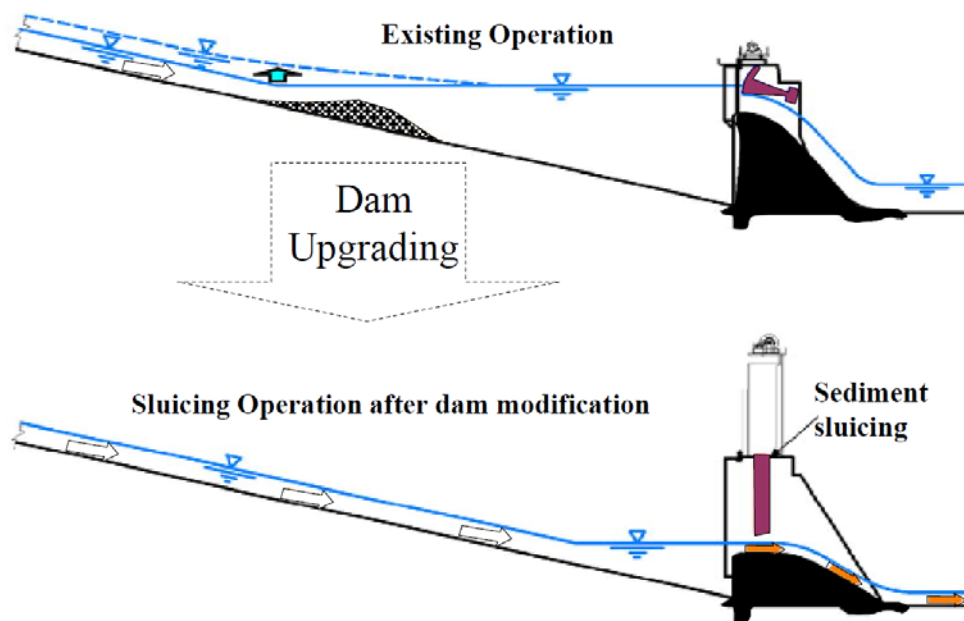


Fig. 6 Schematic view of sediment sluicing

Figura 4.6. Figura 6 de Sumi, 2016, que ilustra la obra de adaptación de una presa para facilitar el “sluicing”.

#### Evacuación de corrientes turbias de densidad

Las corrientes turbias de densidad se forman cuando agua cargada de sedimentos entra a un embalse comparativamente más limpio. El mayor peso específico del agua que entra hace que penetre por debajo del agua que está en el embalse, recorriendo un camino próximo al fondo y conservando sus características (concentración de sedimento) sin mezclarse con el resto del agua del embalse. Si la corriente de densidad llega a la presa y hay un desagüe apropiado a su altura, la apertura del desagüe permitirá evacuar agua con una alta concentración de sedimentos, reduciendo la cantidad que queda depositada en el embalse (Figura 4.7). Si el desagüe no se abre para evacuar la corriente de densidad, ésta quedará retenida junto a la presa, produciendo una acumulación de sedimentos que acabará por depositarse.

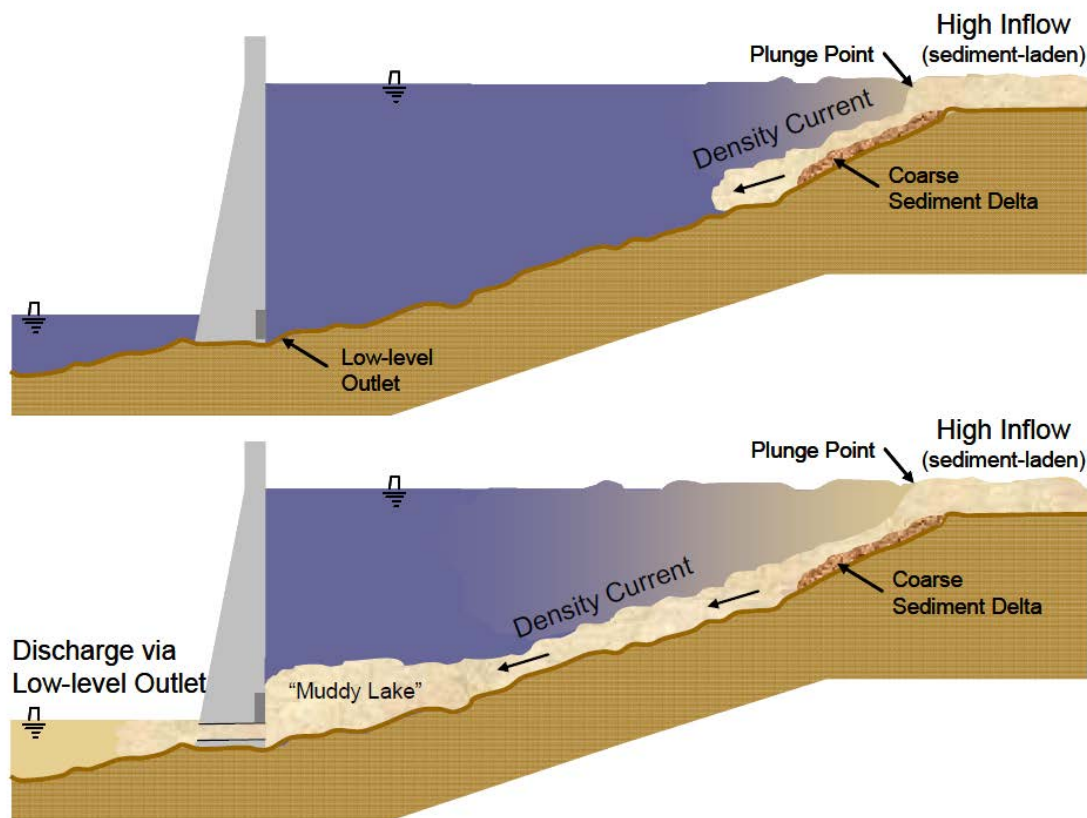


Figura 4.7. Figura 14 de UDWR, 2010, que ilustra la operación de “sluicing” mediante desagües en presión.

Aunque no resulta difícil reproducirlas en laboratorio, la formación de corrientes turbias de densidad en un embalse requiere un conjunto de condiciones singulares que no están bien descritas en la práctica, por lo que no se puede prever este fenómeno en la fase de diseño. El fenómeno es muy sensible a la situación térmica del embalse, ya que el agua cambia su densidad en función de la temperatura. De hecho, pueden darse corrientes de “limpias” densidad si entra agua fría a un embalse comparativamente a mayor temperatura.

La evacuación de corrientes turbias de densidad sólo será una buena elección si se observa que el fenómeno ocurre con frecuencia y se dan las condiciones idóneas para su manipulación. El acondicionamiento de un embalse existente para evacuar las corrientes turbias de densidad puede exigir la modificación de los órganos de desagüe para que puedan tomar el fango de la cota apropiada y evacuarlo. La figura 4.8 muestra dos posibles alternativas en sifón. Requiere además de un sistema de control muy estricto, con una monitorización que permita identificar la formación de la corriente turbia de densidad para coordinar las operaciones. Esto supone instalar turbidímetros a distintas profundidades y en las proximidades de los desagües para conocer la concentración de sólidos en suspensión. Incluso en condiciones ideales, la eficiencia (relación entre el volumen de sedimentos que entra al embalse y el volumen evacuado) es inferior al 50%, siendo lo habitual eficiencias en torno al 20%. A medida que el embalse se va colmatando la eficacia se reduce aún más, porque se forma una superficie horizontal que extiende la base sobre la que discurre la corriente de densidad, incrementando la resistencia al flujo. Habría que combinar la operación con lavados periódicos que mantuvieran un canal estrecho sobre el que pueda discurrir la corriente de densidad.

Figure 7.8 Turbidity Siphon Configurations for Releasing Turbid Density Currents

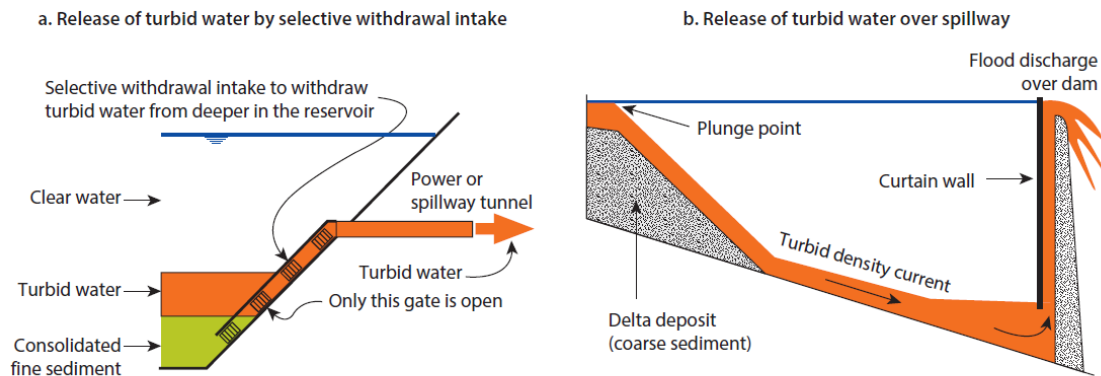


Figura 4.8. Figura 7.8 de Annandale, 2016, que ilustra distintas configuraciones de desagües en sifón para evacuar las corrientes turbias de densidad

### Dispositivos de by-pass

Los dispositivos de by-pass son derivaciones que permiten que los episodios de crecida cargados de sedimentos transiten por un recorrido diferente del embalse. Deben disponer de un sistema de captación, una conducción de transporte y un sistema de retorno al cauce.

#### Embalses fuera del cauce

Los embalses en derivación, situados fuera del cauce, permiten una gestión eficaz de los sedimentos. Si la carga de sedimentos puede ser un problema, se diseña un dispositivo de captación que evite derivar el sedimento hacia el embalse (Figura 4.9). La captación se diseña para derivar un caudal máximo. Cuando se supera, el exceso circula por el río sin ser derivado. También se puede cerrar la derivación cuando la carga de sedimento sea superior a la aceptable. Esto permite dejar pasar las crecidas que llevan la mayor carga de sedimento. En algunos casos, en la captación se dispone un elemento de decantación para reducir la carga de sedimentos del caudal derivado. Si la instalación está bien diseñada, el porcentaje de la aportación natural que se deriva al embalse es mucho mayor que el porcentaje de la carga de sedimentos. Esta medida de gestión sólo puede plantearse en fase de proyecto, si se dan las condiciones adecuadas para el aprovechamiento.

**Figure 7.4 Basic Features of Conventional Onstream Reservoir Compared with Offstream Reservoir**

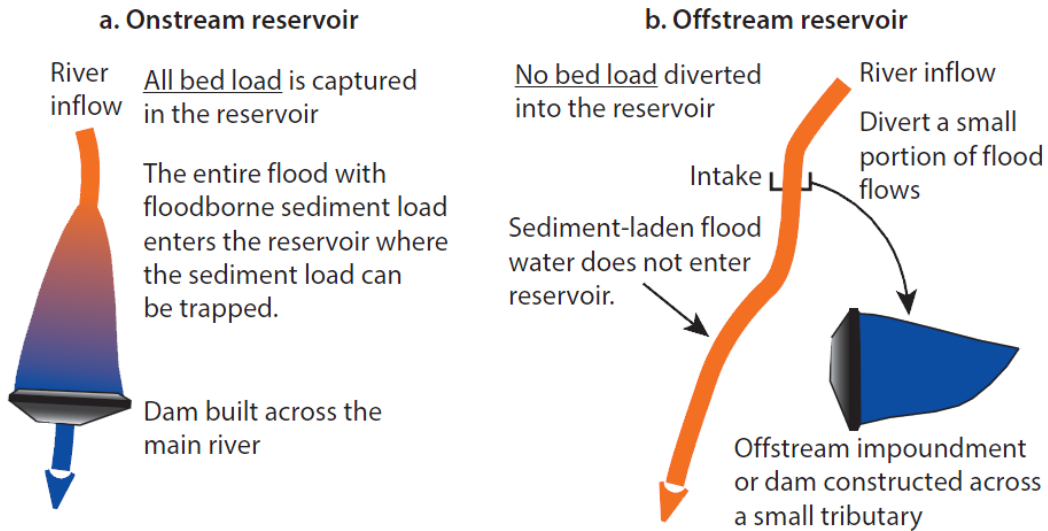


Figura 4.9. Figura 7.4 de Annandale, 2016, que ilustra el funcionamiento de embalses en derivación.

Conducciones de by-pass

Si la presa está construida en el cauce, también se puede derivar el caudal de avenida para que circule por una conducción fuera del embalse. La velocidad en esta conducción de derivación es superior a la que habría si la crecida circulara por el embalse, por lo que puede evitarse la deposición del sedimento y permitir que circule hacia aguas abajo de la presa. Dependiendo de las condiciones topográficas, la derivación puede hacerse en túnel o en canal. La derivación en túnel es la más frecuente, ya que la derivación en canal requiere condiciones topográficas muy favorables que sólo se dan en embalse pequeños y presas de poca altura (Figura 4.10).

**Figure 7.5 Alternatives for Bypass of Sediment-Laden Floods**

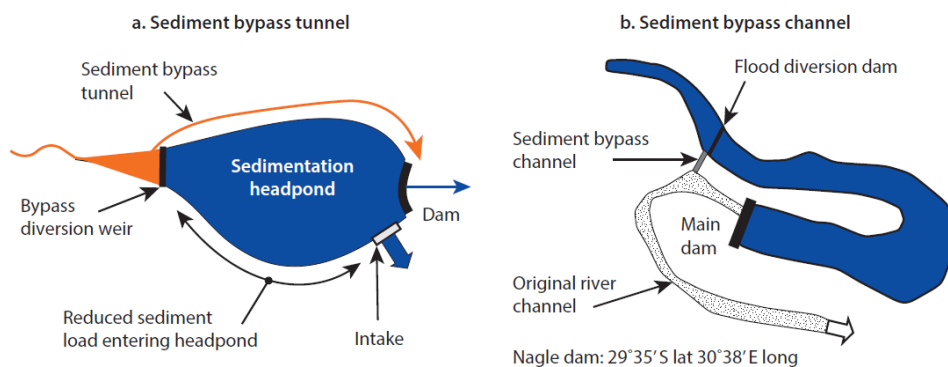


Figura 4.10. Figura 7.5 de Annandale, 2016, que ilustra el funcionamiento de las conducciones de by-pass.

La obra necesita un dispositivo de captación en cola del embalse que permita el paso de los caudales de avenida, si es posible incluyendo también la carga de fondo. Hay también diseños donde la captación se sitúa a cota inferior y operan solamente cuando el nivel del embalse desciende. Las condiciones del túnel de derivación son muy exigentes. Debido a los grandes caudales a transportar, se adoptan velocidades de diseño muy altas, próximas a 10 m/s, lo que



obliga a revestir los túneles con material resistente a la abrasión, ya que el caudal derivado tiene una alta carga de partículas en suspensión. El material puede depositarse en la conducción, lo que obliga a un mantenimiento periódico mediante limpieza, en algunos casos utilizando agua limpia. Estas circunstancias limitan la aplicación de los túneles de by-pass a presas situadas en zonas de alta montaña, donde la topografía permita obtener grandes pendientes en la conducción (Figura 4.11).

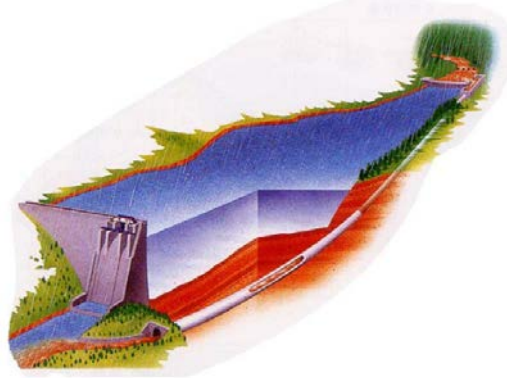


Figure 6.4. Sketch illustrating the bypass tunnel concept.

Figura 4.11. Figura 6.4 de Annandale, 2013, que ilustra el concepto de un túnel de by-pass.

#### By-pass de hidrosucción

El by-pass de hidrosucción aprovecha la diferencia de carga entre la cola del embalse y el pie de presa para transportar agua y sedimento a través de una conducción, generalmente una tubería que atraviesa el embalse. Se debe disponer en combinación con una estructura de retención de sedimentos en la cola del embalse, desde donde se capta la mezcla agua-sedimento que se transporta (Figura 4.12).

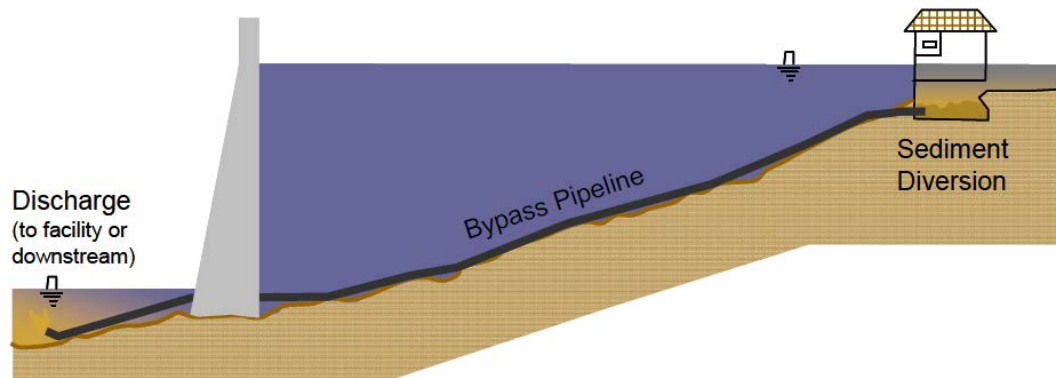


Figura 4.12. Figura 6.4 de Annandale, 2013, que ilustra el concepto de by-pass de hidrosucción, a su vez tomado de Hotchkiss et al., 2014

Si existe suficiente capacidad hidráulica, este sistema permitiría evacuar la mayor parte de la arena que entraría al embalse. Según Hotchkiss et al., 2014, “los autores no conocen ningún sistema de by-pass construido mediante hidrosucción”. Se trata, por tanto, de una propuesta teórica, planteada en una tesis doctoral en la Universidad de Arizona (Eftekharzadeh, 1987), donde se analizaba la capacidad de transporte de la tubería. La hidrosucción sí se ha utilizado para evacuar el material excavado mediante dragado, como se indica más adelante.

### 2.3 Medidas de recuperación de capacidad de embalse

Las medidas de recuperación de la capacidad del embalse tienen como objetivo retirar parte del sedimento ya depositado en el embalse. Se pueden agrupar en dos grandes categorías: la evacuación mediante gestión del embalse y la evacuación directa mediante excavado.

#### *Evacuación mediante gestión*

En este grupo se incluyen las medidas que dependen de la alteración temporal de la operación del embalse para conseguir el objetivo de evacuación o reubicación de los sedimentos. En ellas se aprovecha la capacidad erosiva del agua cuando los calados son bajos y el caudal de circulación es elevado, lo que permite arrastrar material a lo largo del embalse y evacuarlo por los órganos de desagüe.

#### Lavado en superficie

El lavado (“*flushing*”) en superficie consiste en arrastrar el material depositado en el embalse aprovechando el caudal de avenida. Para poder erosionar el material depositado es necesario vaciar el embalse, lo que obliga a evacuar los caudales por un desagüe profundo (Figura 4.13).

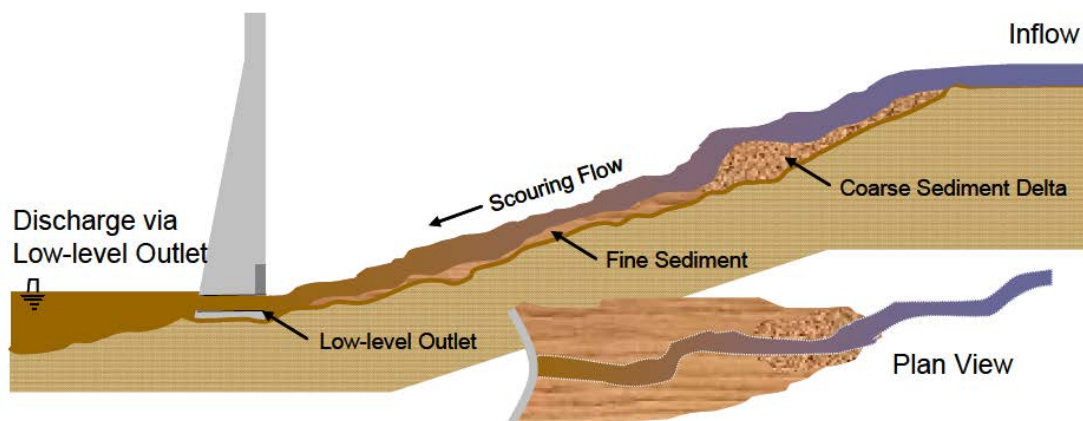


Figura 4.13. Figura 17 de UDWR, 2010, donde se ilustra la operación de lavado de sedimentos

La secuencia de la operación de lavado se ilustra en la figura 4.14. A medida que se va bajando el nivel del embalse, el fondo va quedando al descubierto y el sedimento acumulado en la cola del embalse va siendo arrastrado hacia aguas abajo. Si el nivel desciende lo suficiente como para que se mantenga una velocidad de flujo suficientemente elevada, los sedimentos pueden llegar hasta el órgano de desagüe, que evacua una mezcla de agua y sedimentos con una concentración muy elevada. La concentración del sedimento desciende rápidamente a medida que el material fácilmente erosionable resulta arrastrado, como se indica en el panel b de la figura 4.14.

Figure 7.12 Flushing Event and Quality of Discharged Water

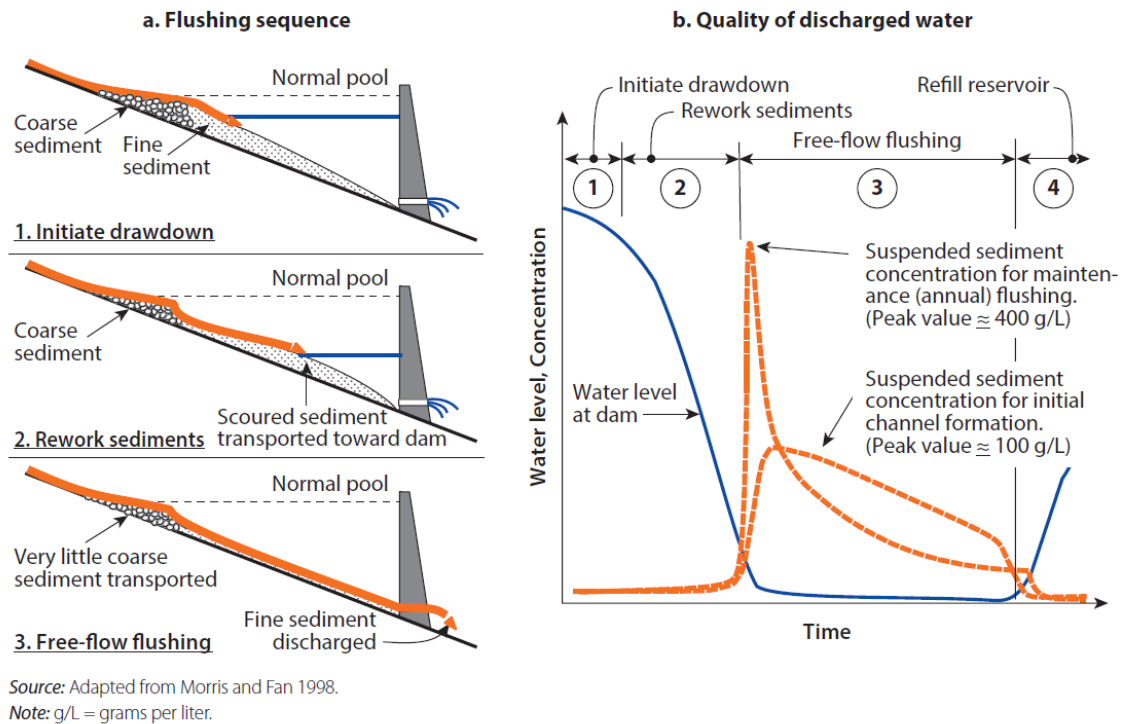


Figura 4.14. Figura 7.12 de Annandale, 2016, donde se ilustra la secuencia de las operaciones de lavado

Si se realiza la operación de lavado por primera vez en un embalse la curva de concentración del efluente es diferente, ya que se forma un canal de erosión en el lecho del embalse, como se muestra en la figura 4.15. El flujo del agua se concentra en las zonas más fácilmente erosionables, excavando un canal que se va profundizando y ensanchando a medida que la erosión progresa. Esto hace que la concentración inicial sea inferior a la que se obtiene en un embalse sometido a operaciones frecuentes de lavado, donde el canal ya está formado y queda ocupado por materia no consolidada, más fácilmente erosionable.

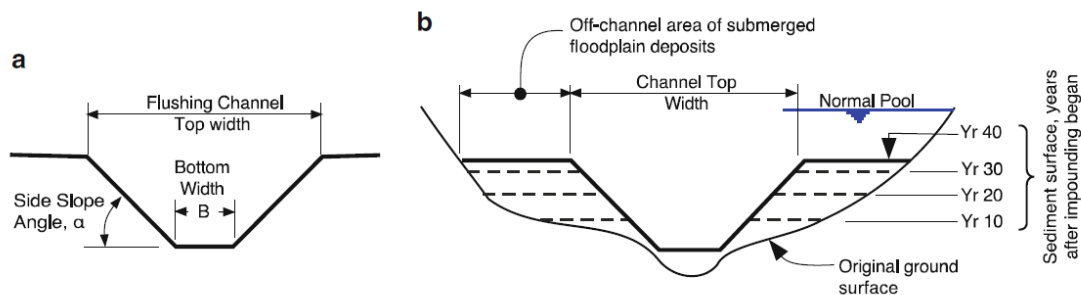


Fig. 5.19. Effect of flushing on reservoir geometry showing (a) definitional cross section of flushing channel in reservoir deposits, and (b) conceptual sequence of deposit configuration over time. This geometry is applicable only to deposits of fine sediment below the area of the reservoir delta.

Figura 4.15. Figura 5.19 de Morris, 2014, donde se muestra el canal de erosión que se forma en el lecho del embalse como consecuencia de las operaciones de lavado

El volumen que se puede evacuar a largo plazo mediante operaciones de lavado está limitado por la anchura y profundidad del canal de erosión. El panel b de la figura 4.15 ilustra la limitada

efectividad de las operaciones sucesivas de lavado. Como puede apreciarse, el agua tiende a discurrir por el canal previamente erosionado y el material depositado fuera de la zona de afección queda en el embalse en forma de terrazas, sin que se pueda movilizar para su retirada. La fotografía de la figura 4.16, correspondiente al vaciado del embalse de Barasona, muestra estos canales de erosión.



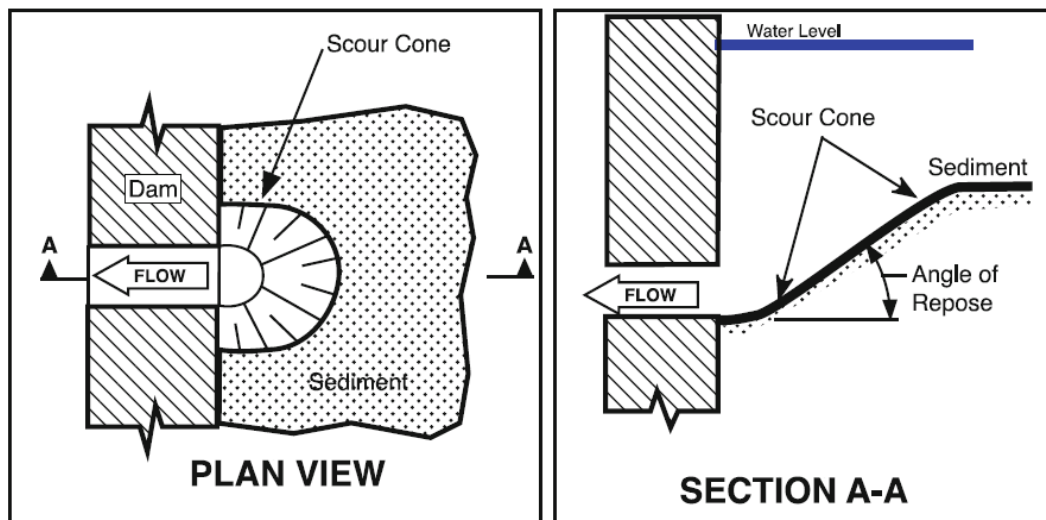
*Figura 4.16. Vaso del embalse de Barasona tras su primer vaciado. Cortesía de D. Rafael Romeo, CHE*

Para posibilitar la evacuación mediante lavado es necesario vaciar el embalse, lo que supone una pérdida de agua y complicaciones en la gestión. En general, se acepta que el lavado es adecuado siempre que la capacidad del embalse no supere el 30% de la aportación media anual (UDWR, 2010). Debe dedicarse aproximadamente un 10% de la aportación media anual a las operaciones de lavado. En embalses en climas semiáridos destinados a riego la mejor época para el lavado es el final de la campaña de riegos. Es necesario además que exista un desagüe operativo a cota suficientemente baja y con capacidad de evacuación a baja carga hidráulica como para que el vaciado resulte efectivo. Los desagües profundos deben tener una capacidad superior al doble del caudal medio anual. Los embalses estrechos en comparación con su longitud son buenos candidatos al lavado, porque resulta más efectivos que en embalses de gran anchura. En el caso de embalses en serie las operaciones de lavado se deben realizar de manera coordinada ya que, en caso contrario, el sedimento retirado de un embalse quedará atrapado en el embalse de aguas abajo.

La realización de operaciones de lavado vierte al cauce caudales con una alta concentración de materia en suspensión, lo que ocasiona problemas medioambientales significativos: reducción del oxígeno disuelto, reducción de la visibilidad y penetración de la luz y alteraciones en la morfología del cauce debidas al depósito del material liberado del embalse. Por ejemplo, en los tres vaciados del embalse de Barasona se alcanzaron concentraciones superiores a los 100 g/l, con picos de 492 g/l en el primer vaciado (la medida se interrumpió porque la colada de barro anegó el cauce del río), de 339 g/l el segundo vaciado y de 500 g/l el tercer vaciado. Pueden producirse problemas adicionales si el vertido moviliza contaminantes acumulados en el embalse. También se producen problemas sociales vinculados a los usos del agua, como interferencia con los sistemas de potabilización, colmatación de conducciones de transporte y distribución, disminución de la calidad de los usos recreativos, entre otros. Aunque el volumen de sedimentos efectivamente liberado sea inferior al que habría circulado en condiciones naturales, la combinación de altas concentraciones de sedimento con alteración del régimen hidrológico fuera de sincronismo con los procesos naturales produce impactos adversos muy significativos, por lo que las operaciones de lavado deben planificarse con cuidado extremo, teniendo en cuenta a todos los actores involucrados y buscando el mayor consenso posible.

Lavado en presión

El lavado puede realizarse también sin necesidad de vaciar el embalse. En este caso se conoce como lavado en presión (“*pressure flushing*”). La efectividad de la operación es mucho menor, puesto que únicamente se puede movilizar un pequeño cono de erosión en las inmediaciones del desagüe que se abre (Figura 4.17).



**Fig. 5.18.** Definition sketch for pressure scouring.

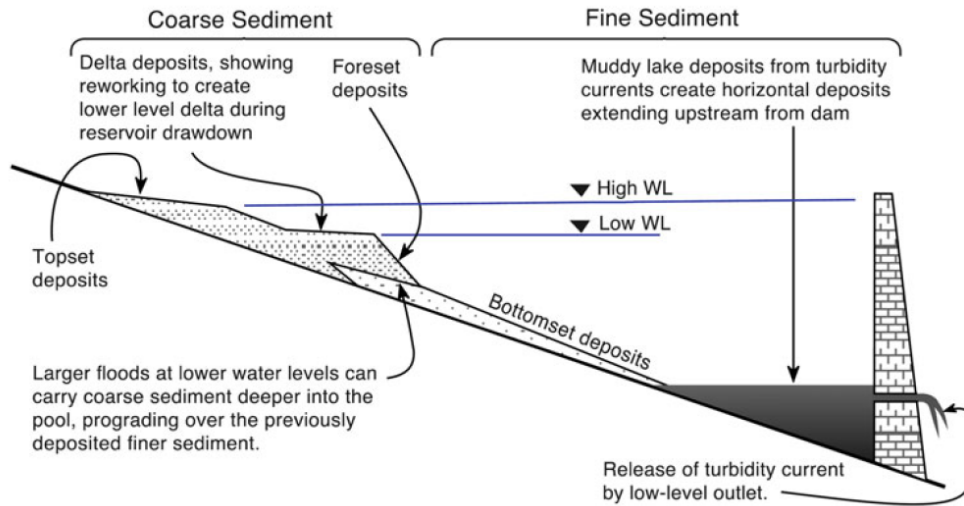
Figura 4.17. Figura 5.18 de Morris, 2014, que ilustra el lavado en presión

El lavado en presión se utiliza fundamentalmente para mantener operativos los desagües profundos de la presa, evitando que queden inutilizados por aterramiento. El alcance de la operación se puede estimar a partir del ángulo en reposo sumergido del material depositado.

Modificación de niveles de operación del embalse

En algunas circunstancias se puede conseguir mover el sedimento dentro del embalse modificando los niveles de operación. La Figura 4.18 muestra el patrón típico de deposición de sedimentos en el embalse. En él se pueden distinguir tres zonas características. En la cola del embalse se produce la deposición del material más grueso, que se decanta en cuanto la velocidad

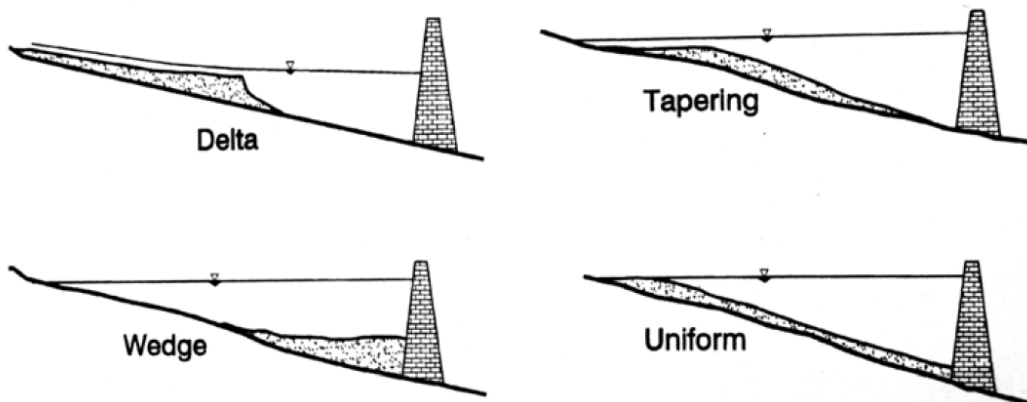
del agua disminuye por la entrada en el embalse. Este depósito tiene una morfología deltaica, que se puede ver alterada por la oscilación de nivel debida a la operación del embalse y por las crecidas, que arrastran el material hacia el interior del embalse. La zona media está normalmente ocupada por material más fino, que se va decantando a menor velocidad a medida que el agua va recorriendo el embalse. Si se dan las condiciones adecuadas, en las proximidades de la presa se produce un depósito horizontal de material muy fino, que es arrastrado por las corrientes turbias de densidad.



**Fig. 5.3.** Generalized pattern of reservoir sedimentation showing development of delta containing coarse sediment at two different levels corresponding to periods of two different water levels, and the accumulation of fine-grained deposits downstream of the delta.

Figura 4.18. Figura 5.3 de Morris, 2014, que ilustra el patrón típico de disposición de sedimentos en el embalse

Este patrón típico puede verse alterado por numerosos factores: régimen hidrológico, forma y características hidrodinámicas del embalse, naturaleza del material en suspensión, estratificación térmica, etc. Por ello, son posibles muchas otras configuraciones alternativas. Algunas de ellas se muestran en la figura 4.19.

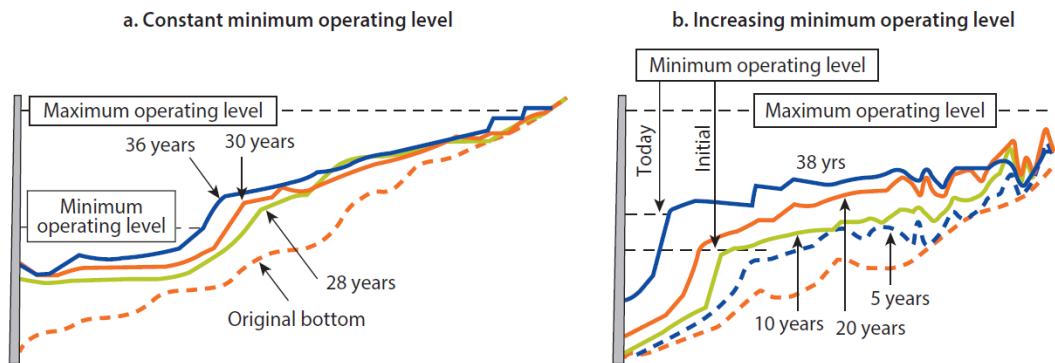


**FIGURE 10.2** Longitudinal patterns of sediment deposition in reservoirs. Multiple patterns can exist simultaneously in different areas of the same reservoir.

Figura 4.19. Figura 10.2 de Morris y Fan, 1998, donde se muestran distintos patrones de depósito de sedimentos

La configuración existente de sedimento en el embalse se puede alterar modificando los criterios de operación. La técnica principal para redistribuir los sedimentos en el embalse es la manipulación de los niveles de operación. Por ejemplo, la formación del delta de cola puede controlarse variando el nivel del embalse cuando llegan las crecidas importantes. Cada vez que se rebaja el nivel del embalse el paso del agua sobre el delta erosiona el material y lo conduce hacia aguas abajo. En la Figura 4.20 se ilustra el efecto de aumentar el nivel mínimo de operación del embalse para conseguir retrasar la penetración del delta en el vaso.

**Figure 7.9 Delta Advance Depending on Reservoir Operational Levels**



Source: Morris 2015.

Figura 4.20. Figura 7.9 de Annandale, 2016, que ilustra el efecto de la modificación de los niveles de operación

### ***Evacuación mediante excavado***

Las técnicas de evacuación mediante excavado consisten en retirar mecánicamente los sedimentos del embalse y conducirlos a otro lugar. Según la técnica de excavación y transporte se distingue entre el dragado y la excavación y transporte en camiones.

#### Dragado

El dragado es la operación de retirada de sedimento bajo el agua. Cualquier sistema de dragado puede ser eficaz para retirar el sedimento acumulado en los embalses sin que sea necesario proceder a su vaciado. Los sistemas de dragado suelen constar de una barcaza provista de una pluma que acciona una cabeza de cortado y un sistema de tuberías y bombas que conduce el material a una zona de depósito.

Por ejemplo, la figura 4.21 muestra la instalación para extracción de arenas silíceas mediante draga para su explotación en el embalse del Ebro.



Figura 4.21. Extracción de arenas silíceas mediante dragas en el embalse del Ebro

Además del consumo energético, el principal problema del dragado es encontrar un lugar adecuado para acopiar y tratar el material retirado, que es un “*slurry*” (mezcla de agua y materia en suspensión) de alta concentración. En algunos casos puede verterse directamente al río aguas abajo de la presa, pero en la mayoría de ocasiones requiere un espacio especial para el secado de los lodos, que luego deben transportarse a una zona acondicionada para su asimilación. Según UDWR, 2010, el dragado en los Estados Unidos se aplica principalmente a los canales navegables y no suele ser una primera opción para la gestión de sedimentos en embalses.

En algunos casos se ha combinado el dragado con la hidrosucción, utilizando el desnivel entre la cota de agua del embalse y el pie de presa para transportar los lodos dragados (Figura 4.22). El transporte se puede realizar en sifón sobre la presa o atravesando la presa por algún desagüe.

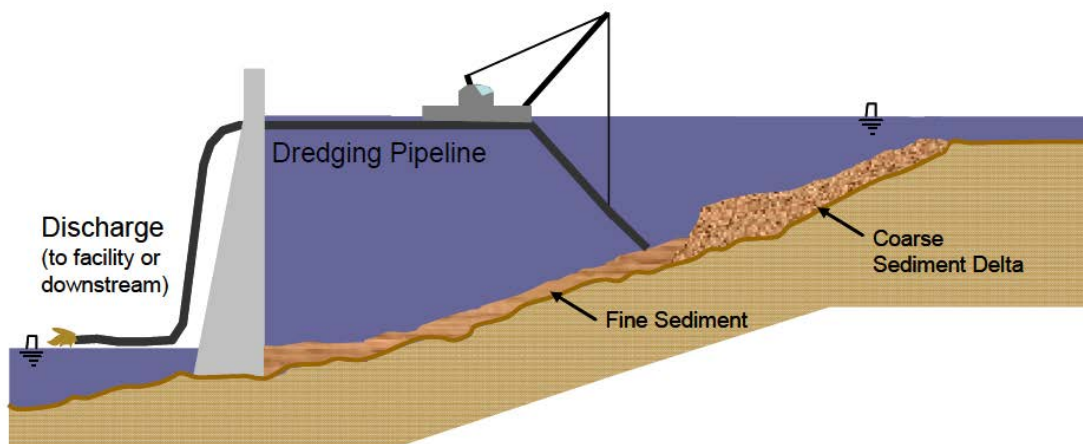


Figura 4.22. Figura 18 de UDWR, 2010, que ilustra el dragado mediante hidrosucción



En principio, la hidrosucción ofrece ciertas ventajas, tanto con relación al dragado como a los métodos de lavado y *sluicing*. La hidrosucción no requiere energía de transporte, aunque sí puede ser necesario emplear energía para vencer la compactación del sedimento mediante una cabeza de corte y permitir su absorción por la toma. Mediante este procedimiento se puede elegir el tipo y cantidad de sedimento que se trasladará hacia aguas abajo, puesto que puede fijarse la zona de toma y la época de operación del sistema, coordinándolo con la evacuación de caudales limpios mediante otras tomas o el aliviadero para no exceder límites de concentración admisibles.

#### Excavación a cielo abierto

En la excavación a cielo abierto se emplean medios mecánicos convencionales para la excavación y transporte del sedimento. Tiene un coste muy significativo y además requiere que el embalse se vacíe para dejar libre el sedimento y permitir trabajar sobre él. Al igual que el dragado, requiere de un espacio donde poder acopiar y tratar el sedimento antes de trasladarlo a un lugar donde pueda ser asimilado.

### 2.4 Medidas de recirculación del sedimento

El sedimento que se retira mediante dragado o excavación se puede inyectar al río para restablecer la dinámica del transporte sedimentario, al menos parcialmente. En este método, el sedimento que se retira mediante excavación se coloca temporalmente aguas abajo de la presa, en un lugar inundable en las crecidas, de forma que pueda retornar al cauce en los procesos de inundación natural.

La puesta en práctica de este método requiere de la definición geométrica de la instalación de acopio en las proximidades del cauce para posibilitar su arrastre por el río en función del caudal circulante. El funcionamiento se ilustra en la Figura 4.23, tomada de Kantoush y Sumi, 2010. En ella se muestra el acopio de sedimentos junto al cauce y la erosión del depósito como consecuencia del paso de una crecida posterior.

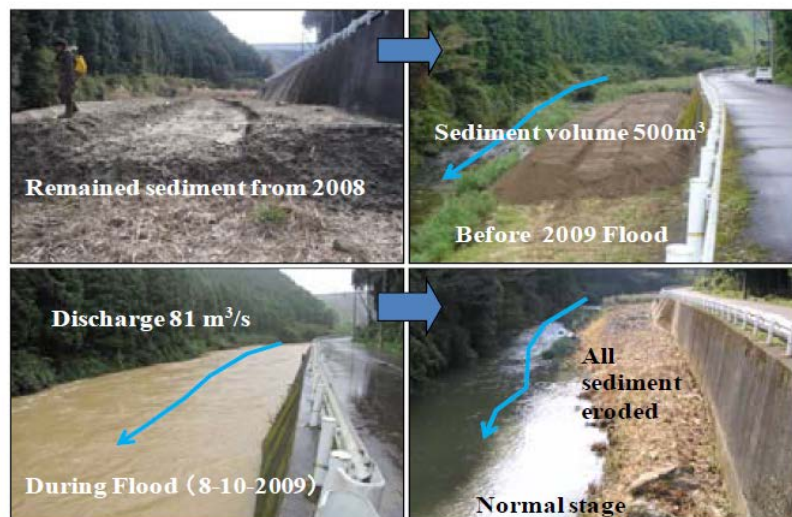


Figura 4.23. Figura 15 de Kantoush y Sumi, 2010, que ilustra la operación de inyección de sedimentos

La inyección de los sedimentos extraídos del embalse en el cauce aguas abajo presenta riesgos significativos. Es necesario planificar adecuadamente la actuación, teniendo en cuenta todos los factores que intervienen: características del sedimento, en particular su posible contaminación, régimen hidrológico del río, características morfológicas del cauce, dinámica del transporte sedimentario, circunstancias ambientales y ecológicas y consideraciones económicas (Figura 4.24).

El sedimento erosionado justo aguas abajo de la presa circula por el cauce sujeto a la dinámica del transporte sedimentario y puede depositarse en lugares donde resulte perjudicial. Por ello es necesario implantar un sistema de monitorización y seguimiento que garantice que el proceso se realiza dentro de los límites tolerables por el ecosistema fluvial aguas abajo de la presa. Si la operación se diseña y ejecuta correctamente el proceso de inyección de sedimento permite restaurar el transporte de fondo y en suspensión y recuperar el hábitat fluvial. Las experiencias de inyección de sedimentos descritas en la literatura han tenido lugar en ríos de gran pendiente en Japón y Suiza.

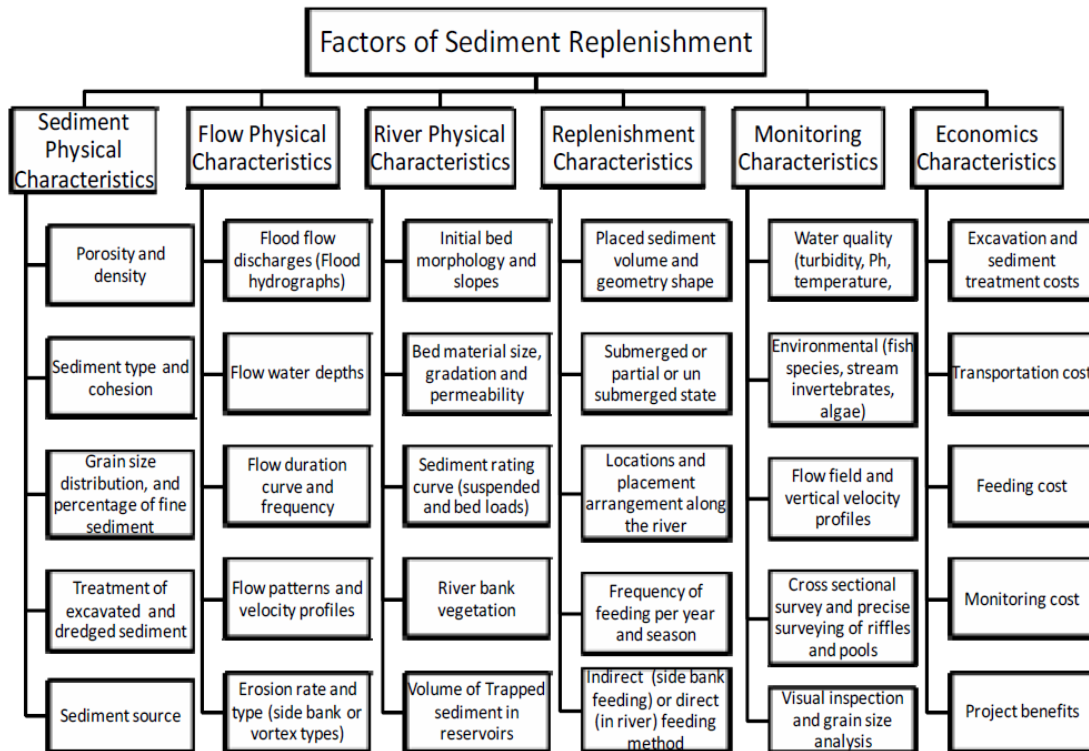


Figura 4.24. Figura 13 de Kantoush y Sumi, 2010, que ilustra los factores a tener en cuenta en las operaciones de inyección de sedimentos

### 3. Elección de las técnicas más apropiadas

En este apartado se seleccionan las técnicas más apropiadas a los embalses del sistema MRF. Se comienza por una revisión general de los estudios realizados sobre las condiciones idóneas de aplicación de las técnicas disponibles. A partir de sus resultados, se discuten las técnicas más adecuadas para embalses de características similares a las del sistema MRF.

#### 3.1 Estudios globales de comparación de técnicas

En este apartado se revisan algunos estudios globales donde se han comparado las distintas técnicas de gestión de sedimentos disponibles en la práctica. En estos estudios se selecciona un conjunto de variables explicativas que permiten determinar las técnicas más apropiadas.

##### *Diagrama de Basson*

El primer trabajo que se presentó con un análisis de un número representativo de casos fue el de Basson (1997). No se ha podido consultar el documento original, pero su trabajo está referenciado por varios autores (Tigrek y Aras, 2012, Palmieri 2001). Basson introdujo dos índices empíricos para caracterizar el modo más apropiado de gestión de sedimentos en un embalse. Los coeficientes propuestos fueron:  $K_w = \frac{V_0}{A_m}$  y  $K_t = \frac{V_0}{A_s}$ , donde  $V_0$  es la capacidad del embalse, en  $hm^3$ ,  $A_m$  la aportación media anual en  $hm^3/año$  y  $A_s$  la aportación media anual de sedimentos en  $hm^3/año$ .  $K_w$  puede interpretarse como el tiempo de retención del embalse (en años) y  $K_t$  puede interpretarse como la vida útil del embalse (en años) si no se adoptan medidas de gestión del sedimento.

Basson estudió las medidas adoptadas en 177 presas y representó el valor de estos dos índices en un gráfico doblemente logarítmico, como se muestra en la Figura 4.25. Los distintos tonos de gris delimitan las zonas donde se concentraban la mayor parte de los casos.

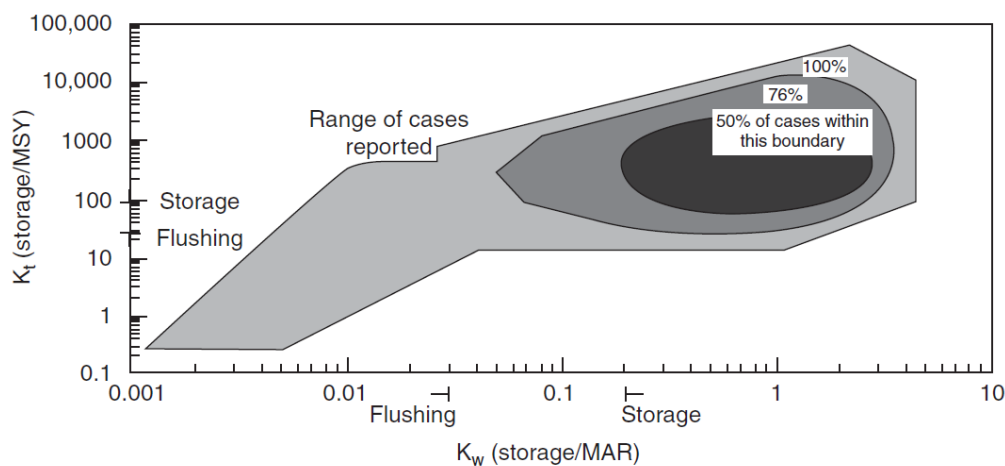


Figure 3.2 Basson's diagram on reservoir operation modes. Modified from Basson (1997)

Figura 4.25. Figura 3.2 de Tigrek y Aras, 2012, que muestra el diagrama de Basson

El diagrama de Basson permite visualizar los diferentes modos en los que se puede gestionar el sedimento en un embalse. La disponibilidad de agua para gestionar los sedimentos es el valor más determinante, y está vinculado al factor  $K_w$ . Si la aportación media anual ( $A_m$ ) es grande con

relación a la capacidad de embalse ( $S_0$ ), el embalse dispone de agua en exceso que puede dedicar a la gestión del sedimento. Esta situación se da para valores pequeños de  $K_w$ . Basson sugiere que no se pueden realizar operaciones de lavado si  $K_w > 0,2$  y que el lavado es la opción más adecuada si  $K_w < 0,03$ . Para valores  $0,03 < K_w < 0,2$  Basson recomienda el lavado estacional o el *sluicing*. El otro índice,  $K_t$ , determina la cantidad de sedimento a la que debe hacerse frente. Basson indica que el lavado es necesario si el valor de  $K_t$  es inferior a 30, indicando que el embalse agotaría su capacidad útil en pocos años si no se adoptaran medidas de gestión del sedimento. El lavado resulta también una opción posible para valores  $30 < K_t < 100$ . Si  $K_t > 100$  resulta conveniente buscar otras alternativas. En este caso, Basson utilizó el término “storage” (almacenamiento) para indicar que había que dejar que el sedimento se acumulara en el embalse y plantear otras medidas, como la excavación o dragado, para retirarlo.

### Diagrama de Kimbrel

Kimbrel (2015) presentó un diagrama similar al de Basson utilizando datos de las presas del Bureau of Reclamation. Él no utilizó datos de medidas aplicadas, sino que realizó un estudio general para determinar la situación global de las presas del BoR. Kimbrel estableció tres zonas principales, delimitadas desde el ángulo inferior izquierdo al ángulo superior derecho: lavado, *sluicing* y dragado, delimitadas por dos líneas frontera (trazadas en color morado y rojo, respectivamente). La mayor parte de los embalses del BoR quedan por encima de la línea roja, por lo que deben aplicarse medidas no hidráulicas para la gestión del sedimento. En este grupo tan sólo se plantea la posibilidad de la evacuación de corrientes turbias de densidad si se dan las condiciones apropiadas.

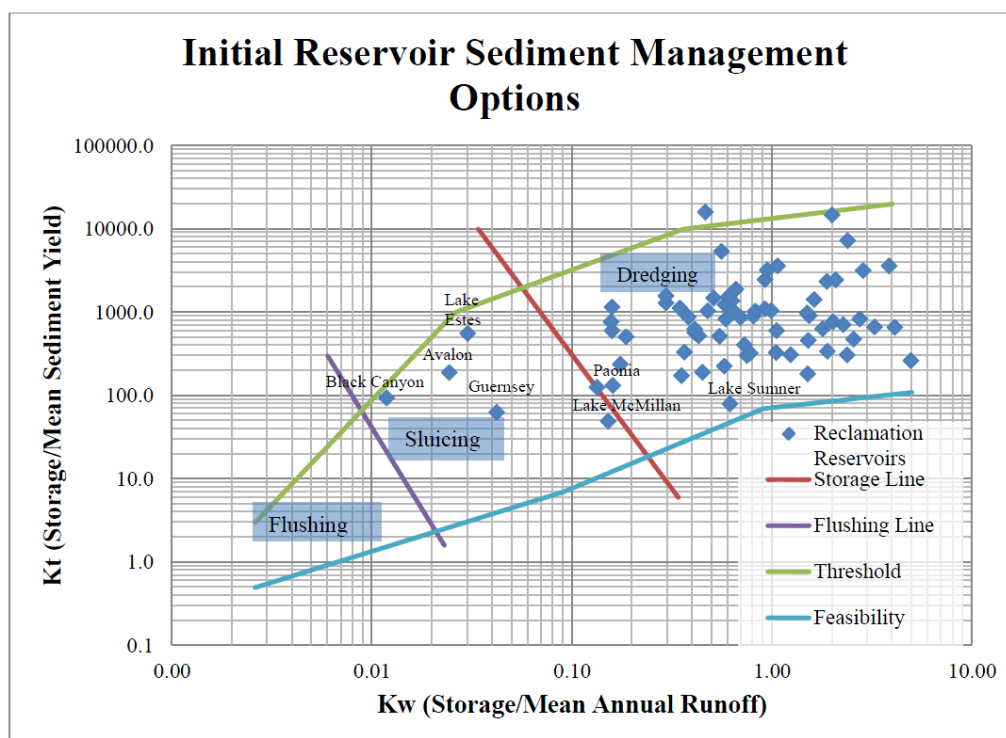


Figure 1. Diagram Adapted from Basson and Rooseboom (1997) for Determining Relative Reservoir Impact and Preliminary Reservoir Sediment Management Options

Figura 4.26. Figura 1 Kimbrel 2015, donde presenta su análisis de las presas de Bureau of Reclamation

**Diagrama de Sumi**

Tetsuya Sumi realizó un estudio similar al de Basson con datos tomados de presas en Japón, que ha publicado en numerosas ocasiones. Su gráfico se presenta en la Figura 4.27, donde se ha elegido la versión publicada en Sumi, 2016, por ser la de más nitidez. En este caso el objetivo era determinar el procedimiento de gestión del sedimento más efectivo para las presas del sistema del río Mimi, Para ello representó los valores de los índices de Basson de estas presas junto con su gráfico de medidas, que está dividido en cuatro zonas, de la parte inferior izquierda a la superior derecha. Para las presas más pequeñas y más comprometidas desde el punto de vista de la gestión del sedimento ( $K_w < 0,02$ ) recomienda el lavado, el dragado y la hidrosucción. Para valores  $0,02 < K_w < 0,2$  Sumi recomienda by-pass, *sluicing* y excavación. Para  $K_w > 0,2$  recomienda diques de retención de sedimentos y aportación de sedimentos aguas abajo. En los casos con  $K_t > 1000$  prácticamente no se han aplicado medidas, pero recomienda la evacuación de corrientes de densidad y la modificación de la operación del embalse.

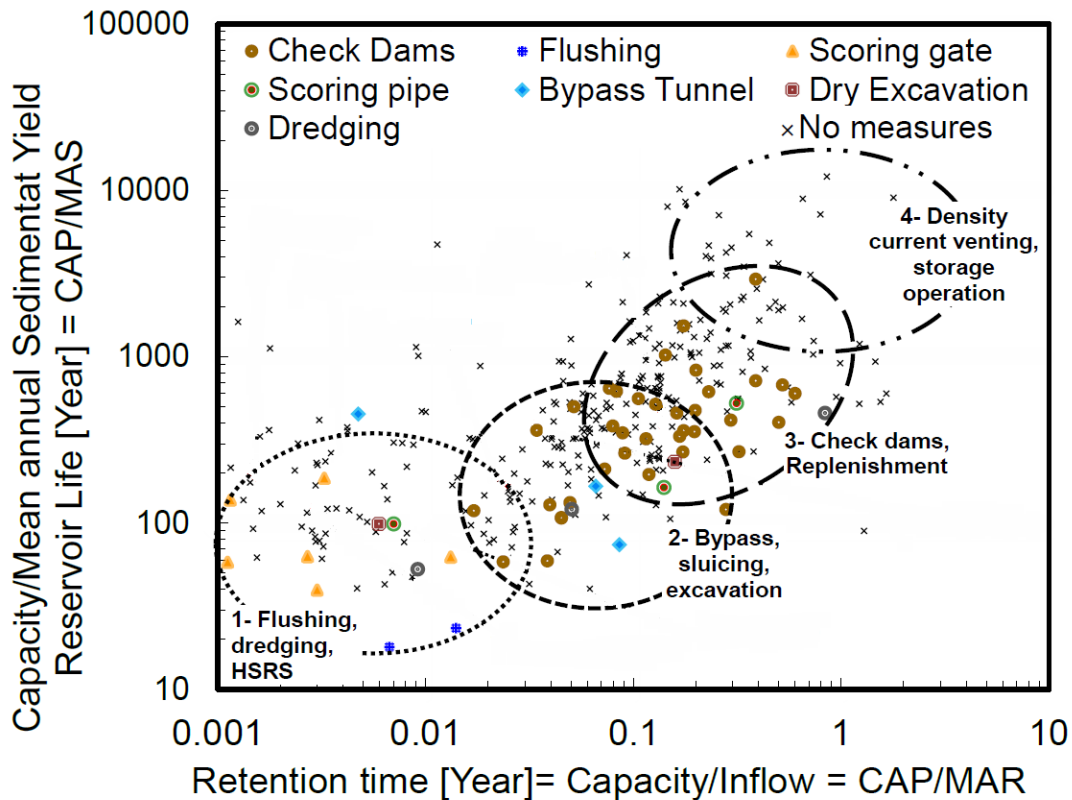


Fig. 4 Proposed sediment management techniques and dams in the Mimi river system

Figura 4.27. Adaptada de la figura 4 de Sumi, 2016, donde presenta el análisis de las presas de Japón

**Clasificación de Annandale**

George Annandale también ha elaborado un gráfico similar, combinado los datos de Basson y Sumi, que se presenta en la figura 4.28. Define unas zonas similares a las de Sumi, pero delimitadas por valores concretos de los índices. Para valores de  $K_w < 0,04$  y  $2 < K_t < 100$ , recomienda lavado,

dragado y hidrosucción. Para  $0,001 < K_w < 0,4$  y  $20 < K_r < 500$  recomienda by-pass, lavado, sleeping, excavación en seco, dragado y evacuación de corrientes de densidad. Para  $0,01 < K_w < 0,7$  y  $50 < K_r < 3000$  recomienda diques de retención de sedimentos. Para  $K_w > 0,1$  y  $K_r > 300$  recomienda evacuación de corrientes de densidad y modificación de la operación del embalse.

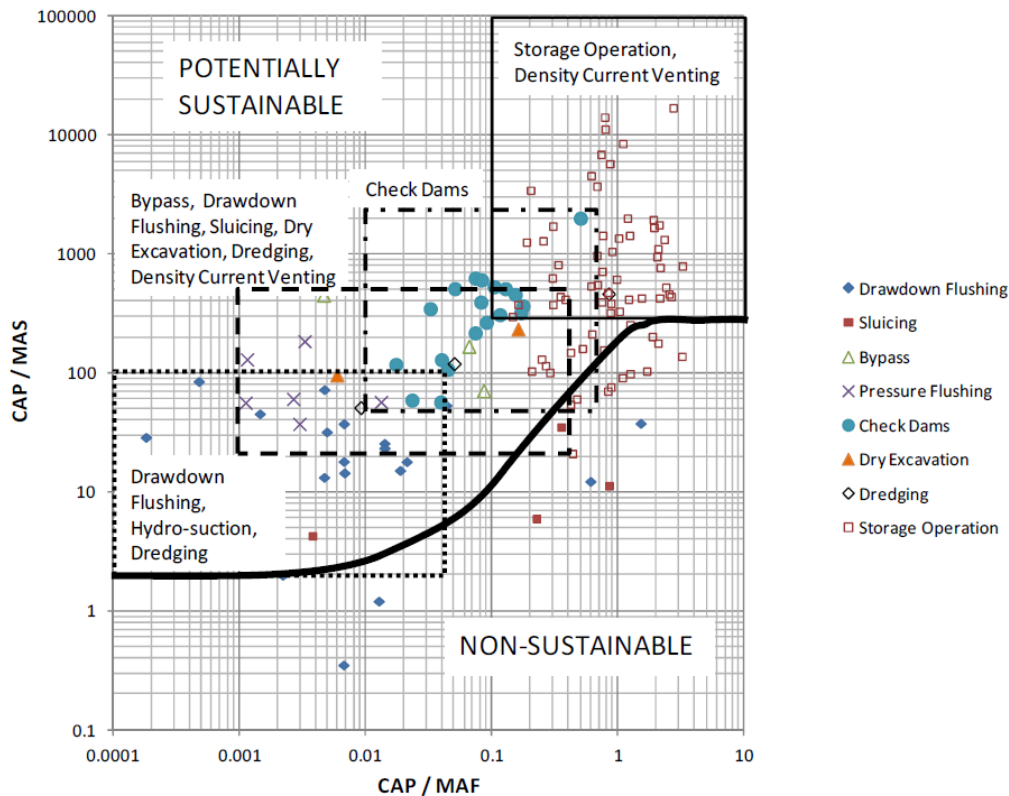


Figure 6.20. Graph comparing previous experience with implementing reservoir sedimentation management approaches (data from Basson, 2009 and Sumi, 2003).

Figura 4.28. Figura 6.20 de Annandale, 2013, donde muestra su diagrama de clasificación de medidas

Annandale también dibuja una línea en el gráfico que delimita la zona donde es posible que el embalse no resulte sostenible, aunque advierte que cada caso particular debe ser analizado específicamente, puesto que hay embalses que quedan fuera de la zona de sostenibilidad y, sin embargo, se mantienen operativos gracias a la aplicación de medidas.

### 3.2 Técnicas adecuadas en los embalses del sistema MRF

En la tabla 4.1 se presentan los valores de los índices de Basson para los tres embalses del sistema MRF. Los datos se han tomado de la recopilación de información realizada y de los estudios de acumulación de sedimentos en los embalses. En el caso de Flix, se ha estimado un valor aproximado de acumulación de sedimentos, puesto que no se dispone de datos directos.

Tabla 4.1. Índices de Basson en los embalses del sistema MRF

	$S_0$	$A_m$	$A_s$	$K_w$	$K_t$
	hm <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup> /año	hm <sup>3</sup> /año	-	-
Mequinenza	1534	7345	1.75	0.21	876
Ribarroja	291	10716	0.33	0.03	882
Flix	11	13576	0.01	0.001	1141

Estos valores se han representado en los gráficos de Basson proporcionados por Sumi y Annandale, al objeto de identificar experiencias de características similares a las de las tres presas en estudio.

La representación sobre el gráfico de Sumi se muestra en la figura 4.29. El embalse de Mequinenza queda encuadrado en el grupo 3, donde se recomiendan diques de retención de sedimentos aguas arriba del embalse y aporte de sedimentos aguas abajo. Los embalses de Ribarroja y Flix quedan fuera de las zonas de recomendación de Sumi, debido a que la vida útil de los embalses (880 y 1150 años) es muy grande en comparación con su tiempo de retención (0,03 y 0,001 años).

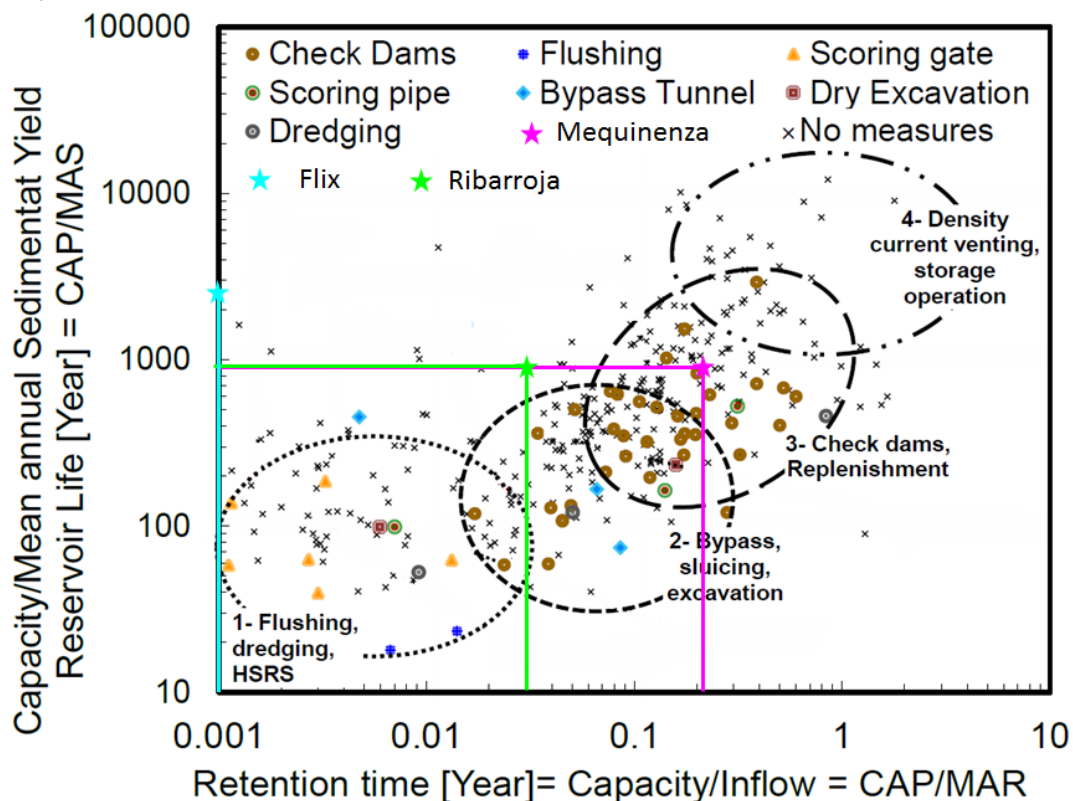


Fig. 4 Proposed sediment management techniques and dams in the Mimi river system

Figura 4.29. Representación de las presas del sistema MRF en el diagrama de clasificación de medidas de Sumi

En el caso de Mequinenza, la mayor parte de las experiencias que están situadas en una zona similar del gráfico corresponden a diques de contención de sedimentos, lo que aconsejaría dicha medida de gestión. Sin embargo, los embalses construidos en la cuenca ya han reducido muy significativamente el aporte de sedimentos, lo que restaría eficacia a esta medida.

Desde el punto de vista de la identificación de medidas, el motivo por el que los embalses de Ribarroja y Flix quedan fuera del campo habitual de actuación se debe a que la capacidad de los embalses es grande en comparación con el volumen de sedimentos que reciben, lo que indica que la actuación no es urgente. En nuestro caso, la necesidad de actuación viene determinada por el déficit de sedimentos identificado en la desembocadura del Ebro. Si seguimos la línea vertical correspondiente al valor del tiempo de residencia de cada embalse podemos comprobar que tanto Mequinenza como Ribarroja quedan en la zona de by-pass, *sluicing* y excavación. En el caso de Flix, la recomendación sería lavado, dragado e hidrosucción.

La figura 4.30 muestra la representación sobre el gráfico de Annandale. Los tres embalses se encuentran lejos del límite de sostenibilidad. El embalse de Mequinenza queda próximo a las zonas de diques de retención de sedimentos y operación del embalse. Los embalses de Ribarroja y Flix también quedan en este caso fuera de las zonas de recomendación.

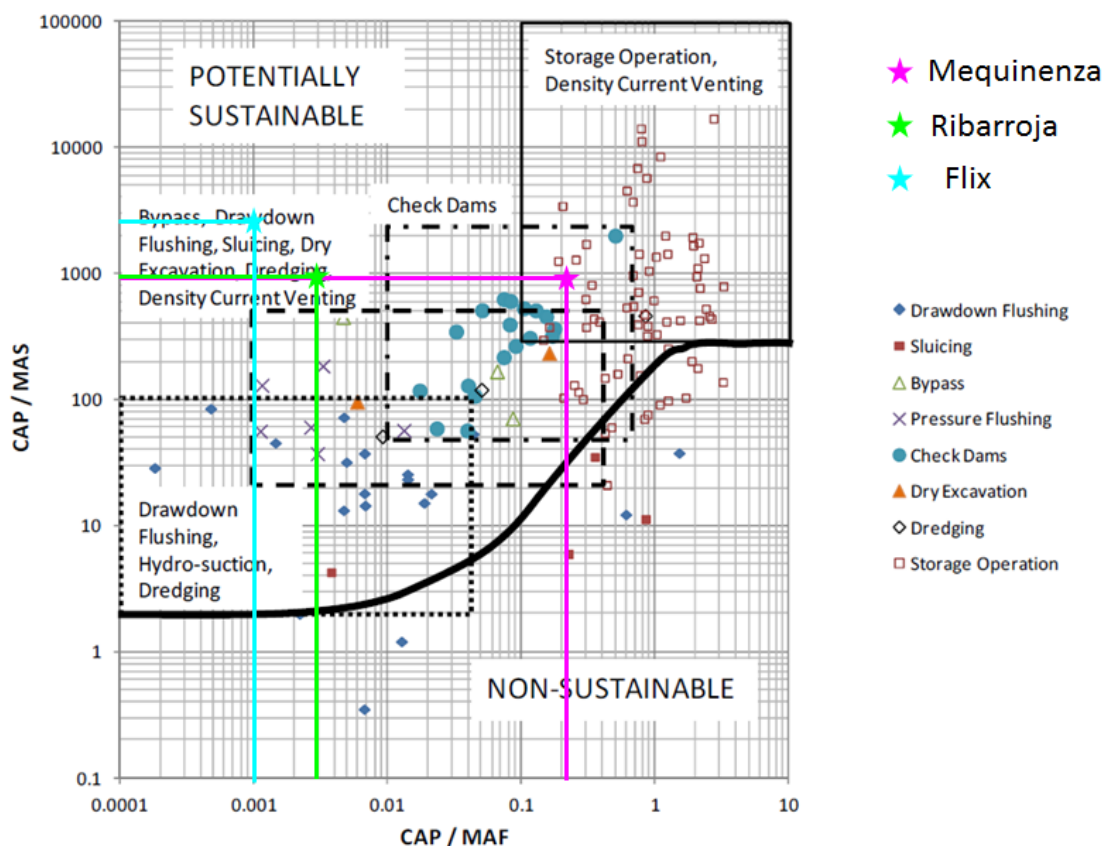


Figura 4.30. Representación de las presas del sistema MRF en el diagrama de clasificación de medidas de Annandale

Si prestamos atención al valor del tiempo de residencia, en Mequinenza seguimos encontrando actuaciones de diques de sedimentos y control del embalse, con un caso de excavación en seco. En el caso de Ribarroja y Flix las actuaciones más comunes son lavado en presión y en lámina libre, con un caso de *sluicing* y otro de excavación en seco.

Además de los índices de Basson, hay otros factores que son importantes a la hora de determinar las medidas más apropiadas. El más característico es el tamaño de las presas. Hay algunas medidas que, a igual valor del tiempo de residencia, son más difíciles de ejecutar cuanto más grande es la presa. Por ejemplo, este es el caso del lavado, que resulta más difícil si se trata de un embalse muchos kilómetros de longitud. También son relevantes otros factores, como la pendiente, que determina la carga hidráulica para operaciones como el by-pass o la hidrosucción, o la configuración de órganos de desagüe, que condiciona la posibilidad de *sluicing*.



## 4. Experiencias en casos similares al sistema MRF

La revisión de las experiencias de casos de gestión de sedimentos que son relevantes para el sistema MRF se ha clasificado en las distintas técnicas identificadas.

### 3.1 Experiencias de lavado

Hay numerosos trabajos de investigación que describen actuaciones de lavado en presas. En primer lugar, presentamos los trabajos que realizan una revisión global de la técnica y posteriormente se realiza un resumen final.

#### *Estudio de Atkinson*

Atkinson, 1996 presentó un estudio encaminado a identificar las circunstancias en las que el lavado puede ser una medida eficaz. Para ello recopiló información sobre un conjunto de embalses en los que se aplicaba el lavado para conservar un volumen útil al menos igual al 50% de la capacidad original. Estableció tres requisitos principales:

- La cantidad de sedimento evacuada debe ser suficiente para equilibrar la carga anual de sedimentos que entra al embalse
- El volumen acumulado en el embalse debe permitir mantener la capacidad mínima necesaria
- El coste del lavado (agua empleada, instalación y daños ambientales) no debe exceder el beneficio (disponibilidad adicional de agua)

Atkinson propuso el empleo de cuatro índices para determinar la viabilidad del lavado y definió unos umbrales de los índices que podrían hacer fracasar la operación de lavado. Los índices son los siguientes

#### 1. Grado de vaciado del embalse (DDR)

Se define como:  $DDR = 1 - \frac{\text{Calado del agua de lavado}}{\text{Calado normal del embalse}}$ . El lavado no es factible si  $DDR < 0.7$

#### 2. Balance de sedimento (SBR)

Se define como  $SBR = \frac{\text{Masa lavada anualmente}}{\text{Masa depositada anualmente}}$ . El lavado no es factible si  $SBR < 1$

#### 3. Anchura del canal de lavado (FWR)

Se define como:  $FWR = \frac{\text{Anchura del canal de lavado}}{\text{Anchura representativa del embalse}}$ . El lavado no es factible si  $FWR < 1$

#### 4. Pendiente de ladera (TWR)

Se define como:  $TWR = \frac{\text{Anchura de la zona erosionada}}{\text{Anchura superior del canal de erosión}}$ . Si la condición 3 es determinante, entonces TWR debe ser mayor que 2. En caso contrario, basta con que TWR se aproxime a 1

En su monografía, propuso métodos simplificados para calcular los índices a partir de información básica del embalse. Los métodos se basan en gran medida en la publicación de Lai y

Shen, 1996. Organizó los datos recopilados en una tabla, donde se distinguen los casos en los que el lavado se realizó de forma satisfactoria y los casos en que no fue así. La tabla se presenta en la Figura 4.31. En la tabla se han marcado en negrita los casos en los que no se cumplen las condiciones exigidas para los índices. Los embalses en los que el lavado funciona correctamente cumplen todos los requisitos. En aquellos casos en los que el funcionamiento no es correcto se incumple al menos uno de los requisitos.

**Table 5 Application of the detailed flushing criteria**

Reservoir Name	(i) DDR Value	(ii) SBR <sub>d</sub> Value	(iii) FWR Value	(iv) TWR Value
Reservoirs flushed successfully				
Baira	0.68	24	3.4	1.6
Gebidem	0.93	20	6.7	1.5
Gmund	0.89	58	5.2	1.3
Hengshan	0.77	about 4	0.10	7.1
Palagnedra	1.00	33	1.4	1.0
Santo Domingo	1.00	11	1.4	1.8
Reservoirs flushed unsuccessfully				
Guanting	0.81	<b>0.3</b>	<b>0.04</b>	<b>0.5</b>
Guemsey	<b>0.44</b>	3.2	1.4	<b>0.26</b>
Heisonglin	0.77	about 1	<b>0.06</b>	<b>0.8</b>
Ichari	<b>0.31</b>	33	9.9	1.4
Ouchi - Kurgan	<b>0.14</b>	110	about 2	<b>about 0.3</b>
Sanmenxia	0.75	4.8	<b>0.26</b>	<b>0.9</b>
Sefid - Rud	0.96	4.3	<b>0.3</b>	<b>0.1</b>
Shuicaozi	<b>0.37</b>	15	1.0	2.1

Figura 4.31. Tabla 5 de Atkinson, 1996, donde establece las características requeridas para un lavado satisfactorio

### **Estudio de Sumi**

Sumi, 2008 presentó un estudio sobre la efectividad del lavado en el río Kurobe, donde se ha aplicado esta técnica a las presas de Dashidaira y Unazuki desde 2001. Para ello, recopiló datos de 20 presas del mundo donde se aplica lavado (Figura 4.32) y analizó su efectividad en las presas donde había datos: Dashidaira, Verbois, Gebidem y Baira. Sumi definió la efectividad del lavado como la relación entre el volumen de sedimento movilizado y el volumen de agua empleado. En las cuatro presas analizadas obtuvo eficiencias comprendidas entre 0.17 y 0.01. Estas diferencias se explican por la gran variabilidad en las condiciones de operación de las presas, con periodos de lavado que van desde unas pocas horas hasta varios meses.

**Table 1** Sediment flushing dams in the World

Name of Dam	Country	Dam completed	Dam Height (m)	Initial Storage Capacity (CAP) (million m <sup>3</sup> )	Mean Annual Sediment Inflow (MAS) (million m <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	1/(Mean Annual Runoff) (=CAP/MAR)	Reservoir Life (=CAP/MAS)	Average Flushing Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Flushing Duration (hrs)	Flushing Frequency (1/yr)
Dashidaira	Japan	1985	76.7	9.01	0.62	0.00674	14.5	200	12	1
Unazuki	Japan	2001	97	24.7	0.96	0.014	25.7	300	12	1
Gebidem	Switzerland	1968	113	9	0.5	0.021	18.0	15	70	1
Verbois	Switzerland	1943	32	15	0.33	0.00144	45.5	600	30	3
Barenburg	Switzerland	1960	64	1.7	0.02	0.000473	85.0	90	20	5
Innerferrera	Switzerland	1961	28	0.23	0.008	0.00018	28.8	80	12	5
Genissiat	France	1948	104	53	0.73	0.00467	72.6	600	36	3
Baira	India	1981	51	9.6	0.3	0.00489	32.0	90	40	1
Gmund	Austria	1945	37	0.93	0.07	0.00465	13.3	6	168	N.A.
Hengshan <sup>2)</sup>	China	1966	65	13.3	1.18	0.842	11.3	2	672	2~3
Santo Domingo	Venezuela	1974	47	3	0.08	0.00667	37.5	5	72	N.A.
Jen-shan-peí <sup>2)</sup>	Taiwan	1938	30	7	0.23	N.A.	30.4	12.2	1272	1
Guanting	China	1953	43	2270	60	1.5	37.8	80	120	N.A.
Guernsey	USA	1927	28.6	91	1.7	0.0433	53.5	125	120	N.A.
Heisonglin	China	1959	30	8.6	0.7	0.6	12.3	0.8	72	N.A.
Ichari	India	1975	36.8	11.6	5.7	0.00218	2.0	2.16	24	N.A.
Ouchi-Kurgan <sup>2)</sup>	Former USSR	1961	35	56	13	0.00376	4.3	1000	2400	N.A.
Sanmenxia <sup>2)</sup>	China	1960	45	9640	1600	0.224	6.0	2000	2900	N.A.
Sefid-Rud <sup>2)</sup>	Iran	1962	82	1760	50	0.352	35.2	100	2900	N.A.
Shuicaozi	China	1958	28	9.6	0.63	0.0186	15.2	50	36	N.A.

1) Average after dam completion, 2) Sluicing dams

Figura 4.32. Tabla 1 de Sumi, 2008, donde presenta la relación de presas en las que se aplica lavado

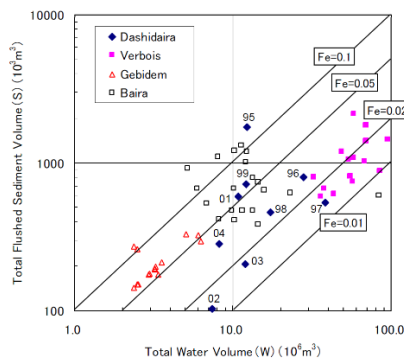


Fig.5 Water volume and flushed sediment volume in sediment flushing dams

Figura 4.33. Figuras 5 y 6 de Sumi, 2008, donde muestra la efectividad de las operaciones de lavado

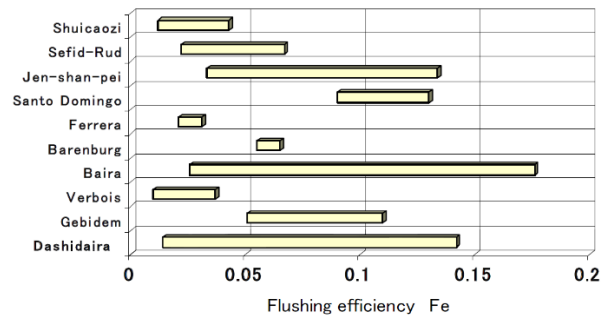


Fig. 6 Sediment flushing dams and flushing efficiency

Sumi propuso una expresión para determinar la viabilidad de las operaciones de lavado:  $K_t > \frac{K_w}{F_s(\beta - K_w)}$ , donde Fe es la eficiencia deseada del lavado y  $\beta$  es la fracción de la aportación anual que se desea dedicar al lavado. El resultado de aplicar dicha función se representa en la figura 4.34 para distintas combinaciones de valores de Fe y  $\beta$ .

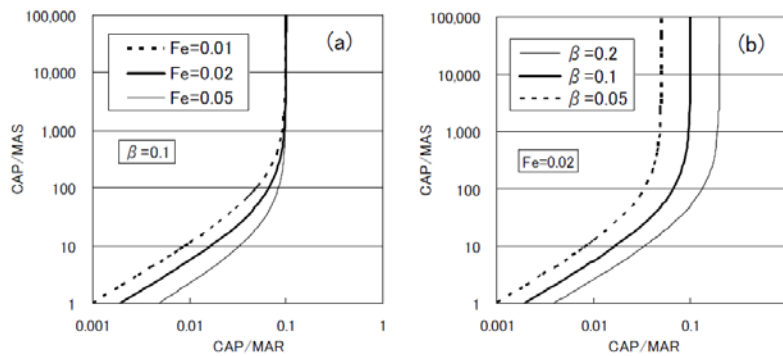


Fig. 7 Possible range of the sediment flushing

(a) Proportion of the water consumption to the mean annual runoff volume  $\beta$  is fixed; (b) Sediment flushing efficiency  $F_e$  is fixed.

Figura 4.34. Figura 7 de Sumi, 2008, donde presenta su ecuación sobre la viabilidad de la operación de lavado en función de los rendimientos

### Estudio de Kondolf

Kondolf et al., 2014 prepararon un análisis general de la situación de la gestión de sedimentos en presas con ejemplos de los cinco continentes. En el apartado dedicado al lavado incluyeron un gráfico de las experiencias de lavado recopiladas de la literatura. El gráfico se presenta en la figura 4.35 y muestra la situación en el diagrama de Basson de presas en las que la experiencia de lavado ha sido positiva y negativa. Las presas que analizaron son similares a las estudiadas por Atkinson y Sumi. Su conclusión fue que el lavado no sería factible para embalses cuyo tiempo de residencia sea superior a 0,4 años

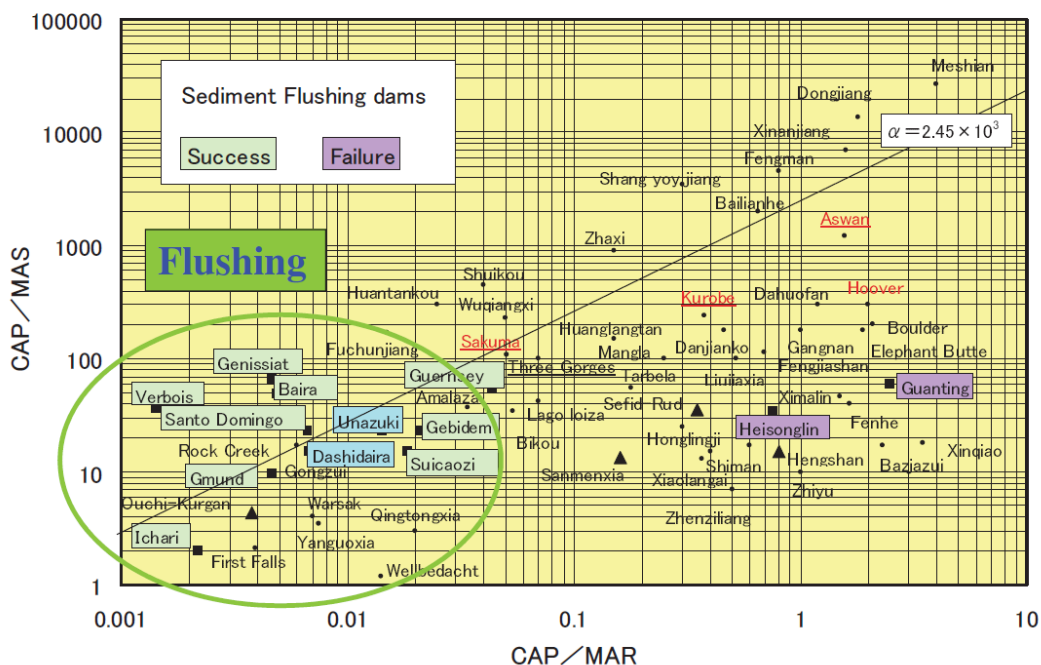


Figura 4.35. Tabla 2 de Kondolf et al., 2014 donde se presenta su análisis de lavado en presas

### Resumen

Además de los trabajos relacionados, hay varias contribuciones que manejan juegos similares de datos (Chaudry, 2010; Kantoush y Sumi, 2014; Sumi y Kantoush, 2010). A modo de resumen se ha preparado una recopilación de los datos disponibles en las presas donde se ha empleado el lavado.

La tabla 4.2 presenta los datos recopilados por Atkinson y Sumi, comparados con los correspondientes a las presas del Ebro. Los datos correspondientes a la geometría del canal de lavado se obtienen mediante las expresiones simplificadas propuestas por Atkinson, aunque no se han calculado en las presas del Ebro. En la tabla se puede comprobar que ninguna de las presas donde el lavado ha tenido éxito tiene condiciones similares a las del tramo bajo del Ebro. Se trata de embalses mucho más pequeños. La longitud y la anchura del vaso del embalse son mucho más cortas (todas las longitudes inferiores a 5 km y todas las alturas, excepto una, inferiores a 25 m). Solo hay tres embalses de tamaños similares a los del bajo Ebro y en todos ellos la operación de lavado no ha resultado efectiva. Los embalses de Guanting y Sefid-Rud tienen capacidades algo mayores que la de Mequinenza, pero menor aportación y una carga de transporte sólido muchísimo mayor. El embalse de Sanmenxia es mucho mayor que los del Ebro.

Tabla 4.2. Datos utilizados por Atkinson y Sumi en sus estudios sobre lavado, comparados con los datos de los embalses del Ebro

Presa	Pais	Cap hm3	Apo hm3/a	Sed Mt/a	Kw años	Kt años	Long km	Alt m	Bfon m	Talud vaso	Zdf m	Cd m2	Qf m3/s	Dur h	Talud canal	CapLim hm3
<b>Éxito</b>																
Baira	India	1.56	1900	0.3	0.001	8	4.1	51	25	2	16.4	24	44	31	3.3	1.56
Gebidem	Suiza	9	420	0.5	0.021	29	1.4	113	6	1.3	8	4	10	45	2	9
Gmund	Austria	0.93	200	0.07	0.005	21	0.93	37	6	3	3	3	6	168	4	0.8
Hengshan	China	13.3	15.8	1.18	0.842	18	1	65	200	1	15		2	600	18	10
Palagnedra	Suiza	5.5	304	0.08	0.018	110	2.6	55	10	1	0	1	1.2	2000	1	5.5
Santo Domingo	Venezuela	3	450	0.2	0.007	24	1	47	20	1	0	3.7	5	72	2	2.9
<b>Fracaso</b>																
Guanting	China	2270	1530	60	1.484	61	30	43	3000	7	8		80	120	20	Baja
Guernsey	USA	91	2100	1.7	0.043	86	23.5	28.6	100	5	10	11.4	125	120	0	Baja
Heisonglin	China	8.6	14.2	0.7	0.606	20	2.9	30	200	2	7	1.8	0.8	72	4	3
Ichari	India	11.55	5300	5.7	0.002	3	11.3	36.75	60	1.05	20.8	52.5	2160	24	1	4
Ouchi-Kurgan	USSR	56.4	15000	13	0.004	7	17	35	200	12	0	206	2000	2500	1	Baja
Sanmenxia	China	9640	43000	1600	0.224	10	120	45	2500	1	10	488	2500	2900	20	3000
Sefid-Rud	Iran	1760	5000	50	0.352	56	25	82	500	13	20	10.5	100	2900	1	Baja
Shuicaozi	China	9.58	514	0.63	0.019	24	6	28	90	1	17	11.3	50	36	4	Baja
<b>Otras</b>																
Dashidaira	Japón	9.01	134	0.7	0.0674	15	2.3	76.7					200	12		
Unazuki	Japón	24.7	1764	1.2	0.014	26	2.4	97					300	12		
Verbois	Suiza	15	10417	0.4	0.0014	45	3.4	32					600	30		
Barenburg	Suiza	1.7	3594	0.02	0.0005	85	2.3	64					90	20		
Innerferrera	Suiza	0.23	1278	0.01	0.0002	29	0.63	28					80	12		
Genissiat	Francia	53	11349	0.9	0.0047	73	5.8	104					600	36		
Jensanpi	Taiwan	8.1	-	0.3	-	35		30					12.2	1272		
<b>Ebro</b>																
Mequinenza	España	1534	7345	2.80	0.209	876	106	61	500	1	0	4.62	46			1300
Ribarroja	España	291	10716	0.53	0.027	882	29	32.3	300	1	2.3	116	1144			200
Flix	España	11	13576	0.02	0.001	1141	12	16.05	200	1	-	-	-			10

En la figura 4.36 se presentan los puntos correspondientes a los embalses en el gráfico de Basson, junto con la curva correspondiente a la ecuación de Sumi para una efectividad  $Fe=0.02$  y un coeficiente  $\beta=0.05$ . Esto indica que se utilizaría un 5% de la aportación anual para la operación de lavado y se esperaría un rendimiento del 2% en movilización del sedimento. Como se puede apreciar, los parámetros  $K_w$  y  $K_t$  no permiten determinar por sí solos las perspectivas de éxito de la aplicación del lavado. Sin embargo, la curva de Sumi delimita una zona donde se encuentra la

mayor parte de las realizaciones reportadas como exitosas en la literatura. Seis de las realizaciones clasificadas como fracaso se encuentran fuera de la zona delimitada por la curva de Sumi y las otras dos están muy cerca de la frontera. Nueve realizaciones clasificadas como éxito se encuentran dentro de la zona y de las tres que están fuera hay una muy próxima a la frontera. Uno de los dos casos corresponde a la presa de Hengshan, que es un caso muy extraño, puesto que tiene una capacidad de embalse muy similar a la aportación anual y sin embargo realiza lavado durante 600 horas utilizando  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que supone el 25% de su aportación natural.

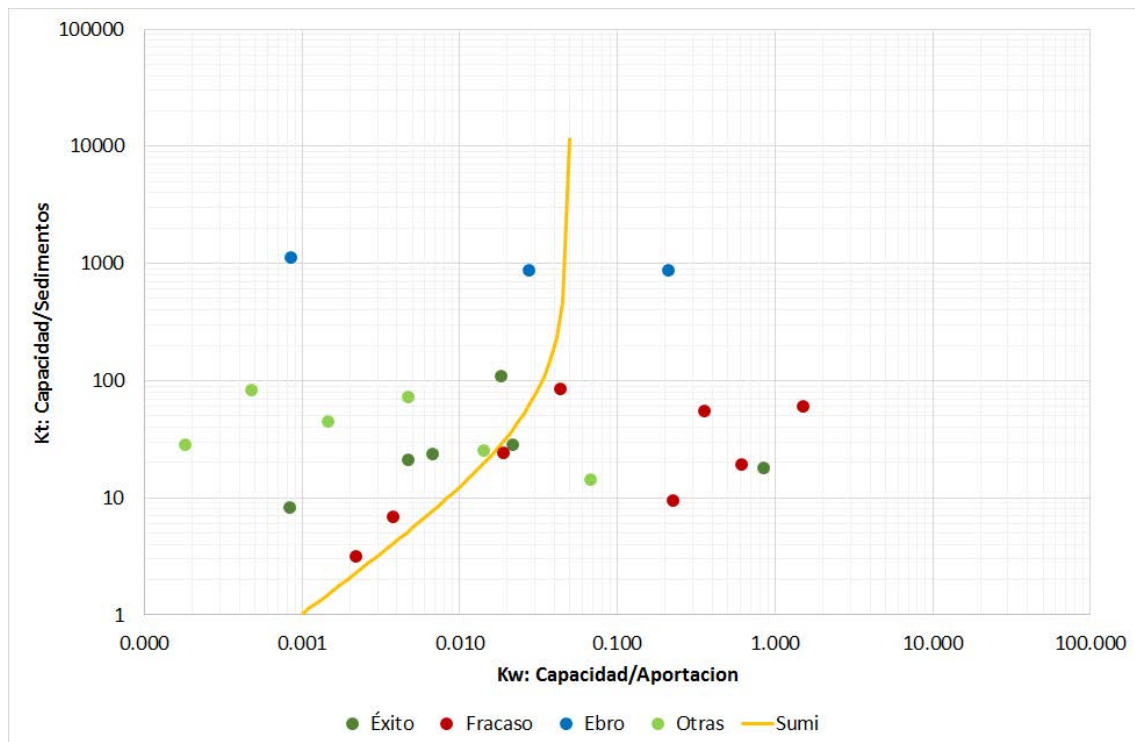


Figura 4.36. Representación de los datos de lavado en el gráfico de Basson y comparación con la curva de Sumi

Por tanto, la curva de Sumi puede tomarse como un buen indicador de la conveniencia de realizar operaciones de lavado en presas. Sin embargo, hay otras variables que influyen en la factibilidad del lavado. La más relevante es la capacidad hidráulica de arrastre, que está directamente vinculada a la pendiente del cauce. La variable  $K_t$  indica la conveniencia de acometer operaciones de gestión de sedimentos, que serán tanto más urgentes cuanto menor sea la vida útil del embalse. Si sustituimos en el diagrama de Basson dicha variable por la pendiente, estimada como el cociente entre la carga hidráulica sobre el órgano de desagüe utilizado para el lavado y la longitud del vaso del embalse, obtenemos los resultados reflejados en la figura 4.37. Puede apreciarse que la variable más determinante para posibilitar el lavado es la pendiente. En todos los casos de lavado reportados como fracaso la pendiente es inferior al 1%, y en todos los casos donde el lavado ha funcionado correctamente es superior a este valor.

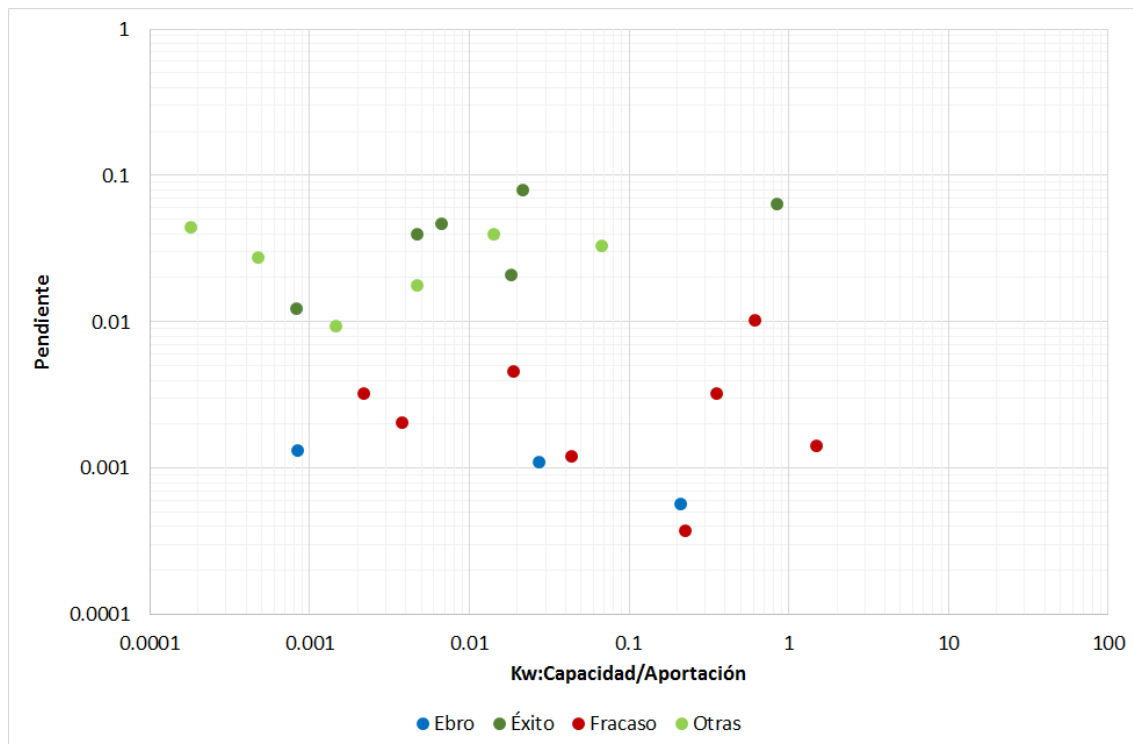


Figura 4.37. Representación de los datos de lavado en el gráfico de Basson y comparación con la curva de Sumi

Si consideramos la posición de las presas del sistema MRF con relación a la curva de Sumi, Ribarroja y Flix serían candidatas al lavado. Sin embargo, la pendiente es un orden de magnitud inferior a los casos en los que el lavado se ha empleado con éxito. Quizás este es el motivo por el cual no se ha podido encontrar ninguna presa de características similares a las del sistema MRF donde se haya aplicado lavado con éxito.

### 3.2 Experiencias de by-pass

La mayor parte de las experiencias mundiales de túneles de by-pass de sedimentos se encuentran en Japón y Austria. Esta solución es adecuada en zonas de alta montaña, donde las fuertes pendientes permiten la evacuación de una cantidad significativa de agua y sedimento a través de un túnel. Hay numerosas referencias que describen las experiencias de gestión de sedimentos mediante túneles de by-pass. Las más notables son: Auel y Boes, 2010; Sumi et al. (2004); Kantoush y Sumi (2010); Sumi, 2015. Todas ellas analizan los mismos casos, que son los relacionados en la Figura 4.38 (Sumi, 2015).

Aunque no se dispone de datos hidrológicos de aportación de caudal y sedimentos, puede comprobarse que esta solución es adecuada para un tipo de presa muy distinto del de las presas del sistema MRF. Todas las pendientes son superiores al 1%. Actualmente, el túnel más largo de by-pass es el de la presa Miwa en Japón, de 4,3 km de longitud, diseñado para un caudal de 300 m<sup>3</sup>/s.

Table 1: Characteristics of successful sediment bypass tunnels in Japan and Switzerland

Name of Dam	Country	Date constr	Tunnel shape	Tunnel cross section (BxH) (m)	Tunnel length (m)	General slope (%)	Design Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Design velocity (ms <sup>-1</sup> )	Annual operation frequency (days/a)
Nunobiki	JP	1908	Archway	2.9 x 2.9	258	1.3	39	7	-
Asahi	JP	1998	Archway	3.8 x 3.8	2350	2.9	140	12	13
Miwa	JP	2004	Horseshoe	2r = 7.8	4300	1	300	10	2-3
Matsukawa	JP	2015	Archway	5.2 x 5.2	1417	4	200	15	-
Koshibu	JP	2016	Horseshoe	2r = 7.9	3982	2	370	9	-
Egshi	CH	1976	Circular	R = 2.8	360	2.6	74	10	10
Palagnedra	CH	1974	Circular	2r = 6.2	1800	2	110	13	2-5
Pffaffensprung	CH	1922	Horseshoe	A = 21 m <sup>2</sup>	280	3	220	14	ca. 200
Rempfen	CH	1983	Horseshoe	3.5 x 3.3	450	4	80	12	1-5
Runcahez	CH	1961	Archway	3.8 x 4.5	572	1.4	110	9	4
Solis	CH	2012	Archway	4.4 x 4.68	968	1.8	170	11	1-10

Notes: JP = Japan, CH = Switzerland, Q = discharge

Figura 4.38. Tabla 1 de Sumi, 2015, que presenta los casos existentes de túneles de bypass en Japón y Suiza.

Las características topográficas e hidrológicas de las presas del bajo Ebro descartan esta alternativa.

### 3.3 Experiencias de evacuación de corrientes de turbidez

La literatura sobre corrientes turbias de densidad es abundante. Existen numerosos ejemplos de embalses donde se produce el fenómeno y en varios de ellos se han organizado medidas para poder evacuar las corrientes que llegan al embalse sin dar tiempo a que se deposite el sedimento. Sin embargo, se trata de un fenómeno singular, que se produce bajo condiciones muy particulares, por lo que no es posible realizar un análisis sistemático de su efectividad. Como visión general, presentamos la tabla que figura en Chamoun et al, 2016, que hicieron una revisión muy completa de los casos de aplicación práctica (Figura 4.39)

Table 2  
Overview of worldwide venting applications.

Reservoir	Storage capacity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Annual runoff (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Annual average sedimentation rate (%)	Average annual sediment load (10 <sup>6</sup> t)	Venting efficiency (%)
Iril Emda (Algeria)	160	210	1.1	3.38 × 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	25–60
Lake Mead (USA)	38,400	16,000	0.33	12.8 × 10 <sup>6</sup> (m <sup>3</sup> )	18–39
Nebeur (Tunisia)	300	180	-	-	59–64
Fengjiashan (China)	398	485	-	-	23–65
Guanting (China)	2270	1400	15.7	57.22	20–34
Mapragg (Switzerland)	5	167	0.4	0.058	10
Sanmenxia (China)	9640	43,200	26	1605	1.2–21
Sefid Rud (Iran)	1760	5008	2.1	50.4	0.9–36
Heisonglin (China)	8.6	14.2	6	0.71	36–92
Nanqin (China)	10.19	121	5.8	0.533	64
Elephant Butte (USA)	3250	1238	0.53	12.8	9–23
Bajiazui (China)	495	-	-	-	46–100
Xiaolangdi (China)	12,650	40,550	-	23.33	20
Liujiaxia (China)	5720	27,300	1	15	52–87

Figura 4.39. Tabla 2 de Chamoun et al., 2016, que presenta experiencias de evacuación de corrientes de turbidez.

En los casos reportados se han conseguido eficiencias muy buenas, aunque es muy posible que se hayan elegido los mejores ejemplos para su inclusión en esta tabla. En cualquier caso, en los embalses del sistema MRF no se han observado corrientes turbias de densidad, posiblemente porque



no se alcanza suficiente concentración de sedimentos para que se produzca el fenómeno. Únicamente se ha encontrado un trabajo fin de carrera de la Universidad Politécnica de Cataluña (Herrero Casas, 2007) donde se plantea que el episodio de contaminación ocurrido en el embalse de Flix pudiera deberse a la resuspensión del sedimento del fondo debido a una corriente de densidad, pero, en ese caso, la corriente es de naturaleza térmica. En consecuencia, la evacuación de corrientes de turbias de densidad no puede considerarse una alternativa viable para la gestión de sedimentos del bajo Ebro.

### 3.4 Experiencias de dragado y excavación

Las experiencias de dragado y excavación son muy numerosas, puesto que este recurso es muy versátil y únicamente está limitado por consideraciones económicas. Las condiciones que determinan la excavación o el dragado dependen en menor medida de la naturaleza del embalse que en otros casos de gestión de sedimento, ya que se emplean medios externos para actuar sobre el sedimento acumulado.

Table 2.3 Sediment removal practices in China by siphon dredging system

Reservoir	Tianjiavan	Xiahuasha	Youhe	Xihe	Taoshupo	Beichaji	Xihe
Damsite (city, ovince)	Yuci,Sharxi	Huaxian,	Weinan,	Lintong,	Fengxiang,	Nijing,	Lintong,
Dam Height (m)	29.5	33	32	35	32.5	15	39.8
Original Storage Capacity	9.43	1.77	24.5	3.94	1.54	2.75	6.74
Annual runoff (106 m3)	3.95	2.5	33.6	4.6	1.31	1.09	3.69
Annual sediment load (10 <sup>3</sup> ton)	320	50	650	450	73	163	440
Annual sediment	82	20	19.3	87.5	55.6	150	-
Completion year	1960	1959	1959	1969	1959	1972	1971
Survey year	1978	1978	1978	1978	1982	1978	1978
Operation period (year)	18	19	19	9	23	6	7
Total deposition (10 <sup>3</sup> ton)	4,000	525	8,985	3,100	782	528	5,780
Annual deposition (10 <sup>3</sup> ton)	220	276	473	344	34	88	340
Discharging structure	Outlet	Pivot Gate	Draw-off	Flexible	Outlet	Bottom	Outlet
Discharging capacity (m <sup>3</sup> /s)	2.5	5	5.5	2	-	10	2
Staring year of dredging	1975	1976	1976	1977	1978	1977	1978
Gross work head (m)	17.4	-	-	-	-	-	-
Effective work head (m)	5.5 - 8.8	0 -20.8	9 - 14.0	5 - 10.0	6 - 8.0	6 -14.0	-
Diameter of pipe (m)	0.55	0.3	0.72	0.3	0.25	0.23 - 0.5	0.18

Table 2.3 (continued) Sediment removal practices in China by siphon dredging system

Reservoir	Tianjiavan	Xiahuasha	Youhe	Xihe	Taoshupo	Beichaji	Xihe
Length of pipe (m)	229	83 - 350					
Pipeline discharge (m <sup>3</sup> /s)	1.2	0.3	0.72	0.3	0.25	0.23-0.5	0.18
Suction head type	Aspirator	Aspirator	Cutter	Cutter	Aspirator	Aspirator	Cutter
Water depth of reservoir	3	12.8-2.7	6-8.0	2-8.0	2-6.0	15-5.0	-
Mean sediment concentration (kg/m <sup>3</sup> )	190	136-168	-	-	87.7	484	3
Max sediment concentration (kg/m <sup>3</sup> )	480	720	581.5	1,080	50.5	1,143	-
Use of release sediment	Irrigation	Irrigation	Irrigation	Irrigation	Irrigation	Irrigation	Irrigation
Grain size at outlet, d <sub>50</sub> (mm)	0.007	0.024-0.044	0.015-0.029	-	-	0.005-0.096	-
Dredging Period	1975-77	1976-86	1978-86	-	-	-	1078-86
Dredging hours	695	4619	4203	-	-	-	4353
Dredged Sediment (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	320	406	325	-	-	-	213
Hourly dredged sediment (m <sup>3</sup> /hr)	460	88	77	-	-	-	49
Cost of siphon dredging system (10 <sup>3</sup> RMB)	-	103.7	99.8	-	-	-	32.2
Dredging unit cost (RMB/m <sup>3</sup> )	0.045	0.21	0.16	-	-	-	0.22

Figura 4.40. Tabla 2.3 de Aras, 2009, que presenta experiencias de dragado en sifón en China.

En este caso, resulta difícil trasladar las experiencias de otras realizaciones al caso del sistema MRF, porque las características del embalse (ubicación, accesos, profundidad, posibilidad de acopio, etc.) y del sedimento (granulometría, compactación, erosionabilidad, etc.) son determinantes del coste. No existe ninguna variable que pueda utilizarse para identificar situaciones similares. Por este motivo, en este apartado únicamente podemos listar algunos casos reportados en la literatura

donde se describen las operaciones de dragado o excavación en seco y se da información sobre sus costes.

### ***Hidrosucción***

En la Figura 4.40 se incluye un juego de datos sobre hidrosucción en presas de China tomado de la tesis doctoral de Tuce Aras (2009).

En todos estos casos la hidrosucción se ha aplicado a una escala mucho menor de la correspondiente a los embalses del sistema MRF. Los volúmenes de material retirado son muy escasos y la instalación hidráulica es de pequeña entidad, con un rango de caudales entre 0,2 y 1,2 m<sup>3</sup>/s diámetros entre 200 y 700 mm.

### ***Dragado***

Hay varias publicaciones que proporcionan tablas comparativas de operaciones de dragado. Una de las más completas es el informe del Texas Water Development Board (TWDB, 2005), que realizó un estudio comparativo del dragado frente a la construcción de nuevos embalses. Entre otras fuentes de datos, analizaron las operaciones de dragado del US Army Corps of Engineers, la agencia estatal que realiza más volumen de operaciones de este estilo. Obtuvieron costes superiores a 1,5\$/m<sup>3</sup> (Figura 4.41), incluso en operaciones de dragado fluvial, que suelen ser menos difíciles que en vasos de embalse.

**TABLE A-1  
CORPS OF ENGINEERS EXPERIENCE**

Year	Project	Cu Yd	Cost/Cu Yd
2003	Neches River	2,700,000	\$2.88
2003	Embrey Dam	251,384	\$10.72
2004	Mobile River/Theodore Ship Channel	750,000	\$4.00
2004	Miss River Pass-A-Loutre	6,250,000	\$1.31
2003	Trinity River - Ch to Anahuac	212,000	\$4.13
2003	Ohio River	1,000,000	\$3.84
2003	Red River - Vicksburg	6,000,000	\$1.17
2002	Trinity River -	894,882	\$5.66
2000	McClellan Kerr Ark River	835,000	\$3.17

Figura 4.41. Tabla A-1 de TWDB, 2005, que presenta experiencias de operaciones de dragado realizadas por el US Army Corps of Engineers en Estados Unidos.

En esta misma publicación se comparan los datos obtenidos de costes (ajustados mediante una función potencial) con dos curvas de costes medios de dragado en función del volumen de la operación, proporcionadas por el programa RESCON (Kawashima et al., 2003) y la Universidad Texas A&M en su programa Cutter Suction Dredge Cost Estimation Program (Ramsdell, 2011). Los resultados se presentan en la Figura 4.42, donde se puede comprobar el mejor ajuste de la función adoptada en RESCON, que es:  $C = 6,6159X^{-0,4315}$ , donde C es el coste unitario en \$/m<sup>3</sup> y X es el volumen retirado en millones de m<sup>3</sup>. Esta función proporciona un límite asintótico de coste ligeramente por debajo de 2\$/m<sup>3</sup>.

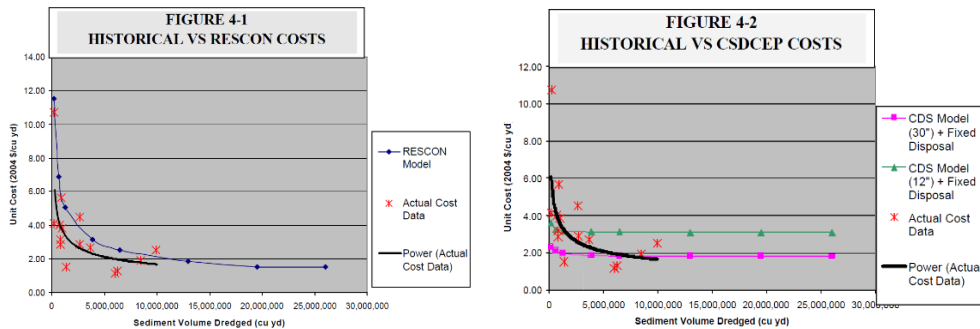


Figura 4.42. Figuras 4.1 y 4.2 de TWDB, 2005, que presenta análisis de costes de operaciones de dragado.

TABLE 16.1 Cost of Sediment Removal from Debris Basins During 1993 in Los Angeles County, California

Basin name	Volume removed, m <sup>3</sup>	One-way haul, km	Unit cost	
			\$/m <sup>3</sup>	\$/yd
1 Dunsmuir	8,412	0.8	\$5.23	\$4.00
2 Halls	10,532	6.1	\$7.41	\$5.66
3 Gould	3,581	11.3	\$7.83	\$5.99
4 Kinneloa East	2,891	1.9	\$8.65	\$6.61
5 May No. 1	4,791	0.8	\$9.39	\$7.18
6 Las Flores	12,543	3.1	\$9.52	\$7.28
7 Brand	6,600	4.8	\$10.00	\$7.65
8 May No. 2	3,157	0.8	\$10.52	\$8.04
9 Wildwood	5,133	12.6	\$11.10	\$8.49
10 Blanchard	6,691	5.2	\$11.66	\$8.91
11 Aliso	14,876	11.3	\$12.12	\$9.27
12 Mullally	1,279	7.7	\$13.29	\$10.16
13 Devils M-1 DRI	11,846	4.8	\$14.10	\$10.78
14 Browns M-1 DRI	3,431	2.6	\$14.86	\$11.37
15 Deer	2,218	9.2	\$15.32	\$11.71
16 Kinneloa West	4,935	1.9	\$17.22	\$13.17
17 Lincoln	2,297	0.5	\$17.41	\$13.32
18 Turnbull	10,826	10.0	\$19.75	\$15.10
19 Sunset Upper	2,753	4.8	\$22.38	\$17.11
20 Vallecito	1,736	31.6	\$23.04	\$17.62
21 Hay	2,446	9.3	\$24.09	\$18.42
22 Linda Vista	369	13.2	\$24.37	\$18.63
23 Barkentine	1,032	10.1	\$27.12	\$20.74
24 Fieldbook	373	35.4	\$29.70	\$22.71
25 Oakmont View	134	6.0	\$49.32	\$37.71

Source: Courtesy Los Angeles County Dept. of Public Works.

Figura 4.43. Tabla 16.1 de Morris y Fan, 1998, que presenta costes de operaciones de excavación en las presas de retención de sedimentos del condado de Los Ángeles.

### Excavación

La excavación requiere el vaciado y secado del embalse antes de comenzar las operaciones, y por ello suele ser más costosa que el dragado. Los factores de coste dependen en gran medida de las condiciones locales, por lo que no resulta generalizables. A título de ejemplo incluimos la tabla

presentada por Morris y Fan, 1998 sobre costes de excavación en el condado de Los Ángeles, en California. Aunque puede suponerse que las condiciones no serían desfavorables, ya que se trata de excavación en presas cuya finalidad es precisamente la retención de sedimentos, los costes resultan muy elevados, superiores a los 5\$/m<sup>3</sup>.

### 3.5 Experiencias de inyección de sedimentos

La mayor parte de los casos de inyección de sedimentos reportados en la literatura corresponden a experiencias realizadas en Japón. Por ejemplo, la tabla de la Figura 4.44 corresponde a las experiencias reportadas por Sumi, 2006. En ella se puede ver la variedad de objetivos ambientales que se perseguían.

Table 1 Sediment replenishment dams in Japan

Name of dam	Name of river	Drainage area (km <sup>2</sup> )	Location	Year	Purpose	Sediment used for replenishment (Particle size)	Transportation distance (km)	Volume used for replenishment (×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /cycle)	Average annual rate of reservoir sedimentation (×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /Year)
Akiha	Tenryu River, Tenryu River System	4,490	Shizuoka Pref	'99~'05	Prevention of riverbed degradation and coastal erosion	Sediment accumulated in reservoir (Gravel 67%, Sand 29%)	Akiha 3 Funagira 23	18~20	430
Miharu	Otake River, Abukuma River System	226	Fukushima Pref.	'99~'05	(1) Prevention of downstream riverbed degradation (2) Prevention of increase in coarse grain content	Sediment accumulated in front reservoir (Sand 60%, Silt 28%)	4	1~2	149
Futase	Ara River, Ara River System	260	Saitama Pref.	'99, '01~'05	(1) Improvement of habitat of fish (sculpin)	Sediment accumulated at check dam (Gravel, boulder)	15	3~8.8	101
Nagashima <sup>*1</sup>	Oi River, Oi River System	958 <sup>*2</sup>	Shizuoka Pref.	'00~'01	(1) Acquisition of basic data for annual sediment replenishment planning for Nagashima Dam (2) Determination of influence on downstream river environment	Sediment accumulated just upstream of an embankment dam downstream of the dam (Average particle diameter 31mm)	1 <sup>*3</sup>	20~25	400
Urayama	Urayama River, Ara River System	51	Saitama Pref.	'00, '02, '03	(1) Improvement of habitat of fish (2) Prevention of increase in coarse grain content	Sediment accumulated in reservoir ( - )	4	1~14	144
Hachisu	Hachisu River, Kushida River System	80	Mie Pref.	'02~'05	(1) Improvement of habitat of <i>ayu</i> (sweet fish) (2) Prevention of riverbed degradation	Sediment accumulated in reservoir ( - )	5	0.3	29
Nibutani	Saru River, Saru River System	1,215	Hokkaido	'02~'04	(1) Disposal of sediment accumulated at check dam (2) Improvement of downstream river environment	Sediment accumulated at check dam ( - )	11 20	1~5.8	764
Shimokubo	Kanna River, Tone River System	322	Gunma Pref.	'03~'05	(1) Conservation of landscapes of Sanbaseki Ravine downstream of the dam (prevention of armoring)	Sediment accumulated in reservoir (Gravel)	5	1	240
Nunome	Nunome River Yodo River System	75	Nara Pref.	'05	(1) Disposal of sediment accumulated at check dam (2) Improvement of downstream river environment	Sediment accumulated at check dam (Gravel 20%, Sand 60%)	1	0.3	12
Hitokura	Iina River Yodo River System	115	Hyogo Pref.	'02~'05	(1) Prevention of increase in coarse grain content (2) Improvement of habitat of <i>ayu</i> (sweet fish)	Sediment from downstream river (Gravel)	-	0.19-0.6	30

\*1: Sediment accumulated at *Shiogo Weir* downstream of Nagashima Dam is used.

\*2: The size of a catchment area at *Shiogo Weir* \*3: Distance from *Shiogo Weir* to a temporary place

Figura 4.44. Tabla 1 de Sumi, 2006, que presenta experiencias de inyección de sedimentos en Japón.

### 3.6 Experiencias similares a partir de K<sub>w</sub> y K<sub>t</sub>

La recopilación de experiencias reportadas en la literatura no ha permitido identificar casos similares a las presas del bajo Ebro donde se haya realizado una gestión eficaz de los sedimentos. Se ha recopilado información de 137 presas documentadas en la literatura, construyendo una base de datos de casos que se presenta en el Anejo 1. Se dispone de información relativa a los parámetros K<sub>w</sub> y K<sub>t</sub> en 61 de estas presas, lo que ha permitido elaborar el gráfico presentado en la Figura 4.45. En muchas de estas presas se aplican varias medidas de gestión del sedimento. En el gráfico se ha incluido la medida de gestión que se ha considerado dominante o más efectiva, a la vista de la literatura disponible. La clave aplicada en el gráfico es la siguiente:

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez  
 FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial;  
 ED: Dragado; EX: Excavación;  
 GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

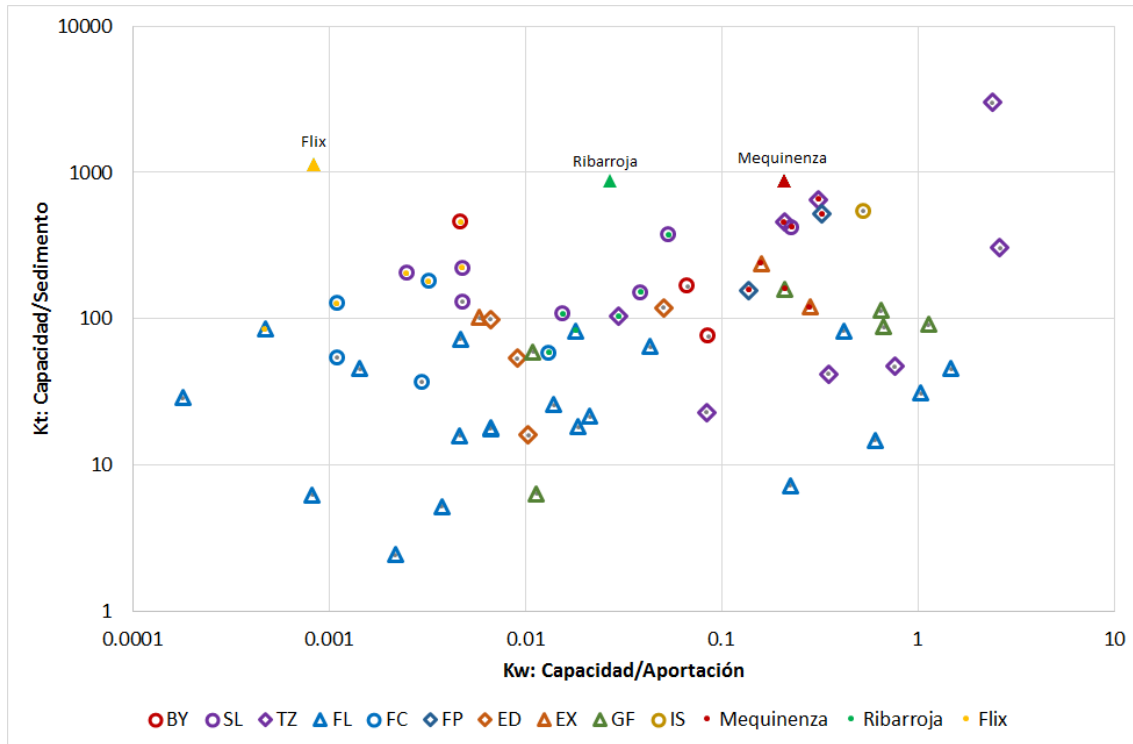


Figura 4.44. Diagrama de Basson de las experiencias recopiladas para las que existe información de gestión de sedimentos.

También se han incluido los puntos correspondientes a las presas del bajo Ebro. Como se puede apreciar en el gráfico, los valores de  $K_w$  y  $K_t$  de las presas del sistema MRF quedan fuera del rango correspondiente a las experiencias identificadas en la literatura, por lo que no se pueden establecer analogías directas. Se han seleccionado las experiencias que quedan más próximas a cada una de las tres presas, marcadas con el color correspondiente a cada una de ellas: Mequinenza en rojo, Ribarroja en verde y Flix en amarillo. Estas experiencias se comentan a continuación.

**Experiencias similares a Mequinenza**

Las presas cuya representación queda próxima a Mequinenza en el diagrama de Basson se presentan en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Embalses más próximos a Mequinenza en el diagrama de Basson

Presa	Pais	Cap hm3	Apo hm3/a	Sed Mt/a	Kw años	Kt años	Alt m	Long Km	Pend m/km	Medidas de gestión		
Mequinenza	España	1534	7345	2.800	0.209	657	61	106.00	0.58			
Liujiaxia	China	5720	27300	15.000	0.210	458	147	41.54	3.54	TZ		
Kamishiiba	Japón	92	402	0.260	0.228	422	110	6.88	15.99	SL		
Xiaolangdi	China	12650	40550	23.330	0.312	651	154	89.20	1.73	TZ	ED	
Miure	Japón	62	190	0.144	0.327	517	83.2	3.47	23.98	FP		
Makio	Japón	75	471	0.378	0.159	238	105	6.43	16.33	EX	ED	
Shihmen	Taiwan	309	1468	2.328	0.211	159	133	17.08	7.79	GF	ES	EX

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Se han seleccionado seis embalses que, por sus características, se encuentran próximos al de Mequinenza en el diagrama de Basson. De estos seis embalses, tres son mucho más pequeños que Mequinenza, uno de ellos tiene una capacidad de aproximadamente el 20% la de Mequinenza y los otros dos son mucho mayores, con capacidades 3,7 y 8,2 veces mayores. Todas las alturas de presa son mayores que la de Mequinenza y todos los vasos son más cortos. Por tanto, la pendiente del río en el vaso es menor que en Mequinenza.

Los embalses que más se parecen a Mequinenza son los dos situados en China: Liujiaxia y Xiaolangdi. Mequinenza tiene un vaso de 106 km de longitud y 0,058% de pendiente. El vaso de Liujiaxia tiene 41 km de longitud y 0,354% de pendiente, mientras que el vaso de Xiaolangdi tiene 89 km de longitud y una pendiente de 0,173%. Morfológicamente el vaso más similar a Mequinenza es el de Xiaolangdi, con un aspecto sinuoso característico de río encajado (Figura 4.45). El vaso de Liujiaxia es mucho más ancho y corto (Figura 4.46).

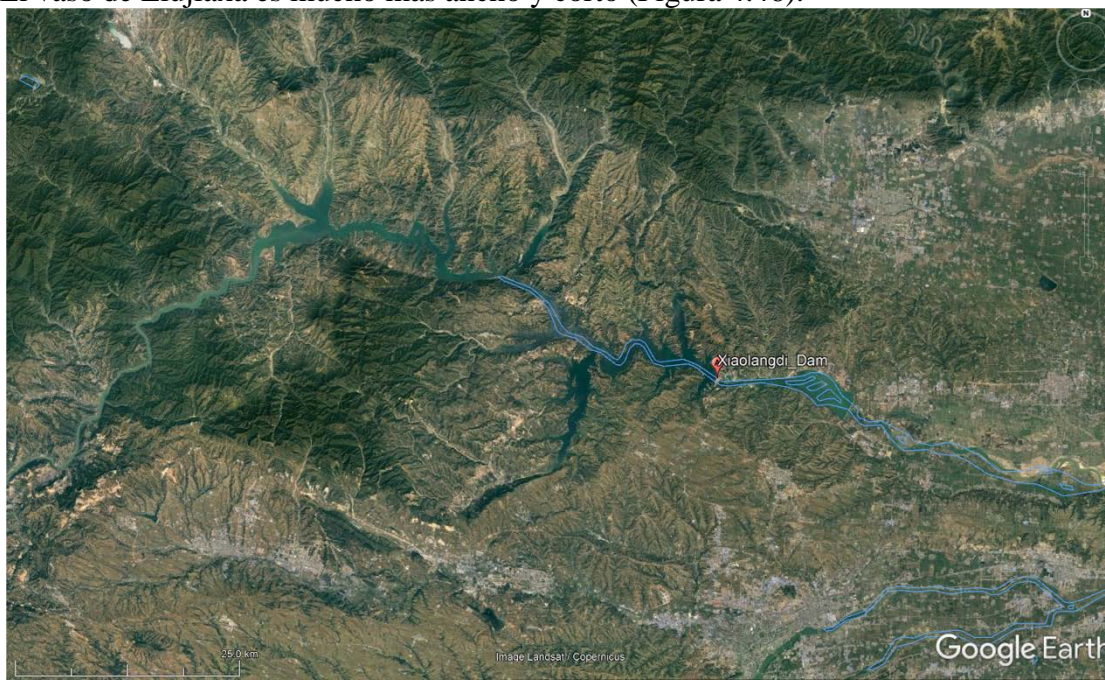


Figura 4.45. Vaso del embalse de Xiaolangdi.



Figura 4.46. Vaso del embalse de Liujaxia

Ambos embalses están situados en el río Amarillo. La medida de gestión de sedimentos aplicada en estos dos embalses es la evacuación de corrientes turbias de densidad. Ambos aparecen en la literatura técnica como casos de estudio de evacuación de corrientes turbias de densidad (Chamoun et al., 2016, Hu et al., 2012; Cao et al., 2014). Wang y Hu, 2009 indican que el embalse está situado a 860 km de la desembocadura del río Amarillo. La obra se terminó en 1999. El embalse retiene la fracción gruesa del transporte, pero deja pasar la fracción fina (menos de 0,02 mm), que llega en forma de corrientes de densidad con flujo hiper-concentrados durante las crecidas. El rendimiento observado en la evacuación de sedimentos mediante este procedimiento es únicamente del 20%, ya que hay una gran proporción de corrientes de densidad que no llegan a la presa, debido a la longitud del vaso. En el caso de Liujaxia los rendimientos observados son mayores, porque el embalse es mucho más corto. No se han observado corrientes de densidad en Mequinenza, por lo que no resulta posible aplicar esta técnica.

En los otros embalses las principales medidas practicadas son la excavación, bien en seco, bien mediante dragado. En el embalse de Kamishiiba, en Japón se practica el *sluicing* y en el de Miure, en Japón, el lavado parcial, pero estos dos procedimientos son difícilmente aplicables a Mequinenza por su escasa pendiente y la configuración desfavorable de sus desagües.

### Experiencias similares a Ribarroja

Las presas cuya representación queda próxima a Ribarroja en el diagrama de Basson se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Embalses más próximos a Ribarroja en el diagrama de Basson

		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	Pend	Medidas de gestión			
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km	m/km				
Ribarroja	España	291	10716	0.528	0.027	882	32.3	29.00	1.11				
Mapragg	Suiza	5	167	0.058	0.030	103	65	1.83	35.52	TZ			
Tsukabaru	Japón	34	635	0.110	0.054	374	87	7.64	11.39	SL			
Morotsuka	Japón	3	89	0.028	0.039	151	59	1.44	40.97	SL	FP		
Palagnedra	Suiza	6	304	0.080	0.018	83	55	2.60	21.15	FL	BY		
Iwayado	Japón	8	533	0.092	0.016	108	45	2.89	15.57	SL			
Senzu	Japón	5	374	0.102	0.013	58	64	1.60	40.00	FC	FP		

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Todos los embalses son mucho más pequeños que Ribarroja. El que más se acerca es el de la presa de Tsukabaru, en Japón, con una capacidad algo superior al 10% de Ribarroja, pero más de dos veces y media su altura. Todas las presas de la relación son presas de alta montaña, con pendientes mucho mayores que las de Ribarroja y vasos mucho más cortos.

Las medidas que se aplican son el *sluicing*, en las presas japonesas de Tsukabaru, Morotsuka e Iwayado, el lavado, en Palagnedra (Suiza) y Sensu (Japón) y la evacuación de corrientes de densidad en Mapragg (Suiza). La presa de Palagnedra dispone además de un túnel de by-pass. No resulta fácil extrapolar estas medidas a las condiciones de Ribarroja.

### Experiencias similares a Flix

En el caso de Flix todas las presas quedan muy alejadas en la representación del diagrama de Basson. Se han seleccionado las más próximas, que se presentan en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Embalses más próximos a Flix en el diagrama de Basson

		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	Pend	Medidas de gestión			
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km	m/km				
Flix	España	11	13576	0.016	0.001	1141	16.1	12.00	1.34				
Asahi	Japón	26	5413	0.067	0.005	456	87	2.38	36.49	BY			
Barenburg	Suiza	2	3594	0.024	0.000	85	64	2.30	27.83	FL			
Ouchibaru	Japón	7	1558	0.041	0.005	222	26	7.23	3.60	SL			
Kasagi	Japón	14	4350	0.094	0.003	180	40.8	10.00	4.08	FC	FP		
Saigo	Japón	2	980	0.014	0.002	204	20	3.75	5.33	SL			
Tokiwa	Japón	1	606	0.006	0.001	126	33.5	1.00	33.50	FC			

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Tres de las presas tienen una capacidad de embalse del mismo orden de magnitud que la de Flix y tres de ellas son mucho más pequeñas. Las pendientes son mayores que en el vaso de Flix, pero en el caso de las presas de Ouchibaru y Kasagi la diferencia no es muy grande (0,360% y 0,408% frente a 0,134%). En estas dos presas la aportación es mucho menor que el Flix (un 11% en el caso de Ouchibaru y un 32% en el caso de Kasagi). Como se muestra en las figuras 4.47 y A.48, la morfología de los vasos también es similar a la de Flix.



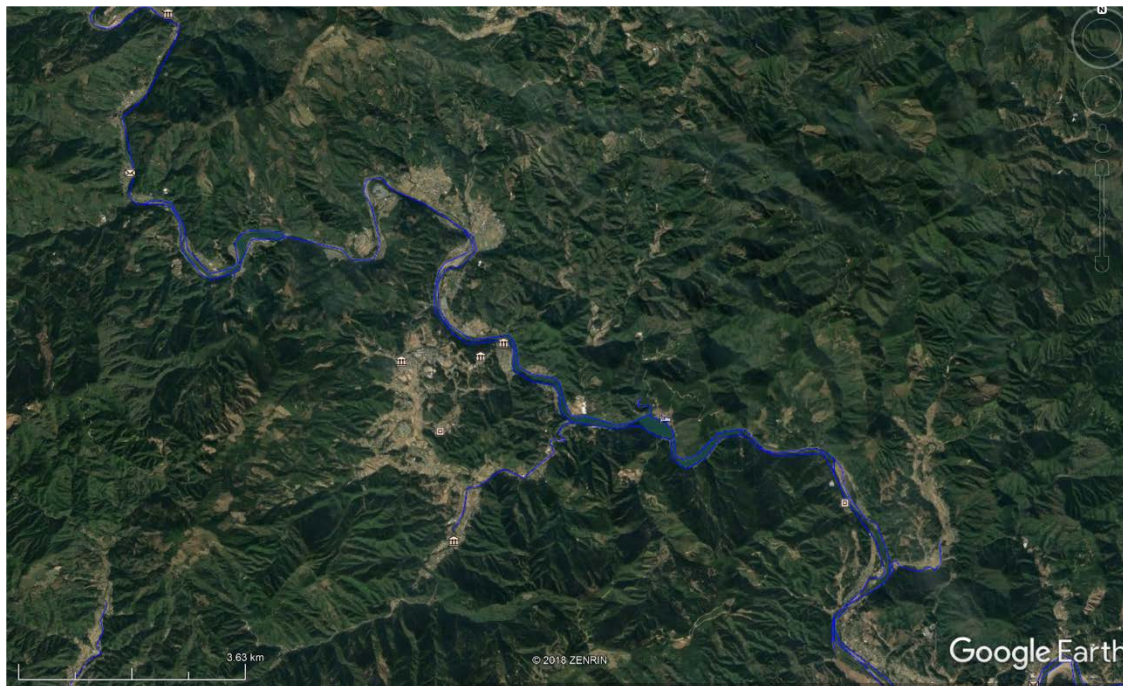


Figura 4.47. Vaso del embalse de Ouchibaru.

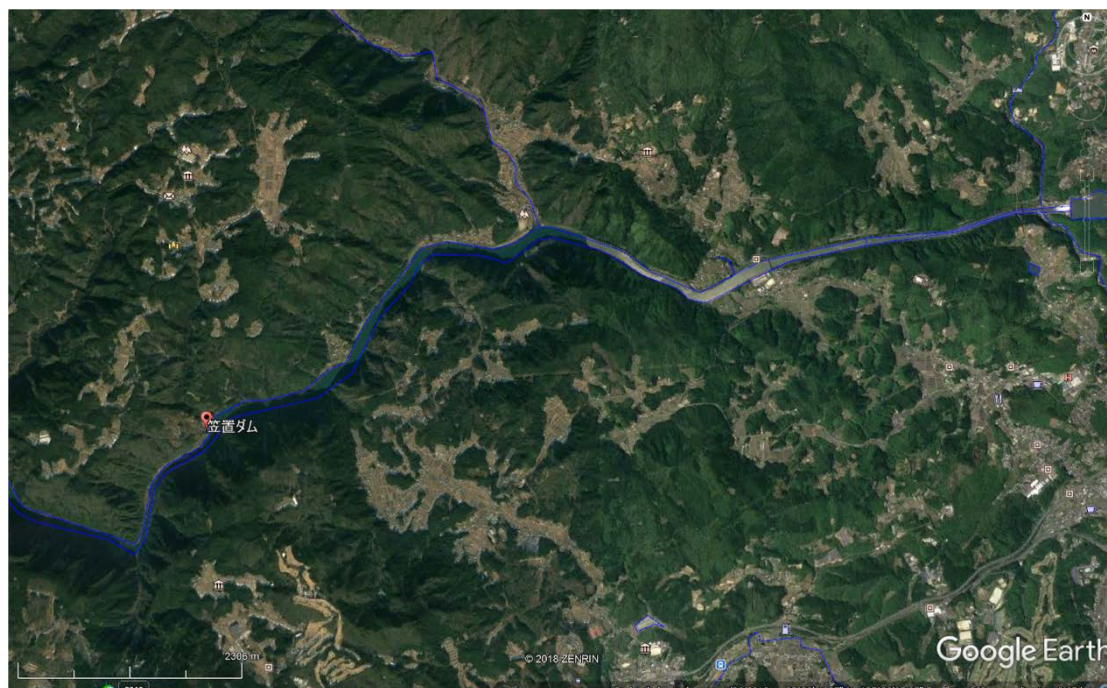


Figura 4.48. Vaso del embalse de Kasagi.

Las medidas que se aplican en estas presas son el túnel de by-pass (Asahi), el *sluicing* (Ouchibaru y Saigo) y el lavado (Barenburg, Kasagi y Tokiwa). La analogía morfológica en Ouchibaru y Kasagi, junto con la configuración favorable de los desagües y la disponibilidad de aportación, permiten suponer que el lavado y el *sluicing* podrían ser factibles en Flix.

### 3.7 Experiencias similares a partir de $K_w$ y pendiente

El parámetro  $K_t$  se utiliza porque es un buen indicador de la necesidad de adoptar medidas de gestión de sedimentos. Sin embargo, en el sistema MRF la gestión de sedimentos no se realizaría únicamente para conservar capacidad útil de embalse, sino que se orientaría fundamentalmente a restituir el tránsito natural de sedimentos que había antes de la construcción de las presas. Por este motivo se ha realizado también una selección de casos análogos basándose en las características hidrodinámicas. Como se vio al analizar el lavado, la pendiente es un buen indicador de la capacidad hidráulica de la corriente para limpiar el sedimento. Se ha elaborado un gráfico similar al del apartado anterior, pero esta vez utilizando  $K_w$  y pendiente, que se presenta en la figura 4.49.

Como se puede apreciar en el gráfico, también en este caso los valores de  $K_w$  y pendiente de las presas del sistema MRF quedan fuera del rango correspondiente a la mayor parte de las experiencias identificadas en la literatura, por lo que no se pueden establecer analogías directas. A partir de este gráfico se han seleccionado las presas con mayor afinidad a las del sistema MRF, que en el gráfico se han marcado con el color correspondiente a cada una de las presas: Mequinenza en rojo, Ribarroja en verde y Flix en amarillo. Las características de estas presas se comentan a continuación.

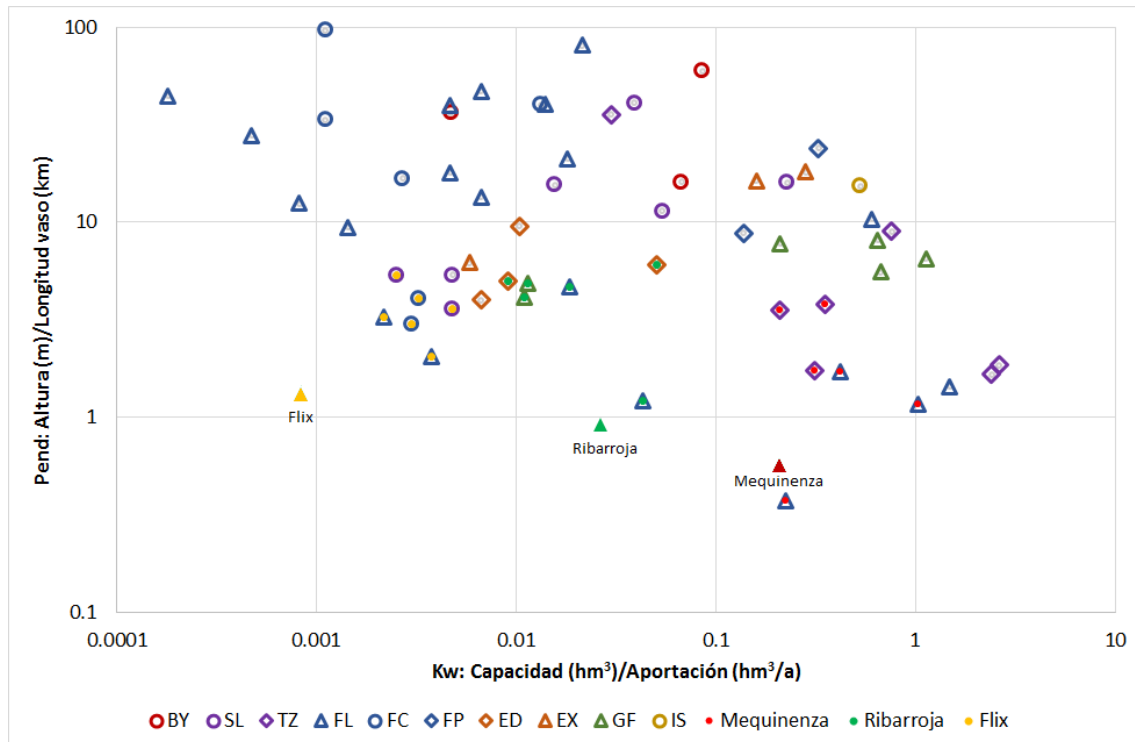


Figura 4.49. Diagrama  $K_w$ , pendiente de las experiencias recopiladas para las que existe información de gestión de sedimentos.

### Experiencias similares a Mequinenza

Las presas cuya representación queda próxima a Mequinenza en el diagrama de  $K_w$ , pendiente se presentan en la tabla 4.6.

Tabla 4.5. Embalses más próximos a Mequinenza en el diagrama de  $K_w$ , pendiente

		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	Pend	Medidas de gestión		
Presa	País	hm <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup> /a	Mt/a	años	años	m	Km	m/km			
Mequinenza	España	1534	7345	2.80	0.209	876	61	106.00	0.58			
Sanmenxia	China	9640	43000	1600	0.224	7	45	120.00	0.38	FL	TZ	ED
Liujiaxia	China	5720	27300	15.00	0.210	458	147	41.54	3.54	TZ		
Xiaolangdi	China	12650	40550	23.33	0.312	651	154	89.20	1.73	TZ	ED	
Tarbela	Pakistan	14300	33260	208	0.419	83	137	79.90	1.71	FL		
Sefid Rud	Irán	1760	5008	50.40	0.351	42	106	27.80	3.81	TZ	FL	
Naodehai	China	270	261	10.47	1.034	31	41.5	35.50	1.17	FL		

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

De los seis embalses que, por sus características, se encuentran próximos al de Mequinenza en el diagrama de  $K_w$ , pendiente hay dos que ya resultaban similares en el diagrama de Basson: Liujiaxia y Xiaolangdi, ambas en China, donde se aplica la evacuación de corrientes de densidad. La experiencia en estas presas ya se ha comentado en el apartado anterior.

La presa más próxima a Mequinenza es la de Sanmenxia, en el río Amarillo en China. Se trata de un caso muy citado en la literatura porque la presa ha presentado graves problemas de aterramiento y se han aplicado medidas de gestión durante muchos años. Se trata de un embalse unas seis veces mayor que Mequinenza, tanto en capacidad como en aportación media anual, pero con una carga de sedimentos casi 600 veces mayor que la de Mequinenza. Puede decirse, por tanto, que se enfrenta a un problema de gestión de sedimentos 100 veces mayor que el de Mequinenza. En esta presa se ha aplicado lavado, evacuación de corrientes de densidad y dragado. La medida de gestión trasladable a Mequinenza sería el lavado, ya que no se han observado corrientes de densidad y el dragado depende únicamente del coste, que es un factor local. Para el lavado se utiliza, según Sumi, 2008 un caudal de 2000 m<sup>3</sup>/s durante 4 meses al año. A pesar de dedicar tantos recursos y tiempo al lavado, la experiencia no ha sido favorable, ya que Atkinson, 1996 la clasifica en el grupo en que el lavado ha sido un fracaso.

Las otras tres presas que se sitúan próximas a Mequinenza en el diagrama  $K_w$ , pendiente son Tarbela, en Pakistán, Sefid Rud, en Irán, y Naodehai, en China. La presa de Tarbela también aparece con frecuencia en la literatura, citada como un ejemplo de sistema que debería haber sido diseñado para gestionar el sedimento desde la fase de proyecto. Dado que no se hizo así, el embalse presentó un fuerte aterramiento, habiendo colmatado el 17% del vaso a los 18 años de su construcción (Wang y Hu, 2009). Al descender el nivel del embalse cada año durante la campaña de riegos, se comprobó que el material, inicialmente depositado en la cola del embalse, se desplazaba hacia el centro del vaso por efecto de lavado. En 2006 la colmatación había alcanzado el 30% del volumen del vaso (Annandale, 2006), de lo que puede deducirse que el lavado no ha sido efectivo. Además, Annandale, 2016 indica que el lavado ya no es factible debido al desarrollo del río aguas abajo de la presa.

La presa de Sefid Rud se construyó en 1961 y a los 20 años el vaso presentaba un aterramiento del 45% (Hassanzadeh, 1995). La gestión de sedimento se basa en la evacuación de corrientes de densidad y en el lavado. La existencia de corrientes de densidad permite reducir la

capacidad de retención del vaso hasta el 70% (Chamoun et al., 2016). En el lavado se utiliza un caudal de 100 m<sup>3</sup>/s durante 4 meses, lo que supone unos 1000 hm<sup>3</sup>/a, el 20% de la aportación anual. Hassanzadeh, 1995, cita que en ocho años de lavado se pudieron evacuar 300 hm<sup>3</sup> de los 800 hm<sup>3</sup> acumulados en el vaso, lo que supone una media de 37,5 hm<sup>3</sup>/a. Sumi, 2008 cita una eficiencia del lavado entre 0,02 y 0,07, que permitiría evacuar entre 20 y 70 hm<sup>3</sup> de sedimento al año y contener el aterramiento del vaso. Sin embargo, Atkinson, 1996, la clasifica en el grupo en que el lavado ha resultado un fracaso.

La presa de Naodehai se construyó en 1942 en el río Liu y fue recrecida en 1969 y rehabilitada en 1991. Presenta un fuerte problema de aterramientos, ya que el vaso tiene una capacidad de 270 hm<sup>3</sup> y la acumulación observada es de 10,5 Mt/a, debido a que el río drena una cuenca desértica. El embalse se utiliza para laminación de avenidas en la época lluviosa (junio-septiembre) y para atender usos de regadío en la época seca (octubre-mayo). Las grandes avenidas depositan una gran cantidad de lodo en el embalse, que se evacua mediante lavado en las avenidas pequeñas. Este régimen de explotación ha permitido mantener una capacidad útil del 80% de la original al cabo de 60 años de operación (Xia, 2003), aunque ha sido necesario coordinar las operaciones de lavado con actuaciones en el cauce para evitar daños producidos por la deposición del sedimento lavado en el embalse.

### ***Experiencias similares a Ribarroja***

Las presas cuya representación queda próxima a Ribarroja en el diagrama de K<sub>w</sub>, pendiente se presentan en la tabla 4.6.

*Tabla 4.6. Embalses más próximos a Ribarroja en el diagrama de K<sub>w</sub>, pendiente*

Presa	Pais	Cap hm3	Apo hm3/a	Sed Mt/a	Kw años	Kt años	Alt m	Long Km	Pend m/km	Medidas de gestión		
Ribarroja	España	291	10716	0.528	0.027	882	29	32.30	0.90			
Guernsey	USA	91	2100	1.700	0.043	64	28.6	23.50	1.22	FL		
Sakuma	Japón	343	6772	3.445	0.051	119	156	25.60	6.07	ED	ES	GD
Shuicaozi	China	10	514	0.630	0.019	18	28	6.00	4.67	FL	EX	
Ronghua	Taiwan	12	1086	2.328	0.011	6	82	16.90	4.85	GF		
Wujie	Taiwan	14	1278	0.28	0.011	59	57.6	14.00	4.11	GF	EX	
Hiraoka	Japón	42	4649	0.952	0.009	54	62.5	12.50	5.00	ED	FP	EX

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Las presas similares a Ribarroja según este criterio son todas diferentes de las que se obtienen aplicando el diagrama de Basson. El embalse más similar es el de Guernsey, en Estados Unidos, que fue construido en 1927 en el río North Platte. Se trata de una presa cuya altura es muy similar a la de Ribarroja. El vaso, que se muestra en la figura 4.47, es algo más corto. Su capacidad es aproximadamente un tercio la de Ribarroja y su aportación media un quinto. La tasa anual de sedimentación es más de tres veces superior a la de Ribarroja. Jarecki y Murphy, 1963, describen las operaciones de lavado realizadas a lo largo de tres años para recuperar el volumen de embalse que había quedado aterrado. Indican que éstas no resultan muy efectivas a menos que el embalse pueda ser vaciado, lo que resulta incompatible con la producción de energía. Atkinson, 1996, basado en la descripción de las operaciones de Jarecki y Murphy, 1963, clasifica el embalse de Guernsey entre aquéllos en los que el lavado no ha dado resultados satisfactorios.

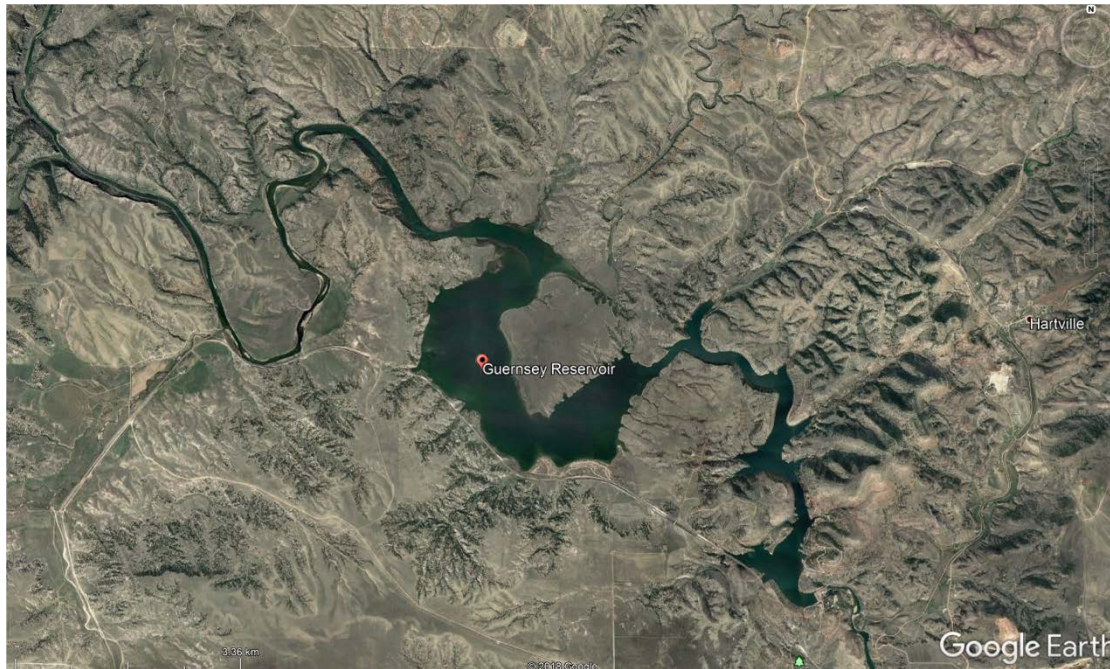


Figura 4.47. Vaso del embalse de Guernsey.

La capacidad, aportación y longitud del vaso del embalse de Sakuma se pueden considerar similares a los de Ribarroja, aunque la pendiente del vaso es mucho mayor porque la presa de Sakuma es cinco veces más alta que la de Ribarroja. Las medidas de gestión de sedimentos reportadas en la literatura para el embalse de Sakuma (Sumi, 2008, Kantoush y Sumi, 2010) son el dragado, la redistribución en el vaso, la hidrosucción mediante sifonamiento y la reforestación de la cuenca. Posiblemente, la altura de presa, superior a los 150 m, impide la realización de operaciones de evacuación hidrodinámica. Bilal, 2016 y Hanmaiahgari et al., 2018 presentan modelos numéricos de acumulación de sedimentos en el embalse, pero sin incluir medidas de gestión.

El resto de embalses son mucho más pequeños que el de Ribarroja y no se pueden considerar análogos. En dos de ellos, Ronghua y Wujie, la principal medida de gestión adoptada es la reforestación de la cuenca. En el embalse de Hiraoka se aplica excavación y dragado, junto con el lavado en presión para mantener los desagües operativos. En el embalse de Shuicaozi, en China, se aplica lavado junto con la excavación, pero este embalse es clasificado por Akinson, 1996, en el grupo donde el lavado no ha dado resultados satisfactorios.

### *Experiencias similares a Flix*

Las presas que quedan más próximas al embalse de Flix en el gráfico de  $K_w$ , pendiente se presentan en la tabla 4.7. Tres de ellas: Kasagi, Ouchibaru y Saigo también resultaban similares a Flix en el diagrama de Basson, por lo que no es necesario volver a analizarlas en este apartado.

Tabla 4.7. Embalses más próximos a Flix en el diagrama de  $K_w$ , pendiente

Presa	Pais	Cap hm3	Apo hm3/a	Sed Mt/a	Kw años	Kt años	Alt m	Long Km	Pend m/km	Medidas de gestión			
Flix	España	11	13576	0.016	0.001	1141	16.1	12.00	1.34				
Ichari	India	12	5300	5.700	0.002	2	36.8	11.30	3.25	FL			
Yasuoka	Japón	11	3609	0.351	0.003	37	50	16.60	3.01	FC	ED	FP	
Ouchi-Kurgan	USSR	56	15000	13.000	0.004	5	35	17.00	2.06	FL			
Kasagi	Japón	14	4350	0.094	0.003	180	40.8	10.00	4.08	FC	FP		
Saigo	Japón	2	980	0.014	0.002	204	20	3.75	5.33	SL			
Ouchibaru	Japón	7	1558	0.041	0.005	222	26	7.23	3.60	SL			

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Las presas de Ichari y Yasuoka tienen un volumen de embalse igual al de Flix, con una aportación del 40% y 25%, respectivamente. La longitud del vaso es similar, pero la pendiente es casi el doble que la de Flix, porque las presas son considerablemente más altas. La presa de Ouchi-Kurgan tiene una aportación similar, pero una capacidad cinco veces mayor. La técnica de gestión de sedimentos que se aplica en las presas de Ichari y Ouchi-Kurgan es el lavado con vaciado del embalse. En estos embalses la carga de sedimentos es muchísimo mayor que en Flix. White, 2001, cita que en Ouchi-Kurgan, construida en 1961, la capacidad del embalse se ha estabilizado desde 1968 en el 50-55% de la capacidad original. En Ichari, construida en 1975, ya se había agotado el 60% de la capacidad en seis años. Ambas presas fueron clasificadas por Atkinson, 1996 en el grupo en el que el lavado no resultó satisfactorio. En la presa de Yasuoka, Sumi, 2008 cita el lavado sin vaciados en presión y mediante compuerta de arrastre (*scouring gate*), como técnica principal, aunque también se aplica el dragado.

## **QUINTA PARTE: ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES REALES DE MOVILIZACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL SISTEMA MEQUINENZA-RIBARROJA-FLIX**

### **1. Introducción**

En esta parte se realiza un análisis específico de las posibilidades reales de movilización de sedimentos en el sistema Mequinenza-Ribarroja-Flix (MRF). Se parte del análisis realizado de las alternativas metodológicas y de la recopilación de experiencias similares. De estos dos estudios se deduce que las únicas posibilidades reales de movilización de sedimentos son la retirada hidrodinámica mediante lavado o *sluicing* y la retirada mecánica mediante excavación o dragado. En el estudio nos centramos en la factibilidad técnica y el rendimiento que puede esperarse en la operación.

Los procedimientos de retirada mecánica son siempre factibles técnicamente, y su única limitación es el coste. No se ha realizado un estudio específico de opciones de excavación en los embalses porque el análisis de coste excede el alcance del presente trabajo. Sin embargo, los datos recopilados en experiencias mundiales, que puede suponerse corresponden a situaciones favorables donde el procedimiento se ha puesto en práctica, arrojan unos resultados de coste muy elevados, superiores a los 2\$/m<sup>3</sup>, que difícilmente justificarían contemplar esta alternativa a gran escala. En consecuencia, el estudio se ha centrado en el análisis de las posibilidades de retirada de sedimento mediante lavado en las tres presas. La opción de retirada mediante *sluicing* en Flix tampoco tiene sentido, ya que los sedimentos que atravesaran el embalse de Ribarroja durante una crecida no serían retenidos en Flix, que tiene menor longitud y menos calado.

## 2. Datos básicos de los embalses

La evacuación hidrodinámica depende de las características de los desagües de la presa, de la geometría del vaso, de las características de los sedimentos y de su tasa de acumulación. En este apartado se recopilan los datos básicos para el análisis de las posibilidades de efectuar la operación de lavado en los embalses.

### 2.1 Embalse de Mequinenza

La cota del cauce en la presa de Mequinenza es 60,0 m y la cota de coronación es 124,0 m. El nivel máximo normal está situado a cota 121 m. Descontando la toma de la central, que no podría utilizarse para operaciones de lavado, la presa tiene los siguientes órganos de desagüe:

- Desagüe de fondo, situado a cota 60,0 m, con una capacidad a NMN de 160 m<sup>3</sup>/s.
- Desagüe intermedio, situado a cota 87,0 m, con una capacidad a NMN de 1.800 m<sup>3</sup>/s.
- Aliviadero, con labio a cota 106,5 m, con una capacidad a NAP de 11.000 m<sup>3</sup>/s.

La capacidad original del vaso era 1533,8 hm<sup>3</sup> y ocupaba una superficie de 7.720 has. El embalse tiene unos 106 km de longitud, lo que supone una pendiente media de 0,7 10<sup>-3</sup> y un ancho medio de 730 m. Es un vaso de forma marcadamente alargada que describe múltiples meandros.

Según se ha determinado en los estudios realizados, el volumen estimado de aterramiento está comprendido entre 75 y 100 hm<sup>3</sup>. La tasa de acumulación media anual desde la construcción del embalse oscila entre 1,5 hm<sup>3</sup>/a y 2 hm<sup>3</sup>/a. Si se toma el extremo superior de la estimación y se descuenta el sedimento acumulado en los primeros 18 años según la estimación del CEDEX, la tasa media de retención en los 30 años transcurridos desde 1982 a 2011 es de unos 0,25 hm<sup>3</sup>/a, muy inferior a la tasa de retención inicial. Esta cifra concuerda aproximadamente con el análisis directo que hizo el grupo FLUMEN mediante el balance de la carga de transporte a la entrada y a la salida de Mequinenza en el periodo 1997-1999, donde estimaron una retención de 1,4 Mt en 22 meses, que corresponde a 0,73 Mt/a y un volumen de 0,45 hm<sup>3</sup>/a suponiendo un peso específico del sedimento de 1,6 t/m<sup>3</sup>. En el análisis de Tena y Batalla, 2013, la retención en Mequinenza se estimó en 0,66 Mt/a, que correspondería a 0,4 hm<sup>3</sup>/a.

El sedimento se encuentra en su mayor parte a una distancia superior a 50 km de la presa. En el tramo ocupado por los 50 km más próximos a la presa se ha observado una acumulación de sedimentos entre 400 y 450 m<sup>3</sup>/m, lo que corresponde a un total de 20-22,5 hm<sup>3</sup>. En el tramo central del vaso, entre 85 y 50 km de distancia de la presa, la acumulación de sedimentos se estima entre 1800 y 2000 m<sup>3</sup>/m, totalizando entre 55 y 75 hm<sup>3</sup>. Finalmente, en la cola del embalse, situada a más de 85 km de la presa, la acumulación es pequeña, pudiendo considerarse inferior a 2,5 hm<sup>3</sup>.

### 2.2 Embalse de Ribarroja

La coronación de la presa de Ribarroja se sitúa a cota 76,0 m y el cauce a cota 37,7 m. El nivel máximo normal está situado a cota 70,0 m. Además de la toma de la central, los órganos de desagüe de Ribarroja son los siguientes:



- Desagües de fondo, situados a cota 43,30 m, con una capacidad a NMN de 273 m<sup>3</sup>/s.
- Desagüe intermedio, situado a cota 40,0 m, con una capacidad a NMN de 2.635 m<sup>3</sup>/s.
- Aliviadero, con labio a cota 59,5 m, con una capacidad a NAP de 7.756 m<sup>3</sup>/s.

El vaso tiene una capacidad de 291,0 hm<sup>3</sup> y ocupa una superficie de 2.029 has. La longitud del embalse es de unos 29 km, lo que supone una pendiente media de  $8,3 \cdot 10^{-4}$ . El ancho medio es de 700 m.

El volumen estimado de sedimentos acumulados en Ribarroja es de 13,1 hm<sup>3</sup>. La tasa media de acumulación desde la construcción del embalse es de 0,33 hm<sup>3</sup>/año. El CEDEX ya estimó una acumulación de 12,2 hm<sup>3</sup> en 1982, por lo que la tasa media desde esa época ha sido de 0,04 hm<sup>3</sup>/a. La estimación de FLUMEN a partir del balance de entrada y salida es de 0,17 hm<sup>3</sup>/a, que equivale a 0,27 Mt/a. El balance de Tena y Batalla, 2013, indica una acumulación de 0,1 Mt/a. El sedimento es de textura limo-arcillosa, con un tamaño medio sobre 0,025 mm.

El sedimento se encuentra repartido por el vaso, con una mayor proporción situada en la cola. En la parte final del vaso, a una distancia de la presa entre 15 y 30 km, se observó una tasa de sedimentación de unos 530 m<sup>3</sup>/m, que corresponde a una acumulación de 8 hm<sup>3</sup>. En el tramo central, entre 15 y 5 km de la presa, existe un equilibrio entre erosión y sedimentación. En los 5 km más próximos a la presa se acumulan unos 5 hm<sup>3</sup>, que corresponde a una tasa de unos 1.000 m<sup>3</sup>/m.

### **2.3 Embalse de Flix**

La coronación de la presa de Flix se sitúa a cota 45,0 m y el cauce a cota 25,0 m. El nivel máximo normal está situado a cota 41,05 m. Sólo se han encontrado datos del aliviadero, cuyo labio está situado a cota 29,0 y tiene una capacidad de 9.800 m<sup>3</sup>/s. Es posible que no tenga desagüe de fondo, porque la cota del labio del aliviadero está muy próxima al cauce.

La capacidad del vaso es de 11,41 hm<sup>3</sup> y ocupa una superficie de 320 has. La longitud del embalse es de unos 11 km, lo que supone una pendiente media de  $1,5 \cdot 10^{-4}$ . El ancho medio es de 300 m.

No existen datos de la acumulación de sedimento en Flix.

### **2.4 Resumen de datos**

La tabla 5.1 presenta un resumen de los datos disponibles para realizar el análisis de las posibilidades de evacuación de sedimentos en los embalses.

Tabla 5.1. Datos básicos de los embalses.

		Mequinenza	Ribarroja	Flix
Altura de presa sobre cauce	m	71	38.3	20
Cota cauce	m	60	37.7	25
Cota NMN	m	121	70	41.05
Aportación	hm <sup>3</sup> /a	7345	10716	13576
Capacidad del embalse	hm <sup>3</sup>	1533.8	291	11.4
Longitud del embalse	km	106	29	11
Pendiente	m/km	0.7	0.83	0.67
Ancho medio	m	730	700	300
Volumen acumulado	hm <sup>3</sup>	75-100	13.1	-
Peso específico	t/m <sup>3</sup>	1.6	1.6	-
Tamaño característico	mm	0.06	0.025	0.025
Tasa acumulación media	hm <sup>3</sup> /a	1.5-2	0.33	-
Tasa acumulación media	t/a	2.4-3.2	0.53	-
Tasa acumulación reciente	hm <sup>3</sup> /a	0.25-0.45	0.06-0.17	-
Tasa acumulación reciente	t/a	0.25-0.42	0.1-0.25	-

Los datos de aportación se han tomado del registro del anuario de aforos correspondiente a cada embalse. Existe una discrepancia importante entre la aportación de Ribarroja y Flix, que puede ser debida a los diferentes periodos de datos disponibles. El valor del peso específico de los sedimentos se ha estimado teniendo en cuenta que presentan un alto grado de compactación. El tamaño medio del sedimento es muy variable. Los valores se han estimado en función de las descripciones disponibles de las visitas de campo.

### 3. Análisis de las posibilidades de lavado

En este apartado se realizan algunos cálculos simplificados que ilustran sobre las posibilidades de la operación de lavado en los tres embalses. Debe tenerse en cuenta que se trata de estimaciones preliminares, basadas en la experiencia generada en embalses en los que se practica lavado con éxito.

#### 3.1 Condiciones que determinan el éxito del lavado

El lavado suele aplicarse en casos donde la acumulación de sedimentos se ha convertido en un problema que afecta a la explotación del embalse. Esto quiere decir que cuando se recurre al lavado hay ya una gran cantidad de sedimento acumulada en el embalse, que en muchos casos supone hasta el 50% de la capacidad inicial. Este sedimento llega hasta las proximidades de la presa, lo que incrementa la pendiente disponible y mejora la capacidad erosiva de la corriente. También significa que hay un gran volumen de sedimento para erosionar. Como ilustración se muestra la figura 5.1, tomada de Shen, 1999, donde se representa el lavado en presión, que sólo afecta a la zona inmediatamente próxima a los desagües, y el lavado con vaciado de embalse, donde se supone que hay una considerable acumulación de sedimento en el embalse.

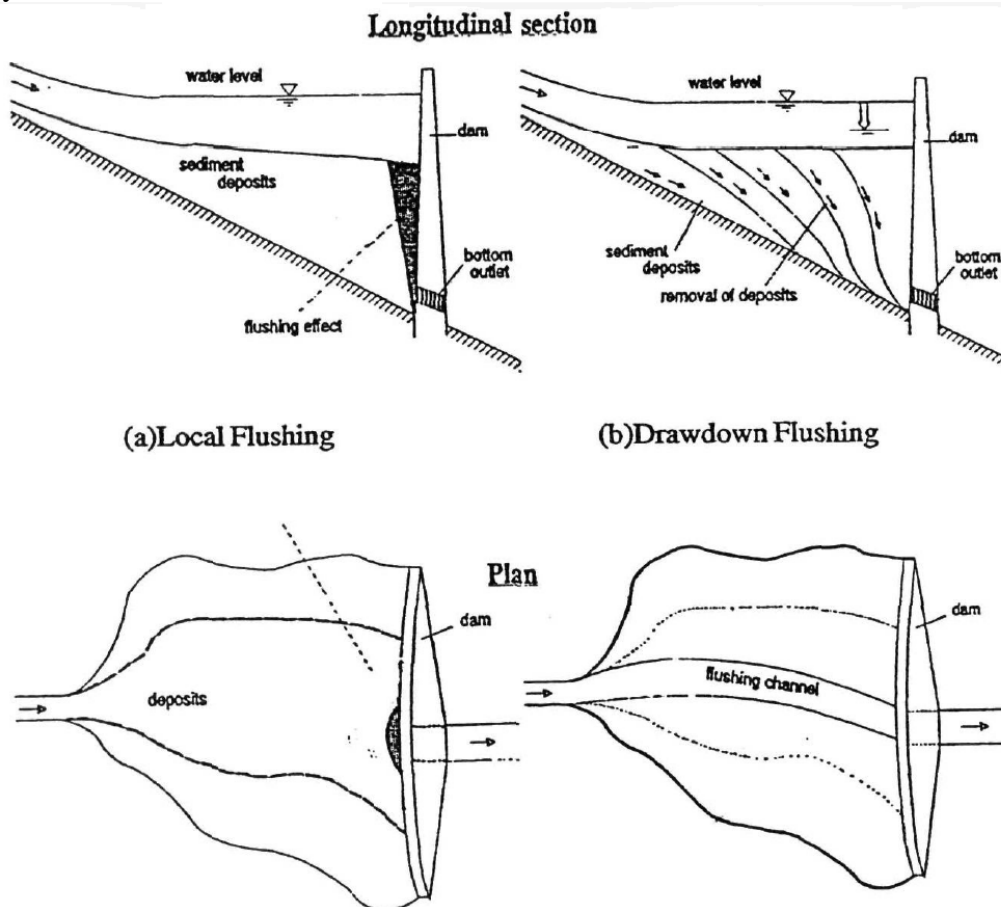


Fig. 2. Sediment erosion.

Figura 5.1. Figura 2 de Shen, 1999, que ilustra los tipos de lavado.

A continuación, se pasa revista a las condiciones que deben darse para que la operación de lavado sea exitosa.

- El lavado es adecuado si la capacidad del embalse es muy inferior a la aportación anual y la presa dispone de desagües con gran capacidad de evacuación a baja cota. También es conveniente que la pendiente hidráulica sea fuerte, para facilitar el arrastre. Numerosos investigadores han ofrecido criterios para identificar las condiciones adecuadas en las que se puede aplicar el lavado: Atkinson, 1996; Morris y Fan, 1997; White, 2001.
- Desde el punto de vista hidráulico, es necesario establecer un régimen fluvial en el vaso del embalse durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo. Para ello es necesario vaciar el embalse y disponer de un desagüe que proporcione la capacidad de evacuar el caudal de lavado a la cota necesaria para que el embalse se mantenga vacío.
- Debe haber recursos hídricos disponibles para poder destinar a la gestión del sedimento, que incluye el vaciado del embalse, la operación de lavado y el nuevo llenado del embalse. Esto es más sencillo en embalses cuya aportación anual es grande comparada con su capacidad. El agua que se destina al lavado suele superar el 10% de la aportación media anual, lo que no debe afectar de manera significativa a los usos del embalse. El lavado es tanto más efectivo cuanto mayor sea el caudal. Se recomienda utilizar un caudal de lavado superior al doble del caudal medio anual. Este caudal debe circular por el río en el momento en que se ha vaciado el embalse. Por ello, el lavado es adecuado en climas en los que la estación húmeda es muy marcada y predecible.
- Los sedimentos deben tener la granulometría y condiciones necesarias para posibilitar su lavado. Los mejores son sedimentos sueltos de tamaño graduado que se suelen dar en ríos con lechos de grava, con pendientes de 0,1% a 0,2%. El material que mejor se lava son las arenas y limos gruesos. Es difícil movilizar los materiales más gruesos. Los materiales más finos suelen repartirse por todo el vaso y no pueden ser erosionados por los canales de lavado.
- El embalse debe ser largo y estrecho, para facilitar que el canal de lavado ocupe toda su sección.

La proporción del volumen original de embalse que se puede mantener mediante el lavado periódico depende de todos los factores mencionados. El lavado se considera aceptable si puede llegar a mantener el 35% de la capacidad original. Debe realizarse un análisis económico que tenga en cuenta las pérdidas ocasionadas por la operación del lavado (pérdida de producción de energía y de agua para usos consuntivos) para determinar la viabilidad de la operación.

### 3.2 Análisis a partir de fórmulas empíricas

En este apartado se presentan las fórmulas que se utilizarán para la definición de las operaciones de lavado. Son fórmulas empíricas que tienen un gran margen de error, incluso en los casos para los que han sido deducidas, pero al menos permiten llegar a una primera aproximación a los valores esperables.

#### *Método de Sumi*

Sumi, 2008 realizó un análisis de la efectividad de la operación, proponiendo una expresión para determinar la viabilidad de las operaciones de lavado. Su expresión depende de dos parámetros característicos de la operación: la fracción de la aportación anual que se dedica a la operación de lavado, que denominó  $\beta$ , y la eficiencia de la operación de lavado,  $F_e$ , que es el cociente entre el volumen de sedimento evacuado y el volumen de agua utilizado.

La condición de Sumi para la viabilidad del lavado es:

$$K_t > \frac{K_w}{F_e(\beta - K_w)}$$

El valor de  $\beta$  depende de la disponibilidad de agua. El valor de  $F_e$  depende de las condiciones hidrodinámicas de la operación, y puede estimarse mediante las fórmulas aproximadas.

La efectividad del lavado vendría dada por la concentración media de sedimento en el caudal evacuado. Sumi estudió múltiples operaciones de lavado en varias presas y encontró eficiencias entre 0,001 y 0,1. Como referencia, se puede tomar una eficiencia de 0,01. Suponiendo esta eficiencia, se puede determinar el valor límite de  $\beta$  para que la operación de lavado cumpla estrictamente la condición de viabilidad de Sumi.

Los resultados para los tres embalses se presentan en la tabla 5.2. Aunque el enfoque es muy superficial, permite hacerse una idea del volumen de agua que debería destinarse al lavado si la eficiencia fuera de 0,01. Con la eficiencia supuesta, el volumen de sedimento evacuado sería mucho mayor que el correspondiente a la tasa de retención de los embalses.

Tabla 5.2. Cálculo de los parámetros de Sumi.

		Mequinenza	Ribarroja	Flix
Kw	años	0.21	0.03	0.001
Kt	años	876	882	1141
Fe		0.01	0.01	0.01
Beta		0.23	0.030	0.0009
Aportación	hm <sup>3</sup> /a	7345	10716	13576
Aportación lavado	hm <sup>3</sup> /a	1709	324	12
Sedimento evacuado	hm <sup>3</sup> /a	17.09	3.24	0.12

En el gráfico 5.2 se presentan las curvas límite de la condición de Sumi que corresponden a cada uno de los tres embalses, junto con las experiencias de lavado recopiladas en la literatura. El embalse de Flix queda claramente en la zona donde las experiencias han sido positivas. El embalse de Mequinenza queda en la zona donde la mayor parte de las experiencias son negativas. El embalse de Ribarroja queda en la zona de experiencias positivas, pero próximo a la frontera que delimita las experiencias negativas.

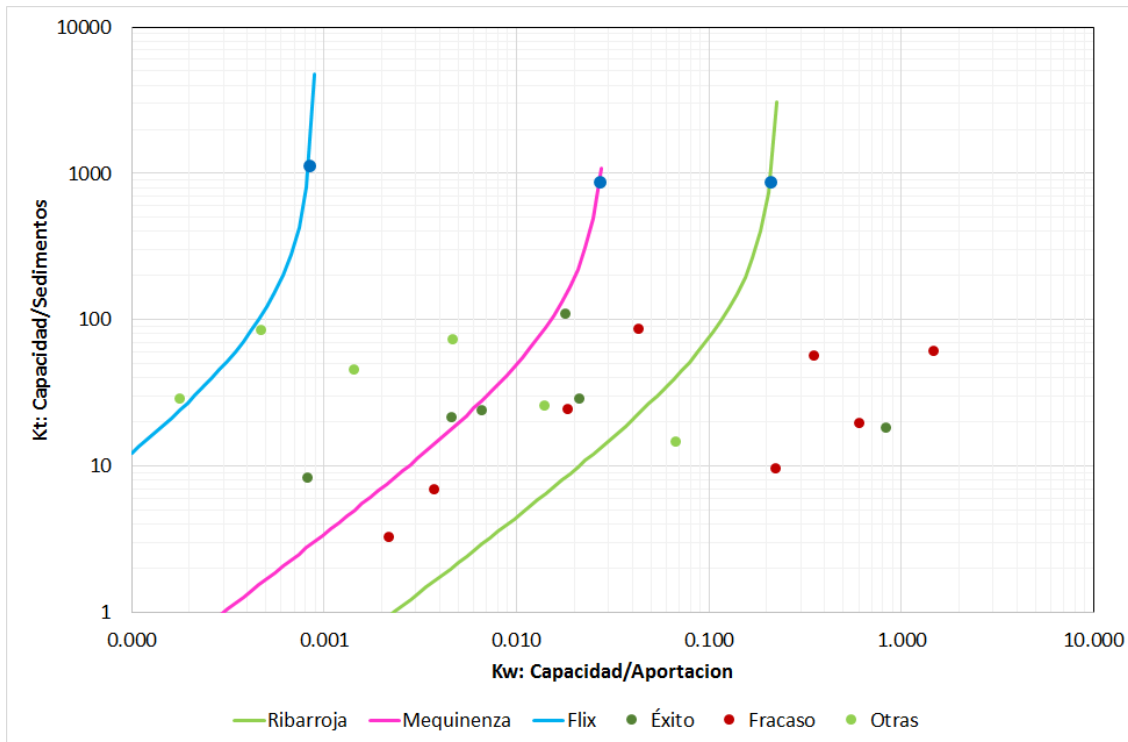


Figura 5.2. Líneas límite correspondientes a la ecuación de Sumi para los embalses del Ebro en comparación con las experiencias mundiales de lavado.

A partir de la eficiencia también se puede llegar a diseñar cómo es la operación de lavado. La eficiencia de 0,01 corresponde aproximadamente a una concentración de 10000 mg/l, lo que equivale a 10 kg/m<sup>3</sup>. Con esta eficiencia, un caudal de lavado de 1 m<sup>3</sup>/s evacuaría 86,4 t de sedimento al día. El gráfico de la figura 5.3 permite determinar el rendimiento de la operación de lavado en función del caudal y la duración para la concentración de referencia de 10000 mg/l. Las líneas marcadas corresponden a la evacuación de una cierta cantidad de sedimento y permiten definir los valores de caudal de lavado y duración de la operación que serían necesarios para alcanzar ese objetivo.

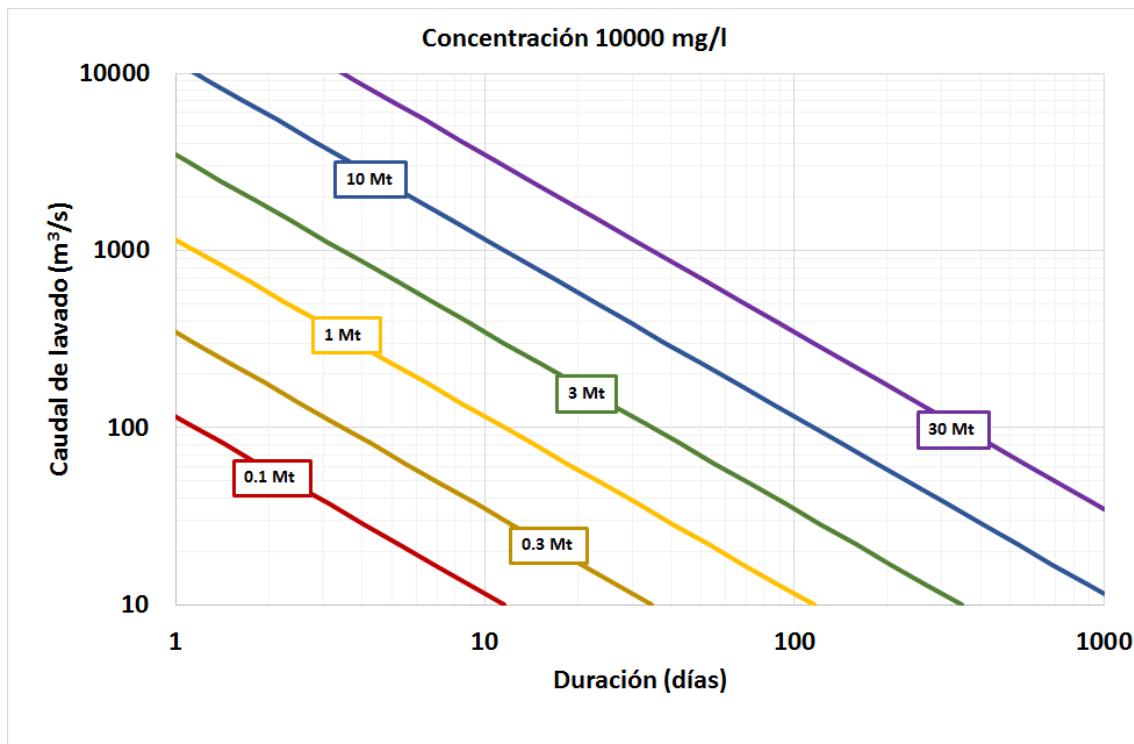


Figura 5.3. Encaje de la operación de lavado para una concentración de 10 mg/l (rendimiento 0,01). Las líneas identifican el caudal y duración de la operación que permitirían evacuar una cierta cantidad de sedimento.

### Modelo de Tsinghua

En este apartado aplicamos el método de análisis que propuso Atkinson, 1996, basado en lo que se conoce como el modelo de Tsinghua. Otros autores, como Shen, 1999, o White, 2001, también utilizan este método para determinar si la operación de lavado tiene expectativas de resultar exitosa. El método se basa en la recopilación de un conjunto de experiencias en China. Los datos experimentales se muestran en la figura 5.4, tomada de Shen, 1999. En ella se refleja la relación entre las características hidrodinámicas del embalse y el caudal sólido evacuado durante la operación de lavado. Las características hidrodinámicas del embalse se asociaron a una expresión que depende del caudal de lavado, de la pendiente de energía y del ancho del canal de lavado. Las experiencias se clasificaron en tres grupos, dependiendo de la granulometría del sedimento existente en el embalse. Todas las experiencias correspondían a embalses de China, donde se practicaban frecuentes operaciones de lavado.

A partir de las experiencias se propuso la ecuación de la universidad de Tsinghua:

$$Q_s = \Psi \frac{Q_f^{1.6} S^{1/2}}{W^{0.6}}$$

Donde  $Q_s$  es el caudal de sedimento en t/s,  $Q_f$  es el caudal de lavado, en m³/s,  $S$  es la pendiente de energía,  $W$  es el ancho del canal de lavado en m y  $\Psi$  es un coeficiente.

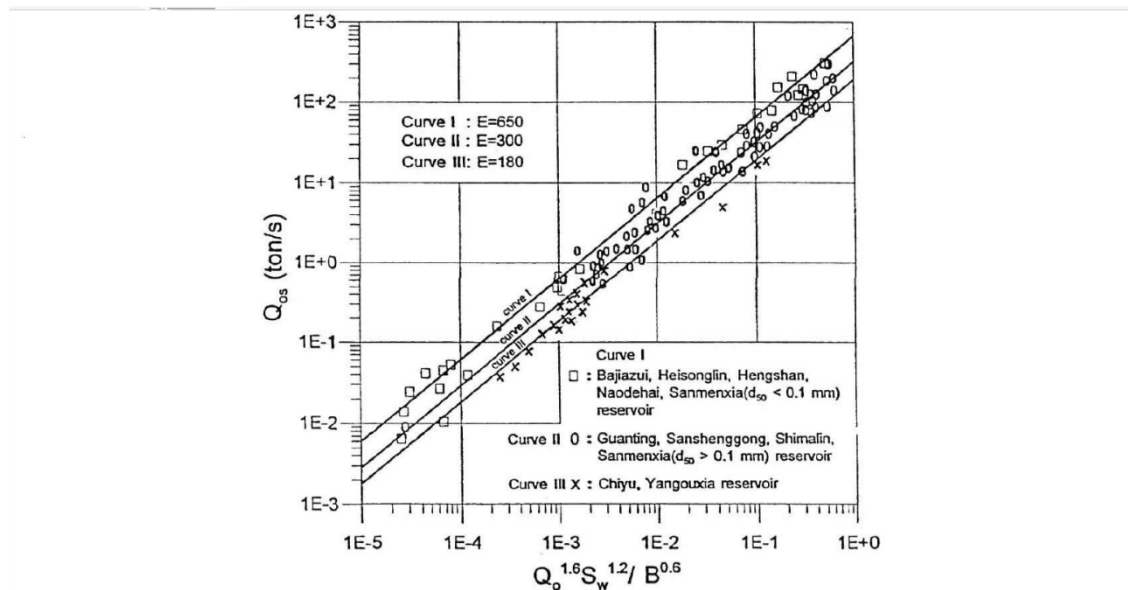


Fig. 3. Relationship between sediment outflow and flow characteristics in reservoir (after Tsinghua University and Northwest Lab., 1979).

Figura 5.4. Figura 3 de Shen, 1999. Relación obtenida entre las características del flujo en el embalse y el caudal sólido evacuado en la operación de lavado.

El valor del coeficiente  $\Psi$  fue inicialmente determinado para China, con lavado frecuente y material fino. Atkinson, 1996, validó la expresión y sugirió reducir el valor del coeficiente a la tercera parte cuando se aplica en casos distintos de los chinos. Los rangos de valores son los siguientes:

- Para loess:  $\Psi=530-1600$
- Para sedimentos con  $D_{50}<0,1$  mm:  $\Psi=225-650$
- Para sedimentos con  $D_{50}>0,1$  mm:  $\Psi=100-300$
- Para lavado con caudal bajo:  $\Psi=60-180$

El valor de la pendiente de energía  $S$  es la correspondiente a la lámina de agua durante la operación de lavado. Puede alcanzar, como máximo, la pendiente del fondo del vaso del embalse.

Aunque en ocasiones el ancho del canal de erosión puede estar limitado por el ancho del vaso, en general depende sólo del caudal de lavado y no de las características del sedimento. Se propone una ecuación ligada al caudal de lavado:

$$W = 12,8Q_f^{0,5}$$

El caudal de lavado es, por tanto, la variable más determinante de la capacidad de arrastre. Debe ser un caudal circulante por el río, que se debe poder evacuar por los órganos de desagüe con el embalse completamente vacío.

La operación de lavado se diseña con un objetivo concreto. Normalmente se plantea evacuar la carga de sedimento acumulado en el embalse desde la última operación. Puede hacerse con



periodicidad anual o realizarse cada cierto tiempo, cuando se dan condiciones favorables en la explotación o cuando resulta necesario. Debe definirse también el caudal de trabajo y el volumen de agua que se destina a la operación.

### 3.3 Análisis del embalse de Mequinenza

Si se analiza simultáneamente la configuración de los órganos de desagüe, la geometría del vaso y la localización de los sedimentos se comprueba que el lavado en Mequinenza presenta muchas dificultades. Para poder efectuar el lavado es necesario bajar el nivel del embalse hasta dejar al descubierto los sedimentos y aprovechar una época de caudal fuerte para que se produzca la erosión de los sedimentos que han quedado al aire. Según Shen, 1999, el único escenario donde el lavado puede retirar una parte sustancial de los sedimentos en el embalse es el que se produce cuando el embalse está vacío y el nivel del agua llega a la altura del órgano de evacuación. Además, es necesario que se presenten unos caudales fuertes en el embalse y que dichos caudales se puedan evacuar mediante los desagües cuando el embalse está vacío.

La figura 5.5 presenta un esquema que ilustra la situación del embalse de Mequinenza. En ella se combina la ley de capacidad de evacuación de caudales en función de la cota, el vaso (suponiendo pendiente constante del fondo) y la situación de los sedimentos.

El desagüe de fondo sólo permite evacuar caudales inferiores a  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta la cota 87,0 m. A partir de esa cota puede utilizarse el desagüe intermedio. Si marcamos como objetivo realizar el lavado con un caudal de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , es necesario mantener el nivel del embalse sobre la cota 89,0 m para poder evacuarlos. Como se aprecia en el vaso, esta cota de embalse dejaría una gran proporción del sedimento al descubierto, que podría ser erosionado. Si circulara por el río un caudal de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , se podría producir el arrastre del material. Sin embargo, el material arrastrado todavía tendría que atravesar otros 50 km de embalse hasta la presa y la disminución de velocidad propiciaría la decantación del material arrastrado antes de que fuera evacuado por los desagües.

Para realizar un análisis más concreto podemos aplicar el modelo de Tsinghua, que nos permite estimar aproximadamente el valor de las variables relevantes en el lavado.

No se han podido obtener datos de granulometría del sedimento, pero sí hay descripciones visuales del sedimento en las zonas en las que queda expuesto cuando baja el nivel del embalse y descripciones de las catas y sondeos realizados. A partir de estas observaciones se puede estimar un valor del parámetro resulta  $\Psi$ =igual a 250, que corresponde a un tamaño estimado del sedimento de  $D_{50}=0,06 \text{ mm}$ .

El valor de la pendiente de energía  $S$  puede alcanzar, como máximo, la pendiente del fondo del vaso del embalse. En el caso de Mequinenza no es posible el lavado con el vaciado total del embalse, pero se adopta el valor de la pendiente del vaso:  $S=0,7 \cdot 10^{-3}$  para analizar el lavado sobre la zona descubierta.

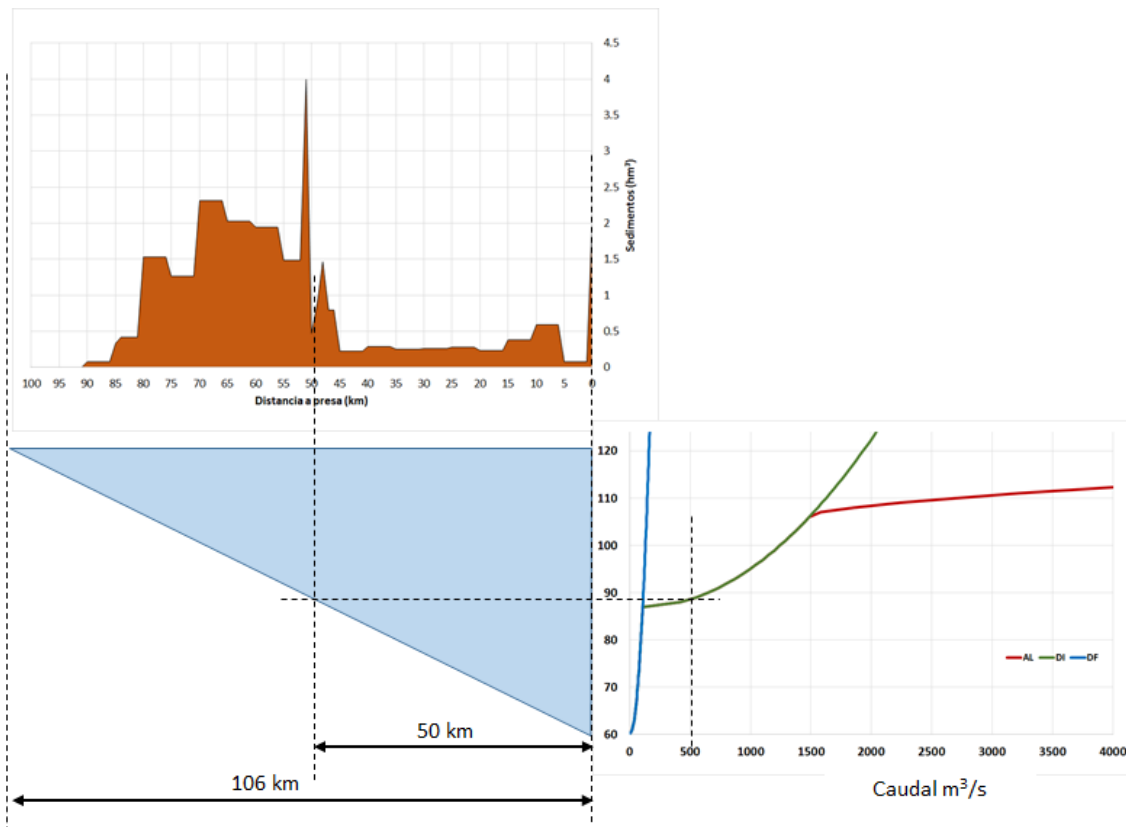


Figura 5.5. Análisis comparado de la capacidad de evacuación de la presa, la geometría del vaso y el emplazamiento de los sedimentos en Mequinenza.

En la tabla 5.3 se presenta el resultado del cálculo de la operación de lavado, suponiendo que el lavado afectara a todo el vaso. Se analizan distintos caudales, comprendidos entre 50 y 500 m³/s. Para ellos se calcula el ancho del canal de lavado, el caudal sólido y su concentración. La duración del lavado y el volumen de agua empleado en la operación se han determinado a partir del objetivo de evacuar una cantidad de sedimento igual a 1 Mt.

Tabla 5.3. Cálculo aproximado de la operación de lavado para evacuar 1Mt en Mequinenza.

Caudal	Ancho del canal	Q sólido	Concent	Peso diario	Duración	Volumen
m3/s	m	t/s	kg/m3	Mt	días	hm3
50	90.51	1.43	28.67	0.12	8.1	35
100	128.00	3.53	35.30	0.30	3.3	28
150	156.77	5.98	39.86	0.52	1.9	25
200	181.02	8.69	43.46	0.75	1.3	23
250	202.39	11.62	46.46	1.00	1.0	22
300	221.70	14.72	49.08	1.27	0.8	20
350	239.47	17.99	51.40	1.55	0.6	19
400	256.00	21.40	53.50	1.85	0.5	19
450	271.53	24.94	55.42	2.15	0.5	18
500	286.22	28.60	57.20	2.47	0.4	17

Se obtienen concentraciones entre 28000 y 57000 mg/l, que son inferiores a las máximas concentraciones observadas en los vaciados del embalse de Barasona. Estas concentraciones permitirían cubrir el objetivo de evacuación con operaciones de lavado relativamente cortas. Sin embargo, el lavado es parcial, puesto que no puede vaciarse completamente el embalse.

Para tener en cuenta este efecto se ha realizado una estimación del rendimiento del lavado. Se ha determinado el porcentaje de sedimento erosionado que quedaría retenido en el vaso en la parte del embalse que no se ha vaciado. Se ha aplicado la curva de Churchill, 1948, que fue modificada por Bube y Trimble, 1985 y Trimble y Bube, 1990, a partir de datos en embalses del TVA. Churchill propuso estimar la capacidad de retención de sedimentos del embalse a partir del índice de sedimentación, definido como el cociente entre el tiempo de residencia y la velocidad terminal del sedimento.

La velocidad terminal del sedimento se puede determinar mediante la fórmula de Stokes:

$$v_{lim} = \frac{2(\rho_s - \rho)gr^2}{9\mu}$$

Donde  $v_{lim}$  es la velocidad terminal de caída,  $\rho_s$  es la densidad de la partícula,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $g$  es la aceleración de la gravedad  $r$  es el radio de la partícula y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido.

El tiempo de residencia se obtiene a partir de la longitud de recorrido y la velocidad media. La longitud de recorrido se puede estimar a partir de la cota necesaria en el embalse para evacuar el caudal y la pendiente del fondo. La velocidad media se determina a partir del caudal y la sección media, que se calcula como cociente entre el volumen de embalse y la longitud de recorrido.

La figura 5.6 muestra la curva de retención propuesta por Churchill, 1948 y modificada pro Bube y Trimble, 1985. La retención es superior al 90% para valores del índice de sedimentación superiores a  $10^8$ .

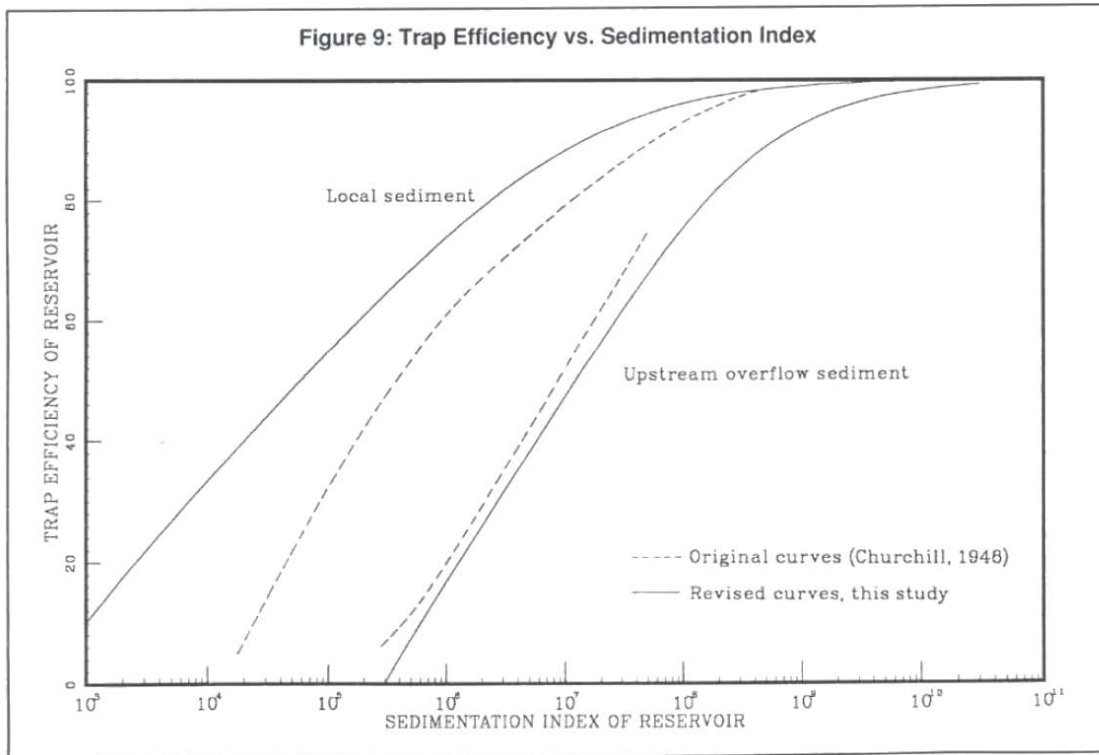


Figura 5.6. Figura 9 de Trimble y Bube, 1985, que muestra la curva de retención de Churchill revisada en su estudio.

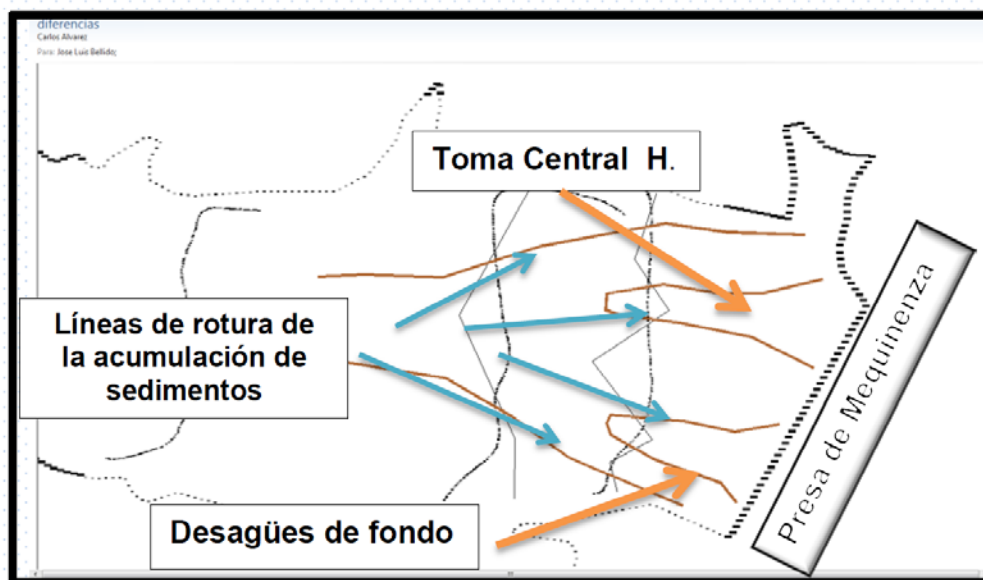
Los cálculos se presentan en la tabla 5.4, que muestra que el índice de sedimentación es superior a  $10^{11}$  en todos los casos, por lo que la mayor parte del sedimento lavado se volvería a depositar en el embalse y no podría ser evacuado.

Tabla 5.4. Cálculo de la sedimentación que se produciría en la parte de Mequinenza no vaciada

Caudal	Cota	Volumen	Distancia	Velocidad media	Tiempo	Indice de sediment.
m <sup>3</sup> /s	m	hm <sup>3</sup>	km	m/s	h	s <sup>2</sup> /m
50	65.96	1.50	8.51	0.28	8.4	2.32E+11
100	84	98.26	34.29	0.03	272.9	7.59E+12
150	87.02	140.21	38.60	0.04	259.7	7.22E+12
200	87.09	141.31	38.70	0.05	196.3	5.46E+12
250	87.22	143.35	38.89	0.07	159.3	4.43E+12
300	87.4	146.21	39.14	0.08	135.4	3.76E+12
350	87.62	149.76	39.46	0.09	118.9	3.30E+12
400	87.9	154.36	39.86	0.10	107.2	2.98E+12
450	88.22	159.74	40.31	0.11	98.6	2.74E+12
500	88.6	166.28	40.86	0.12	92.4	2.57E+12

El rendimiento de la operación disminuye considerablemente, puesto que sólo se conseguiría trasladar el sedimento a la zona del embalse más próxima a la presa. Además, dada la situación del embalse de Mequinenza, el caudal de lavado entraría al embalse de Ribarroja que, si no se vacía también, retendría el sedimento evacuado.

En consecuencia, puede concluirse que la operación de lavado con vaciado del embalse no es técnicamente viable en el embalse de Mequinenza. Sí resulta factible, en cambio el lavado profundo, como muestra la figura 5.7, tomada del estudio “Nivelación de Precisión y Estimación de la Acumulación de Sedimentos en el Embalse de Mequinenza”. La figura, generada a partir de la comparación de la batimetría del embalse con la cartografía original, muestra las líneas de rotura de la acumulación de sedimentos producidas por la operación e las tomas de la central y los desagües profundos. Evidentemente, esta evacuación de sedimentos sólo permite mantener operativos los desagües, despejando la zona más próxima a las tomas. La efectividad del lavado en presión disminuye rápidamente con la distancia. A medida que se abre el cono de aspiración se reduce la velocidad del flujo y, en consecuencia, se reduce la capacidad de arrastre.



**Planta batimétrica de la gran acumulación de sedimentos junto a la presa.  
PK 106+000**

*Figura 5.7. Efectividad del lavado en presión en Mequinenza. Figura tomada de estudio: “Nivelación de Precisión y Estimación de la Acumulación de Sedimentos en el Embalse de Mequinenza”*

### 3.4 Análisis del embalse de Ribarroja

La figura 5.8 presenta el esquema que ilustra la situación del embalse de Ribarroja, combinando la ley de capacidad de evacuación de caudales en función de la cota, el vaso y el emplazamiento de los sedimentos. Si están operativos, la capacidad de los desagües profundos es muy potente, lo que permite evacuar 500 m<sup>3</sup>/s con el embalse a cota 41,1 m, sólo 3,4 m por encima del cauce. Esto supone que sólo quedarían sumergidos algo menos de 5 km de embalse, con un calado relativamente pequeño. Por tanto, los desagües de Ribarroja permitirían la operación de lavado, siempre que se encuentren operativos.

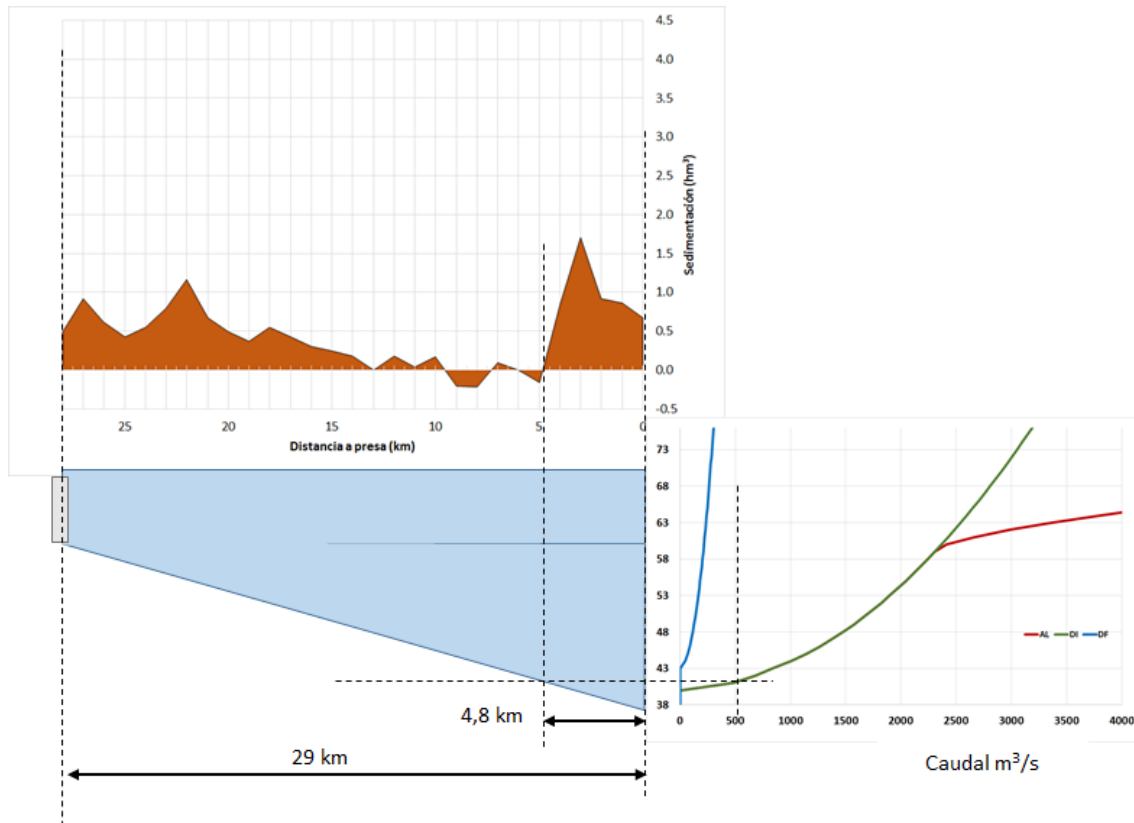


Figura 5.8. Análisis comparado de la capacidad de evacuación de la presa, la geometría del vaso y el emplazamiento de los sedimentos en Ribarroja.

Se ha realizado el cálculo del rendimiento de la operación de lavado en el embalse de Ribarroja siguiendo el modelo de Tsinghua. Según el estudio de FLUMEN, 2007, el tamaño del sedimento es de 0,025 mm, aunque hay algunas zonas en la cola del embalse donde el sedimento presenta tamaños mayores. Se ha adoptado un valor del parámetro  $\Psi$  igual a 300. El valor de la pendiente del vaso de Ribarroja es de  $S=0,83 \cdot 10^{-3}$ .

Los resultados de los cálculos se presentan en la tabla 5.5. Se obtienen concentraciones superiores a las de Mequinenza, debido a la mayor pendiente del vaso y al menor tamaño del sedimento. En el caso de Ribarroja el lavado es total, por lo que no es esperable que se produzca sedimentación del material erosionado en el propio embalse.

Tabla 5.5. Cálculo aproximado de la operación de lavado para evacuar 1Mt en Ribarroja.

Caudal	Ancho del canal	Q sólido	Concent.	Peso diario	Duración	Volumen
m3/s	m	t/s	kg/m3	Mt	días	hm3
50	90.51	2.11	42.21	0.18	5.5	24
100	128.00	5.20	51.96	0.45	2.2	19
150	156.77	8.80	58.68	0.76	1.3	17
200	181.02	12.79	63.97	1.11	0.9	16
250	202.39	17.10	68.40	1.48	0.7	15
300	221.70	21.67	72.25	1.87	0.5	14
350	239.47	26.48	75.67	2.29	0.4	13
400	256.00	31.50	78.76	2.72	0.4	13
450	271.53	36.72	81.59	3.17	0.3	12
500	286.22	42.11	84.21	3.64	0.3	12

Como resultado del análisis realizado se puede concluir que, en principio, la operación de lavado es técnicamente posible en Ribarroja, siempre que los desagües profundos se encuentren operativos.

Sin embargo, pueden plantearse dudas sobre la viabilidad de la operación en Ribarroja. En primer lugar, depende de la operatividad de los desagües profundos, que está situados a cota muy baja y que han podido quedar obstruidos por la acumulación de sedientos. Si se da este caso, la operación de recuperación de los desagües puede ser muy delicada.

En segundo lugar, la situación de los sedimentos es muy desfavorable, puesto que están distribuidos a lo largo de los 30 km del vaso, como puede apreciarse en la figura 5.9, donde se observa una gran acumulación de sedimentos en la cola del embalse, muy alejados de los desagües profundos. Los valores que proporciona el método de Tsinghua corresponden a casos en los que el depósito de sedimentos se encuentra en las inmediaciones de la presa, lo que permite el lavado por erosión remontante. Según Shen, 1999, si el sedimento se encuentra lejos de la presa la concentración alcanzada puede ser muy inferior al resultado de la fórmula empírica. También puede reducirse la tasa con relación a la teórica si el sedimento es cohesivo o presenta alguna dificultad para su remoción. Atkinson, 1996, encontró que en la mayor parte de los casos que estudió la tasa de evacuación de sedimentos era inferior a la proporcionada por el método de Tsinghua. Estos aspectos deberían ser analizados con detalle mediante toma de datos de campo que permitieran cartografiar con precisión la localización de los sedimentos, su granulometría, su composición química y su grado de compactación y la simulación de la operación de lavado mediante modelación matemática antes de iniciar ninguna operación en este sentido.

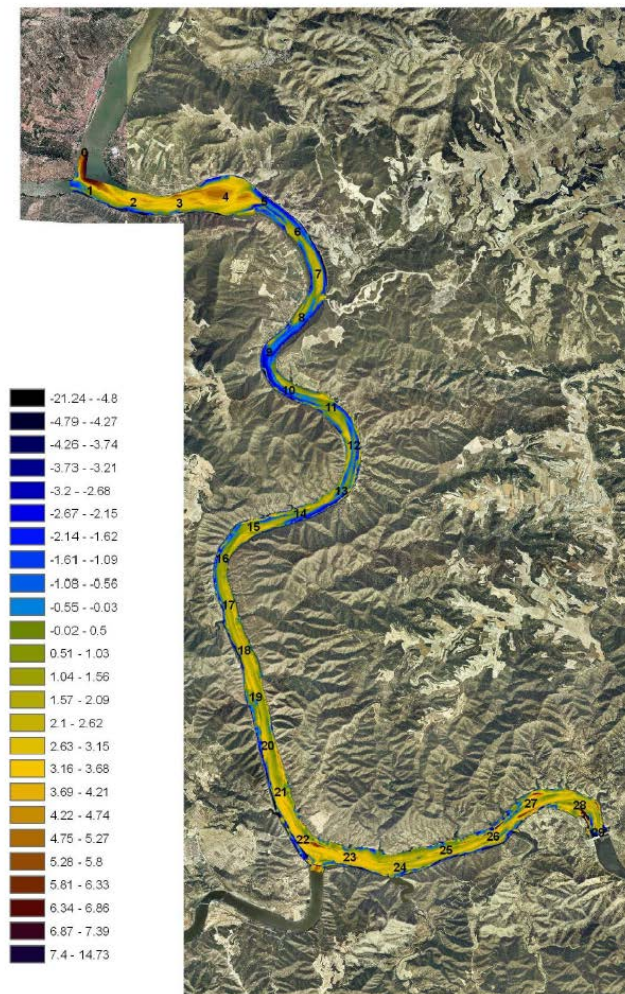


Figura 1. Altura de sedimento (m) depositado a lo largo del embalse, con indicación de los PK

Figura 5.9. Distribución de sedimentos a lo largo del embalse de Ribarroja, según el estudio de FLUMEN, 2007.

### 3.5 Análisis del embalse de Flix

La figura 5.10 presenta el esquema que ilustra las condiciones del embalse de Flix, combinando la ley de capacidad de evacuación de caudales en función de la cota y el vaso. El aliviadero de Flix permite evacuar grandes caudales a partir de la cota de su labio. A cota 31,07 m, 6 m por encima del cauce, ya se podrían desaguar 500 m<sup>3</sup>/s. Quedarían sumergidos algo más de 5 km de embalse, con un calado relativamente pequeño. Por tanto, los desagües de Flix permiten la operación de lavado.

El cálculo aproximado de la operación de lavado se presenta en la tabla 5.6. Se ha supuesto que el sedimento de Flix tiene las mismas características que el de Ribarroja, por lo que se ha adoptado un valor del parámetro  $\Psi$  igual a 300. El valor de la pendiente del vaso de Flix es de  $S=0,63 \cdot 10^{-3}$ .



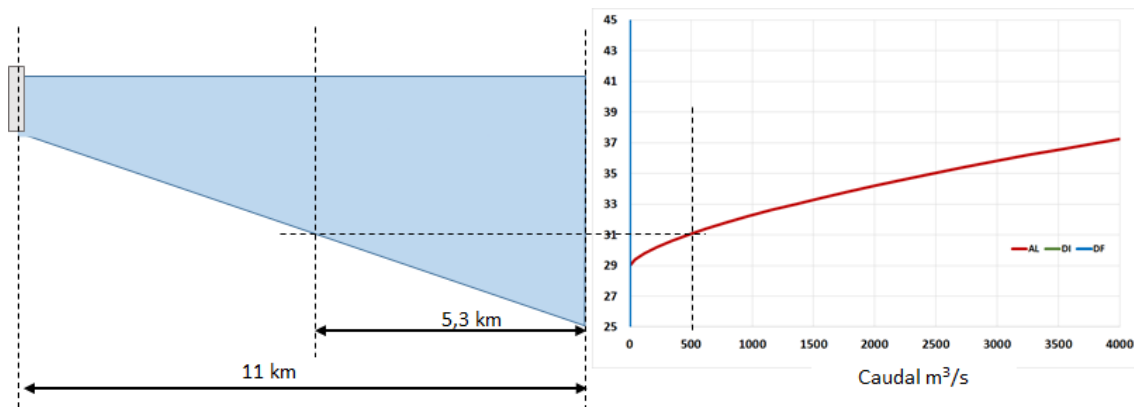


Figura 5.10. Análisis comparado de la capacidad de evacuación de la presa y la geometría del vaso en Flix.

Las concentraciones que resultan del análisis son algo inferiores a las de Ribarroja. Si pudieran alcanzarse estas concentraciones, y una vez vaciado el embalse, la operación de lavado tendría una duración relativamente breve. No se dispone de la curva característica del embalse de Flix, pero se estima que el volumen de embalse situado por debajo de la cota del labio del aliviadero (29,0 m) debe ser muy pequeño, por lo que no sería esperable que el material erosionado en el lavado volviera a depositarse en el propio embalse.

Tabla 5.6. Cálculo aproximado de la operación de lavado para evacuar 1Mt en Flix.

Caudal	Ancho del canal	Q sólido	Concent	Peso diario	Duración	Volumen
m <sup>3</sup> /s	m	t/s	kg/m <sup>3</sup>	Mt	días	hm <sup>3</sup>
50	90.51	1.63	32.64	0.14	7.1	31
100	128.00	4.02	40.19	0.35	2.9	25
150	156.77	6.81	45.39	0.59	1.7	22
200	181.02	9.90	49.48	0.85	1.2	20
250	202.39	13.23	52.90	1.14	0.9	19
300	221.70	16.76	55.88	1.45	0.7	18
350	239.47	20.48	58.52	1.77	0.6	17
400	256.00	24.36	60.91	2.11	0.5	16
450	271.53	28.40	63.10	2.45	0.4	16
500	286.22	32.56	65.13	2.81	0.4	15

Al igual que en el caso de Ribarroja, puede concluirse que la operación de lavado es técnicamente posible en el embalse de Flix, ya que el aliviadero permite evacuar fuertes caudales desde una cota relativamente baja. El vaso de Flix es más corto que el de Ribarroja, por lo que la operación de lavado presenta menos problemas prácticos. Sin embargo, habría que garantizar que el sedimento está libre de contaminación antes de proceder a su movilización.

### 3.5 Análisis del embalse de Barasona

La experiencia acumulada en el vaciado del embalse de Barasona permite hacerse una idea de la validez de las simplificaciones del método de Tsinghua, ya que se dispone de datos bastante fiables del resultado de las operaciones de lavado.

El embalse de Barasona está situado en el río Ésera. La presa es de gravedad con planta curva, de 66 m de altura sobre cimientos y 99 m de longitud de coronación. La coronación de la presa se sitúa a cota 449,0 m y el cauce a cota 388,0 m. El nivel máximo normal está situado a cota 448,0 m. La capacidad del vaso al finalizar la construcción era de 92,5 hm<sup>3</sup> a NMN, ocupando una superficie de 664 has. El embalse tiene unos 7,3 km de longitud, lo que supone una pendiente media de  $8,2 \cdot 10^{-3}$  y un ancho medio de 900 m. El aliviadero está regulado por compuertas. Tiene su labio a cota 440,17 m y su capacidad es de 1.738 m<sup>3</sup>/s. Tiene dos desagües de fondo a cota 395,38 m que permiten evacuar 235 m<sup>3</sup>/s a cota de NMN.

Cuando se realizó la operación de lavado, la acumulación de sedimentos se estimaba entre 18 hm<sup>3</sup>, según Navas et al., 1998, y 24,7 hm<sup>3</sup> según Avendaño y Cobo, 1998. Esto supone entre el 20% y el 26% de la capacidad inicial. Según Avendaño y Cobo, 1998, el sedimento llegaba hasta la cota 418,0 m, unos 30 m por encima de la cota del cauce. Navas et al., 1998, realizaron una caracterización de los sedimentos del vaso mediante 21 sondeos. Obtuvieron una textura limo-arcillosa con preponderancia de limos (83%). El tamaño del 90% del sedimento es inferior a 90 micras y el 50% es inferior a 15 micras. El tamaño medio se estima en 17 micras. El peso específico se estimó en 1.112 t/m<sup>3</sup>.

La figura 5.11 presenta el esquema que ilustra las condiciones del embalse de Barasona, combinando la ley de capacidad de evacuación de caudales en función de la cota y el vaso. Se ha marcado la cota 418,0 m, nivel alcanzado por los sedimentos. A esta cota la capacidad del desagüe de fondo es de 154 m<sup>3</sup>/s.

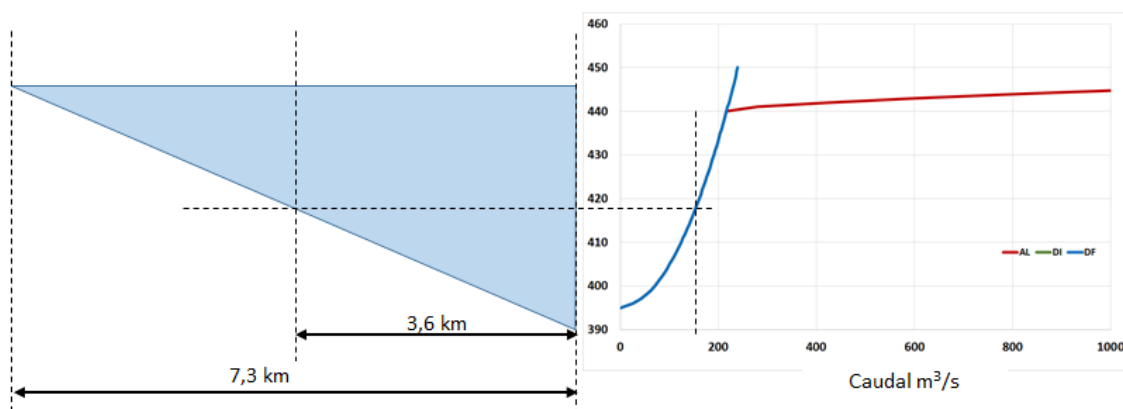


Figura 5.11. Análisis comparado de la capacidad de evacuación de la presa y la geometría del vaso en Barasona.

El cálculo aproximado de la operación de lavado se presenta en la tabla 5.7. Para las características del sedimento de Barasona se ha adoptado un valor del parámetro  $\Psi$  igual a 350. El valor de la pendiente del vaso de Barasona se ha tomado igual a  $S=4,1 \cdot 10^{-3}$ , para tener en cuenta que los sedimentos se hallan a la cota 418,0 m. Se ha planteado como objetivo de la operación de lavado retirar 3 Mt.

Resultan concentraciones muy superiores a las obtenidas en Ribarroja y Flix. Por ejemplo, para un caudal de lavado de 100 m<sup>3</sup>/s se obtiene una concentración superior a 400 kg/m<sup>3</sup>, mientras que en Ribarroja y Flix las concentraciones son de 40-50 kg/m<sup>3</sup>, 10 veces menores.

Tabla 5.7. Cálculo aproximado de la operación de lavado para evacuar 3Mt en Barasona.

Caudal	Cota	Vol	Ancho del canal	Q sólido	Concent.	Peso diario	Duración	Volumen
m <sup>3</sup> /s	m	hm <sup>3</sup>	m	t/s	kg/m <sup>3</sup>	Mt	días	hm <sup>3</sup>
20	395.76	0.20	57.24	5.08	340.10	0.44	6.8	12
40	396.90	0.30	80.95	12.50	312.45	1.08	2.8	10
60	398.81	0.54	99.15	21.17	352.86	1.83	1.6	9
80	401.48	1.05	114.49	30.77	384.67	2.66	1.1	8
100	404.91	2.07	128.00	41.13	411.30	3.55	0.8	7
120	409.10	4.02	140.22	52.13	434.43	4.50	0.7	7
140	414.06	7.58	151.45	63.70	454.99	5.50	0.5	7
160	419.77	13.74	161.91	75.77	473.59	6.55	0.5	6
180	426.25	23.97	171.73	88.31	490.62	7.63	0.4	6
200	433.49	40.32	181.02	101.27	506.37	8.75	0.3	6

Los valores obtenidos en el cálculo se pueden contrastar con los resultados de los tres vaciados del embalse. Las operaciones fueron las siguientes:

Primer lavado: del 12-10-1995 a las 3:00 h al 12-10-1995 a las 20:00 h. Duración 17:00 h. La reserva en Barasona el 12-10-1995 era de 16,10 hm<sup>3</sup>, que corresponde aproximadamente a cota 421,5 m, con una capacidad de desagüe de 165,6 m<sup>3</sup>/s.

Tabla 5.8. Cálculo aproximado del primer lavado del embalse de Barasona.

t	V	Cota	Q	Ancho canal	Qs	Conc	ΔV	ΔS
h	hm <sup>3</sup>	m	m <sup>3</sup> /s	m	t/s	kg/m <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>	Mt
0	16.10	421.50	165.57	164.70	78.31	475.47	0.60	0.28
1	15.50	421.08	164.24	164.04	78.18	476.62	0.59	0.28
2	14.91	420.66	162.87	163.35	78.05	477.82	0.59	0.28
3	14.33	420.22	161.47	162.65	77.92	479.06	0.58	0.28
4	13.75	419.78	160.02	161.92	77.78	480.35	0.58	0.28
5	13.17	419.33	158.54	161.17	77.63	481.70	0.57	0.28
6	12.60	418.87	157.01	160.39	77.48	483.10	0.57	0.28
7	12.03	418.40	155.44	159.58	77.33	484.56	0.56	0.28
8	11.47	417.92	153.81	158.75	77.17	486.09	0.55	0.28
9	10.92	417.43	152.14	157.88	77.00	487.69	0.55	0.28
10	10.37	416.93	150.40	156.98	76.82	489.37	0.54	0.28
11	9.83	416.42	148.60	156.03	76.64	491.14	0.53	0.28
12	9.30	415.90	146.73	155.05	76.44	493.01	0.53	0.28
13	8.77	415.36	144.79	154.02	76.24	494.98	0.52	0.27
14	8.25	414.80	142.78	152.95	76.02	497.07	0.51	0.27
15	7.73	414.23	140.67	151.81	75.80	499.29	0.51	0.27
16	7.23	413.65	138.47	150.62	75.56	501.66	0.50	0.27
17	6.73	413.04	136.16	149.36	75.31	504.20	0.49	0.27
						TOTAL	9.86	4.99

La tabla 5.8 presenta los cálculos. Según el modelo, en las 17 h que duró el vaciado se habrían evacuado 9,9 hm<sup>3</sup> de agua y 5,0 Mt de sedimento, quedando el embalse a cota 413,0 m.

Segundo lavado: del 1-10-1996 a las 12:15 h al 2-10-1996 a las 12:00 h. Duración 23:45 h. La reserva en Barasona el 1-10-1996 era de 12,86 hm<sup>3</sup>, que corresponde aproximadamente a cota 419,1

m, con una capacidad de desagüe de 157,7 m<sup>3</sup>/s. Los resultados del cálculo se presentan en la tabla 5.9. Se habrían evacuado 11.8 hm<sup>3</sup> de agua y 6,7 Mt de sedimento.

Tabla 5.9. Cálculo aproximado del segundo lavado del embalse de Barasona.

t	V	Cota	Q	Ancho canal	Qs	Conc	ΔV	ΔS
h	hm3	m	m3/s	m	t/s	kg/m3	hm3	Mt
0	12.86	419.08	157.72	160.75	77.55	482.44	0.57	0.28
1	12.29	418.62	156.17	159.96	77.40	483.88	0.56	0.28
2	11.73	418.14	154.57	159.14	77.24	485.38	0.56	0.28
3	11.17	417.66	152.91	158.28	77.08	486.95	0.55	0.28
4	10.62	417.16	151.20	157.40	76.90	488.59	0.54	0.28
5	10.08	416.66	149.44	156.47	76.72	490.32	0.54	0.28
6	9.54	416.14	147.60	155.51	76.53	492.14	0.53	0.28
7	9.01	415.61	145.70	154.50	76.33	494.06	0.52	0.27
8	8.48	415.06	143.71	153.45	76.12	496.10	0.52	0.27
9	7.97	414.50	141.65	152.34	75.90	498.25	0.51	0.27
10	7.46	413.92	139.49	151.18	75.67	500.55	0.50	0.27
11	6.96	413.32	137.23	149.95	75.43	503.01	0.49	0.27
12	6.46	412.71	134.86	148.65	75.16	505.65	0.49	0.27
13	5.98	412.08	132.37	147.27	74.88	508.48	0.48	0.27
14	5.50	411.42	129.74	145.79	74.58	511.56	0.47	0.27
15	5.03	410.73	126.94	144.22	74.26	514.91	0.46	0.27
16	4.58	410.02	123.97	142.52	73.91	518.58	0.45	0.27
17	4.13	409.28	120.80	140.68	73.53	522.63	0.43	0.26
18	3.69	408.51	117.38	138.68	73.10	527.15	0.42	0.26
19	3.27	407.69	113.69	136.48	72.64	532.23	0.41	0.26
20	2.86	406.84	109.65	134.04	72.12	538.03	0.39	0.26
21	2.47	405.93	105.21	131.29	71.52	544.75	0.38	0.26
22	2.09	404.96	100.27	128.17	70.84	552.67	0.36	0.26
23	1.73	403.92	94.67	124.54	70.03	562.28	0.34	0.25
24	1.39	402.80	88.22	120.22	69.05	574.31	0.32	0.25
						TOTAL	11.79	6.71

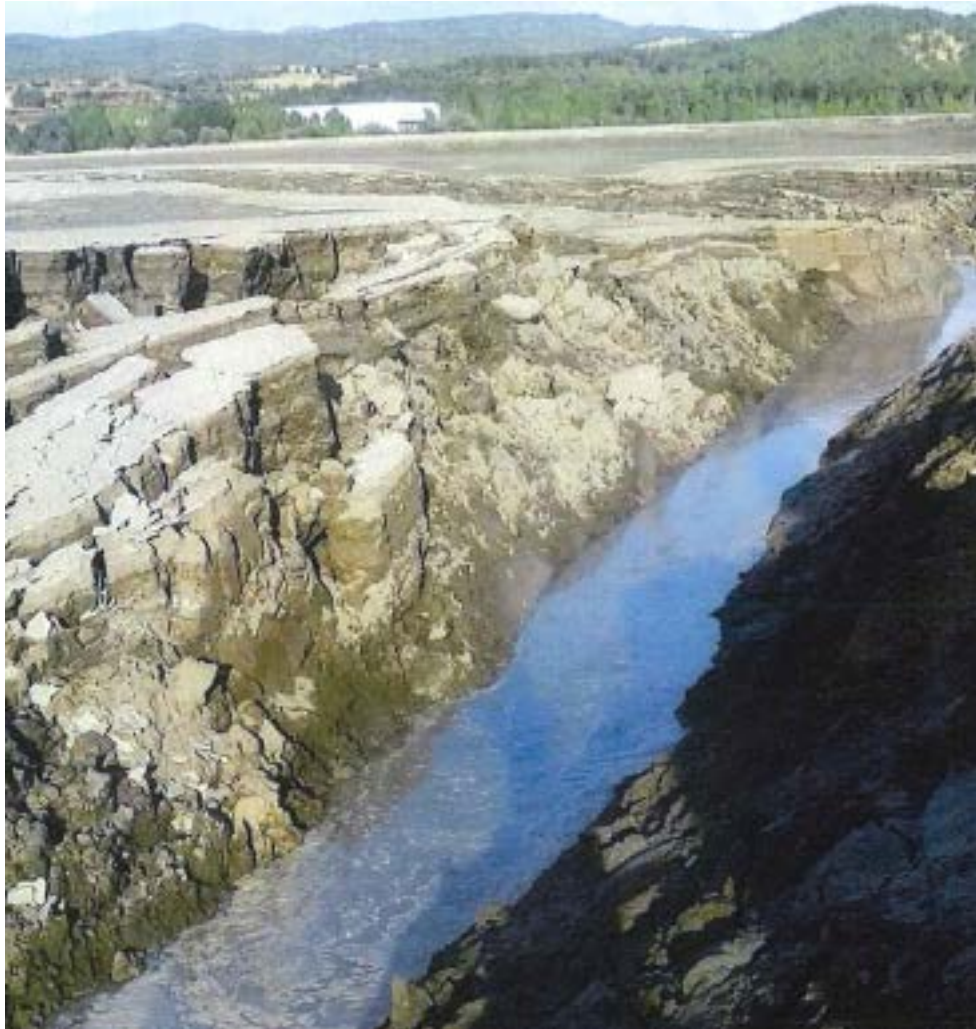
Tercer lavado: del 3-10-1997 a las 12:00 h al 4-10-1997 a las 13:00 h. Duración 25:00 h. La reserva en Barasona el 3-10-1997 era de 11,32 hm<sup>3</sup>, que corresponde aproximadamente a cota 417,8 m, con una capacidad de desagüe de 153,4 m<sup>3</sup>/s. Los resultados del cálculo se presentan en la tabla 5.10. Resulta un volumen de agua evacuado igual a 11,0 hm<sup>3</sup> y una cantidad de sedimento de 6,6 Mt.

En los cálculos realizados se ha supuesto que la disposición de sedimentos en el embalse es siempre igual a la inicial, con los sedimentos situados a la cota 418,0 m. Las fórmulas empíricas empleadas están al límite de su validez, ya que un incremento de la pendiente o del parámetro Ψ haría que el caudal sólido proporcionado por la fórmula se aproximara o incluso superara al caudal líquido. Estas aproximaciones son muy groseras, pero permiten tener una idea de la efectividad de la operación de lavado.

Tabla 5.10. Cálculo aproximado del tercer lavado del embalse de Barasona.

t	V	Cota	Q	Ancho canal	Qs	Conc	$\Delta V$	$\Delta S$
h	hm <sup>3</sup>	m	m <sup>3</sup> /s	m	t/s	kg/m <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>	Mt
0	11.32	417.79	153.36	158.51	77.12	486.52	0.55	0.28
1	10.77	417.30	151.66	157.63	76.95	488.15	0.55	0.28
2	10.22	416.79	149.91	156.72	76.77	489.85	0.54	0.28
3	9.68	416.28	148.09	155.77	76.58	491.65	0.53	0.28
4	9.15	415.75	146.21	154.77	76.39	493.54	0.53	0.27
5	8.62	415.21	144.25	153.73	76.18	495.55	0.52	0.27
6	8.10	414.65	142.20	152.64	75.96	497.67	0.51	0.27
7	7.59	414.07	140.07	151.49	75.73	499.93	0.50	0.27
8	7.09	413.48	137.84	150.28	75.49	502.34	0.50	0.27
9	6.59	412.87	135.50	149.00	75.23	504.93	0.49	0.27
10	6.10	412.25	133.04	147.64	74.96	507.71	0.48	0.27
11	5.62	411.59	130.45	146.19	74.66	510.72	0.47	0.27
12	5.15	410.92	127.70	144.65	74.35	513.99	0.46	0.27
13	4.70	410.22	124.78	142.98	74.00	517.57	0.45	0.27
14	4.25	409.48	121.66	141.18	73.63	521.52	0.44	0.27
15	3.81	408.72	118.31	139.23	73.22	525.91	0.43	0.26
16	3.38	407.91	114.69	137.08	72.77	530.83	0.41	0.26
17	2.97	407.07	110.76	134.71	72.26	536.42	0.40	0.26
18	2.57	406.17	106.43	132.05	71.69	542.87	0.38	0.26
19	2.19	405.22	101.63	129.04	71.03	550.44	0.37	0.26
20	1.82	404.20	96.22	125.56	70.26	559.54	0.35	0.25
21	1.47	403.10	90.02	121.45	69.33	570.84	0.32	0.25
22	1.15	401.90	82.74	116.43	68.17	585.46	0.30	0.25
23	0.85	400.58	73.89	110.03	66.64	605.68	0.27	0.24
24	0.59	399.11	62.55	101.23	64.46	636.71	0.23	0.23
						TOTAL	10.96	6.60

Por diferencia de batimetrías antes y después de las tres operaciones de lavado, Avendaño y Cobo dedujeron que se habían evacuado 8,86 hm<sup>3</sup>, lo que supone entre el 50% y el 35% de los sedimentos retenidos. Esto indica que cada operación de lavado permitió retirar unos 3 Mt de sedimento, aproximadamente la mitad de los valores obtenidos en los cálculos. Resulta interesante contrastar el ancho del canal de lavado con las observaciones realizadas en el embalse. La figura 5.12 muestra una fotografía del vaso de Barasona durante uno de los vaciados, donde se puede apreciar que la anchura del fondo del canal no llega a los valores supuestos en las fórmulas (más de 100 m), pero sus taludes son verticales e inestables, lo que permite suponer que puede ensancharse si continúa el proceso.



*Figura 5.12. Vista del canal de lavado durante uno de los vaciados de Barasona. (Cortesía de D. Rafael Romeo, CHE).*

Las concentraciones observadas durante los vaciados fueron muy fuertes. Según los datos proporcionados por Avendaño y Cobo, 1998, en los tres vaciados se alcanzaron concentraciones superiores a los  $100 \text{ kg/m}^3$ , con picos de  $492 \text{ kg/m}^3$  en el primer vaciado (la medida se interrumpió porque la colada de barro anegó el cauce del río), de  $339 \text{ kg/m}^3$  en el segundo vaciado y de  $500 \text{ kg/m}^3$  en el tercer vaciado. Como ilustración se presenta la figura 5.13, que muestra varios fotogramas del vídeo producido por la CHE sobre el primer vaciado del embalse (accesible en [https://www.youtube.com/watch?v=\\_3rxTgikm5s](https://www.youtube.com/watch?v=_3rxTgikm5s)). En uno de ellos se aprecia que el fango ocupa la totalidad del lecho del río. Las cifras de concentración medidas en Barasona son algo inferiores a las proporcionadas por las fórmulas empíricas, pero se encuentran en el mismo orden de magnitud.



*Figura 5.13. Fotogramas del vídeo producido por CHE (1995) sobre el primer vaciado de Barasona, donde se aprecia la concentración de sedimentos.*

El contraste de las fórmulas empíricas con las observaciones realizadas en los tres vaciados de Barasona permite validar parcialmente la metodología. El rendimiento real de la operación fue inferior al proporcionado por el método de Tsinghua (algo menos de la mitad), pero se encuentra dentro del mismo orden de magnitud, tanto en concentraciones como en volumen total evacuado.

Las condiciones de Barasona son más favorables para el lavado que las de los embalses del bajo Ebro. El grado de aterramiento de Barasona era ya muy significativo cuando se realizaron los vaciados (del orden del 25% de la capacidad), lo que supuso que el sedimento se encontrara acumulado hasta 30 m por encima del cauce y 20 m por encima del desagüe de fondo en las proximidades de la presa. La fotografía de la figura 5.14 ilustra este aspecto. El sedimento de Barasona era más fino que el acumulado en Ribarroja y no se encontraba compactado, ya que su densidad era muy baja. Desde el punto de vista hidrodinámico, el vaso de Barasona es más corto que el de Ribarroja y su pendiente es considerablemente superior, lo que también facilita el lavado. Todo esto indica que la experiencia de Barasona no debe trasladarse directamente al caso de Ribarroja o Flix, ya que las diferencias entre los dos casos son sustanciales.



*Figura 5.14. Acumulación de sedimento en las inmediaciones de la presa de Barasona. (Cortesía de D. Rafael Romeo, CHE).*



#### **4. Consideraciones medioambientales, económicas y sociales**

Además de las cuestiones hidrodinámicas, la operación de lavado está condicionada por otros factores de distinta naturaleza. En este apartado se realizan unas reflexiones sobre las implicaciones de la operación de lavado.

##### **4.1 Consideraciones medioambientales**

La operación de lavado requiere un vaciado prácticamente total del embalse, seguido de un periodo de evacuación de sedimentos y un periodo en el que se recupera el volumen embalsado inicial. Estos tres procesos pueden producir efectos medioambientales significativos en el embalse y en tramo aguas abajo, que están muy bien documentados en la literatura (Palau, 1998, Gual et al., 2015, Armour et al., 2016, DeBoer et al., 2016).

El vaciado del embalse produce un caudal superior al que circularía naturalmente por el río. Este efecto en sí mismo no resulta muy perjudicial, pero debe tenerse en cuenta que se liberará agua situada en las capas inferiores del embalse, que suele tener menos calidad que el agua superficial. Las capas inferiores de los embalses estratificados suelen presentar menor contenido de oxígeno disuelto debido a la inhibición de los procesos mezcla originada por la estratificación. Este déficit de oxígeno disuelto puede llegar incluso a condiciones de anoxia, como se aprecia en la figura 5.15, correspondiente al informe de Comisaría de Aguas sobre el embalse de Ribarroja en 1996. También es frecuente que el material sedimentado en el fondo del vaso sea activo desde el punto de vista bioquímico, por lo que el agua de las capas inferiores está expuesta a la resuspensión de este material. Estos problemas son tanto más acusados cuanto mayor sea el grado de eutrofia del embalse.

Según informe de la Comisaría de Aguas de la CHE, 1996, el estado trófico del embalse de Ribarroja es mesotrófico, con hipolimnion anóxico a partir de la cota 44,0 m, por encima de la cota de los dos desagües profundos (43,3 y 40,0, respectivamente). La termoclina del embalse de Ribarroja se estima localizada a una profundidad que oscila entre 5 y 10 m. Los desagües profundos se encuentran en la zona del hipolimnion, por lo que existe riesgo de turbinar aguas anóxicas. El sedimento tiene un alto contenido de materia orgánica, aunque la producción de metano y el riesgo de contaminación se consideran bajos.

El vaciado del embalse tiene también su efecto en el vaso. La reducción del volumen embalsado y la superficie inundada producen cambios sustanciales en las comunidades biológicas. El embalse acoge una densidad media de vida piscícola que debería desaparecer prácticamente por completo o resultar trasladada, bien mediante operaciones específicas o simplemente como consecuencia del arrastre a través de los desagües. El embalse de Ribarroja también se considera de interés natural debido a la presencia de aves acuáticas. El tramo de la cola del embalse hasta la confluencia de los ríos Segre y Cinca está incluido en la lista de zonas húmedas de importancia internacional.

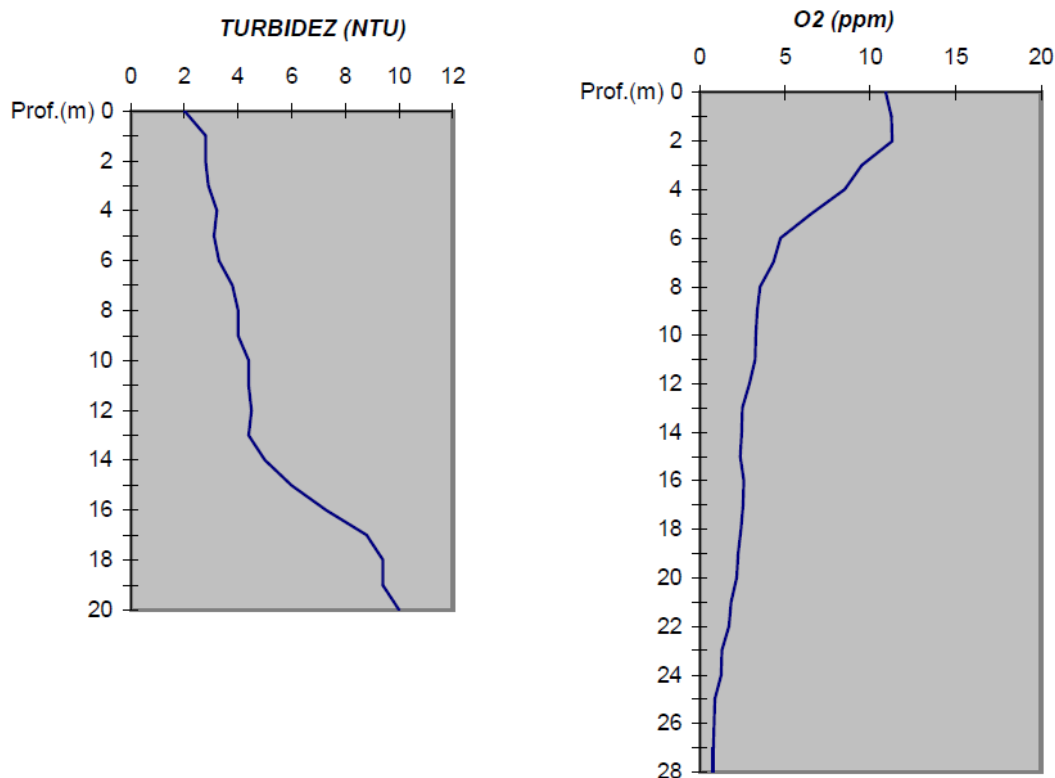


Figura 5.15. Perfiles de turbidez y oxígeno disuelto en el embalse de Ribarroja, según informe de Comisaría de Aguas, 1996.

El proceso de lavado produciría el vertido al río de agua con una muy alta concentración de sedimentos. Aunque no se alcanzara ni el 10% de los valores que se deducen del modelo de Tsinghua (de 40000 mg/l a 80000 mg/l), las concentraciones pueden ser mucho mayores que las observadas históricamente en la zona y se producirían en un régimen muy diferente del natural, ya que no ocurrirían durante crecidas, sino tras un periodo prolongado de caudal superior al habitual. Esto produciría indudablemente efectos ambientales de gran importancia, tanto sobre la vegetación riparia como sobre fauna de ribera. La experiencia del vaciado de Barasona indica que los efectos son reversibles a medio plazo, pero esta capacidad de recuperación resultaría muy comprometida si los lavados se realizan de forma periódica, como debería ser si se pretende restituir el flujo original de sedimentos en el río. Es difícil que el ecosistema fluvial pudiera tolerar estos pulsos periódicos de muy alta concentración.

La experiencia de Barasona también demuestra que el sedimento evacuado del embalse no se transporta en su totalidad hacia aguas abajo. Una gran parte queda depositada en el propio cauce, a la espera de ser erosionado por episodios posteriores. Esto originaría cambios morfológicos en el cauce que producirían el correspondiente impacto negativo.

Tras el lavado debe recuperarse el nivel del embalse para volver a posibilitar la explotación hidroeléctrica. Para ello es necesario evacuar un caudal inferior al que entra al embalse, pero manteniendo la servidumbre establecida para refrigeración de la central nuclear de Ascó y el caudal ecológico del Delta. Este régimen de caudales inferiores a los habituales también produciría efectos ambientales significativos, especialmente si se tiene en cuenta que ocurriría después del pulso de alta concentración de materiales en suspensión.

Todos los efectos mencionados, y otros muchos que podrían producirse, pueden analizarse para elaborar un plan de vaciado, donde se previeran los efectos esperados y su alcance y se definieran las medias de prevención, reparación o compensación que resultaran adecuadas.

#### 4.2 Consideraciones económicas

La principal consideración económica vinculada al vaciado de los embalses del Ebro es la correspondiente a la interrupción de la producción hidroeléctrica. La afección a la producción hidroeléctrica se compone de dos factores: la pérdida de producción por el volumen de agua no turbinado o por menor salto bruto y la afección al esquema de producción por la no disponibilidad de la central hidroeléctrica. En este estudio se puede hacer una estimación simplificada de la afección producida por el primero de estos dos factores. El análisis del segundo factor queda fuera del ámbito de este estudio, ya que requiere el conocimiento del sistema regional de producción de energía eléctrica.

En una operación de lavado habría que comenzar por bajar el nivel del embalse de Ribarroja y Flix. Para ello se podrían utilizar las tomas de las centrales hasta la cota límite de explotación determinada por su mínimo técnico. A partir de ese punto el agua debería ser evacuada sin turbinar. La central de Ribarroja está equipada con cuatro grupos Kaplan con un caudal de equipo de 225 m<sup>3</sup>/s cada uno. El salto bruto máximo es de 30 m, correspondiente al desnivel entre el máximo nivel de explotación de Ribarroja (70,0 m) y la cota de explotación del embalse de Flix (40,0 m).

El embalse de Ribarroja se explota prácticamente a nivel constante, como puede apreciarse en la figura 5.16. La cota media de explotación en los últimos 10 años es 66,24 m, que supone un salto bruto de 26,24 m. El caudal medio en ese tiempo ha sido de 251,36 m<sup>3</sup>/s. Si se turbinara toda la aportación, la energía anual producida sería de 1,3 TWh. Con un precio aproximado de 50€/MWh, resultan unos ingresos superiores a los 60 M€/año. Esto da una idea de la importancia económica de la explotación.



Figura 5.16. Cota de explotación del embalse de Ribarroja en los últimos años.

La afección durante la operación de lavado se produciría por turbinar con menor salto durante el vaciado y llenado y dejar de turbinar durante la operación de lavado. El vaciado debe evacuar el volumen comprendido entre la cota 66,24 y la cota del desagüe de fondo, unos 40,0 m, que es aproximadamente 200 hm<sup>3</sup>. De este volumen, los últimos 16 hm<sup>3</sup> no podrían ser turbinados, porque se encuentran por debajo del mínimo técnico, que se supone igual a un tercio del salto bruto para las turbinas Kaplan, en la cota 50,0 m.

La pérdida de energía vendría dada por:

$$\Delta E = \gamma V \Delta H_b \eta$$

Donde  $\Delta E$  es la pérdida de energía,  $\gamma$  es el peso específico del agua,  $V$  es el volumen turbinado,  $\Delta H_b$  es la pérdida de salto bruto y  $\eta$  es el rendimiento, que se supone igual a 0,92. La pérdida de salto bruto va variando a medida que se vacía el embalse. Los cálculos se presentan en la tabla 5.11. Resulta una pérdida de energía de 3800 MWh, que supondría una merma de ingresos de unos 0,19 M€ suponiendo un precio medio de 50 €/MWh.

Tabla 5.11. Cálculo aproximado de la pérdida de energía durante el vaciado del embalse de Ribarroja.

Cota	Volumen	$\Delta$ Volumen	Hb	$\Delta$ Hb	$\Delta E$
m	hm3	hm3	m	m	MWh
66.24	200.85		26.24		
66	195.72	5.12	26.12	0.12	1.57
65	175.70	20.02	25.50	0.74	37.38
64	157.09	18.61	24.50	1.74	81.39
63	139.85	17.25	23.50	2.74	118.67
62	123.91	15.94	22.50	3.74	149.60
61	109.23	14.68	21.50	4.74	174.58
60	95.76	13.47	20.50	5.74	193.98
59	83.45	12.31	19.50	6.74	208.21
58	72.24	11.21	18.50	7.74	217.66
57	62.08	10.16	17.50	8.74	222.70
56	52.92	9.16	16.50	9.74	223.74
55	44.71	8.21	15.50	10.74	221.16
54	37.40	7.31	14.50	11.74	215.35
53	30.93	6.47	13.50	12.74	206.70
52	25.25	5.68	12.50	13.74	195.61
51	20.32	4.94	11.50	14.74	182.45
50	16.07	4.25	10.50	15.74	167.62
49	12.46	3.61	9.50	26.24	237.48
48	9.44	3.02	8.50	26.24	198.96
47	6.95	2.49	7.50	26.24	163.84
46	4.94	2.01	6.50	26.24	132.14
45	3.36	1.58	5.50	26.24	103.85
44	2.16	1.20	4.50	26.24	78.96
43	1.29	0.87	3.50	26.24	57.48
42	0.69	0.60	2.50	26.24	39.41
41	0.31	0.38	1.50	26.24	24.76
40	0.11	0.21	0.50	26.24	13.51
Total		200.74			3868.78

La pérdida de producción durante el lavado dependería el volumen que se destinara a la operación de lavado. La pérdida de energía, aplicando la fórmula anterior, sería de 66 MWh por cada  $\text{hm}^3$  empleado en el lavado. El volumen necesario para evacuar 1Mt se ha estimado entre 12  $\text{hm}^3$  y 24  $\text{hm}^3$  aplicando el método de Tsinghua, lo que daría una pérdida de energía entre 800 GWh y 1600 MWh, lo que supondría entre 0,04 y 0,08 M€ Por los motivos ya comentados, es muy posible que el rendimiento sea muy inferior al teórico, por lo que la pérdida de energía podría superar los 3000 MWh, con un coste de 0,15 M€

Para el llenado se debería mantener un caudal mínimo para, al menos, atender la servidumbre de la refrigeración de Ascó y el caudal ecológico en el Delta. Resulta complicado hacer una estimación, puesto que el volumen turbinado en Ribarroja dependería del caudal turbinado en Mequinenza, pero puede suponerse que la pérdida de energía sería similar a la producida durante el vaciado.

En el embalse de Flix puede hacerse un análisis similar, aunque la entidad de la explotación hidroeléctrica es mucho menor. La figura 5.17 representa la cota de explotación de Flix en los últimos años disponibles (sólo hay datos hasta 2010). Resulta un volumen embalsado medio de 3,67  $\text{hm}^3$ , que corresponde a una cota media de 35,98 m.

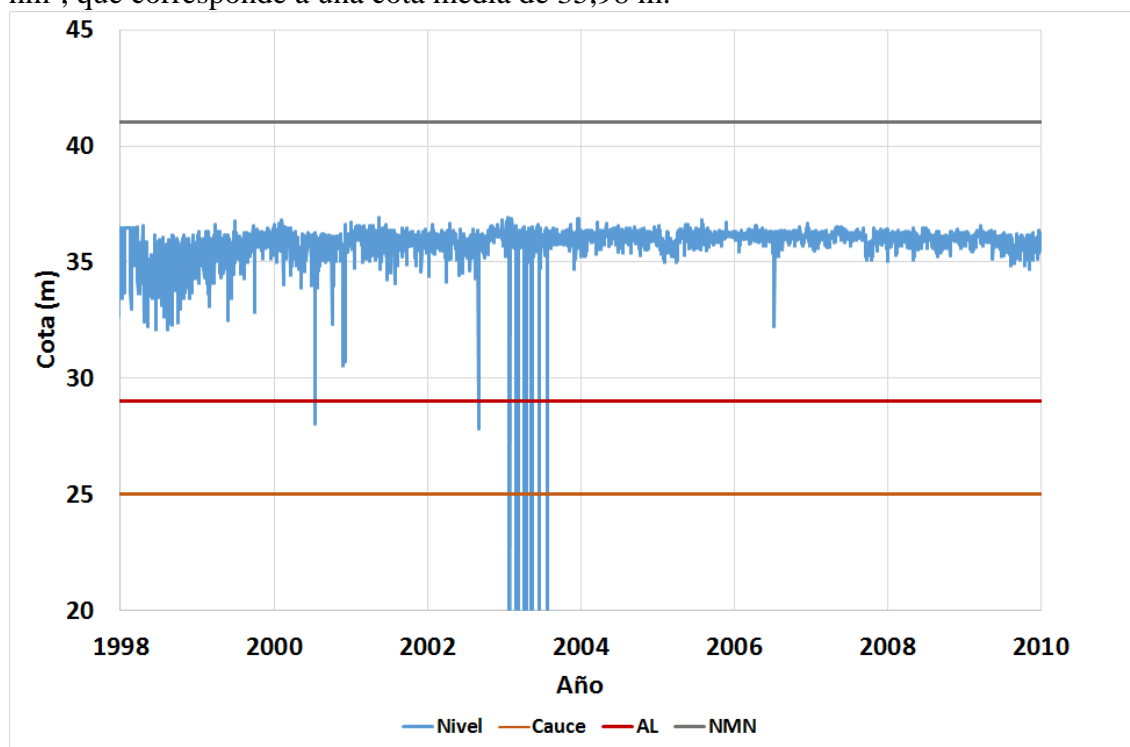


Figura 5.17. Cota de explotación del embalse de Flix en los últimos años.

La central de Flix está equipada con cuatro grupos Kaplan de 100  $\text{m}^3/\text{s}$  cada uno. El salto bruto máximo es de 12,1 m, lo que supone que la cota de aspiración de las turbinas es la 28,0 m. Si suponemos un mínimo técnico del 30% de un tercio del salto bruto, la cota mínima de explotación sería la 32,3 m. El cálculo de la pérdida de energía durante el vaciado se presenta en la tabla 5.12. Resulta una pérdida de energía de 30 MWh. La pérdida de energía durante el lavado sería de 20 MWh por cada  $\text{hm}^3$  empleado en el lavado. Suponiendo los volúmenes empleados en Ribarroja, entre 12  $\text{hm}^3$  y 24  $\text{hm}^3$ , resultarían un rango entre 240 y 480 MWh. Teniendo en cuenta el posible rendimiento, la pérdida de energía total podría llegar a los 800 MWh, que supondrían 0,04 M€. Estas cantidades son muy inferiores a las obtenidas para el embalse de Ribarroja.

Tabla 5.12. Cálculo aproximado de la pérdida de energía durante el vaciado del embalse de Flix.

Cota	Volumen	$\Delta$ Volumen	Hb	$\Delta$ Hb	$\Delta$ E
m	hm <sup>3</sup>	hm <sup>3</sup>	m	m	MWh
35.98	3.65		7.98		
35.5	3.19	0.46	7.74	0.24	0.28
35	2.76	0.43	7.25	0.73	0.80
34.5	2.36	0.39	6.75	1.23	1.22
34	2.01	0.35	6.25	1.73	1.54
33.5	1.69	0.32	5.75	2.23	1.77
33	1.41	0.28	5.25	2.73	1.93
32.5	1.16	0.25	4.75	3.23	2.01
32	0.95	0.22	4.25	7.98	4.35
31.5	0.76	0.19	3.75	7.98	3.77
31	0.60	0.16	3.25	7.98	3.24
30.5	0.46	0.14	2.75	7.98	2.74
30	0.34	0.11	2.25	7.98	2.28
29.5	0.25	0.09	1.75	7.98	1.87
29	0.18	0.07	1.25	7.98	1.50
Total		3.48			29.30

En total, la pérdida de producción de energía durante el lavado en Ribarroja y Flix podría alcanzar 0,5 M€ en cada operación. A esta cifra habría que sumar la repercusión que tendría sobre la explotación del sistema de producción de energía la falta de disponibilidad de la potencia instalada en Ribarroja y Flix.

#### 4.3 Consideraciones sociales

La operación de vaciado de los embalses de Ribarroja y Flix y posterior lavado de sedimentos también puede tener importantes afecciones sociales, ya que existe un gran número de intereses vinculados a la gestión de estos embalses. En este apartado se hacen unos breves comentarios sobre estas afecciones.

Los usos del agua del tramo fluvial situado aguas abajo del embalse se verían alterados por la alta concentración de sólidos en suspensión y por la posible movilización de sustancias tóxicas acumuladas en los lodos del embalse. Los puntos de abastecimiento del bajo Ebro son particularmente sensibles a un cambio en las características del agua captada, y sus sistemas de tratamiento podrían verse muy afectados por el incremento de partículas en suspensión. El lavado también afectaría a los usos recreativos, como la pesca, que se vería directamente perturbada por el incremento de carga en suspensión.

La central nuclear de Ascó toma su caudal de refrigeración del río Ebro, aguas abajo del embalse de Flix. Las operaciones de lavado se pueden diseñar para mantener la garantía del caudal de refrigeración, pero las características del agua se alterarían. Sería necesario verificar que las instalaciones de Ascó son compatibles con la carga de sólidos en suspensión que transportaría el agua durante la operación de lavado. Si resultaran incompatibles, debería pararse la producción de la central, lo que tendría un impacto económico muy mayor que el estimado sobre la producción hidroeléctrica.

La movilización de sedimentos estaría destinada a mitigar la subsidencia del Delta. El mecanismo previsto es el traslado de los sedimentos a las zonas cultivadas a través de los canales de la red de riego que toma el agua en el azud de Xerta, con un recorrido de decenas de kilómetros y una pendiente muy baja. Los usuarios de la red de riego se verían directamente afectados, ya que tendrían que gestionar el paso del agua con una alta carga de sedimentos en suspensión a través de su infraestructura. Esto plantearía problemas de conservación, ya que es esperable que parte del sedimento se acumule en los canales de riego, obstruyéndolos parcial o totalmente. Por otra parte, existen serias dudas sobre la efectividad de la medida, que debería ser objeto de un estudio cuantitativo que tuviera en cuenta la capacidad de captación, la duración de las operaciones de lavado, el transporte del sedimento en suspensión y su aplicación al terreno.

El sector energético debería compensar la pérdida de producción en las centrales con otro tipo de energía, posiblemente mediante el consumo de combustible con el consecuente incremento de emisiones. Debería llegarse a un acuerdo para la compensación por la merma en ingresos y la alteración de la gestión que supone la operación de lavado. Esto requeriría realizar una imputación de costes ambientales, lo que obligaría a incluir a la práctica totalidad de usuarios del agua en la cuenca, ya que la alteración del régimen hidrológico y del tránsito de sedimentos no puede atribuirse exclusivamente a los tres embalses del bajo Ebro, sino que es consecuencia de los usos aguas arriba de los embalses.

En resumen, existe una gran variedad de afecciones sociales que se deben tener en cuenta en la planificación de las operaciones.





## SEXTA PARTE: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 1. Conclusiones

La finalidad de este estudio es el análisis del tránsito de sedimentos a través de los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix, situados en el curso bajo del río Ebro y próximos a su desembocadura en el Delta. El estudio ha consistido en una revisión de la literatura científica y los datos disponibles para realizar una caracterización del tránsito de sedimentos en el curso bajo del río Ebro y un análisis de las alternativas técnicas para la posible movilización de los sedimentos acumulados en los embalses. En este apartado se presenta un resumen de las conclusiones obtenidas sobre estas dos cuestiones.

#### 1.2 Conclusiones sobre el tránsito sedimentario

El estudio del tránsito sedimentario se ha basado en la revisión de la literatura presentada en la primera parte del trabajo y el análisis de los datos presentados en la segunda parte. El estudio se describe en detalle en la tercera parte del trabajo. Aquí se resumen las principales conclusiones que se derivan del análisis realizado.

##### *Sobre la acumulación de sedimentos en los embalses*

Básicamente, se han manejado tres fuentes de información: los estudios realizados por el CEDEX en 1982, el análisis del grupo FLUMEN sobre el periodo 1997-1999 y los estudios realizados por la CHE en 2011-2012. La información proporcionada por estos estudios ha permitido caracterizar cuantitativamente el proceso de acumulación de sedimentos, dentro de los márgenes de precisión razonablemente esperables en este tipo de estudios.

En el embalse de Mequinenza el estudio del CEDEX estimó una acumulación de 92,8 hm<sup>3</sup> en 1982, que corresponde a una retención media de 5,2 hm<sup>3</sup>/año en los 18 años transcurridos desde su puesta en explotación en 1964. Los dos estudios realizados por la CHE en el vaso completo en el periodo 2011-2012 han arrojado cifras de 133 hm<sup>3</sup> en el año 2008 y 76,9 hm<sup>3</sup> en 2011. Previamente se había obtenido una estimación de 4,91 hm<sup>3</sup> en los últimos 35 km de la cola del embalse. Tras un análisis detallado y comparación de los tres estudios, se ha llegado a la conclusión de que el estudio realizado en 2011 mediante nivelación de precisión es el más fiable de los tres, ya que pudo cartografiar una gran parte del vaso que quedaba al descubierto por el bajo nivel del embalse. **Se ha concluido que el sedimento acumulado en Mequinenza probablemente se encuentra en el rango comprendido entre 75 hm<sup>3</sup> y 100 hm<sup>3</sup>.** Esto supone una retención media anual entre 1,5 hm<sup>3</sup>/a y 2 hm<sup>3</sup>/a en los 48 años transcurridos desde la puesta en explotación. Si se toma el extremo superior de la estimación y se descuenta el sedimento acumulado en los primeros 18 años según la estimación del CEDEX, la tasa media de retención en los 30 años transcurridos desde 1982 a 2011 es de unos 0,25 hm<sup>3</sup>/a, muy inferior a la tasa de retención inicial. Esta cifra concuerda aproximadamente con el análisis directo que hizo el grupo FLUMEN mediante el balance de la carga de transporte a la entrada y a la salida de Mequinenza en el periodo 1997-1999, donde estimaron una retención de 1,4 Mt en 22 meses, que corresponde a 0,73 Mt/a y un volumen de 0,45 hm<sup>3</sup>/a suponiendo un peso específico del sedimento de 1,6 t/m<sup>3</sup>.

En el embalse de Ribarroja el estudio del CEDEX estimó una acumulación de 12,22 hm<sup>3</sup> en 1982, que corresponde a una retención media de 0,87 hm<sup>3</sup>/año en los 14 años transcurridos desde su puesta en explotación en 1968. El estudio de FLUMEN estimó una sedimentación acumulada de 13,1 hm<sup>3</sup> en 2007, que corresponde a una tasa media de 0,34 hm<sup>3</sup>/a desde su puesta en explotación en 1968. Si se descuenta la estimación del CEDEX de 1982, la tasa media entre 1982 y 2007 fue de 0,04 hm<sup>3</sup>/a. En el análisis directo del grupo FLUMEN mediante el balance de la carga de transporte a la entrada y a la salida de Ribarroja en el periodo 1997-1999, se estimó una retención de 0,5 Mt en 22 meses, que corresponde a 0,27 Mt/a y un volumen de 0,17 hm<sup>3</sup>/a.

En el embalse de Flix no se dispone de datos sobre la acumulación de sedimentos, pero tampoco existe constancia de que esta circunstancia haya supuesto un problema durante su explotación, a pesar de que su capacidad, 11,4 hm<sup>3</sup>, es considerablemente menor que la de los otros dos embalses. Esto es probablemente debido a que el tiempo de residencia en Flix es mucho menor que en Ribarroja.

En los dos embalses donde hay datos se observa que el proceso no ha sido estacionario. Se ha constatado una fuerte tasa de acumulación de sedimentos en el periodo inicial, que se reduce considerablemente a lo largo del tiempo. **Partiendo de los valores medios calculados desde su construcción la vida útil de Mequinenza se estimaría en unos 300 años. Con los valores medios estimados en 2012 pasaría a 750-1.000 años. Si se toma la cifra de acumulación estimada en el periodo 1982-2012 esta cifra sube hasta cerca de los 3.000 años. Las cifras de Ribarroja son similares: vida útil de 230 años en 1982, de 644 años en 2007, y de más de 5.000 años tomando la tasa media del periodo 1982-2007.**

Los análisis realizados han permitido también determinar que la mayor parte de la acumulación de sedimentos se concentra en el tercio del vaso más alejado de la presa. Este efecto es más acusado en el caso de Mequinenza que en el caso de Ribarroja, donde el reparto es algo más uniforme. **En el caso de Mequinenza, se ha encontrado que el 80% del sedimento se encuentra a más de 50 km de la presa.** En las inmediaciones de la presa (menos de 1 km) hay menos de 2 hm<sup>3</sup>. **En el caso de Ribarroja, se ha encontrado que el 60% del sedimento se encuentra a más de 15 km de la presa.** En las inmediaciones de la presa (menos de 1 km) hay 0,5 hm<sup>3</sup>. Esta circunstancia es plenamente concordante con lo descrito en la literatura, que indica que el sedimento más grueso se deposita en la cola del embalse como consecuencia de su mayor velocidad de decantación. El sedimento más fino puede avanzar por el vaso y depositarse algo más adelante, pero, si el embalse es largo es poco probable que llegue hasta la presa. Las fluctuaciones de nivel pueden hacer que el sedimento acumulado en la cola se vaya desplazando hacia aguas abajo, pero sólo dentro de la zona sujeta a la oscilación de nivel. Estas oscilaciones de nivel también producen una compactación del sedimento, que se ha observado consolidado e incluso con vegetación, lo que dificulta su erosionabilidad.

**Las cifras obtenidas de acumulación de sedimentos en los embalses de Mequinenza y Ribarroja son perfectamente compatibles con su explotación para uso hidroeléctrico y no justificarían, desde ese punto de vista, realizar en este momento ninguna actuación para su movilización.**

### *Sobre el flujo de sedimentos en el bajo Ebro*

El tránsito de sedimentos en el bajo Ebro ha sido el objeto de numerosos estudios recientes, donde se han realizado distintas campañas de toma de datos que permiten caracterizar el comportamiento actual con bastante precisión. La tabla 6.1 resume los resultados que se deducen del análisis bibliográfico realizado.

Tabla 6.1. Valores medios estimados de transporte de sedimentos en diversos puntos de la cuenca del Ebro según distintos autores.

Río	Emplazamiento	Transporte sólido Mt/a					
		1997-99	2002-2004	2005-2008	1998-2008	2008-2012	2008-2012
Ebro	Zaragoza						0.329
Ebro	Sástago		1.640			0.659	
Ebro	Escatrón	0.766					
Ebro	Mequinenza	0.038					
Segre	Serós	0.235				0.040	
Cinca	Fraga	0.457				0.121	0.047
Ebro	Ribarroja	0.405				0.043	
Ebro	Ascó					0.055	0.120
Ebro	Pas de l'Ase				0.092	0.056	
Ebro	Mora de Ebro		0.454	0.216		0.071	
Ebro	Xerta				0.116	0.070	
Ebro	Tortosa					0.066	0.500
	Referencia	Roura, 2008	Vericat y Batalla, 2006	Batalla y Vericat, 2011	Tena et al., 2012	Tena y Batalla, 2013	Este trabajo

La dispersión que se aprecia entre los datos se justifica fundamentalmente por dos circunstancias: la precisión de las técnicas de medida, que se suelen basar en muestreos puntuales o en estimaciones a partir de la medida continua de la turbidez, y la corta duración de las campañas de toma de datos, que no alcanzan a abarcar periodos representativos.

El estudio más extenso es el publicado en Tena y Batalla (2013), que abarca numerosos puntos de la red fluvial en el periodo 2008-2011. Las entradas al sistema MRF, evaluadas en el Ebro en Sástago (0,659 Mt/a), en el Segre en Serós (0,040 Mt/a) y en el Cinca en Fraga (0,121 Mt/a) totalizan 0,82 Mt/a. Las salidas, evaluadas en Ribarroja, totalizan 0,043 Mt/a, lo que supone una tasa de retención de 0,777 Mt/a. Adoptando un peso específico de 1,6 t/m<sup>3</sup>, **resulta una acumulación en Mequinenza y Ribarroja de 0,5 hm<sup>3</sup>/a. Esta cifra es también concordante con las que se han obtenido a partir de la acumulación de sedimentos en los embalses. Según la estimación de Flumen (2009), Mequinenza retiene el 95% del sedimento que entra, mientras que Ribarroja retiene el 40%.**

A lo largo del cauce aguas abajo del sistema MRF se observa un ligero incremento en la carga de transporte en suspensión, que los investigadores atribuyen a procesos erosivos en el cauce. También indican que en el tramo del río Ebro situado aguas abajo de los embalses la carga de fondo puede constituir un 40% del transporte total.

### ***Sobre las alteraciones en el sistema***

El análisis de la acumulación de sedimentos en los embalses permite concluir que el proceso de transporte de sedimentos se ha visto alterado en las últimas décadas. Las tasas de acumulación de sedimentos fueron mucho mayores en el periodo analizado por el CEDEX (hasta 1982) que en el periodo comprendido entre 1982 y la actualidad. Esta variación en las tasas de sedimentación no puede atribuirse a un cambio en las características hidrodinámicas de los embalses, puesto que ni su morfología ni su régimen de explotación han variado sustancialmente. Debe concluirse, por tanto, que la variación que se ha observado en las tasas de acumulación es debida a una reducción en la carga de sedimentos que entra al sistema.

Si el transporte de sedimentos se conoce con cierta precisión en el periodo actual, no sucede lo mismo con periodo anterior a la construcción de los embalses. Sólo se han encontrado en la literatura dos referencias a la carga de transporte de sedimentos anteriores a la época de construcción de los embalses. Se trata de las de Gorría, 1877 y Catalá, 1969. El dato de Gorría ha llevado a algunos investigadores a cifrar la carga de sedimentos del Ebro en unas 25-30 Mt/a a

finales del siglo XIX. A pesar de que esta cifra es citada reiteradamente por varios investigadores, se trata de una estimación altamente especulativa, ya que Gorriá sólo realizó cinco tomas de muestras y la cifra de concentración media (1400 mg/l) que corresponde a esa estimación es mucho mayor que la mayor parte de las concentraciones instantáneas observadas recientemente. La otra referencia corresponde a un libro de texto sobre calidad de agua, que incluye una tabla con medidas de carga en suspensión en 18 puntos de las cuencas del Duero, Tajo y Ebro. En Flix se estima una tasa media de transporte en el periodo octubre 1961 a septiembre de 1963 de 2,2 Mt/a basada en 15 medidas, mientras que en Zaragoza la estimación es de 3,2 Mt/a basada en 23 medidas. A pesar de que el autor considera que el transporte de sedimentos puede ser mayor que el medido por la escasa frecuencia de muestreo, estas cifras ya son entre 3 y 5 veces mayores que la estimación del transporte actual aguas arriba de Mequinenza. Esta circunstancia refuerza la hipótesis de que la carga de sedimentos que entran al sistema MRF se ha reducido sustancialmente.

Esta reducción de la actividad de transporte de sedimentos tiene dos causas fundamentales: la retención producida en los otros embalses de la cuenca situados aguas arriba del sistema MRF y la alteración del régimen hidrológico.

El periodo de mayor actividad en la construcción de embalses de la cuenca fue precisamente el de la entrada en servicio de los embalses de Mequinenza y Ribarroja, cuando se creció desde los 1.500 hm<sup>3</sup> de capacidad hasta superar los 6.500 hm<sup>3</sup>. Durante este periodo la acumulación de sedimentos en el sistema MRF fue muy significativa. A medida que fue pasando el tiempo, la entrada en servicio de los nuevos embalses fue reduciendo la carga de transporte en suspensión que llegaba al curso bajo del Ebro.

El crecimiento de la capacidad de embalse vino acompañado por un desarrollo progresivo de los usos del agua, lo que produjo la alteración del régimen hidrológico, que en el tramo bajo del Ebro consiste fundamentalmente en una disminución de las aportaciones medias, especialmente las procedentes del río Segre. Esta reducción es concordante con el desarrollo de los usos del agua en la cuenca, cuyo consumo se cifra en el Plan Hidrológico en unos 5.000 hm<sup>3</sup>/año, que equivalen a unos 150 m<sup>3</sup>/s. Esta cifra concuerda aproximadamente con la diferencia entre el caudal total del río Ebro en el periodo 1947-1965 (500 m<sup>3</sup>/s) y en el periodo 1997-2015 (320 m<sup>3</sup>/s). El resto (30 m<sup>3</sup>/s) puede atribuirse a la merma de aportaciones naturales registrada desde 1980, que se ha constatado en muchas partes de España. Esta reducción de caudales circulantes lleva aparejada, lógicamente, una reducción de la capacidad de transporte de sedimentos.

También se ha constatado que el efecto directo de alteración hidrológica producido por los embalses del sistema MRF como consecuencia de su gestión para regulación es, comparativamente, mucho menor, y no puede ser considerado por sí mismo determinante de la modificación del régimen de transporte de sedimentos.

Aunque el análisis de la producción de sedimentos en la cuenca no ha sido objeto de este trabajo, el análisis de las cifras permite deducir una disminución en la producción de sedimentos a lo largo del último siglo, que ha sido debida a una serie de factores: cambios de uso del suelo, reforestación, protección contra la erosión, incremento de cubierta vegetal, cambios en el régimen de lluvias, etc. Los análisis de cambio climático sugieren que la actividad erosiva puede reducirse aún más, como consecuencia del cambio en el régimen de precipitación y en la frecuencia de las crecidas.

El balance actual de transporte de sedimentos difiere mucho del que pudo haber antes del desarrollo de los usos del agua en la cuenca, pero resulta muy difícil especular sobre cuál pudo haber sido la situación de referencia. Se ha establecido que la variación en la dinámica de transporte sedimentario del bajo Ebro es atribuible a alteraciones sedimentológicas e hidrológicas. Desde el punto de vista sedimentológico, el transporte se ha reducido significativamente por la menor erosión y la retención de sedimentos en los embalses de la cuenca. Desde el punto de vista hidrológico, la

circulación de caudales se ha visto reducida por las detracciones realizadas en la cuenca para atender los usos consuntivos. Además, pueden haber influido otras circunstancias como los cambios de uso del suelo de la cuenca o las correcciones hidrológico-forestales para evitar la erosión, pero no resulta fácil cuantificar, siquiera aproximadamente, el efecto que han podido tener cada uno de ellos.

## 1.2 Conclusiones sobre las alternativas de movilización de sedimentos

Las alternativas de movilización de sedimentos se han analizado en las partes cuarta y quinta de este trabajo. En la cuarta parte se han realizado una recopilación de experiencias de gestión de sedimentos, estableciendo posibles analogías con los embalses del sistema MRF. En la quinta parte se han estudiado específicamente las alterativas en los embalses del sistema. A continuación, se resumen las conclusiones de estos dos estudios.

### *Recopilación de experiencias de gestión de sedimentos*

Todos los estudios globales en los que se analiza la gestión de sedimentos en múltiples embalses emplean dos índices básicos para su clasificación:  $K_w$  y  $K_t$ . El índice  $K_w$  es el cociente entre la capacidad de embalse y la aportación media anual y puede interpretarse como el tiempo de retención del embalse (en años). El índice  $K_t$  es el cociente entre la capacidad de embalse y la tasa de sedimentación anual y puede interpretarse como la vida útil del embalse (en años). Los distintos autores delimitan zonas en un gráfico doblemente logarítmico donde se representan estos dos índices, indicando las alternativas de gestión que son más frecuentes en cada caso.

A partir de la revisión de la literatura consultada se ha recopilado una base de datos de 137 embalses en los que se cita algún modo de gestión de sedimentos. De estos embalses se ha obtenido información suficiente como para determinar los valores de los índices  $K_w$  y  $K_t$  en 61 casos, que se han representado en gráfico doblemente logarítmico junto con los embalses del bajo Ebro.

El punto correspondiente al embalse de Mequinenza se encuentra en la zona donde se recomiendan diques de contención de sedimentos, gestión del nivel de embalse o inyección de sedimentos. Los puntos correspondientes a los embalses de Ribarroja y Flix se encuentran fuera de las zonas donde se han reportado experiencias en la literatura, debido a la baja tasa de sedimentación que presentan en comparación con el volumen de embalse. Por este motivo, también se han analizado las experiencias correspondientes a valores similares del índice  $K_w$ , y de la pendiente del cauce, estimada como el cociente entre la altura de presa y la longitud del vaso. En cada caso se han seleccionado los seis embalses más próximos a cada uno de los embalses del sistema MRF, analizando las medidas de gestión de sedimentos aplicadas y su posible analogía con los embalses del bajo Ebro.

Los embalses cuyas características son más próximas a las del embalse de Mequinenza se presentan en la tabla 6.2. El más similar desde el punto de vista hidrodinámico es el de Sefid Rud, en Irán, aunque desde el punto de vista sedimentológico su tasa anual de sedimentación es mucho mayor. Del resto de embalses, hay cuatro cuya capacidad y aportación son mucho mayores (al menos cinco veces) y cinco mucho menores (cinco veces menores), por lo que no resulta muy adecuado establecer una analogía. En tres de estos embalses la principal medida de gestión del sedimento es la evacuación de corrientes de densidad. En otros cinco embalses se aplican medidas de evacuación hidrodinámica: lavado y *sluicing*. En otros dos embalses se aplican medidas de retirada mecánica del sedimento o de control de producción de sedimentos en la cuenca.

Tabla 6.2. Embalses más similares a Mequinenza

Presa	Pais	Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	Pend	Medidas de gestión		
		hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km	m/km			
Mequinenza	España	1534	7345	2.80	0.209	876	61	106.00	0.58			
Sefid Rud	Irán	1760	5008	50.40	0.351	42	106	27.80	3.81	TZ	FL	
Sanmenxia	China	9640	43000	1600	0.224	7	45	120.00	0.38	FL	TZ	ED
Liujiaxia	China	5720	27300	15.00	0.210	458	147	41.54	3.54	TZ		
Xiaolangdi	China	12650	40550	23.33	0.312	651	154	89.20	1.73	TZ	ED	
Tarbela	Pakistan	14300	33260	208	0.419	83	137	79.90	1.71	FL		
Shihmen	Taiwan	309	1468	2.33	0.211	159	133	17.08	7.79	GF	ES	EX
Naodehai	China	270	261	10.47	1.034	31	41.5	35.50	1.17	FL		
Kamishiiba	Japón	92	402	0.26	0.228	422	110	6.88	15.99	SL		
Miure	Japón	62	190	0.14	0.327	517	83.2	3.47	23.98	FP		
Makio	Japón	75	471	0.38	0.159	238	105	6.43	16.33	EX	ED	

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Los embalses más similares a Ribarroja se presentan en la tabla 6.3. El más similar desde el punto de vista hidrodinámico es el de Sakuma, en Japón, aunque la gran altura de la presa hace que la pendiente del cauce sea mucho mayor que en Ribarroja. La tasa de sedimentación es seis veces superior a la de Ribarroja. El embalse de Guernsey tiene una pendiente similar a la de Ribarroja, aunque su capacidad es un tercio y su aportación la quinta parte. El resto de embalses son mucho menores que Ribarroja y sus pendientes son considerablemente mayores, por lo que la analogía es mucho menor. En cinco embalses se emplean medidas de gestión de sedimentos basadas en la evacuación hidrodinámica: tres mediante lavado y dos mediante *sluicing*. Hay un embalse donde es posible la evacuación mediante corrientes de densidad. En los otros cuatro embalses las medidas que se aplican son la retirada mecánica del sedimento o de control de producción de sedimentos en la cuenca.

Tabla 6.3. Embalses más similares a Ribarroja

Presa	Pais	Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	Pend	Medidas de gestión		
		hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km	m/km			
Ribarroja	España	291	10716	0.528	0.027	882	29	32.30	0.90			
Sakuma	Japón	343	6772	3.45	0.051	119	156	25.60	6.07	ED	ES	GD
Guernsey	USA	91	2100	1.700	0.043	64	28.6	23.50	1.22	FL		
Hiraoka	Japón	42	4649	0.952	0.009	54	62.5	12.50	5.00	ED	FP	EX
Tsukabaru	Japón	34	635	0.110	0.054	374	87	7.64	11.39	SL		
Shuicaozi	China	10	514	0.630	0.019	18	28	6.00	4.67	FL	EX	
Ronghua	Taiwan	12	1086	2.328	0.011	6	82	16.90	4.85	GF		
Wujie	Taiwan	14	1278	0.283	0.011	59	57.6	14.00	4.11	GF	EX	
Mapragg	Suiza	5	167	0.058	0.030	103	65	1.83	35.52	TZ		
Morotsuka	Japón	3	89	0.028	0.039	151	59	1.44	40.97	SL	FP	
Palagnedra	Suiza	6	304	0.080	0.018	83	55	2.60	21.15	FL	BY	

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

Los embalses más similares a Flix se presentan en la tabla 6.4. El más similar es el embalse de Ouchi-Kurgan, cuya aportación y pendiente son similares a las de Flix, aunque su capacidad es cuatro veces mayor y su altura de presa el doble. Desde el punto de vista sedimentológico, su tasa de sedimentación es casi mil veces superior. Los embalses de Yasuoka, Ichari, Ouchibaru y Kasagi

tienen capacidades similares, pero sus aportaciones son menos de la mitad y sus pendientes son el doble de las de Flix. El resto de embalses, excepto Asahi, son mucho más pequeños que Flix y tienen pendientes considerablemente mayores. Excepto en el caso de Asahi, donde existe un túnel de by-pass, en el resto de embalses la gestión de sedimentos se realiza principalmente mediante evacuación hidrodinámica: lavado y *sluicing*.

Tabla 6.4. Embalses más similares a Flix

Presa	Pais	Cap hm3	Apo hm3/a	Sed Mt/a	Kw años	Kt años	Alt m	Long Km	Pend m/km	Medidas de gestión		
Flix	España	11	13576	0.016	0.001	1141	16.1	12.00	1.34			
Ouchi-Kurgan	USSR	56	15000	13.00	0.004	5	35	17.00	2.06	FL		
Ichari	India	12	5300	5.700	0.002	2	36.8	11.30	3.25	FL		
Yasuoka	Japón	11	3609	0.351	0.003	37	50	16.60	3.01	FC	ED	FP
Ouchibaru	Japón	7	1558	0.041	0.005	222	26	7.23	3.60	SL		
Kasagi	Japón	14	4350	0.094	0.003	180	40.8	10.00	4.08	FC	FP	
Saigo	Japón	2	980	0.014	0.002	204	20	3.75	5.33	SL		
Asahi	Japón	26	5413	0.067	0.005	456	87	2.38	36.49	BY		
Tokiwa	Japón	1	606	0.006	0.001	126	33.5	1.00	33.50	FC		
Barenburg	Suiza	2	3594	0.024	0.000	85	64	2.30	27.83	FL		

BY: By-pass; SL: Sluicing; TZ: Corrientes de turbidez; FL: Lavado; FC: Lavado en presión; FP: Lavado parcial; ED: Dragado; EX: Excavación; GF: Reforestación; IS: Inyección de sedimento;

### Alternativas de gestión de sedimentos

Tras el análisis realizado, las alternativas de gestión de sedimentos en los embalses del sistema MRF son muy escasas. El objetivo de la gestión es fundamentalmente la restitución del flujo original de sedimentos que había en el curso bajo del Ebro antes de la construcción de las presas. La conservación del volumen útil de los embalses sólo es un objetivo secundario, lo que descarta las medidas más aplicadas en la práctica, que son el control de la erosión en la cuenca mediante la reforestación y el control parcial del flujo de sedimentos mediante diques de contención. Las medidas basadas en la retirada de sedimentos mediante excavación o dragado son factibles, pero están limitadas por su coste. En este estudio no se han realizado análisis específicos de coste, pero las cifras encontradas en la literatura, que corresponden a casos favorables donde esta medida se ha llevado a la práctica, permiten suponer que la inversión requerida para la retirada de los sedimentos sería desproporcionada.

En el embalse de Mequinenza no se ha encontrado ninguna medida que resulte factible en su configuración actual, excepto la retirada mecánica mediante excavación o dragado. En los embalses más parecidos a Mequinenza la principal opción de gestión es la evacuación de las corrientes de densidad, que no se han observado en Mequinenza. La gran longitud del vaso, la posición de los sedimentos, situados en su mayor parte a una distancia superior a 50 km de la presa, la escasa pendiente del cauce y mínima la capacidad de los desagües de fondo (160 m<sup>3</sup>/s a embalse lleno) impiden la gestión mediante *sluicing* y limitan enormemente la efectividad de las operaciones de lavado, que debería realizarse en presión y, como mucho, podría plantear como objetivo mantener la operatividad de los desagües. Hay unos desagües intermedios con 1.800 m<sup>3</sup>/s de capacidad, pero están situados a cota 87 m, lo que supone 27 m por encima de los desagües de fondo y 34 m por debajo del nivel máximo normal, por lo que sólo se podrían emplear en lavado parcial.

En el embalse de Ribarroja el lavado es técnicamente posible, puesto que dispone de dos desagües profundos que permiten evacuar 2.908 m<sup>3</sup>/s a embalse lleno. En principio, sería factible bajar el nivel del embalse hasta una cota próxima a la del cauce y abrir los desagües para evacuar el sedimento. En el gráfico de Sumi el punto correspondiente al embalse de Ribarroja se encuentra

próximo a la curva límite para una efectividad  $Fe=0.01$  y un coeficiente  $\beta=0.03$ . Esto indica que si se esperara un rendimiento del 1% en movilización del sedimento habría que utilizar como mínimo un 3% de la aportación anual (unos  $350 \text{ hm}^3$ ) para que la operación de lavado se encontrase al límite de la viabilidad. Rovira e Ibáñez, 2007, basados en un informe no publicado de Martín Vide, proponen el lavado como método de menor coste para movilizar los sedimentos del embalse de Ribarroja.

Sin embargo, existen serias dudas sobre la efectividad de la operación de lavado, puesto que se dan una serie de circunstancias desfavorables: la situación de los sedimentos, distribuidos a lo largo de los 30 km de vaso, la escasa pendiente, la probable compactación de los sedimentos tras haber transcurrido varias décadas sin ninguna acción de lavado. Según los índices propuestos por Atkinson, 1996, el lavado no sería satisfactorio. Entre los embalses similares a Ribarroja se aplica lavado en Guernsey, Shuicaozi y Palagnedra. En los dos primeros, Atkinson, 1996 indica que el lavado no ha resultado satisfactorio y el tercero tiene una pendiente del vaso mucho mayor. Junto a estas dificultades técnicas deben considerarse también otros factores, como el paso a través del embalse de Flix, el efecto del pulso de alta concentración de sedimentos en el cauce aguas abajo, la propagación hacia el Delta o la incidencia sobre la explotación de la central hidroeléctrica.

La configuración de desagües en la presa de Flix permite tanto las operaciones de lavado como el *sluicing*. El aliviadero está formado por siete vanos regulados por compuertas verticales con el umbral del vertedero a cota 29 m, cuatro metros por encima del cauce. La apertura de una o varias compuertas del aliviadero permitiría la evacuación de caudal con el nivel de agua en el embalse situado pocos metros por encima del fondo del cauce. Esto permite la gestión de sedimentos por lavado o por *sluicing*, aunque esta última alternativa no tiene mucho sentido, ya que en las crecidas los sedimentos que no hayan sido retenidos en Mequinenza o Ribarroja pasarían también el embalse de Flix sin necesidad de *sluicing*, porque las velocidades de circulación en Flix son mucho mayores que en Ribarroja debido a su menor profundidad.

Aunque la pendiente de Flix es similar a la del embalse de Ribarroja, el vaso se encuentra más encajado y es considerablemente más corto, por lo que es posible que rendimiento de la operación fuera mejor. Sin embargo, son aplicables las mismas cautelas que en el caso de Ribarroja. La gestión de sedimentos mediante lavado o *sluicing* se aplica en la práctica totalidad de embalses similares a Flix, pero todos ellos tienen una pendiente del vaso mayor que la de Flix y dos de ellos, Ouchi\_Kurgan e Ichari, figuran en el grupo que Atkinson, 1996 catalogó como de lavado no satisfactorio.

Además de los factores desfavorables ya citados para Ribarroja, en el caso de Flix hay que tener en cuenta que el volumen de sedimentos en el embalse (aunque no ha sido cuantificado específicamente por ningún estudio) debe ser mucho menor, y debe resolverse completamente el problema de la contaminación antes de plantear su movilización.

**En conjunto, las únicas alternativas técnicamente viables que se han encontrado para la gestión de sedimentos en el sistema MRF son la retirada mecánica mediante excavación en seco o dragado (en los tres embalses) y la retirada hidrodinámica mediante lavado (en Ribarroja y Flix). La viabilidad de la retirada mecánica debe analizarse mediante un estudio económico específico, pero los valores más favorables recopilados en la literatura suponen unos costes muy elevados. Con relación a las medidas de evacuación hidrodinámica, requieren condiciones muy singulares, que no se dan en los embalses del sistema, por lo que las efectividades esperables son muy bajas.**

El lavado resulta típicamente adecuado en embalses cuya capacidad es muy inferior a la aportación anual, con una gran capacidad de evacuación a baja cota y con pendiente disponible en el cauce. Suele aplicarse en casos donde hay una gran cantidad de sedimento acumulado (próximo al 50% de la capacidad inicial del embalse), que ha avanzado hasta las proximidades de la presa,



incrementando así la pendiente disponible, y puede ser erosionado con facilidad porque no se ha consolidado. El objetivo del lavado suele ser evitar que el aterramiento progrese y conservar la capacidad útil del embalse.

**Varias de estas condiciones no se dan en el sistema MRF, donde los cauces tienen una pendiente muy baja, el sedimento acumulado es una pequeña fracción de la capacidad original, está alejado de la presa y se encuentra, aparentemente, consolidado e incluso colonizado por vegetación. En estas condiciones es difícil que el resultado de la operación de lavado sea favorable.** Por ejemplo, de los ocho ejemplos citados por Atkinson, 1996, de embalses donde el lavado no ha resultado satisfactorio, en este estudio se ha encontrado que seis de ellos son similares a los embalses del sistema MRF: Sefid Rud y Sanmenxia son similares a Mequinenza, Guernsey y Shuicaozi son similares a Ribarroja y Ouchi-Kurgan e Ichari son similares a Flix.

En el sistema MRF se dan además otras circunstancias desfavorables, como la configuración de tres embalses en serie y la larga distancia que existe desde el punto de evacuación de sedimentos (el embalse de Flix) y su destino (el Delta del Ebro), situado a unos 100 km. La configuración de embalses en serie obliga a realizar las operaciones de lavado coordinadamente, vaciando simultáneamente al menos los embalses de Ribarroja y Flix y trabajando con un caudal que pueda ser evacuado por ambos embalses. Una vez realizada la evacuación, el sedimento debe bajar por el río Ebro hasta llegar al Delta. La alta concentración de partículas en suspensión puede producir efectos negativos sobre la calidad de agua y puede dar lugar a sedimentación en el cauce, ya que el tiempo de viaje puede ser considerable. Tampoco está claro cómo se puede aplicar el sedimento movilizado para contrarrestar la posible subsidencia del Delta.

## 2. Recomendaciones

A partir de las conclusiones del estudio se puede derivar un conjunto de recomendaciones para afrontar la gestión de sedimentos del bajo Ebro en el futuro. Estas recomendaciones se han dividido en tres grandes grupos: monitorización, plan de acción e integración de actores.

### 2.1 Recomendaciones sobre monitorización

En este trabajo se ha dispuesto de una abundante información, que ha permitido extraer conclusiones que se estiman válidas, teniendo en cuenta el rango de incertidumbre que suele caracterizar los procesos de dinámica sedimentaria.

La mayor incertidumbre corresponde a la situación del sistema antes de la construcción de las presas, puesto que los datos hidrológicos son escasos y los sedimentológicos casi inexistentes. Las cifras que se barajan son altamente especulativas y no conviene otorgarles gran credibilidad. Se recomienda trabajar sobre la situación actual, intentando corregir las deficiencias que se vayan constatando, pero sin pretender recuperar la situación previa a la construcción de las presas. **Resulta muy difícil estimar cuál habría podido ser dicha situación y prácticamente imposible recuperar el régimen hidrológico y sedimentológico que existía.**

En consecuencia, se considera de la máxima importancia avanzar en el conocimiento de la situación actual. Esto supone mantener las actividades iniciadas de monitorización y realizar un análisis sistemático de los datos para validar las cifras de referencia de que se dispone. La red de medida actualmente operativa cuenta con estaciones de aforo de entrada al sistema en Gelsa en el Ebro, Fraga en el Cinca, Serós en el Segre, Caspe en el Guadalope y Nonaspe en el Matarraña. Además, se dispone de control en los tres embalses y en las estaciones de Ascó, Xerta y Tortosa. Esta red permite cuantificar perfectamente el régimen hidrológico observado en la zona y realizar los estudios pertinentes sobre su variabilidad estacional e interanual. **Se recomienda continuar las actividades de monitorización hidrológica**, garantizando la operatividad de las estaciones de medida y evitando periodos de ausencia de datos.

Desde el punto de vista del análisis sedimentológico, la entrada en servicio de las estaciones vinculadas al PIPDE ofrece la posibilidad de disponer de datos en el eje del Ebro aguas arriba (Zaragoza, Presa Pina y Gelsa) y aguas abajo (Ascó, Xerta y Tortosa) de los embalses. Además, se dispone de las entradas en Fraga. Las series analizadas en estas estaciones tienen una importante proporción de huecos. Se recomienda mantener operativas estas estaciones, evitando que se produzcan interrupciones en su funcionamiento y reduciendo, en la medida de lo posible, el porcentaje de huecos. Las estaciones de medida de calidad de agua están provistas de turbidímetro, que puede utilizarse para estimar el transporte de sedimento en suspensión si se dispone de las curvas de tarado correspondiente. Se recomienda trabajar en la elaboración y validación de estas curvas de tarado y realizar análisis periódicos, similares a los publicados por Tena y Batalla, 2013, para caracterizar la variabilidad del transporte de sedimentos.

Además de la información hidrológica y sedimentológica, es importante caracterizar los problemas que se piensa abordar, diagnosticando sus causas antes de proponer los remedios. Aunque el presente trabajo no está centrado en los problemas planteados por la alteración en la dinámica de sedimentos, la revisión que se ha realizado de la literatura ha permitido identificar dos problemas fundamentales que se quiere resolver: la erosión en el cauce del bajo Ebro y la subsidencia del Delta. Debe caracterizarse la influencia que tiene el tránsito sedimentario en los embalses sobre estos dos problemas, para valorar la conveniencia de acometer esta tarea.

Es posible que el problema de la erosión en el cauce se pueda controlar mediante otro tipo de medidas con menos impacto ambiental y socioeconómico que la movilización del sedimento de los embalses, como medidas de estabilización de márgenes, protección del lecho, revegetación o inyección puntual de sedimentos. Para ello deben identificarse y cuantificarse los problemas derivados de la erosión en el cauce y determinar en qué medida dependen de la gestión de sedimentos en los embalses del sistema MRF. Se recomienda realizar una monitorización de los episodios de erosión en el cauce, identificando las zonas expuestas y cuantificando su importancia, al objeto de poder acometer estudios que determinen la mejor manera de afrontar el problema.

Respecto de la subsidencia del Delta, es igualmente posible que el problema no se resuelva mediante la gestión de sedimentos en los embalses. En primer lugar, es necesario caracterizar cuantitativamente el problema. La red de referencias topográficas que se ha instalado en el marco del PIPDE supone una buena base para disponer de observaciones directas y objetivas que permitan cuantificar la subsidencia. Se recomienda realizar una monitorización de esta red mediante nivelación de alta precisión con una cierta periodicidad (por ejemplo, cada diez años) como paso previo al planteamiento de cualquier medida de actuación. Esto permitiría cuantificar objetivamente el problema y establecer las bases para diagnosticar las causas de la posible subsidencia determinando el papel que juega el déficit sedimentario.

La presencia de los embalses en el cauce bajo del Ebro es uno entre múltiples factores que han determinado la situación actual del Delta. Se trata de un entorno antropizado que ha experimentado una profunda transformación en el último siglo y que se encuentra en la actualidad ocupado por la actividad humana. La presencia humana ha llevado asociada la desconexión del río, cuya interacción con el Delta se producía mediante crecidas que desbordan el cauce e inundan el terreno, depositando los lodos. Estas crecidas son ya incompatibles con la explotación agrícola del Delta y otras actividades humanas y por este motivo se adoptan medidas para laminar las puntas de caudal y evitar los desbordamientos del río.

Si fuera viable la movilización de los sedimentos de los embalses, lo que resulta difícil a la vista del estudio realizado, es posible que tampoco se resolviera el problema, debido a la falta de conectividad entre el río y el Delta a través de crecidas extraordinarias. El incremento de la carga en suspensión en el cauce, sin desbordarse, no produciría por sí mismo un efecto directo sobre la subsidencia. La conducción y depósito del sedimento a través de la red de canales de riego plantea numerosos problemas que arrojan serias dudas sobre su viabilidad, debido a la escasa capacidad de captación en el punto de toma, la longitud de los canales y su baja pendiente. Es necesario cuantificar la fracción del sedimento que sería captada por los canales y la posibilidad de transportarlo y aplicarlo al terreno con la infraestructura existente. Se recomienda realizar un estudio de viabilidad de esta solución analizando los datos disponibles para cuantificar el posible efecto de la circulación por la red de canales de agua con un alto contenido de sólidos en suspensión.

## **2.2 Recomendaciones sobre plan de acción**

La movilización de los sedimentos acumulados en los embalses del sistema MRF es una tarea de gran envergadura, con importantes impactos ambientales, económicos y sociales, que debería acometerse en el marco de un plan de acción adecuadamente diseñado. La complejidad de los procesos que intervienen desaconseja suponer que las experiencias internacionales de gestión de sedimentos en los embalses son directamente trasladables al caso de los embalses del bajo Ebro. Hay muchos factores que pueden variar: la situación del embalse con relación al curso del río, la carga anual de sedimentos, la geometría del vaso, la situación, granulometría y grado de compactación de los sedimentos depositados, la configuración de los órganos de desagüe, el

régimen hidrológico, los usos del embalse. También son muy variables las circunstancias externas: los objetivos de la actuación, los beneficios esperados, los factores que determinan los costes, los impactos ambientales, económicos y sociales de la actuación, etc. Por tanto, no resulta adecuado iniciar directamente las operaciones partiendo de los resultados positivos obtenidos en otros casos, sobre todo considerando que no hay experiencias internacionales de éxito en sistemas con características similares al sistema MRF.

Se recomienda elaborar un plan de acción escalonado, en el que las tareas se acometan de forma progresiva, validando cada etapa antes de pasar a la etapa siguiente. La elaboración de este plan de acción debe ser objeto de un estudio específico y queda fuera del alcance de este trabajo, pero, a la vista de la literatura consultada, pueden hacerse algunas recomendaciones sobre cómo abordar el plan de acción. Se recomienda estructurar el plan de acción en cinco fases: caracterización, identificación de objetivos, estudios técnicos, implantación experimental, implantación definitiva.

### ***Caracterización del sistema MRF***

En la primera fase debe caracterizarse la situación específica del sistema MRF basándose en los datos disponibles. En las cuestiones ambientales que son objeto de debate público es frecuente encontrar opiniones que se basan en información procedente de casos distintos al analizado. Existe una tendencia a generalizar y a trasladar experiencias obtenidas en contextos diferentes. La literatura que se ha consultado es un claro ejemplo de este efecto. Hay una gran cantidad de publicaciones que citan las mismas experiencias de gestión de sedimentos ya referidas por otros autores, sin que los autores hayan tenido oportunidad de analizarlas en detalle. En algunos casos las experiencias citadas se reportaron hace varias décadas a partir de medidas tomadas en los primeros años de explotación del embalse y no reflejan la experiencia real que se tiene en la actualidad. La presencia reiterada de la misma referencia en la literatura no le otorga mayor validez; es un simple reflejo del incremento exponencial que la literatura científica ha experimentado en los últimos años.

Se recomienda realizar una caracterización cuantitativa de la situación actual del sistema MRF, basándose en datos objetivos. El análisis de datos es fundamental para caracterizar la situación con criterios objetivos y resolver determinados debates. En la revisión de la literatura realizada en este trabajo se han encontrado numerosas evidencias basadas en datos que describen de forma objetiva el régimen de transporte de sedimentos que se produce actualmente en el sistema MRF. Sin embargo, también se han encontrado manifestaciones que no se han visto confirmadas en el análisis de datos que se ha elaborado.

Por ejemplo, no se ha encontrado que la alteración del régimen hidrológico en el bajo Ebro sea principalmente atribuible a la presencia de los embalses de Mequinenza, Ribarroja y Flix. Estos embalses se operan para producción hidroeléctrica y son pequeños en comparación con la aportación media, por lo que no tienen una gran capacidad de regulación y no alteran significativamente el régimen hidrológico, excepto en los años muy secos, en los que eliminan las crecidas. Se ha encontrado que la alteración del régimen hidrológico es principalmente atribuible a las detracciones realizadas para atender los usos de agua en la cuenca, realizadas aguas arriba de los embalses del sistema MRF.

También se ha encontrado que el volumen de sedimentos que entra al sistema MRF es en la actualidad muy inferior al que hubo en los primeros años de explotación de las presas. Las cifras de transporte de sedimentos en la situación previa a la construcción de los embalses son muy superiores a las estimaciones de la carga que entra actualmente a los embalses. No resultaría adecuado plantear una actuación para restablecer el flujo original de sedimentos, puesto que, incluso si se pudiera conseguir, la situación no sería sostenible.

### ***Identificación de objetivos***

Se recomienda identificar los objetivos de la actuación, como consecuencia de la caracterización de la situación actual. La formulación de objetivos verificables es esencial para definir un plan de actuación. Los objetivos deben definirse para conseguir un fin específico. Por ejemplo, si el fin es evitar la subsidencia del Delta, debe analizarse en qué medida ésta depende del tránsito de sedimentos en los embalses y cuantificar un objetivo deducido de este análisis. Para ello es imprescindible establecer una relación directa entre el fin que se persigue y los objetivos de la actuación. Ello requiere la elaboración de los estudios técnicos que resulten necesarios para establecer las relaciones causales que permitan atribuir al déficit de sedimentos los efectos adversos que se quiere corregir. Los estudios deberán establecer también en qué medida debe modificarse el tránsito sedimentario para mitigar dichos efectos. En la actualidad distintos autores barajan cifras de transporte de sedimentos necesario para corregir la subsidencia del Delta entre 1 Mt/a y 2 Mt/a. Estas cifras son probablemente inalcanzables, puesto que son superiores a la tasa media de deposición observada en los embalses en los últimos años. Se recomienda realizar los estudios específicos que permitan cuantificar esta cifra y vincularla a los efectos que se quiere conseguir.

Se recomienda procurar que los objetivos que se formulen sean necesarios para conseguir el fin, sean factibles técnicamente y sean viables desde el punto de vista de los costes que comportan, entendiendo éstos en su triple dimensión ambiental, económica y social. El estudio realizado en este trabajo ha versado sobre la factibilidad técnica. Se ha encontrado que existen diferencias sustanciales entre los embalses del sistema MRF y los embalses donde se han realizado experiencias de gestión de sedimentos que desaconsejan que dichas experiencias se tomen como base para plantear directamente actuaciones piloto. Para que la formulación de objetivos sea realista es conveniente que se base en experiencias de éxito. Es posible que existan casos de embalses similares a los del sistema MRF donde se haya realizado gestión eficaz de sedimentos, pero no se han encontrado en la revisión realizada en este trabajo a pesar del intenso esfuerzo realizado. Es conveniente continuar la actividad de estudios comparativos, buscando experiencias internacionales que resulten útiles. En el presente trabajo se ha identificado un conjunto de embalses donde se realiza gestión de sedimentos que presentan cierta analogía con los embalses del sistema MRF. Se recomienda actualizar, en la medida de lo posible, la información disponible sobre estas experiencias, ya que algunas referencias bibliográficas utilizadas resultan bastante antiguas.

Existen además otros procedimientos que permiten realizar un análisis preliminar de la factibilidad técnica de los objetivos y su viabilidad, al menos desde el punto de vista económico. Por ejemplo, se puede aplicar el programa RESCON, desarrollado por el Banco Mundial, para realizar un estudio de sensibilidad a distintas variables del problema. Hay también procedimientos simplificados que permiten estimar la eficiencia esperable de las operaciones de lavado en función de las características del vaso, de los sedimentos y de los órganos de desagüe de la presa. Se recomienda que, con carácter previo a la formulación de objetivos, se acometan este tipo de estudios, para intentar que los objetivos sean realistas y acordes con el estado del arte de las técnicas de gestión de sedimentos.

### ***Estudios técnicos***

Los estudios técnicos constituyen la parte central del plan de acción. Los estudios deben proporcionar la información necesaria para la toma de decisiones a partir de resultados que sean cuantitativamente objetivables. Existen en la actualidad medios técnicos que permiten abordar el análisis de los procesos vinculados a la generación, transporte y deposición de sedimentos y que se pueden utilizar para realizar una valoración global del problema. Del mismo modo que se utilizan modelos hidrológicos para la estimación de recursos, modelos hidráulicos para la evaluación de

riesgo de inundación o modelos de explotación de sistemas de recursos hídricos para el análisis de los usos del agua, pueden utilizarse modelos hidrodinámicos para el análisis del flujo de sedimentos.

Se recomienda continuar con el desarrollo de modelos hidrodinámicos con transporte de sedimentos para ganar conocimiento sobre el alcance cuantitativo de estos procesos, mediante el contraste de sus resultados con las observaciones de la red de monitorización. Ya se han realizado actuaciones en esta línea, que han permitido caracterizar el comportamiento hidrodinámico de los embalses y los tramos de río próximos, incluyendo efectos térmicos y transporte de sedimentos. A la vista de la documentación analizada, se considera que estas experiencias han sido satisfactorias y han producido resultados de interés a un coste muy inferior al que habría supuesto la realización de experiencias piloto. Se recomienda ampliar el ámbito de aplicación de estos modelos para incluir todo el tramo de río Ebro hasta la desembocadura en el Delta, incluyendo la red de canales de riego. También debe ampliarse la escala de trabajo de estos modelos para entender el comportamiento del tránsito de sedimentos en los embalses en una escala temporal que abarque varios años. Son numerosas las experiencias de modelación citadas en la literatura que se han orientado al análisis de la acumulación de sedimentos en embalses a largo plazo. Estos modelos permitirían caracterizar la situación actual, comprender mejor los procesos que intervienen y realizar proyecciones a medio y largo plazo que permitirían evaluar escenarios y ayudar a la toma de decisiones.

Los estudios técnicos también permiten identificar, evaluar y seleccionar las mejores estrategias de gestión de sedimentos para el sistema MRF. En este estudio se ha abordado un análisis comparativo donde se han identificado casos de gestión que se consideran similares a los embalses del sistema MRF y se ha realizado una valoración cualitativa de su aplicabilidad. Tras este estudio preliminar, se recomienda acometer un estudio sistemático de evaluación de alternativas, con ayuda de las herramientas de modelación adecuadas, que permita identificar las opciones que resultan técnicamente viables, determinar sus características para alcanzar los objetivos propuestos y realizar una evaluación comparativa que permita seleccionar un conjunto reducido de actuaciones específicas. Normalmente los planes de gestión de sedimento se basan en la puesta en marcha de un conjunto de alternativas que se coordinan para alcanzar el fin perseguido. Estas actuaciones se pueden desarrollar mediante un diseño conceptual concreto, estimando sus costes y sus implicaciones ambientales y sociales, para someter a un proceso de toma de decisión que permita definir la actuación o conjunto de actuaciones que deben ponerse en marcha, si procede.

### ***Implantación experimental***

La complejidad de la situación del sistema MRF permite intuir que el problema no se resolverá con una única actuación, sino que será necesario elaborar un plan de actuaciones coordinadas que proporcione resultados incrementales. Se trata de una cuestión sobre la que no hay gran experiencia, por lo que resulta prudente plantear que su puesta en marcha se realice de forma escalonada, comenzando por actuaciones piloto que permitan validarlas. Ya se han realizado actuaciones piloto en la cuenca, por ejemplo, la generación de pequeñas crecidas de corta duración para alcanzar objetivos ambientales en el cauce. La literatura consultada describe estas experiencias como positivas y puede ser un buen modelo a seguir para la gestión de sedimentos.

También existen experiencias de apertura de desagües profundos o vaciado de embalses: Barasona, Santa Ana, Alloz, Moneva, etc. Estas experiencias, en particular los tres vaciados del embalse de Barasona que están muy bien documentados, indican que no siempre se consiguen los fines que se perseguían y hay numerosas consecuencias colaterales que afectan a un gran número de actores. Se han registrado casos en los que el vaciado no ha permitido evacuar los sedimentos y éstos han tenido que ser retirados mediante excavación, mientras que en otros casos se han producido concentraciones de sedimento tan altas que han resultado perjudiciales para el

ecosistema. La irrupción del pulso de sedimentos ha alterado la dinámica de transporte, dando lugar a depósitos de sedimentación que han ocasionado problemas en el cauce de aguas abajo. En otros casos no ha sido posible realizar la operación prevista, porque podía producir afecciones a usos del agua como captaciones de abastecimiento o piscifactorías. Se recomienda recopilar todas estas experiencias y utilizarlas para la validación de los estudios técnicos que se realicen.

Si se decide acometer alguna actuación de gestión de sedimentos, se recomienda que inicie a pequeña escala y con carácter experimental. Previamente a la fase de implantación experimental se habrán realizado estudios técnicos que definirán esta actuación y estimarán los resultados que son esperables. La implantación progresiva y a pequeña escala permite validar los modelos y realizar las modificaciones necesarias antes de acometer tareas de más envergadura.

### ***Implantación definitiva***

La fase de implantación definitiva sólo se acometería si los estudios técnicos y la implantación experimental proporcionan resultados favorables y existe un consenso entre todos los actores involucrados para poner en marcha el proceso. En este momento no se realizan recomendaciones sobre esta fase, ya que existen grandes incertidumbres sobre la naturaleza de las medidas que podrían ser implantadas.

## **2.3 Recomendaciones sobre integración de actores**

Si se decide plantear la posibilidad de un plan de actuación para la gestión de sedimentos en el bajo Ebro, se recomienda involucrar a los actores afectados para recoger todos los puntos de vista. A lo largo del estudio se ha comprobado que los problemas planteados en el curso bajo del Ebro son consecuencia de la intervención humana en la gestión del río. Esta intervención está plenamente justificada y ha producido efectos globalmente beneficiosos sobre la totalidad de la cuenca e incluso específicamente sobre la zona del Delta del Ebro. Las actuaciones han facilitado la disponibilidad de agua para atender los usos de agua de la cuenca, cuyo efecto socioeconómico no puede ser puesto en cuestión. Además, ha producido un efecto global de reducción del riesgo de inundación que resulta patente por la práctica eliminación de los caudales de avenida excepcionales en el bajo Ebro, que producirían efectos catastróficos. Finalmente, se dispone en la actualidad de un control sobre el flujo de agua en la cuenca que puede ser puesto a disposición de los fines que socialmente se estimen como más adecuados, respetando los derechos legales de los concesionarios.

Las alternativas de gestión de sedimentos que se podrían plantear tendrán repercusión sobre un gran número de actores interesados, aunque sólo sea para contribuir a su financiación. Para que la iniciativa pueda tener éxito es necesario incorporar a todos ellos en el proceso de toma de decisión. Los actores más evidentes son las administraciones competentes, los concesionarios de la explotación hidroeléctrica y titulares de los embalses, los municipios ribereños, los regantes del bajo Ebro y los que toman en el propio embalse, los grupos ecologistas, etc., en el marco del respeto al funcionamiento de los órganos colegiados de la Confederación Hidrográfica del Ebro. El resto de usuarios de agua en la cuenca se pueden ver afectados por las medidas de gestión que se establezcan. Otros actores, como la comunidad científica, los partidos políticos o los medios de comunicación, pueden tener un interés indirecto y legítimo. Se recomienda establecer un procedimiento para identificar a los actores y canalizar su participación en el proceso. Mediante este procedimiento se podría dar a conocer el conocimiento obtenido en los estudios técnicos, incorporar de manera efectiva las actividades de otros actores con responsabilidad de gestión, recibir las opiniones de los afectados y facilitar los canales de comunicación adecuados para que se pueda trabajar de forma colaborativa.





## BIBLIOGRAFÍA

Alatorre LC (2008): Erosión del suelo y fuentes de sedimento en la cuenca del río Ésera (Pirineo Central) Análisis espacial y dinámica temporal mediante técnicas de simulación y teledetección. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía y Ordenación del territorio. Universidad de Zaragoza.

Alatorre, L.C.; Beguería, S.; García-Ruiz, J.M. (2010): Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology* 391, 109–123

Alayo Manubens JC (2017): La Construcción de la Central de Flix (1941-1948). Cuarto Simposio Internacional de Historia de la Electrificación. Barcelona.

Alcázar J, Ferrán I (1998): La vegetación de ribera de los ríos Ésera y Cinca en el tramo afectado por el vaciado del embalse de Joaquín Costa. *Limnética* 14, pp 73-82.

Althaus JJ, De Cesare G (2006): ALPRESERV: Sustainable Sediment Management in Alpine Reservoirs considering ecological and economical aspects. Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München.

Annandale GW (1987): *Reservoir Sedimentation*. Elsevier.

Annandale GW (2013): *Quenching the Thirst Sustainable Water Supply and Climate Change*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

Annandale GW, Morris GL, Karki, P (2016): *Extending the life of Reservoirs., Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower*. World Bank Group.

Aras T (2009): *Cost Analysis of Sediment Removal Techniques From Reservoir*. MSc Thesis. The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University.

Arbat-Bofill M (2015): *Distribución de Temperatura y Velocidad en Embalses*. Análisis numérico-experimental aplicado a los embalses de Sau (Ter) y Ribarroja (Ebro). Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

Arbat-Bofill, M.; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Niñerola D.; Dolz, J. (2014b): *Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain)*. *Reservoir Sedimentation*, Schleiss et al. (eds), Taylor & Francis, pp 99-107.

Arbat-Bofill, M.; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Niñerola D.; Dolz, J.; Palau, A. (2014a): *Hydrodynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain): Water temperature, water velocities and water age*. *River Flow 2014*, Schleiss et al. (eds), Taylor & Francis, pp 1737-1744.

Armengol J (1998): *Efectos ecológicos del dragado y vaciado del embalse de Barasona*. *Limnética* 14, pp 17-34.

Armour D, Hewitt M, Malia J, Murray R (2016): *Managing the Environmental Risk from Reservoir Draw Down. Dams – Benefits and Disbenefits; Assets or Liabilities?* ICE. 281-293.

Arnáez J (2014): *Los estudios sobre la erosión del suelo. Aportaciones del profesor José María García Ruiz*. *Geoecología. Cambio ambiental y paisaje*. 231-245.

Arnáez, J. (2014): Los estudios sobre la erosión de suelo: aportaciones del profesor José María García Ruiz. *Geoecología, cambio ambiental y paisaje. Homenaje al profesor José María García-Ruiz, Arnáiz, González-Sampérez, Lasanta, Valero Garcés* (eds), CSIC, pp 231-245.

ASCE (2011): *Sediment Dynamics upon Dam Removal*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice N. 122. Papanicolaou, T., Barkdoll E.D. eds.

Atkinson E (1996): *The feasibility of Flushing Sediment From Reservoirs*. HR Wallingford Technical Report OD 137.

Auel C, Berchtold T, Boes R (2010): *Sediment Management in the Solis Reservoir Using a Bypass Tunnel*. 8th ICOLD European Club Symposium: 438-443.

Auel C, Boes RM (2011): *Sediment bypass tunnel design – hydraulic model tests*. 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels.

Auel C, Boes RM (2012): *Sediment bypass tunnel design – review and outlook*. Dams and reservoirs under Changing Challenges. Schleiss & Boes (eds): 403-412.

Auel C, Boes RM (2012): *Sustainable Reservoir Management Using Sediment Bypass Tunnels*. Vingt-Quatrième Congrès des Grands Barrages, Tokyo, Q92-R16.

Auel C, Kantoush SA, Sumi T (2016): *Positive Effects of Reservoir Sedimentation Management on Reservoir Life - Examples from Japan*. International Symposium on Appropriate technology to ensure proper Development, Operation and Maintenance of Dams in Developing Countries.

Avendaño C, Cobo R (1998): *Seguimiento de los sólidos en suspensión durante el vaciado del embalse de Joaquín Costa*. *Limnética* 14, pp 113-120.

Avendaño Salas, C.; Cobo Rayán, R.; Sanz Montero, E.; Gómez Montaña, J.L (1997): *Capacity situation in Spanish reservoirs*. Proceedings XIX ICOLD World Congress, Q 74, R.53, pp 849-862.

Avendaño Salas, C.; Sanz Montero, E.; Cobo Rayán, R.; Gómez Montaña, J.L (1997): *Sediment yield at Spanish reservoirs and its relationship with the drainage basin area*. Proceedings XIX ICOLD World Congress, Q 74, R.53, pp 863-874.

Avendaño-Salas C, Sanz Montero E, Cobo-Rayán R (2000): *State of the art of reservoir sedimentation management in Spain*. Proceedings of International Workshop and Symposium on Sedimentation Management. 135-142.

Balash JC, Vericat D, Batalla RJ (2007): *Deposición de sedimentos finos durante una crecida en un tramo del Ebro medio*. *Rev. C & G.*, 21 (1-2): 41-55.

Barceló D, Petrovic M (2011): *The ebro River Basin*. The Handbook of Environmental Chemistry 13. Springer.

Batalla RJ (2003): *Sediment deficit in rivers caused by dams and instream gravel mining. A review with examples from NE Spain*. *Rev. C. & G.*, 17 (3-4): 79-91.

Batalla RJ, Kondolf GM, Gomez CM (2004): *Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin, NE Spain*. *Journal of Hydrology* 290: 117–136

Batalla RJ, Vericat D (2009): *Hydrological and sediment transport dynamics of flushing flows: implications for river management in large Mediterranean rivers*. *River Research and Applications* 25, pp 297–31

Batalla RJ, Vericat D (2011a): An appraisal of the contemporary sediment yield in the Ebro Basin. *Journal of Soils and Sediments*, 11, pp 1070–1081

Batalla RJ, Vericat D (2011b): Hydrology and Sediment Transport. The Ebro River Basin, D. Barcelo and M. Petrovic (eds.), *Handbook of Environmental Chemistry* 13: 21–46

Batalla RJ, Vericat D (2011c): A Review of Sediment Quantity Issues: Examples from the River Ebro and Adjacent Basins (Northeastern Spain). *Integrated Environmental Assessment and Management*, 7(2), pp 256–268

Batalla RJ, Vericat 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: 37-44.

Batalla RJ, Vericat D, Palau A (2008): Efectos de las presas en la dinámica geomorfológica del tramo bajo del Ebro. *Crecidas controladas*. *Ingeniería del Agua*, 15, pp 243-255

Batalla RJ, Vericat D, Tena A (2014): The fluvial geomorphology of the lower Ebro (2002-2013): Bridging gaps between management and research. *Cuadernos de Investigación Geográfica* 40(1): 29-51

Bayერი (1934-35). *Historia de Tortosa y su comarca*.

Bieri M, Müller M, Boillat JL, Schleiss AJ (2012): Modeling of Sediment Management for the Lavey Run-of-River HPP in Switzerland. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(4): 340-347.

Bilal A, Dai W, Larson M, Beebo QN, Xie Q (2017): Qualitative simulation of bathymetric changes due to reservoir sedimentation: A Japanese case study. *PLoS ONE* 12(4).

Bladé Castellet E, Arbat-Bofill M, Sánchez-Juny M, Dolz Ripollés J, Cobos Campos G, Polanco Fernández, L (2010): Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro) XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta Del Este, Uruguay

Boes RM, Auel C, Hagmann M, Albayrak I (2014): Sediment bypass tunnels to mitigate reservoir sedimentation and restore sediment continuity. *Reservoir Sedimentation – Schleiss et al. (Eds)*: 221-228.

Boillat JL, Martinerie R, Garcia J, De Cesare G (2008): La gestion sédimentaire en milieu alpin. *La Houille Blanche*, 04, pp 122-129.

Bronstert A, de Araújo JC, Batalla RJ et al. (2014): Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments. *J. Soils Sediments* 14:2001–2018.

Brune GM (1953): Trap efficiency of reservoirs. *Trans Am Geophys Union* 34(3):407–418.

Bube K, Trimble S (1986): Revision of the Churchill Reservoir Trap Efficiency Curves Using Smoothing Splines. *Water Resources Bulletin*, 22(2), 305-309.

Buendia C, Herrero A, Sabater S, Batalla RJ (2016): An appraisal of the sediment yield in western Mediterranean river basins. *Science of the Total Environment* 572: 538-553

Cao Z, Li J, Pender G, Liu Q (2015): Whole-Process Modeling of Reservoir Turbidity Currents by a Double Layer-Averaged Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(2): 04014069.

Carreras Candi (1911): *Geografía general de Catalunya*. Edicions Catalanas.

Caspani D (2014): DELTALAB: Designing delta ecosystems. The Ebro Delta. Master Thesis. Landscape Architecture. Wageningen University.

Castillo Elsitdié LG, Álvarez Enjo A, Carrillo Sánchez JM (2013): Modelación numérica de sedimentación y lavado de sedimentos mediante "flushing" en el embalse Paute-Cardenillo. III Jornadas de Ingeniería del Agua. La protección contra los riesgos hídricos.

Castillo LG, Carrillo JM (2015): Modelación numérica de la sedimentación y lavado de embalses. X Jornadas Españolas de Presas.

Catalán (1969): Química del agua. Ed Blume.

Chamoun S, De Cesare G, Schleiss AJ (2016): Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review. International Journal of Sediment Research 31, 195-204.

Chaudhry MA, Ur-Rehman H (2012): Worldwide Experience of Sediment Flushing Through Reservoirs. Mehran University Research Journal of Engineering & Technology, 31(3):395-408.

Chaudhuri D (2006): Life of Maithon Reservoir on Ground of Sedimentation: Case Study in India. Journal of Hydraulic Engineering, 132(9), 875-880.

Chaudhuri D, Banerjee S (2013): Reservoir Sedimentation and Its Remedies-A Case Study On Panchet Reservoir. India Water Week 2013.

CHE (1995): Vaciado del embalse de Joaquín Costa. Vídeo accesible en [https://www.youtube.com/watch?v=\\_3rxTgjk5s](https://www.youtube.com/watch?v=_3rxTgjk5s).

CHE (1996): Diagnóstico y Gestión Ambiental de Embalses en el Ámbito de la Cuenca del Ebro. Embalse de Ribarroja. Limnos.

CHE (2010): Asistencia técnica para el control de macrófitos: Mejora de la gestión de los embalses del Bajo Ebro. Informe final.

CHE (2013): Plan Hidrológico del Ebro. Anejo VI: Sistemas de Explotación y Balances.

CHE (2014): Extracto del estudio sobre el régimen de caudales ecológicos en la desembocadura del río Ebro.

Climate Resilient Mekong (2014): Technical memorandum on options for sediment passage through Sambor Dam.

Cobo, R. (2008): Los sedimentos de los embalses españoles. Ingeniería del Agua, 15 (4), pp 231-241.

Costa AV (2014): Influencia de la temperatura de los ríos Ebro y Segre en el comportamiento térmico del Embalse de Ribarroja. Trabajo Fin de Master. Universitat Politècnica de Catalunya.

Day J, Ibáñez C, Scarton F, Pont D, Hensel P, Day J, Lane R (2011): Sustainability of Mediterranean Deltaic and Lagoon Wetlands with Sea-Level Rise: The Importance of River Input. Estuaries and Coasts 34:483-493.

Day JW, Maltby E, Ibáñez C (2006): River basin management and delta sustainability: A commentary on the Ebro Delta and the Spanish National Hydrological Plan. Ecological Engineering 26:85-99.

De Cesare G, Schleiss AJ, Jenzer-Althaus JM (2011): Innovative approaches to sediment management. Hydropower and Dams, Vol 3, pp. 68-72.

De Vincenzo A, Molino AJ, Molino B, Scorpio V (2017): Reservoir rehabilitation: The new methodological approach of Economic Environmental Defence. *International Journal of Sediment Research*, 32: 288–294.

DeBoer J, Webber CA, Dixon DA, Pope KL (2016): The influence of a severe reservoir drawdown on springtime zooplankton and larval fish assemblages in Red Willow Reservoir, Nebraska. *Journal of Freshwater Ecology*, 31(1): 131-146.

Dolz Ripollés J, Gómez Valentín M, Nieto Romeral J (1997): El Ebro en el Delta. *Revista de Obras Públicas* 3368, pp 7-14.

Eftekharzadeh S (1987): Sediment bypass system for impounding reservoirs. PhD Dissertation. The University of Arizona.

Elzinga L (2017): Dredging of Reservoirs. MSc Thesis. Delft University of Tecnology.

Emamgholizadeh S, Bina S, Fathi-Moghadam S, Ghomeyshi M (2006): Investigation and Evaluation of the Pressure Flushing Through Storage Reservoir. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 1(4): 7-16.

Emmanouil A (2017): Analysis of measured data of sediment nourishments in the Rhine River. MSc Thesis. Delft University of Tecnology.

Fan J, Morris GL (1992a): Reservoir Sedimentation, I: Delta and Density Current Deposits, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118 (3), 354-369.

Fan J, Morris GL (1992b): Reservoir Sedimentation, II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118 (3), 370-384.

Fathi-Moghadam M, Emamgholizadeh S, Bina M Ghomeshi M (2010): Physical modelling of pressure flushing for desilting of non-cohesive sediment, *Journal of Hydraulic Research* 48(4): 509-514.

Fernández Carrasco P, Avendaño Salas, C., Cobo Rayán, R. (2003): Gestión comparada de sedimentos en embalses. *Proceedings of IWRA XI World Water Congress, Madrid*

Fruchard F, Camenen B (2012): Reservoir sedimentation: different type of flushing - friendly flushing example of Genissiat dam flushing. *ICOLD International Symposium on Dams for a changing world*.

George MW, Hotchkiss RH, Huffaker R (2017): Reservoir Sustainability and Sediment Management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 143(3): 04016077.

George MW, Hotchkiss RH, Huffaker R (2017): Reservoir Sustainability and Sediment Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 4016077.

Ghumman AR, ul Haq I (2015): Investigation of Flushing Sediments from Large Reservoir Using Numerical Methods. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(3): 1444-1456.

Gibson S, Boyd P (2016): Monitoring, Measuring, and Modeling a Reservoir Flush on the Niobrara River in the Sandhills of Nebraska. *Proceedings of RiverFlow Conference*.

González C (2007): Modelització de la hidrodinàmica d'un embassament. Aplicació al cas de l'embassament de Riba-roja al riu Ebre. Tesina de Master. Universitat Politècnica de Catalunya.

Gorría (1877): Deseccación de las marismas y terrenos pantanosos denominados de Los Alfaques. Ministerio de Agricultura.

Gorría (1880): Navegación y riegos en la región inferior del Ebro, 32 pp.

Granado-Lorencio C, Encina I, Escot-Muñoz C, Mellado-Álvarez E, Rodríguez-Ruiz A (1998): Estudio ictiológico en el embalse de Joaquín Costa (río Ésera, Huesca). *Limnética* 14, pp 35-46.

Grantham TE, Figueroa R, Prat N (2013): Water management in mediterranean river basins: a comparison of management frameworks, physical impacts, and ecological responses. *Hydrobiologia* 719:451–482.

Gual Pérez MLI, Sebastián López M (2015): Problemática ambiental derivada del vaciado de embalses: propuesta de protocolo de desembalse. Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación: 1659-1668.

Guillén, J. y Palanques, A. (1992): Sediment dynamics and hydrodynamics in the lower course of a river highly regulated by dams: the Ebro River. *Sedimentology* 39, 567-579.

Guillén, J., Díaz, J.I. y Palanques, A. (1992): Cuantificación y evolución durante el siglo XX de los aportes de sedimento transportado como carga de fondo en el río Ebro al medio marino.

Gupta H, Kao SJ, Dai M (2012): The role of mega dams in reducing sediment fluxes: A case study of large Asian rivers. *Journal of Hydrology* 464-465 447-458.

Halcrow (2011): Sedimentation in storage reservoirs. Report for the Department of the Environment, Transport and the Regions.

Hanmaiahgari PR, Gompa NR, Pal D, Pu JH (2018): Numerical modeling of the Sakuma Dam reservoir sedimentation. *Nat Hazards* 91:1075–1096.

Hassanzadeh Y (1995): The Removal of Reservoir Sediment. *Water International*, 20: 151-154.

Healy KM, Cox AL, Hanes DM, Chambers LG (2015): State of the practice of sediment management in reservoirs: minimizing sedimentation and removing deposits. Proceedings of the 5th Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference and the 10th Federal Interagency Sedimentation Conference.

Herrero A (2007): Estudio sobre la capacidad de resuspensión de las corrientes de densidad. Aplicación al caso del embalse de Flix. Tesina de Master. Universitat Politècnica de Catalunya.

Herrero A, Vila J, Eljarrat E, Ginebreda A, Sabater S, Batalla RJ, Barceló D (2018): Transport of sediment borne contaminants in a Mediterranean river during a high flow event. *Science of the Total Environment* 633: 1392-1402

Hidayat F, Juwono PT, Suharyanto A, Pujiraharjo A, Legono D, Sisinggih D, Neil D (2018): Sediment Management of Reservoirs in Volcanic Area: Case of Wlingi and Lodoyo Reservoirs in Indonesia. Chapter 6 of *Sedimentation Engineering*. InTechOpen.

Hotchkiss RH (1990): Reservoir Sedimentation and Sediment Sluicing: Experimental and Numerical Analysis. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory Technical Report n. 304. University of Minnesota.

Hotchkiss RH, Huang X (1995): Hydrosuction sediment-removal systems (HSRS): principles and field test. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(6): 479-489.

Hu P, Cao Z, Pender G, Tan G (2012): Numerical modelling of turbidity currents in the Xiaolangdi reservoir, Yellow River, China. *Journal of Hydrology* 464-465 41-53.

Ibàñez C, Alcaraz C, Caiola N, Rovira A, Trobajo R, Alonso M, Duran C, Jiménez PJ, Munné A, Prat N (2012): Regime shift from phytoplankton to macrophyte dominance in a large river: top-down versus bottom-up effects. *Science of the Total Environment* 416, pp 314-322

Ibàñez C, Canicio A, Day JW, Curcó A (1997): Morphologic development, relative sea level rise and sustainable management of water and sediment in the Ebre Delta, Spain. *Journal of Coastal Conservation* 3, pp 191-202

Ibàñez C, Prat N, Canicio A (1996): Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary. *Regulated Rivers: Research and Management*, 12, pp 51-62.

Ibàñez C, Sharpe PJ, Day JW, Day JN, Prat N (2010): Vertical Accretion and Relative Sea Level Rise in the Ebro Delta Wetlands (Catalonia, Spain). *Wetlands* 30, pp 979-988

Ibàñez, C. (1993): Dinàmica hidrològica i funcionament ecològic del tram estuari del Ebre. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.

Infraeco (2006): Elaboración del registro de zonas protegidas, determinación del potencial ecológico de los embalses, desarrollo de programas específicos de investigación. Embalse de Ribarroja.

International Commission on Large Dams (2006): Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems. ICOLD.

Jenzer Althaus J, De Cesare G, Boillat JL, Schleiss A (2009): Turbidity currents at the origin of reservoir sedimentation, case studies. *Vingt Troisième Congrès des Grands Barrages*, Brasilia, Q89-R24.

Ji U (2006): Numerical Model For Sediment Flushing at the Nakdong River Estuary Barrage. PhD Dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University.

Jokiel C, Detering M (2011): An Innovative Sediment Removal Solution—Application and Project Experiences.

Kamphuis J, Meerse K (2017): Integrated Sediment Management in Rivers and Reservoirs. *American Journal of Civil Engineering* 5(6): 315-319.

Kantoush SA (2008): Experimental Study on the Influence of the Geometry of Shallow Reservoirs on Flow Patterns and Sedimentation by Suspended Sediments. Tesis doctoral. Faculté de L'Environnement Naturel, Architectural et Construit. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Kantoush SA, Sumi T (2010): River Morphology and Sediment Management Strategies for Sustainable Reservoir in Japan and European Alps. *Annals of Disaster Prevention Research Institute* 53B: 821-839.

Kashiwai J (2005): Reservoir Sedimentation and Sediment Management in Japan

Kawashima S (2007): Conserving reservoir water storage: An economic appraisal, *Water Resources Research*, 43, W05417.

Kawashima S, Johndrow TB, Annandale GW, Shah F (2003): Reservoir Conservation, Volume II. RESCON Model and User Manual. World Bank.

Khan SM (1985): Management of River and Reservoir Sedimentation in Pakistan, *Water International*, 10(1): 18-21.

Kimbrel S, Collins K, Randle T (2015): Formulating guidelines for reservoir sustainability plans. Proceedings of the 3rd Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, Reno, Nevada, USA, pp 1456-1467.

Kondolf GH, Gao Y, Annandale GW (2014): Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2, 256–280.

Kondolf GM, Farahani A (2018): Sustainably Managing Reservoir Storage: Ancient Roots of a Modern Challenge. *Water*, 10, 117.

Kondolf GM, Rubin ZK, Minear JT (2014): Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation, *Water Resources Research*, 50, 5158–5169.

Kondolf M, Gao Y, Annandale GW (2014): Sustainable Sediment Management in Reservoirs and Regulated Rivers: Experiences from Five Continents. *EOS*.

Lai JS, Shen HW (1996): Flushing sediment through reservoirs, *Journal of Hydraulic Research* 34(2): 237-255.

Lai YG, Wu K (2018): Reservoir Turbidity Current Management: A Modeling Study of Sediment Bypass Tunnels at Shihmen Reservoir, Taiwan. *Water* (In press).

Lee FZ, Lai JS, Tan YC, Sung CC (2014): Turbid Density Current Venting through Reservoir Outlets. *KSCE Journal of Civil Engineering* 18(2):694-705.

Lobera G, Batalla RJ, Vericat D, López-Tarazón JA, Tena A (2016): Sediment transport in two Mediterranean regulated rivers. *Science of the Total Environment* 540, 101–113

Lobera G, Besné P, Vericat, D, López-Tarazón, JA, Tena A, Aristi I, Díez JR, Ibisate A, Larrañaga A, Elozegi A, Batalla RJ (2015): Geomorphic status of regulated rivers in the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment* 508, 101–114.

López P, Dolz J, Arbat M, Armengol J (2012): Physical and chemical characterisation of superficial sediment of the Ribarroja Reservoir (River Ebro, NE Spain). *Limnetica*, 31 (2): 327-340

López-Tarazón JA, Batalla RJ (2014): Dominant discharges for suspended sediment transport in a highly active Pyrenean river. *Journal of Soils and Sediments* 14, pp 2019–2030

Martínez Casanovas JA, Poch RM (1998): Estado de conservación de los suelos de la cuenca del embalse Joaquín Costa. *Limnética* 14, pp 83-92.

Martínez Salvador A, Conesa García C, García Lorenzo R, Pérez Cutillas P (2015): Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP. Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva (cuenca del río Segura). *Limnetica*, 34(1): 41-56.

Mefford B, Stowell H, Heinje C (2008): Robles Diversion Dam High Flow and Sediment Bypass Structure. Ventura, California. Physical Model Study. Hydraulic Laboratory Report HL-2008-07. US Bureau of Reclamation.

Minear J T, Kondolf M (2009): Estimating reservoir sedimentation rates at large spatial and temporal scales: A case study of California, *Water Resources Research*, 45, W12502.



Molinet V (2007): Recuperación del Delta del Ebro I. Recuperación de la configuración del Delta del Ebro. Tesina de Master. Universitat Politècnica de Catalunya.

Möller G, Boes R, Theiner D, Fankhauser A, De Cesare G, Schleiss A (2011): Hybrid modeling of sediment management during drawdown of Räterichsboden reservoir. Dams and Reservoirs under Changing Challenges – Schleiss & Boes (Eds).

Morillo M, García de Jalón D (1998): Efectos del vaciado del embalse de Barasona en las comunidades de peces fluviales. *Limnética* 14, pp 47-58.

Morris GL (2014): Sediment Management and Sustainable Use of Reservoirs, in *Modern Water Resources Engineering*, Wang, Yang eds, Springer.

Morris GL (2015): Management Alternatives to Combat Reservoir Sedimentation. International Workshop on Sediment By-Pass Tunnels.

Morris GL, Annandale GW, Hotchkiss RH (2008): Reservoir Sedimentation. Capítulo 12 de *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, American Society of Civil Engineers, pp 579-612.

Morris GL, Fan J (1998): Reservoir sedimentation handbook: Design and management of dams, reservoirs and watersheds for sustainable use. McGraw Hill.

Müller PJ, De Cesare G (2009): Sedimentation Problems in the Reservoirs of the Kraftwerke Sarganserland - Venting of Turbidity Currents as the Essential Part of the Solution. *Vingt Troisième Congrès des Grands Barrages, Brasilia*, Q89-R21.

Muñoz, I. (1990): Limnología de la part baixa del riu Ebre i els canals de reg: Els factors físico-químics, el fitoplàncton i els macroinvertebrats bentònics. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.

Muñoz, I. y Prat, N. (1989): Effects of river regulation on the lower Ebro river. *Regulated Rivers*, 3, pp 345-354.

Muñoz, I.(1998): Carbono, nitrógeno y fósforo en la parte baja del río Ebro y en los canales de riego del Delta. *Oecología Aquatica* 11: 23-53.

Navarro E, García-Berthou E, Armengol J (2010): La calidad ecológica de los embalses. *Investigación y ciencia*. Feb 2010, 80-88.

Navas A, Valero B, Machín J, Walling D (1998): Los sedimentos del embalse de Joaquín Costa y la historia de su depósito. *Limnética* 14, pp 93-112.

Négrel P, Roy S, Petelet-Giraud E, Millot R, Brenot A (2007): Long-term fluxes of dissolved and suspended matter in the Ebro River Basin (Spain). *Journal of Hydrology* (2007) 342, 249– 260

Négrel P, Roy S, Petelet-Giraud E, Millot R, Brenot A (2007): Long-term fluxes of dissolved and suspended matter in the Ebro River Basin (Spain). *Journal of Hydrology* 342: 249–260.

Nelson, C.H. (1990): Estimated post-Messinian sediment supply and sedimentation rates on the Ebro continental margin, Spain. *Marine Geology*, 95, pp 395 418.

Owens PN, Batalla RJ, Collins AJ, et al. (2005): Fine-grained sediment in river systems: environmental significance and management issues. *River Research and Applications*, 21, pp. 693-717.

Palanques (1987): Dinámica sedimentaria, mineralogía, y micro-contaminantes inorgánicos de las suspensiones y de los sedimentos superficiales en el margen continental del Ebro. Tesis Doctoral, UPC.

Palanques, A., Plana, F. and Maldonado, A., 1990. Recent influence of man on Ebro margin sedimentation system (Northwestern Mediterranean Sea). *Marine Geology*, 95: 247-263

Palau A (1998): Estudio limnológico del ecosistema fluvial afectado por los vaciados del embalse de Barasona. *Limnética* 14, pp 1-15.

Palau A (2006): Integrated environmental management of current reservoirs and regulated rivers. *Limnética*, 25(1-2): 287-302

Palmieri A, Shah F, Annandale GW, Dinar A (2003): Reservoir Conservation, Volume I. The RESCON Approach. World Bank.

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

Peña Martínez R, Ruiz Verdú A, Serrano Pérez ML (1998): Aplicación de la teledetección al estudio de la difusión de sólidos en suspensión en los sucesivos vaciados de Barasona. *Limnética* 14, pp 121-127.

Piqué G, Batalla RJ, Sabater S (2016): Hydrological characterization of dammed rivers in the NW Mediterranean region. *Hydrological Processes Journal* 30, pp 1691–1707

Polo MJ, Rovira A, García-Contreras D, Contreras E, Millares A, Aguilar C, Losada MA (2016): Reservoir impacts downstream in highly regulated river basins: the Ebro Delta and the Guadalquivir estuary in Spain. *Proc. IAHS*, 373, pp 45–49

Prats J, Armengol J, Marcé R, Sánchez-Juny M, Dolz J (2011): Dams and reservoirs in the lower Ebro River and its effects on the river thermal cycle. In: Barceló D, Petrovich M (eds) *The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 13. The Ebro River Basin. Springer, Berlin, pp 77–95

Prats J, Morales-Baquero R, Dolz J, Armengol J (2014): Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. *Ingeniería del Agua* 18.1: 83-97

Prats J, Val R, Armengol J, Dolz J (2007): A methodological approach to the reconstruction of the 1949–2000 water temperature series in the Ebro River at Escatrón. *Limnética* 26:293–306

Prats Rodríguez J, Val Segura R, Arbat-Bofill M, Martí Cardona B, Ninyerola Chifoni D, Armengol Bachero J, Dolz Ripollés J (2015): Trabajos de seguimiento de la temperatura del agua en el curso inferior del río Ebro (España), 1er Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología, Querétaro, México.

Provansal M, Dufour S, Sabatier F, Anthony EJ, Raccasi G, Robresco, S (2014): The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: Hydropower dams versus other control factors. *Geomorphology* 219, 27-41.

Rahmani V, Kastens JH, de Noyelles F et al. (2018): Examining Storage Capacity Loss and Sedimentation Rate of Large Reservoirs in the Central U.S. *Great Plains. Water* 10, 190.

Ramsdell T (2011); Technical inputs to dredging cost estimates. *Proceedings, WEDA XXXI Technical Conference & TAMU*.

Randle T, Kimbrel S, Collins K (2015): Reservoir sustainability workshop and National Reservoir Sedimentation Team. Proceedings of the 3rd Joint Federal Interagency Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, Reno, Nevada, USA, pp 1278-1288.

Ribé Forn M, Bladé Castellet E, Dolz Ripollès, J (2017): Modelación numérica bidimensional de la dinámica sedimentaria del río Ebro en Castejón. Jornadas de Ingeniería del Agua, Coruña.

Rosell C, Nadal J, Cahill S, Campeny R, Parpal J, Pedrocchi V, Ruiz-Olmo J (1998): Efectos del vaciado del embalse de Joaquín Costa sobre anfibios, aves y mamíferos vinculados al ambiente de ribera. *Limnética* 14, pp 59-72.

Roura, M. (2003): Incidencia de l'embassament de Mequinenza en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat de l'aigua del riu Ebre. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.

Roura, M.; Armengol, J.; Jaime, F.; Dolz, J. (2008b): Incidencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. *Ingeniería del Agua* 15(4): 221-229.

Roura, M.; Jaime, F.; Armengol, J.; Dolz, J. (2008a): Incidencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. VIII Jornadas Españolas de Presas. CNEGP.

Rovira A, Alcaraz C, Ibàñez C (2012): Spatial and temporal dynamics of suspended load at-a-crosssection: The lowermost Ebro River (Catalonia, Spain). *Water Research* 46, pp 3671-3681

Rovira A, Ibàñez C (2007): Sediment Management Options for the Lower Ebro River and its Delta. *Journal of Soils and Sediments* 7(5), 285–295.

Rovira A, Ibàñez C, Martín-Vide JP (2015): Suspended sediment load at the lowermost Ebro River (Catalonia, Spain). *Quaternary International*, 388, pp 188-198

Salgado A (2009): Optimització de paràmetres del model hidrodinàmic de l'embassament de Ribarroja al riu Ebre. Tesina de master. Universitat Politècnica de Catalunya.

Samadi Boroujeni H (2012): Sediment Management in Hydropower Dam (Case Study – Dez Dam Project). Capítulo 6 de *Hydropower – Practice and Application* (Samadi-Boroujeni Ed.), pp 115-142. InTech. Disponible en [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

Sánchez Arcilla A, Jiménez JA, Geronch G, Nieto Romeral J (1997): El problema erosivo en el Delta del Ebro. *Revista de Obras Públicas* 3368, pp 23-32.

Sanz Montero, M.E.; Avendaño Salas, C.; Cobo Rayán, R. (2001): Influencia del complejo de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix (río Ebro) en la morfología del cauce situado aguas abajo. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14(1-2), pp 3-17

Sanz Montero, M.E.; Cobo Rayán, R.; Gómez Montaña, J.L.; Avendaño Salas, C. (1998): Composición de los sedimentos acumulados en embalses españoles. *Ingeniería del Agua*, 5 (4), pp 21-28.

Schellenberg G, Donnelly CR, Holder C, Ahsan R (2017): Dealing with Sediment: Effects on Dams and Hydropower Generation. *Hydro Review Worldwide* 02/22/2017. [HydroWorld.com](http://HydroWorld.com)

Schleiss AJ, De Cesare G (2010): Physical Model Experiments on Reservoir Sedimentation. *HydroLink*, 4/2010, 54-57. 2010

Schleiss AJ, Franca MJ, Juez C, De Cesare G (2016): Reservoir sedimentation, *Journal of Hydraulic Research*, DOI:10.1080/00221686.2016.1225320.

Serra Raventós J (1997): El Sistema sedimentario del Delta del Ebro. *Revista de Obras Públicas* 3368: 15-22.

Sloff CJ, Omer AYA, Heynert KV, Mohamed YA (2015): Design and modeling of reservoir operation strategies for sediment management. RCEM 2015: 9th Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Iquitos, Peru, 30 August-3 September 2015.

Snoussi M, Haïda S, Imassi S (2002): Effects of the construction of dams on the water and sediment fluxes of the Moulouya and the Sebou Rivers, Morocco. *Regional Environmental Change* 3, 5–12.

Solans A (2015): Guidelines for the design of an environmental flow regime program at the regional scale: Application of the ELOHA framework in the Ebro River Basin. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. Universidad Politécnica de Madrid.

Stefanidis P, Stefanidis S (2012): Reservoir sedimentation and mitigation measures. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 17: 113–117.

Strand RI, Pemberton EL (1982): Reservoir Sedimentation. Bureau of Reclamation

Sumi T (2006): Reservoir sediment management measures and necessary instrumentation technologies to support them. The 6th Japan-Taiwan Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation.

Sumi T (2008): Evaluation of Efficiency of Reservoir Sediment Flushing in Kurobe River. Fourth International Conference on Scour and Erosion.

Sumi T, Kantoush S (2016): Sediment Management Option by Sediment Sluicing in the Mimi River, Japan. 12th International Conference on Hydroscience & Engineering Hydro-Science & Engineering for Environmental Resilience.

Sumi T, Kantoush SA (2010): Integrated management of reservoir sediment routing by flushing, replenishing, and bypassing sediments in Japanese river basins. In: *International Symposium on Ecohydrology, Kyoto*. pp 831–838.

Sumi T, Kantoush SA (2010): Integrated Management of Reservoir Sediment Routing by Flushing, Replenishing, and Bypassing Sediments in Japanese River Basins. *Proceedings of the 8th International Symposium on Ecohydraulics*: 831-838.

Sumi T, Kantoush SA, Suzuki S (2012): Performance of Miwa Dam Sediment Bypass Tunnel: Evaluation of Upstream And Downstream State and Bypassing Efficiency. *Vingt-Quatrième Congrès des Grands Barrages, Tokyo*, Q92-R38.

Sumi T, Kobayashi K, Yamaguchi K, Takata Y (2009): Study on the applicability of the asset management for reservoir sediment management. Conference paper. ICOLD.

Sumi T, Okano M, Takata Y (2004): Reservoir Sedimentation Management with Bypass Tunnels in Japan. *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*.

Tejwani KG (1984): Reservoir Sedimentation in India—Its Causes, Control, and Future Course of Action, *Water International*, 9(4): 150-154.

Tena A, Batalla RJ (2013): The sediment budget of a large river regulated by dams (The lower River Ebro, NE Spain). *Journal of Soils and Sediments* 13, pp 966–980

Tena A, Batalla RJ, Vericat D (2012b): Reach-scale suspended sediment balance downstream from dams in a large Mediterranean river. *Hydrological Sciences Journal* 57, pp 1–19

Tena A, Batalla RJ, Vericat D, Lopez-Tarazón JA (2011): Suspended sediment dynamics in a large regulated river over a 10-year period (the lower Ebro, NE Iberian Peninsula). *Geomorphology* 125:73–84

Tena A, Książek L, Batalla RJ, Vericat D (2012a): Assessing the geomorphic effects of a flushing flow in a large regulated river. *River Research and Applications* 29, pp 876–890

Tena A, Vericat D, Batalla RJ (2014): Suspended sediment dynamics during flushing flows in a large impounded river (the lower River Ebro). *Journal of Soils and Sediments* 14, pp 2057–2069

Tigrek S, Aras T (2012): *Reservoir Sediment Management*. CRC Press.

Tomita K, Homma T, Sumi T (2017): Economic assessment of the effects of sediment replenishment to rivers and the effectiveness of sediment management, en *River Sedimentation*, Wieprecht et al. (eds).

Trimble DW (1990): Improved reservoir trap efficiency prediction. *The Environmental Professional*, 12, 255-272.

Turner TM (1996): *Fundamentals of Hydraulic Dredging*. ASCE Press.

TWDB (2005): *Dredging vs. New Reservoirs*. Texas Water Development Board Contract #2004 483-534.

UNEP/MAP (2003): *Riverine Transport of Water, Sediments and Pollutants to the Mediterranean Sea*. MAP Technical Report Series no. 141. United Nations Environment Programme/Mediterranean Action Plan.

UNESCO (1985): *Methods of Computing Sedimentation in Lakes and reservoirs*.

US Geological Survey (2015): *Lower Susquehanna River Watershed Assessment*. Maryland and Pennsylvania. USGS.

Utah Department of Water Resources (2010): *Managing Sediment in Utah's Reservoirs*. Utah Department of Water Resources.

UTE Red Biológica del Ebro (2009): *Informe final del Embalse de Ribarroja*.

Val R (2003): *Incidencia de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja-Flix en el río Ebro*.

Varela, J.M., Gallardo, A y López de Velasco (1986): *Retención de sólidos por los embalses de Mequinenza y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al Delta del Ebro; en Mariño, M. (ed), El sistema integrado del Ebro*. Gráficas Hermes.

Vericat D (2006): *Sediment Transport and Processes in a Highly Regulated River. The Lower Ebro, NE Iberian Peninsula*. Tesis Doctoral. Universitat de Lleida.

Vericat D, Batalla RJ (2004): *Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro*. *Revista C&G*, 18 (1-2), pp 37-50.

Vericat D, Batalla RJ (2005): *Sediment transport in a highly regulated fluvial system during two consecutive floods (lower Ebro River, NE Spain)*. *Earth Surface Processes and Landforms* 30:255–272

Vericat D, Batalla RJ (2006): *Sediment transport in a large impounded river: The lower Ebro, NE Iberian Peninsula*. *Geomorphology* 79: 72–92

Vericat D, Batalla RJ (2007): Transport de sediments i processos morfosedimentaris en el tram baix del riu Ebre. *Miscel·lània del CERE* 18, pp 189-208

Vericat D, Batalla RJ, Garcia C (2006) Breakup and reestablishment of the armour layer in a large gravel-bed river below dams: the lower Ebro. *Geomorphology* 76: 122–136

Vericat D, Batalla RJ, Garcia C (2008): Bed-material mobility in a large river below dams, *Geodinamica Acta*, 21(1-2), pp 3-10

Villiers JWL, Basson GR (2008): Modelling of long term sedimentation at Welbedacht reservoir, South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineers*, 49(4), 10-18.

Wang HW, Kondolf M, Tullos D, Kuo WC (2018): Sediment Management in Taiwan's Reservoirs and Barriers to Implementation. *Water* 10: 1034.

Wang Z, Hu C (2009): Reservoir Rehabilitation: Strategies for Managing Reservoir Sedimentation. *International Journal of Sediment Research*, 24: 369–384.

Wen Shen H (1999): Flushing sediment through reservoirs, *Journal of Hydraulic Research*, 37(6) 743-757.

White R (2001): Evacuation of sediments from reservoirs. Thomas Telford.

Wild TB, Loucks DP, Annandale JW, Kaini P (2016): Maintaining Sediment Flows through Hydropower Dams in the Mekong River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management* 142(1): 05015004.

Xi LX, Chantha O, Quynh LTP, Thuy DT (2015): Sediment budget as affected by construction of a sequence of dams in the lower Red River, Vietnam, *Geomorphology* 248, 125-133.

Xia Q, Liu J (2003): Sediment Management at Naodehai Reservoir. *World Water & Environmental Resources Congress*.

## ANEJO 1: BASE DE DATOS DE ACTUACIONES

En este anejo se presenta la base de datos de actuaciones que se ha recopilado a lo largo del desarrollo del trabajo. En la tabla se incluyen los datos básicos de las presas: capacidad de embalse, en hm<sup>3</sup>, aportación media anual, en hm<sup>3</sup>/año, carga de sedimentos, en Mt/año, los coeficientes Kw, en años, y Kt, en años, la altura de presa, en m, y la longitud del vaso, en km.

A continuación, se presentan las medidas de gestión reportadas en la literatura, con las siguientes claves:

BY	By-pass
DQ	Dique
ED	Dragado
EX	Excavación
ES	Hidrosucción
IS	Inyección sedimento
FL	Lavado
FX	Lavado en presión
FP	Lavado parcial
GR	Recrecimiento
GD	Redistribución sedimento
GF	Reforestación
FC	Scouring gate
FP	Scouring pipe
SL	<i>Sluicing</i>
TZ	Turbidez

Seguidamente figura el tipo de tratamiento que recibe en la literatura, con las siguientes claves

CS	Caso
CC	Caso comentado
CD	Caso detallado
EJ	Ejemplo
EC	Ejemplo comentado
MC	Modelo cálculo
MH	Modelo hidráulico

Finalmente, se indican las referencias bibliográficas donde se ha obtenido la información.

		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	M1	M2	M3	M4	An	
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km						
Agongdian	Taiwan	36.7	55	0.50	0.669	74	31		GF	FL	EX		CD	Wang, 2018
Akiba	Japón	34.703	5934	0.41	0.006	102	89		EX	ED	FP	IS	CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Annabrucke	Suiza				-	-			FP				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Asahi	Japón	25.513	5413	0.07	0.005	456	87	2.4	BY				EC	Sumi, 2004 Auel y Boes, 2011 Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Aswan High Dam	Egipto	130000		100.00	-	1300	111						EJ	Schellenberg, 2017
Baira	India	1.56	1900	0.30	0.001	5	51	4.1	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Bajiazui	China	495	-	-	-	-			TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Barenburg	Suiza	1.7	3594	0.02	0.000	71	64	2.3	FL				CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Beninar	España	70	27		-	-	87		DQ				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Bodendorf	Austria				-	-			EX				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Cachí	Costa Rica	54			-	-			FL				EJ	Chaudry, 2010
Dashidaira	Japón	9.01	1352	0.61	0.007	18	76.7		FL	SL			CD	Sumi, 2008 Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Dez	Iran	3460	3778		-	-	203		FL	ED	GR		EJ	Schellenberg, 2017 Chamoun et al., 2016
Edling	Austria	83	8655		-	-	36		FP				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Egschi	Suiza				-	-		0.4	BY				EJ	Auel y Boes, 2011
Elephan Butte	USA	3250	1238	12.80	2.625	254			TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Emosson	Suiza	227	28		-	-	180		EX	IS			EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Feistritz	Austria				-	-			FP				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Feitsui	Taiwan	406		0.99	-	408			GF	EX			CS	Wang, 2018
Fengjiashan	China	398	485	-	0.821	-	74		TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Futase	Japón	26.9		0.12	-	222	95		EX	IS	TZ		EJ	Kantoush y Sumi, 2010 Sumi, 2006
Gebidem	Suiza	9	420	0.50	0.021	18	113	1.4	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Genissiat	Francia	53	11349	0.88	0.005	61	104	5.8	FL	EX			CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Ghazi	Pakistan	50	1151		0.043	-	7		FL				FL	Ghumman, 2015
Glockner-Kaprun	Austria				-	-			TZ				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Gmund	Austria	0.93	200	0.07	0.005	13	37	0.9	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Grimsel	Suiza				-	-	114		TZ	FX			MC	Daneshvari y de Cesare, XXXX Kantoush y Sumi, 2010
Guanting	China	2270	1530	60.00	1.484	38	43	30	FL	TZ			CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996 Chamoun et al., 2016
Guernsey	USA	91	2100	1.70	0.043	54	28.6	24	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Hachisu	Japón	32.6		0.03	-	937	78		IS				CS	Sumi, 2006



		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	M1	M2	M3	M4	An	
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km						
Hakuwa	Japón				-	-			EX	ED			CS	Sumi, 2008
Heisonglin	China	8.6	14	0.70	0.606	12	30	2.9	FL	TZ			CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996 Chamoun et al., 2016
Hengshan	China	1.33	42	0.13	-	10	69		FL				EC	Wang y Hu, 2009 Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Hiraoka	Japón	42.425	4649	0.95	0.009	54	62.5		ED	FP	EX		CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Hitokura	Japón	33.3	84	0.04	-	925	75		IS				CS	Sumi, 2006
Ichari	India	11.55	5300	5.70	0.002	2	36.8	11	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Ikawa	Japón	150	1089	1.15	0.138	156	104		FP	EX	ED	FP	CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Innerferrera	Suiza	0.23	1278	0.01	0.000	24	28	0.6	FL				CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Iril Emda	Argelia	160	210	4.06	0.762	39			TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Iwayado	Japón	8.31	533	0.09	0.016	90	45	2.9	SL				CS	Sumi y Katoush, 2016
Jesanpei	Taiwan	8.11	7	0.11	1.132	76	30		GF	FL	EX		CD	Wang, 2018 Sumi, 2008 Chaudry, 2010
Kamishiiba	Japón	91.55	402	0.26	0.228	352	110	6.9	SL				CS	Sumi y Katoush, 2016
Kasagi	Japón	14.121	4350	0.09	0.003	180	40.8	10	FC	FP			CS	Sumi, 2008
Katagiri	Japón				-	-			TZ				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Khashm-El-Gibra	Sudan	950			-	-			FL				EJ	Chaudry, 2010
Kigawa	Japón				-	-			TZ				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Koshibu	Japón	58	205	0.58	0.283	120	105		EX	DQ	BY		CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Lake Mead	USA	38400	16000	15.36	2.400	2500			TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Lavey	Suiza		5676	0.03	-	-		3	FL	SL			MC	Bieri et al., 2012
Ligistbach	Austria				-	-			SL				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Liujiaxia	China	5720	27300	15.00	0.210	381	147	42	TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Livigno	Italia	164.6			-	-	130		SL	TZ			EJ	Kantoush y Sumi, 2010 Chamoun et al., 2016
Lodoyo	Indonesia	5.2			-	-			ED	FL	BY		EJ	Hidayat et al., 2018
Lower Sesam 2	Camboya	1793	1511		1.187	-		50	FL				MC	Wild et al., 2015
Lower Sesam 2 II	Camboya	136.9	731		0.187	-		16	FL				MC	Wild et al., 2015
Lower Sre Pok 2	Camboya	258.6	800		0.323	-		21	FL				MC	Wild et al., 2015
Luzzone	Suiza			0.05	-	-	208		FL	SL	TZ	ES	MC	Jenzer et al., 2009 Kantoush y Sumi, 2010
Makio	Japón	75	471	0.38	0.159	238	105	6.4	EX	ED			CS	Sumi, 2008
Mangahao	Nueva Zelanda	-			-	-			FL				EJ	Chaudry, 2010
Mapragg	Suiza	5	167	0.06	0.030	86	65	1.8	TZ				CS	Chamoun et al., 2016 Jenzer et al., 2009

		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	M1	M2	M3	M4	An	
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km						
Margaritze	Austria				-	-			EX	IS			EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Masugadawa	Japón				-	-			SL				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Matsukawa	Japón	7.4	87	0.12	0.085	76	84.3	1.4	BY	DQ			EJ	Auel y Boes, 2011 Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Miharu	Japón	42.8		0.18	-	239	65		IS				CS	Sumi, 2006
Minte	Taiwan	17.7		0.16	-	108			GF		ES		CS	Wang, 2018
Miure	Japón	62.216	190	0.14	0.327	517	83.2	3.5	FP				CS	Sumi, 2008
Miwa	Japón	29.952	446	0.21	0.067	168	69.1	4.3	BY	EX	ED	DQ	CD	Sumi, 2008 Sumi, 2012 Auel y Boes, 2011
Morotsuka	Japón	3.48	89	0.03	0.039	126	59	1.4	SL				CS	Sumi y Katoush, 2016
Murou	Japón	16.9	140		0.120	-	64		EX	IS			EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Nagashima	Japón	78		0.48	-	163	109		DQ	IS			CS	Sumi, 2006 Kantoush y Sumi, 2010
Nahua	Taiwan	154.41		3.29	-	47			GF	EX	ES	TZ	CS	Wang, 2018
Nanquin	China	10.19	121	0.53	0.084	19			TZ	FL			CS	Chamoun et al., 2016 Chaudry, 2010
Naodehai	China	270	261	10.47	1.034	26	41.5		FL				CD	Xia y Liu, 2003 Chaudry, 2010
Nebeur	Túnez	300	180	-	1.667	-	72		TZ				CS	Chamoun et al., 2016
Nibutani	Japón	31.5		0.92	-	34	32		IS				CS	Sumi, 2006
Nunobiki	Japón				-	-		0.3	BY				EC	Sumi, 2004 Auel y Boes, 2011
Nunome	Japón	17.3		0.01	-	1201	72		EX	IS			EC	Kantoush y Sumi, 2010 Sumi, 2006
Oi	Japón	29.4	4410	0.36	0.007	99	53.4		ED	FP			CS	Sumi, 2008
Ooma	Japón		0	0.00	0.003	59			FC	FP			CS	Sumi, 2008
Orden	Suiza				-	-			SL				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Ouchibaru	Japón	7.49	1558	0.04	0.005	185	26	7.2	SL				CS	Sumi y Kantoush, 2016
Ouchi-Kurgan	USSR	56.4	15000	13.00	0.004	4	35	17	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Oued Neckar	Marruecos				-	-			TZ				EJ	Chamoun et al., 2016
Paiho	Taiwan	25.9		0.49	-	52			GF	ES	EX	SL	CS	Wang, 2018
Palagnedra	Suiza	5.5	304	0.08	0.018	69	55	2.6	FL	BY			CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996 Auel y Boes, 2011 Auel y Boes, 2011
Paute-Cardenillo	Ecuador		4298		-	-							MC	Castillo et al., 2013
Pfaffensprung	Suiza				-	-		0.3	BY				EC	Auel y Boes, 2010 Auel y Boes, 2011
Pieve di Cadore	Italia	71.6	658	0.48	0.109	-	112		GD				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Punt del Gall	Italia	164.6			-	-	130		TZ				MC	Jenzer et al., 2009
Räterichsboden	Suiza	25			-	-			FX				MC	Moller et al., 2011

		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	M1	M2	M3	M4	An	
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km						
Rempen	Suiza				-	-		0.5	BY				EJ	Auel y Boes, 2011
Ronghua	Taiwan	12.4	1086	2.33	0.011	5	82		GF				CD	Wang, 2018
Runcahez	Suiza				-	-		0.6	BY				EC	Auel y Boes, 2011
Sabaishigawa	Japón				-	-			SL				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Saigo	Japón	2.45	980	0.01	0.002	170	20	3.8	SL				CS	Sumi y Katoush, 2016
Sakuma	Japón	343	6772	3.45	0.051	119	156		ED	ES	GD		CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Sanmenxia	China	9640	43000	1600	0.224	6	45	120	FL	TZ	ED		CC	Wang y Hu, 2009 Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996 Chamoun
Santo Domingo	Venezuela	3	450	0.20	0.007	15	47	1	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Sautet	Francia				-	-			TZ				EJ	Chamoun et al., 2016
Se San Upstream 1	Camboya	231.5	612		0.378	-		20	FL				MC	Wild et al., 2015
Seeuferegg	Suiza				-	-							MC	Jenzer et al., 2009 Wang y Hu, 2009
Sefid Rud	Irán	1760	5008	50.40	0.351	35			TZ	FL			EC	Chamoun et al., 2016
Senzu	Japón	4.95	374	0.10	0.013	58	64	1.6	FC	FP			CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Shihmen	Taiwan	309.12	1468	2.33	0.211	133	133	17	GF	ES	EX	SL	CD	Wang, 2018 Lai y Wu, 2017
Shimokubo	Japón	130	246	0.29	0.529	451	129		IS				CS	Sumi, 2006
Shuicaozi	China	9.58	514	0.63	0.019	15	28	6	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Solis	Suiza	1220	1862		0.655	-	57	1	BY				MH	Auel y Boes, 2010 Auel y Boes, 2011
Spencer	USA	12.9			-	-			FL				MC	Gibson y Boyd, XXXX
Spitallamm	Suiza	101	134		0.756	-	114	5.5	DQ	TZ			MC	Jenzer et al., 2009
Sufid-Rud	Iran	1760	5000	50.00	0.352	35	82	25	FL				CC	Sumi, 2008 Chaudry, 2010 Atkinson, 1996
Tapu	Taiwan	9.26		0.09	-	100			GF	FL	ES		CS	Wang, 2018
Tarbela	Pakistan	14300	33260	208.00	0.419	69	137		FL				EC	Wang y Hu, 2009
Techi	Taiwan	262.21		2.03	-	129			GF				CS	Wang, 2018
Three Gorges	China	39000			-	-			FL				EJ	Schellenberg, 2017 Wang y Pu, 2009
Tokiwa	Japón	0.669	606	0.01	0.001	126	33.5	1	FC				CS	Sumi, 2008
Tourtemagne	Suiza				-	-			TZ				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Tsengwen	Corea	748	1740		0.430	-	133	15	TZ				MC	Lee et al., 2014
Tsukabaru	Japón	34.33	635	0.11	0.054	312	87	7.6	SL				CS	Sumi y Katoush, 2016
Unazuki	Japón	24.7	1764	1.15	0.014	21	97	2.4	FL	SL	FL		CC	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Urayama	Japón	58		0.17	-	336	156		IS				CS	Sumi, 2006

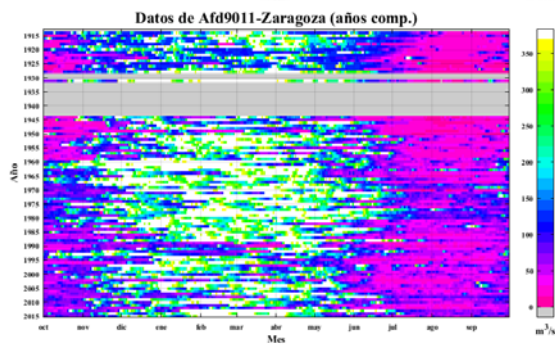
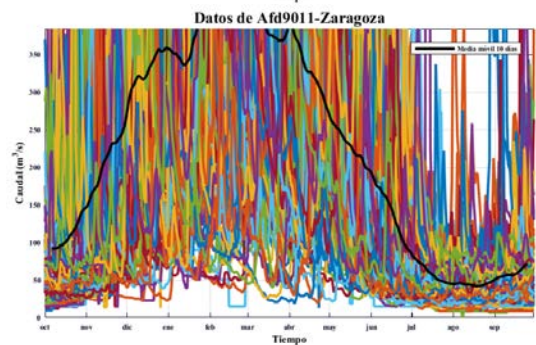
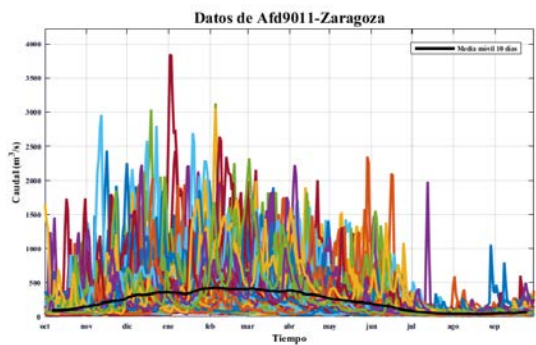
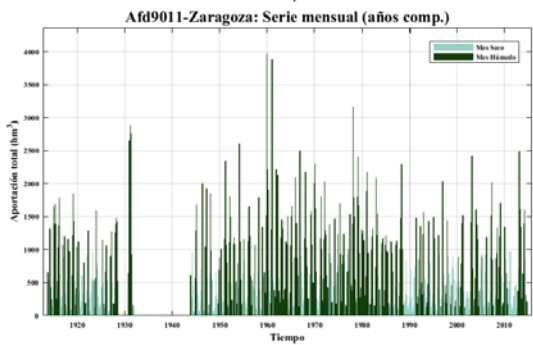
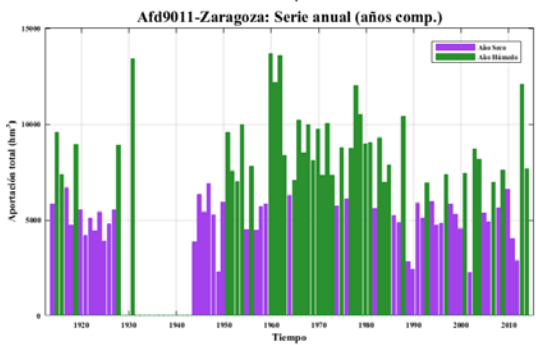
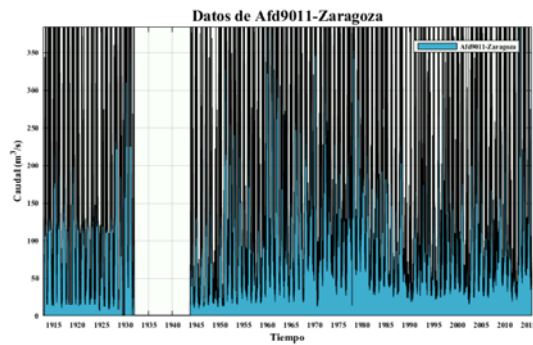
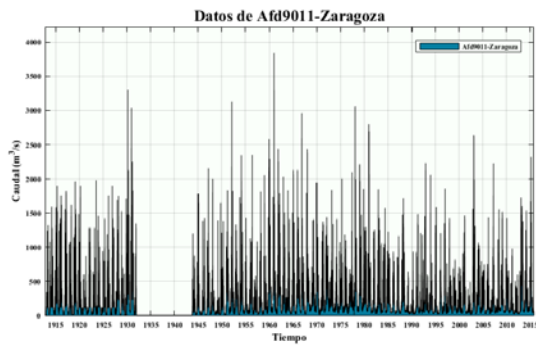
		Cap	Apo	Sed	Kw	Kt	Alt	Long	M1	M2	M3	M4	An	
Presa	Pais	hm3	hm3/a	Mt/a	años	años	m	Km						
Varsak	Austria	170			-	-			FL				EJ	Chaudry, 2010
Verbois	Suiza	15	10417	0.40	0.001	38	32	3.4	FL				CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Walensee	Suiza				-	-			TZ				EJ	Chamoun et al., 2016
Wlingi	Indonesia	24	2313	1.79	0.010	13	48		ED	FL	BY		EJ	Hidayat et al., 2018
Wujie	Taiwan	14	1278	0.28	0.011	49	57.6		GF	EX			CD	Wang, 2018
Wusantou	Taiwan	154.15		1.14	-	136			GF	ES			CS	Wang, 2018
Wusheh	Taiwan	148.6		2.26	-	66			GF	EX			CS	Wang, 2018
Xiaolangdi	China	12650	40550	23.33	0.312	542	154	89	TZ	ED			CS	Chamoun et al., 2016 Wang y Hu, 2009 Hu et al., 2012 Cao et al., 2014
Yahagi	Japón	80	447		0.179	-	100		TZ				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Yamaguchi	Japón	3.484	3158	0.08	0.001	54	38.6		FC	FP			CS	Sumi, 2008
Yamasubaru	Japón	4.19	872	0.04	0.005	109			SL				CS	Sumi y Katoush, 2016
Yanase	Japón	104.625	156		0.206	-	115		ED				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Yasuoka	Japón	10.761	3609	0.35	0.003	37	50		FC	ED	FP	EX	CS	Sumi, 2008 Kantoush y Sumi, 2010
Yokohama	Japón				-	-			BY				EJ	Kantoush y Sumi, 2010
Zemo-Afchar	USSR	-			-	-			FL				EJ	Chaudry, 2010
Zengwen	Taiwan	748.4	1153	7.91	0.649	95	133		GF	ES	EX		CD	Wang, 2018
Zhuwo	China	14.75		0.25	-	58	33		FL				EC	Wang y Hu, 2009

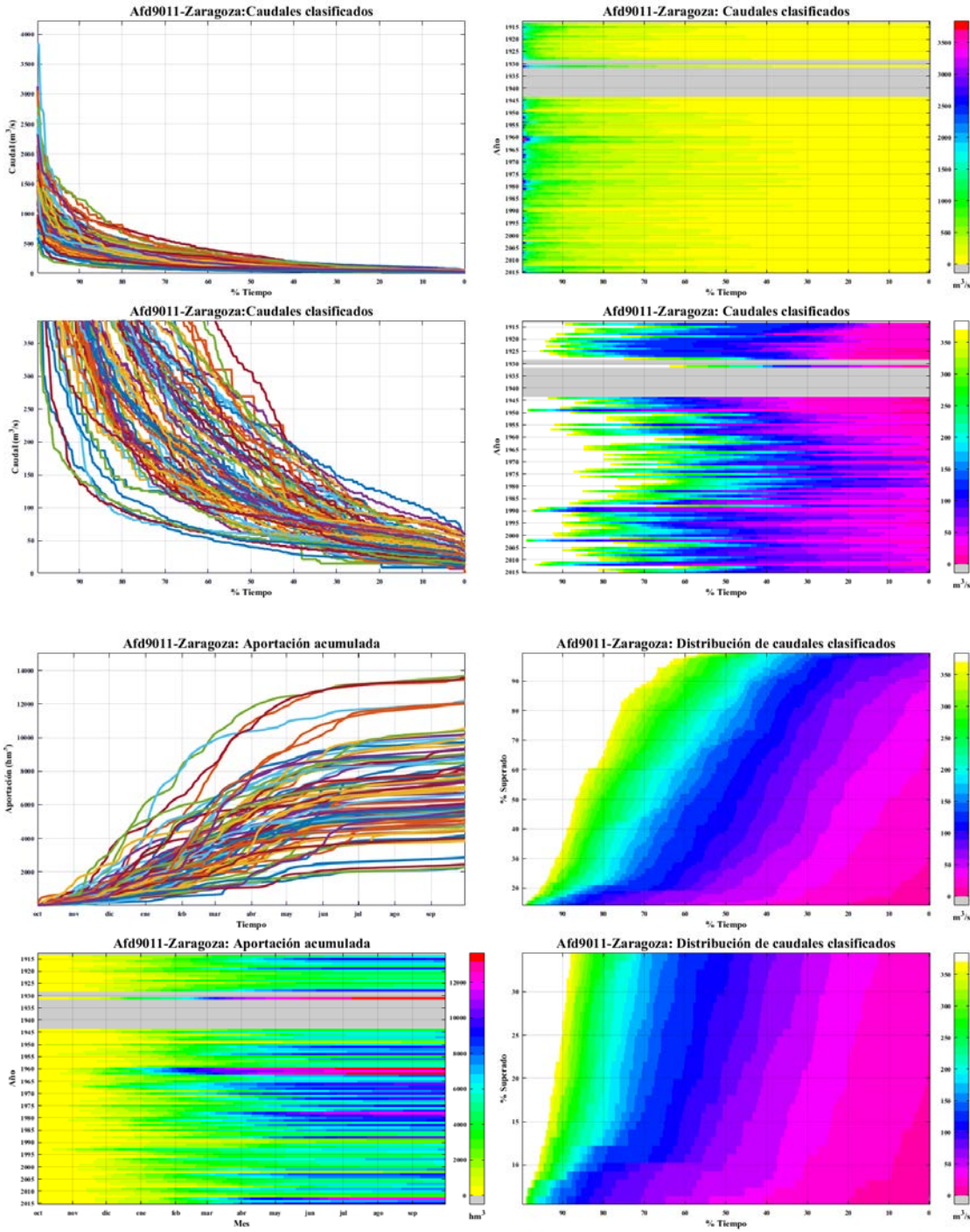
## **ANEJO 2: DATOS DE LAS REDES DE MEDIDA**



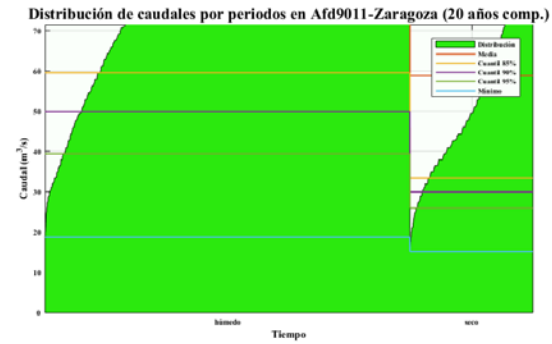
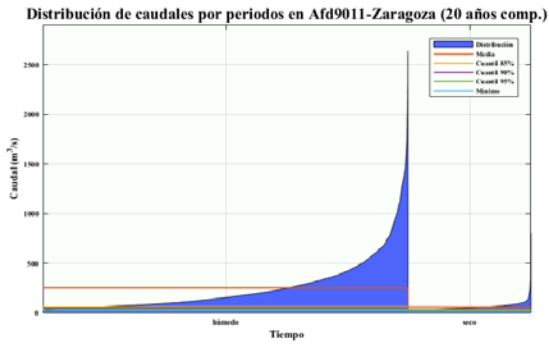
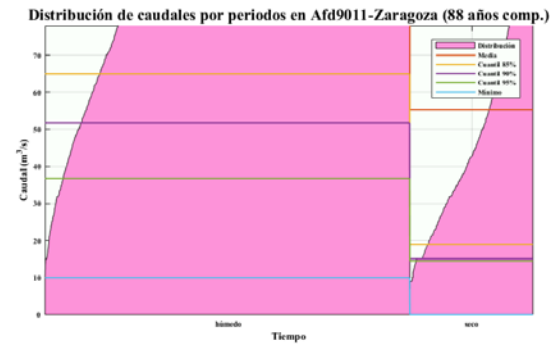
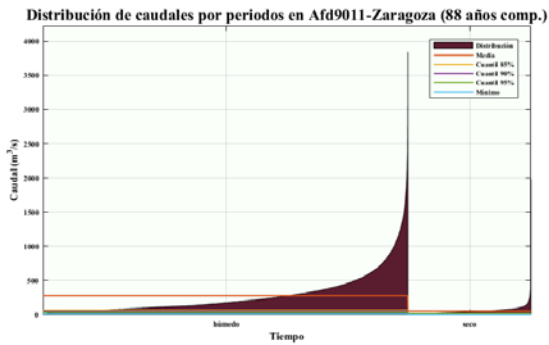
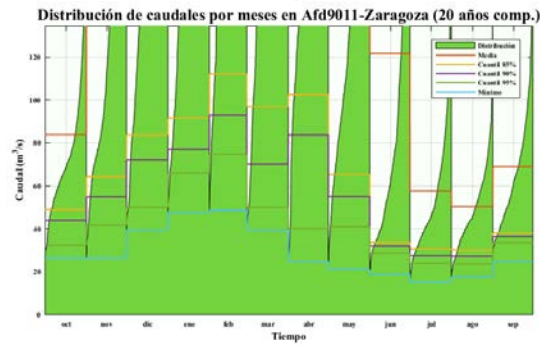
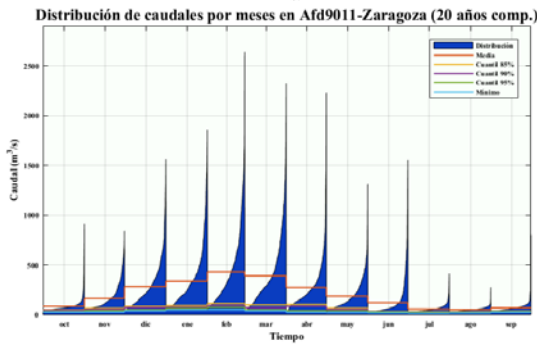
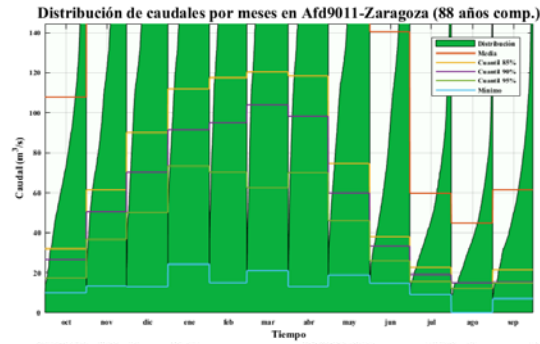
Datos de estaciones de aforo

Aforo en Zaragoza EA 9011

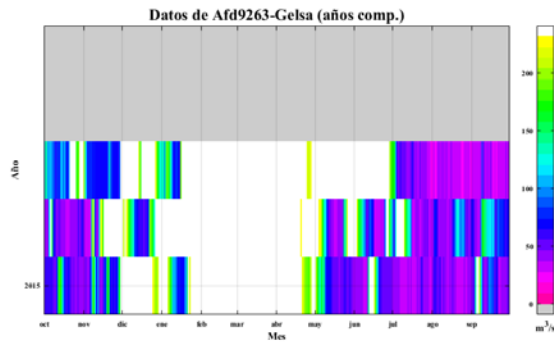
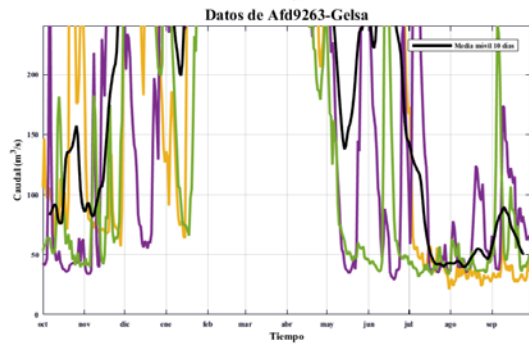
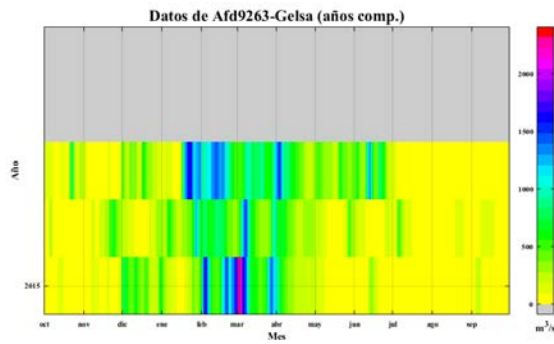
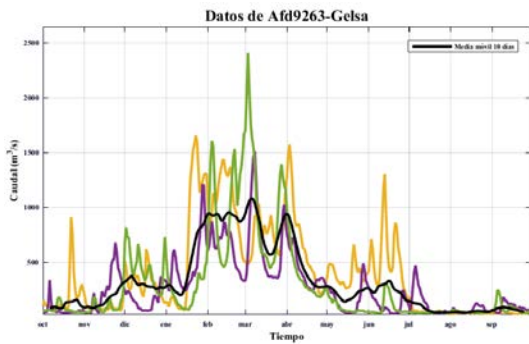
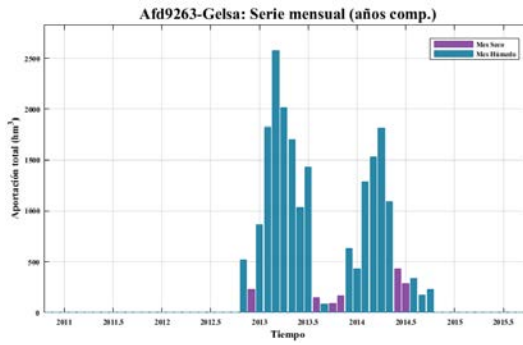
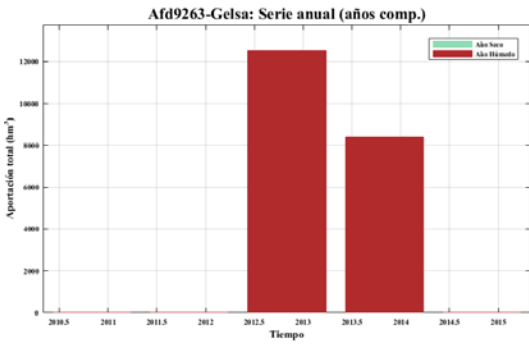
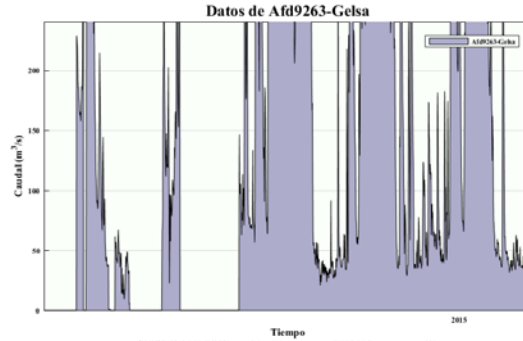
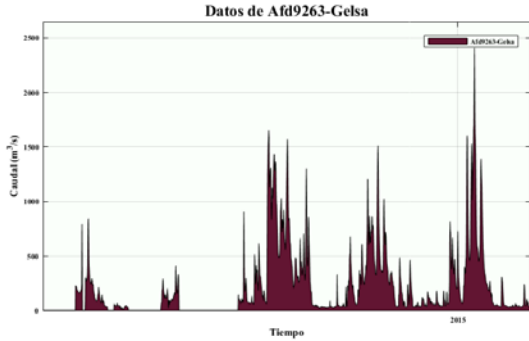


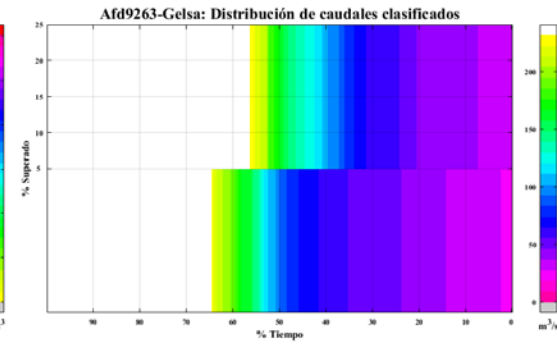
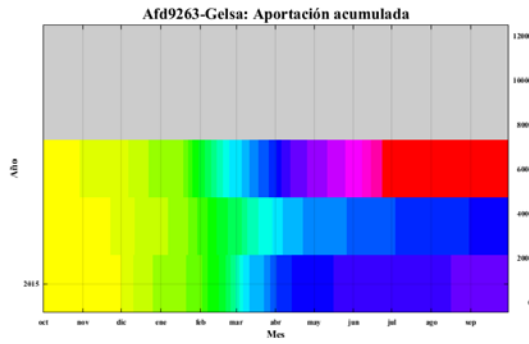
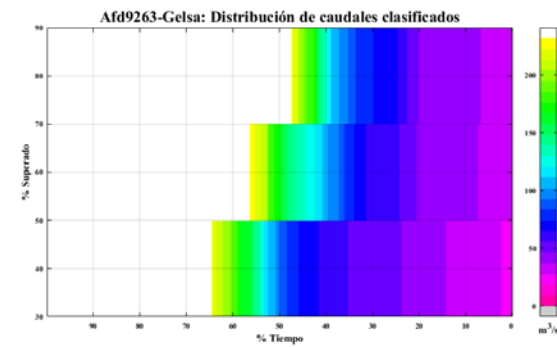
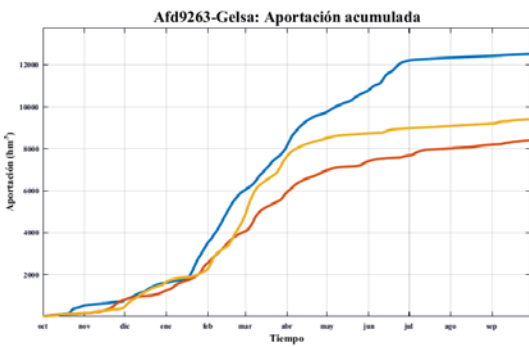
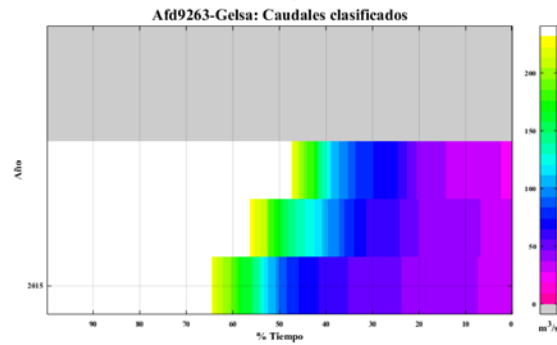
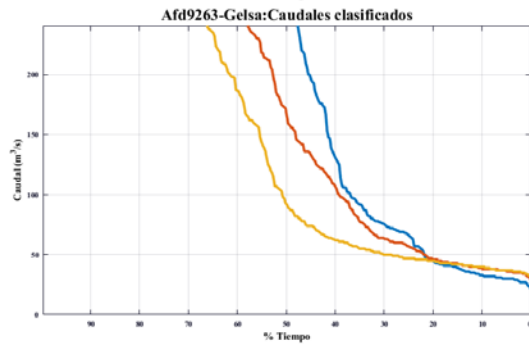
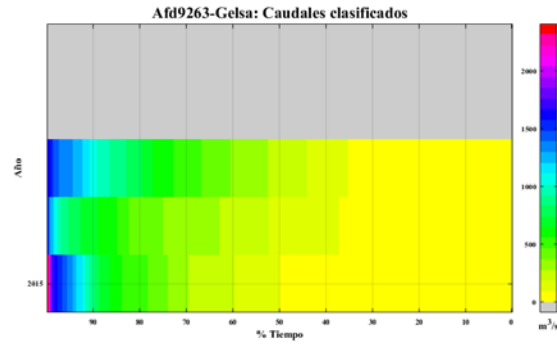
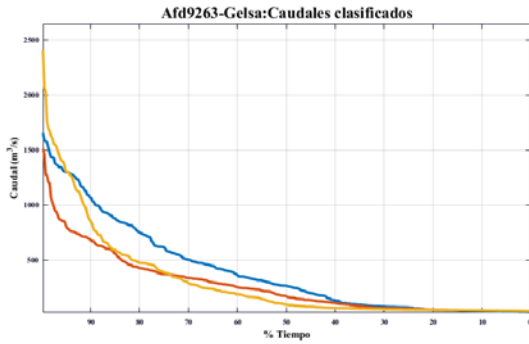


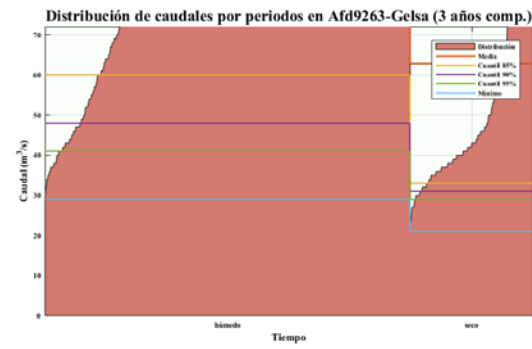
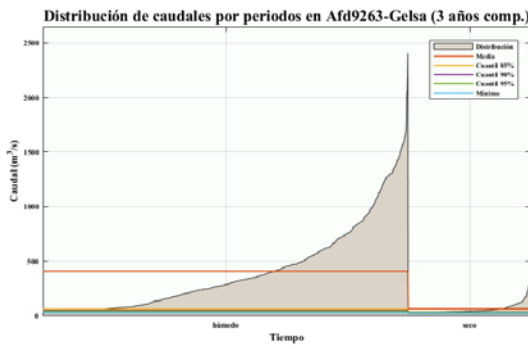
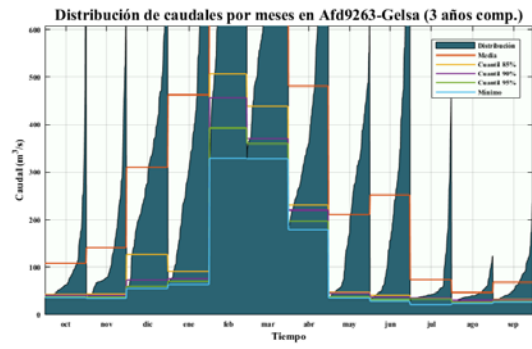
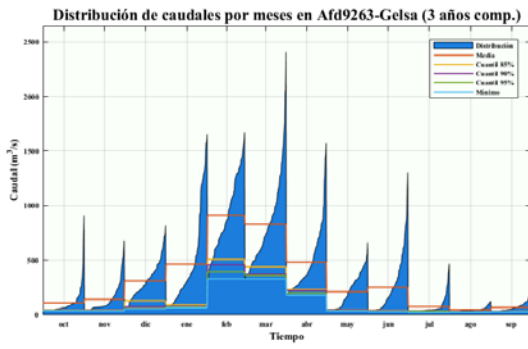




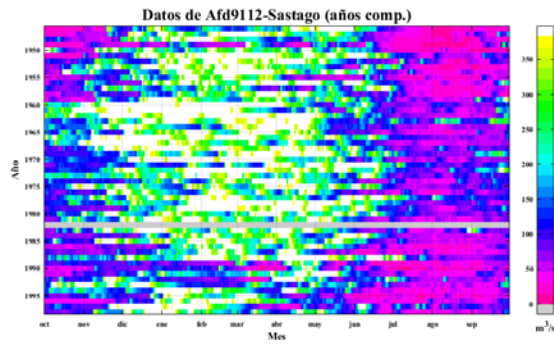
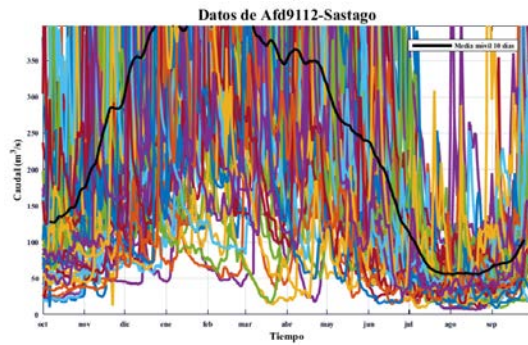
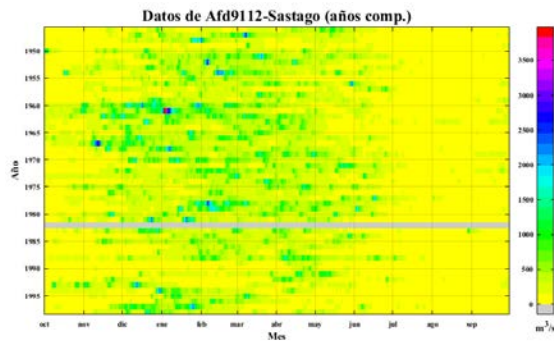
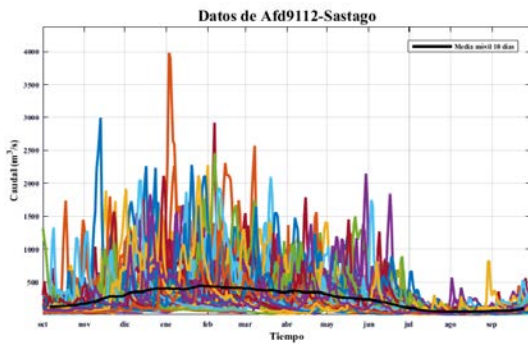
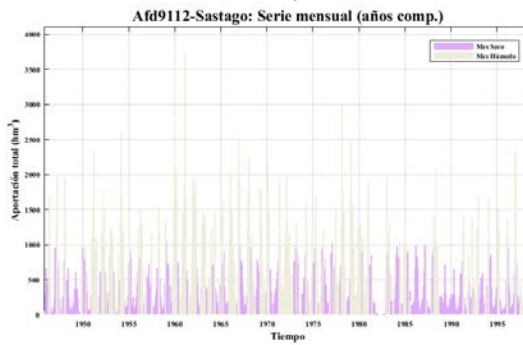
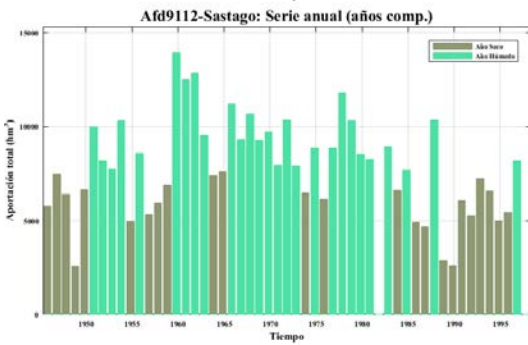
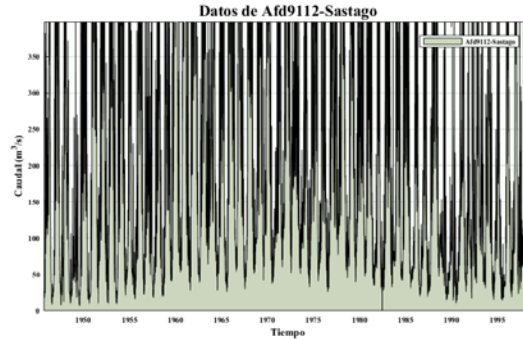
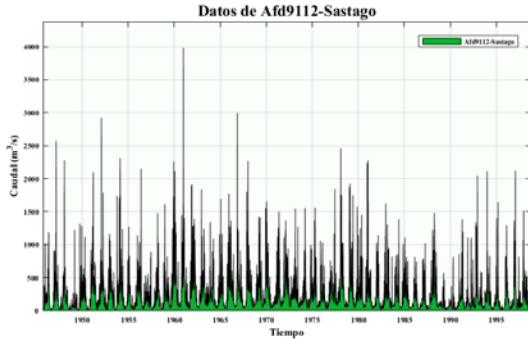
**Aforo en Gelsa EA 9263**

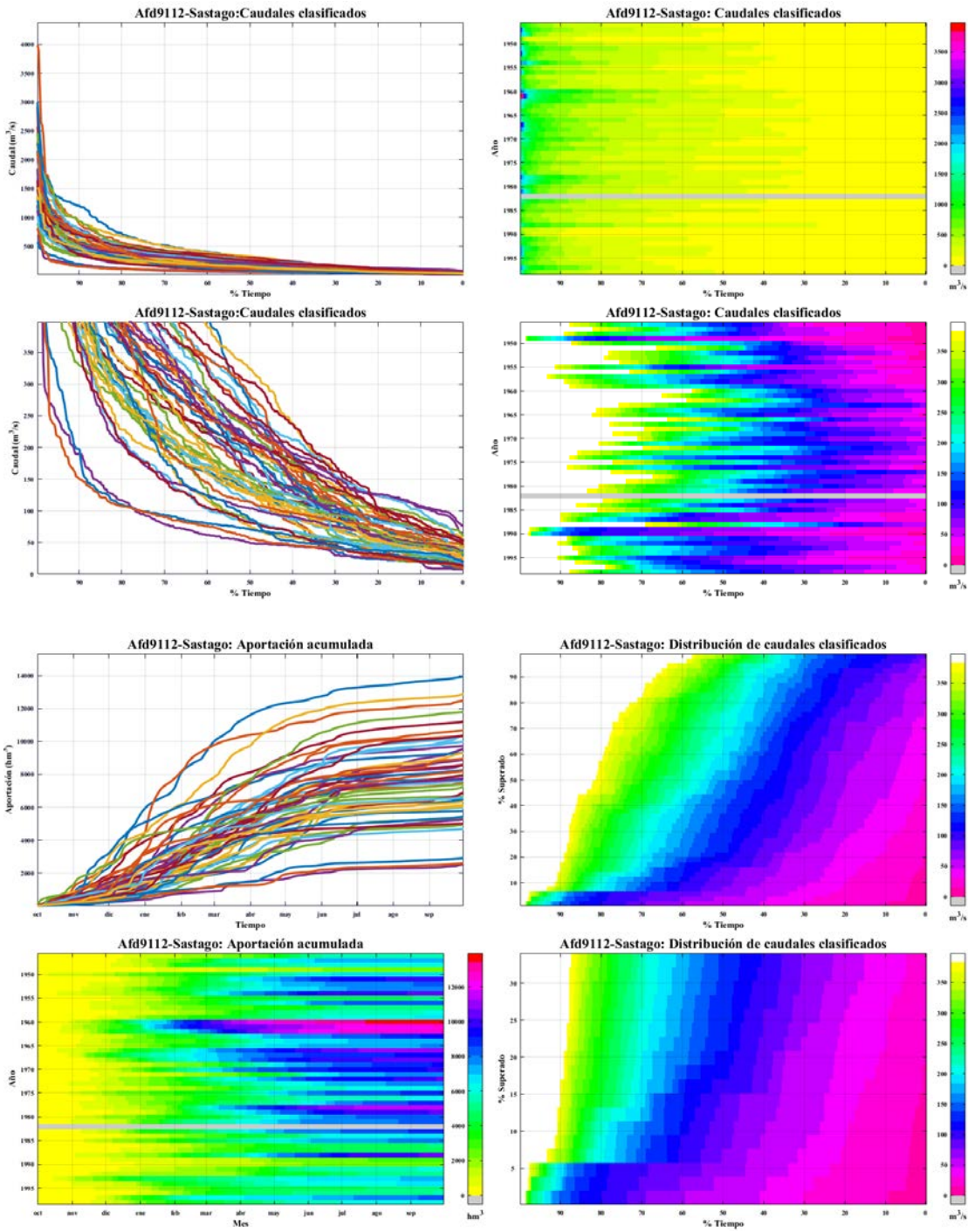


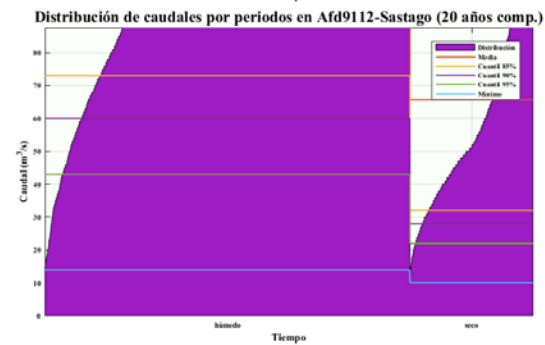
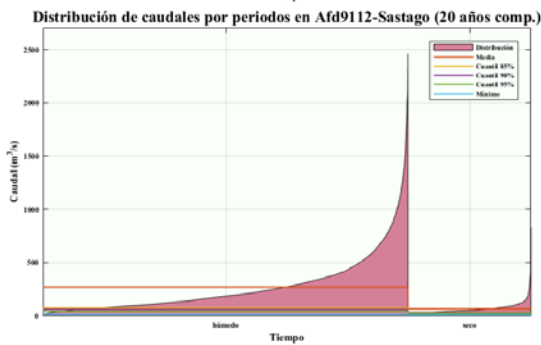
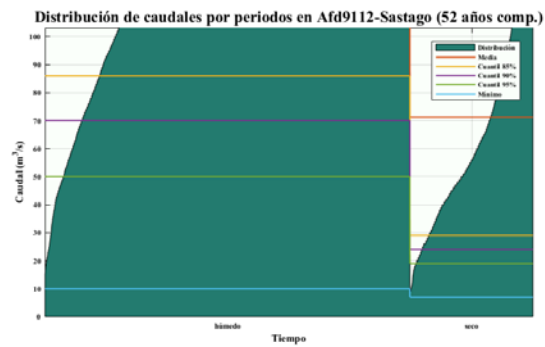
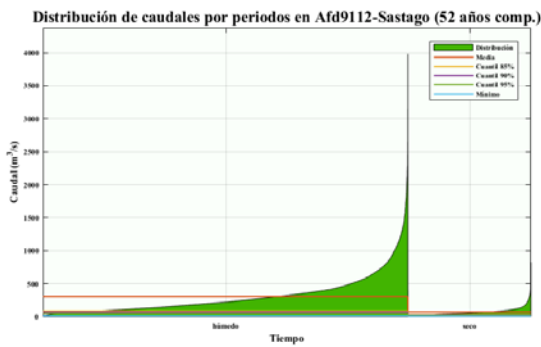
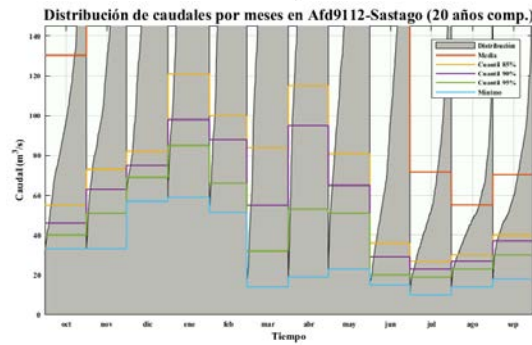
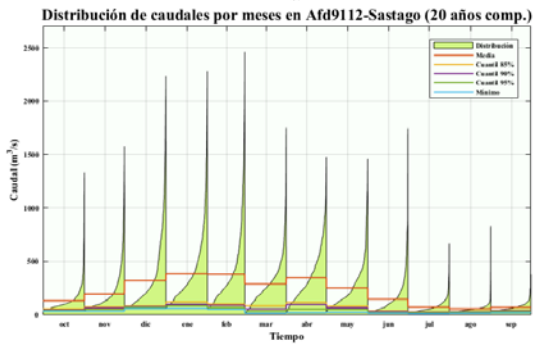
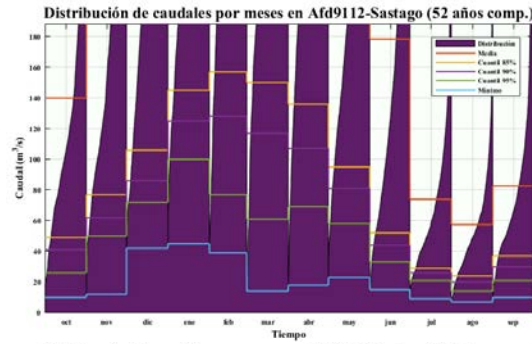
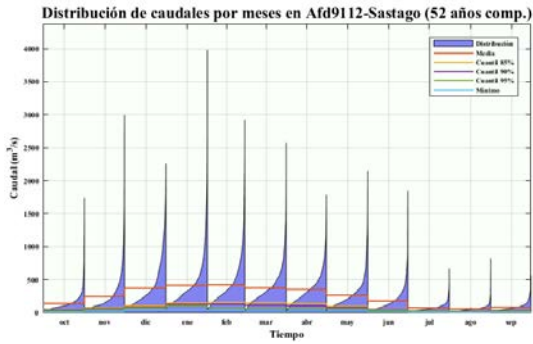




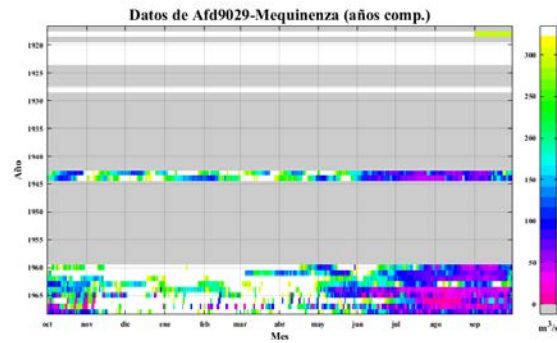
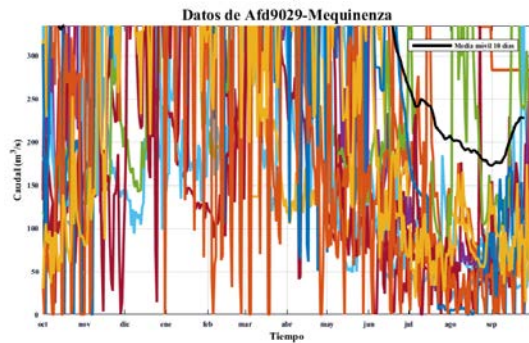
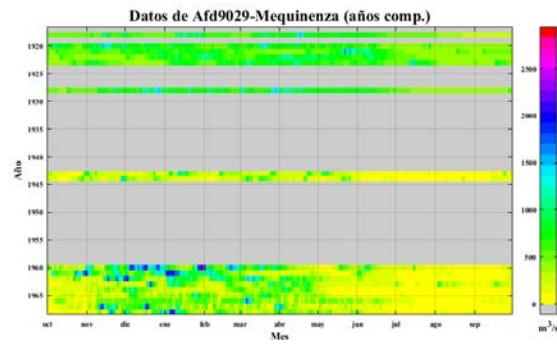
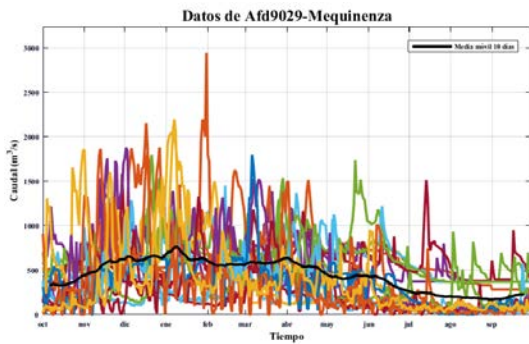
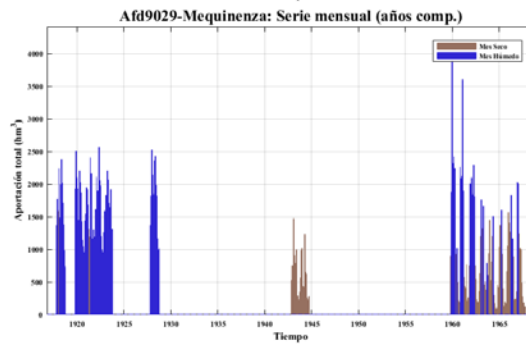
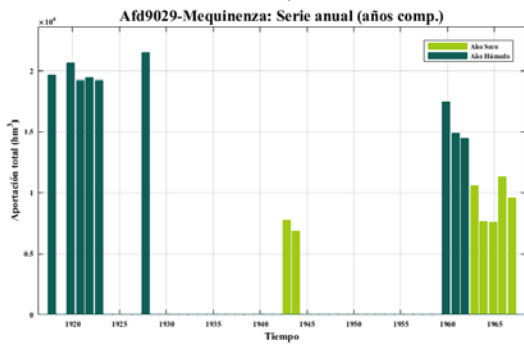
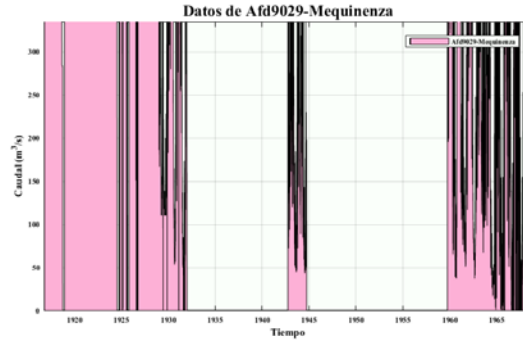
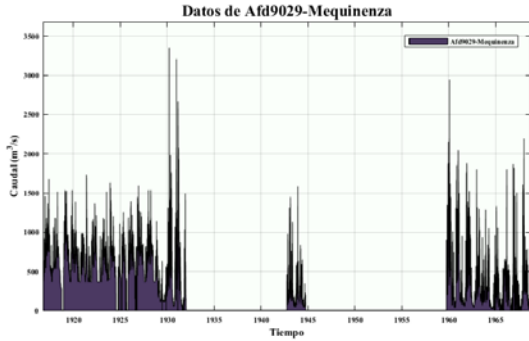
*Aforo en Sástago EA 9112*



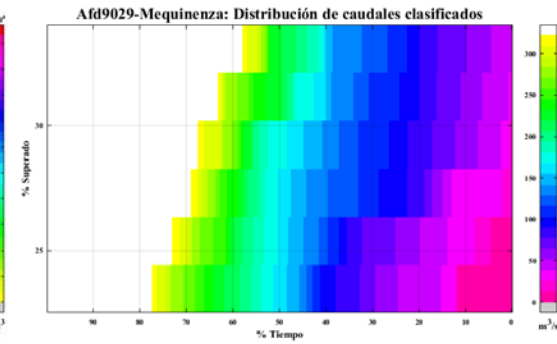
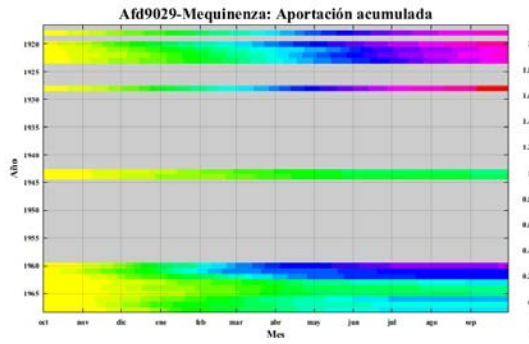
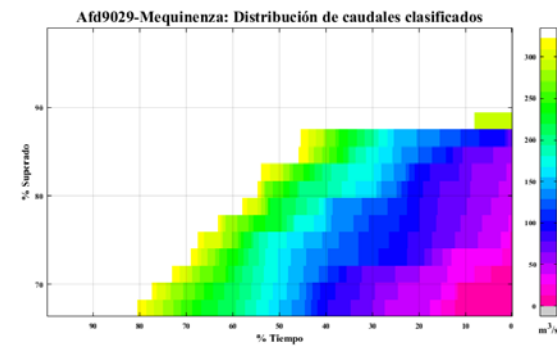
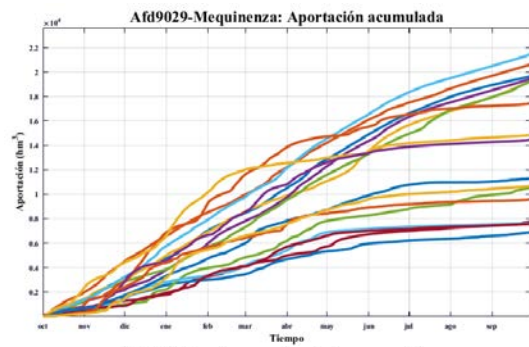
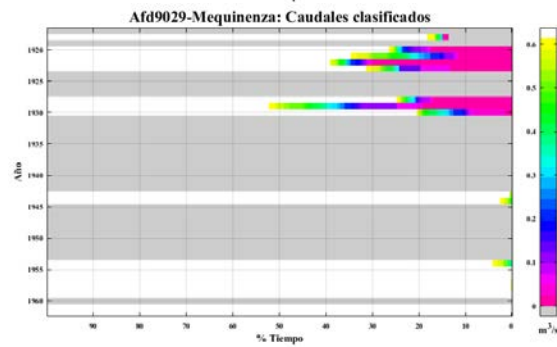
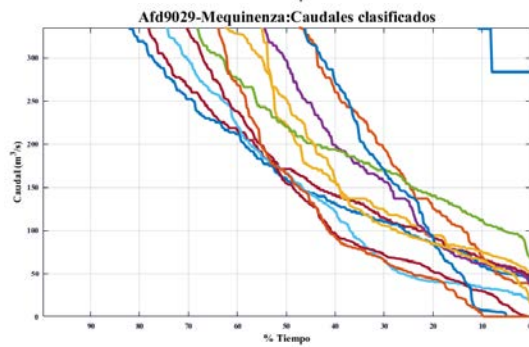
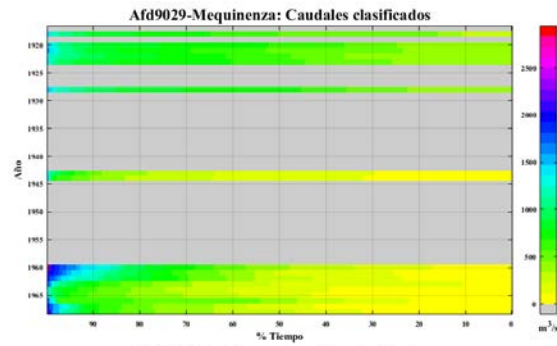
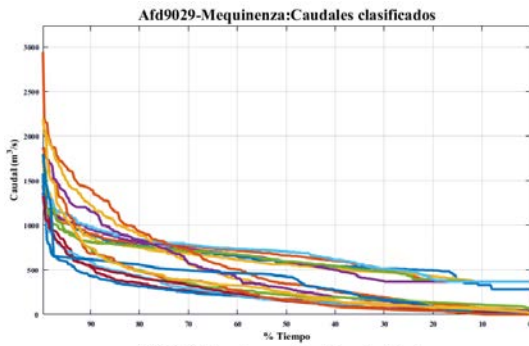




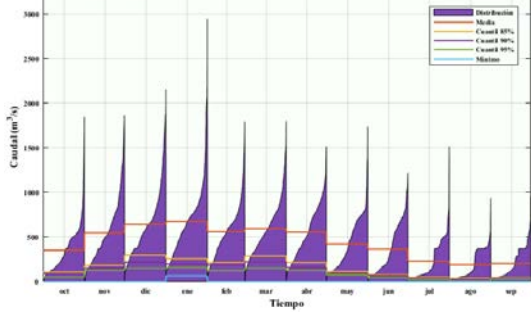
**Aforo en Mequenza EA 9029**



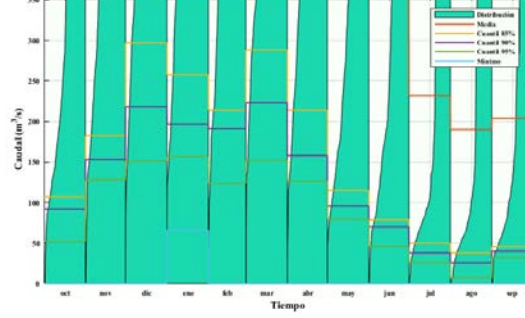




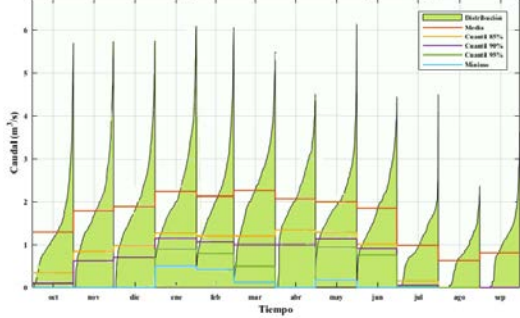
Distribución de caudales por meses en Afd9029-Mequinenza (17 años comp.)



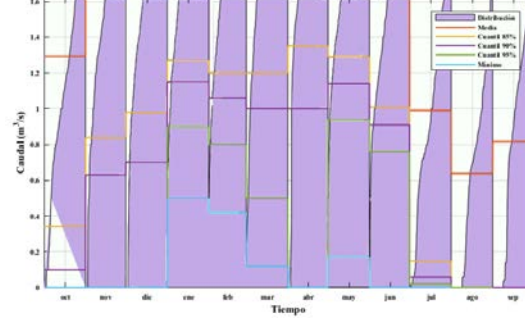
Distribución de caudales por meses en Afd9029-Mequinenza (17 años comp.)



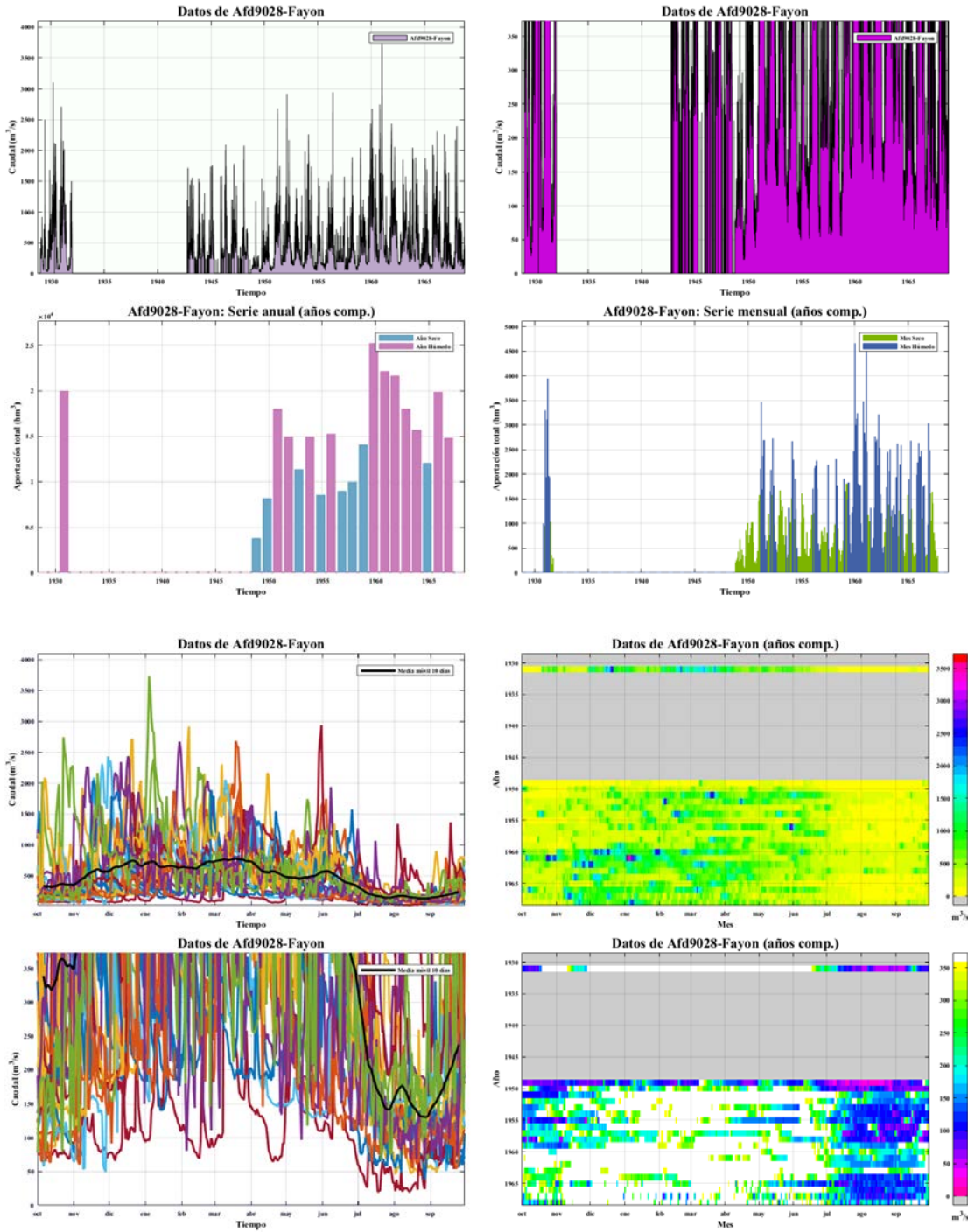
Distribución de caudales por meses en Afd9029-Mequinenza (18 años comp.)

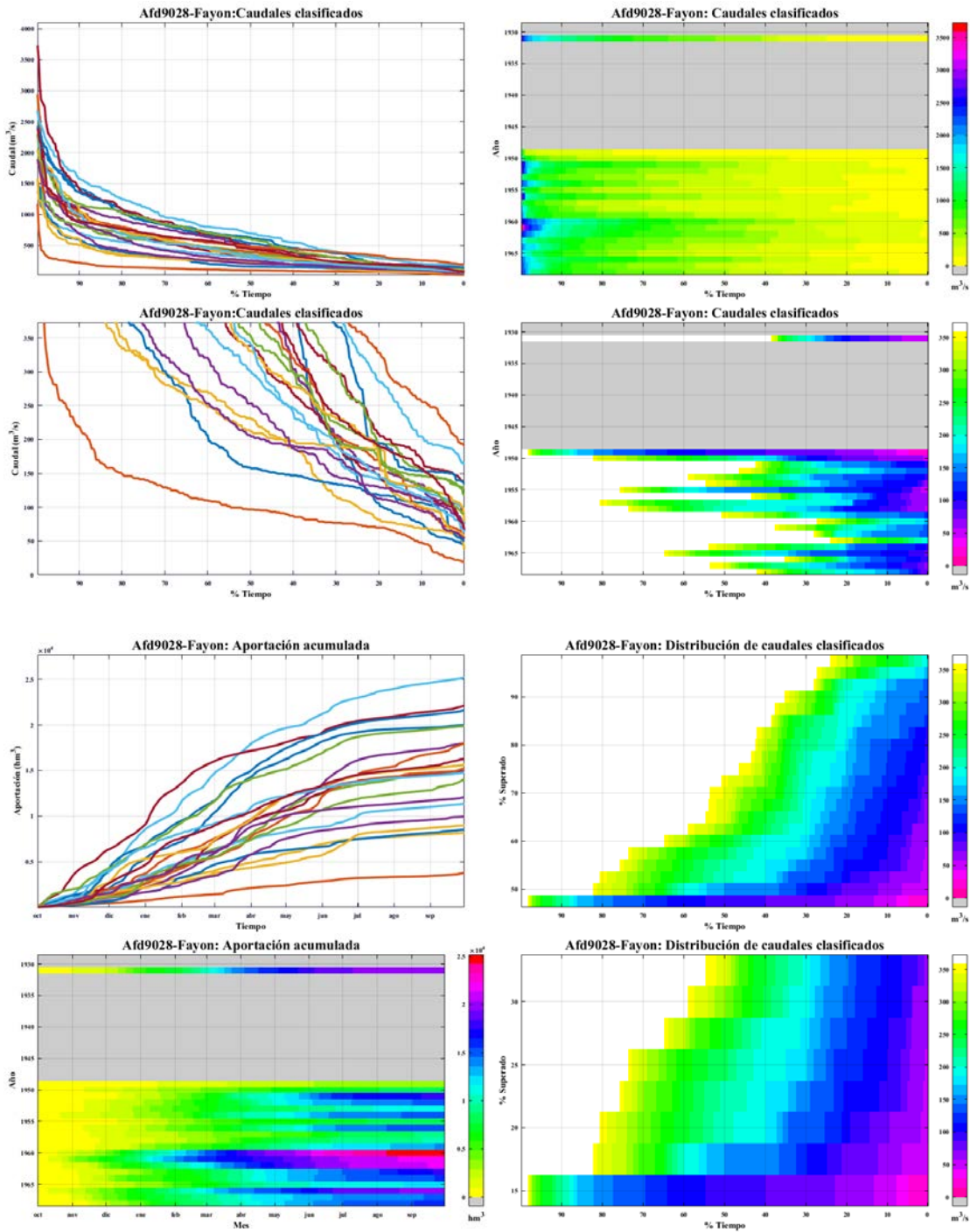


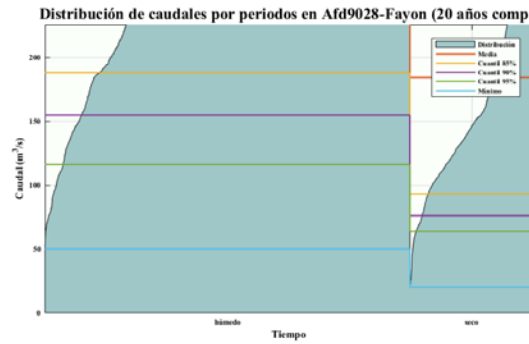
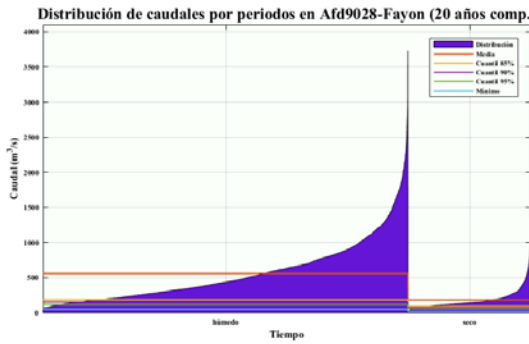
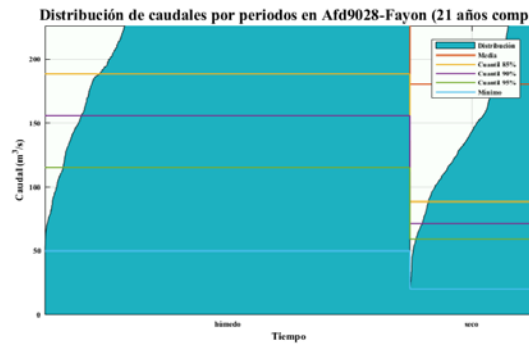
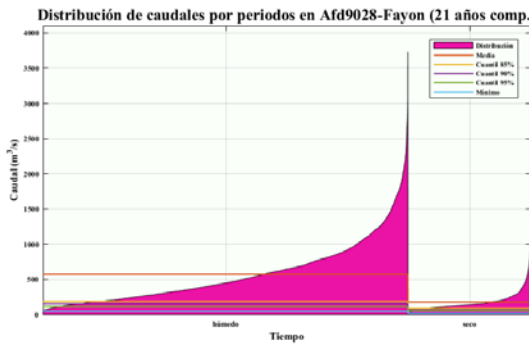
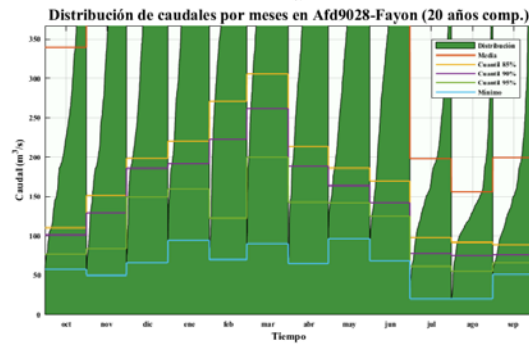
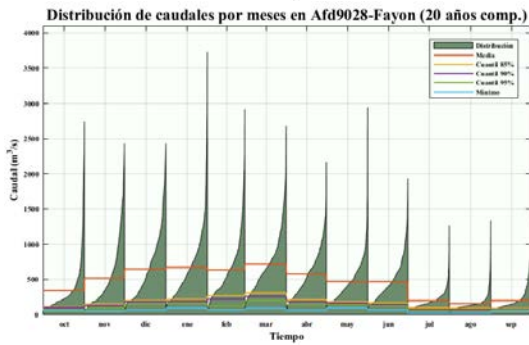
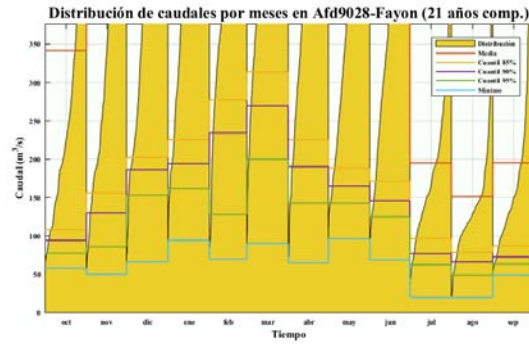
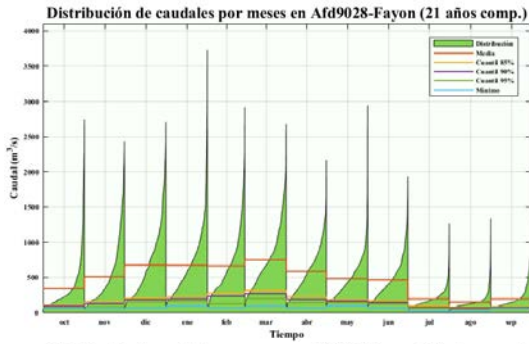
Distribución de caudales por meses en Afd9029-Mequinenza (18 años comp.)



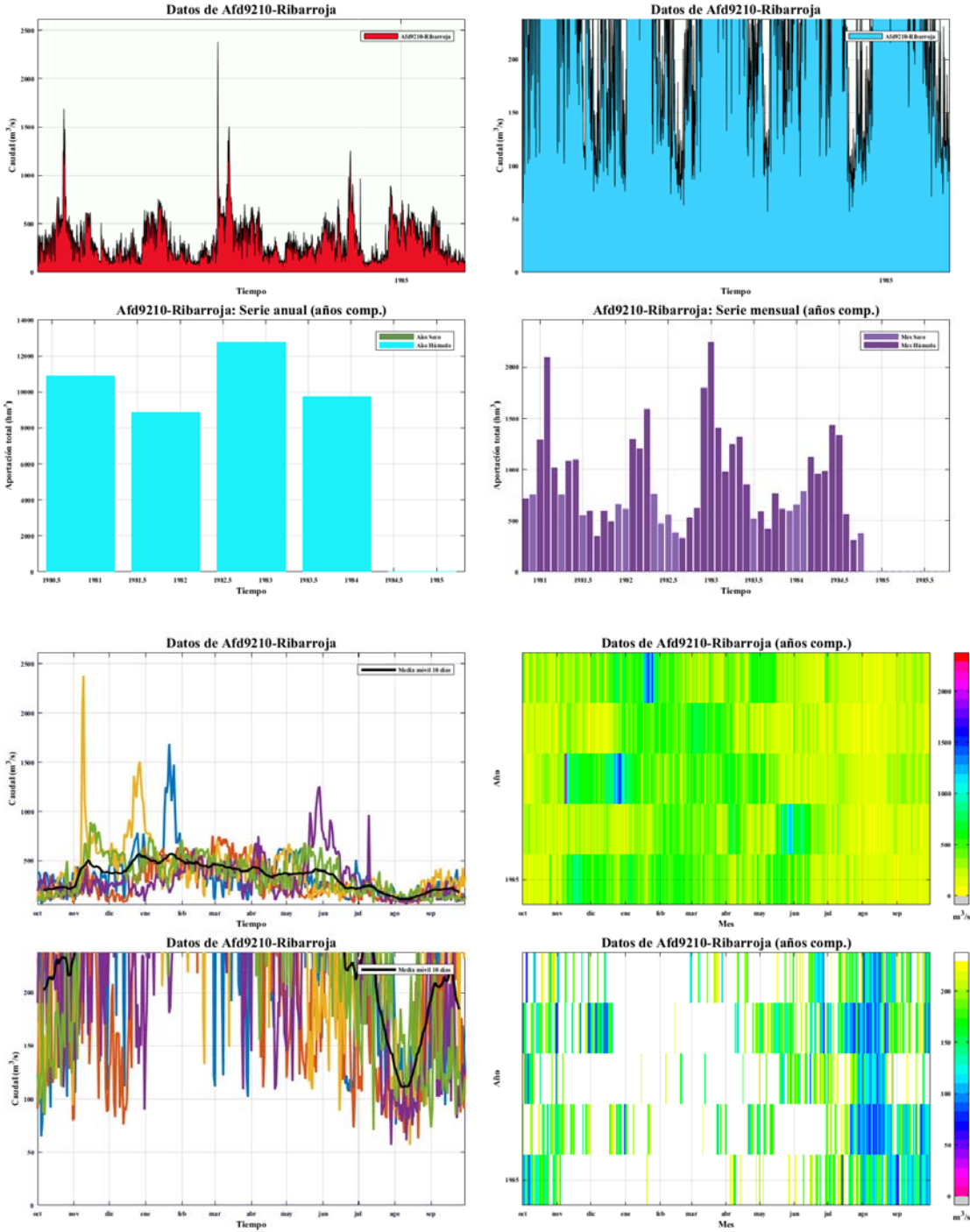
**Aforo en Fayón EA 9028**

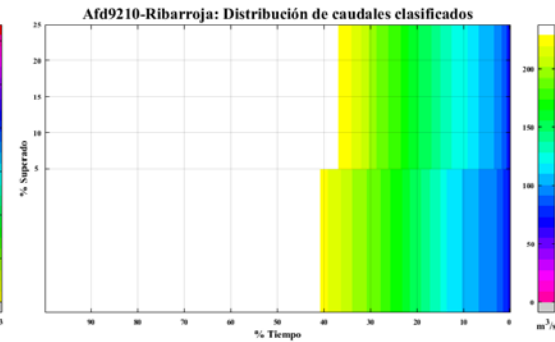
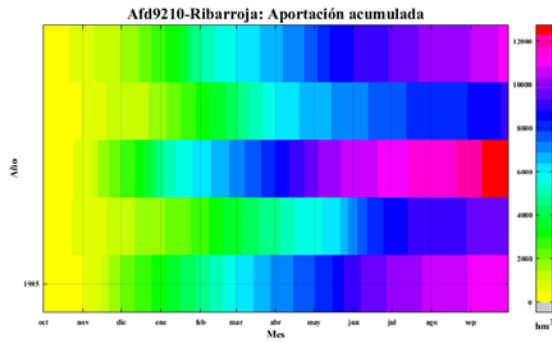
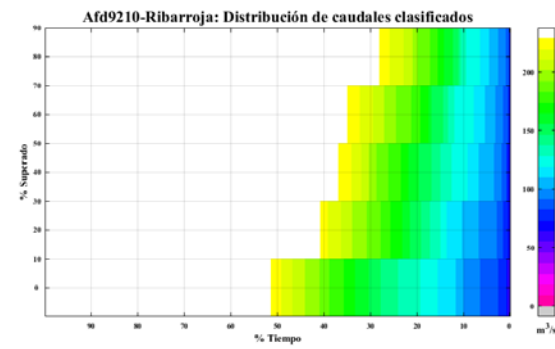
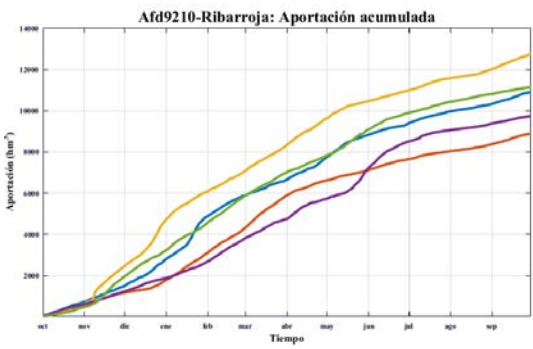
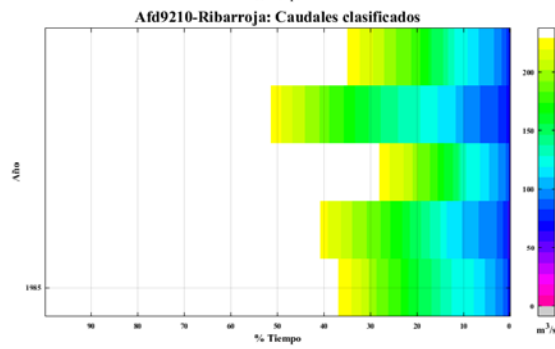
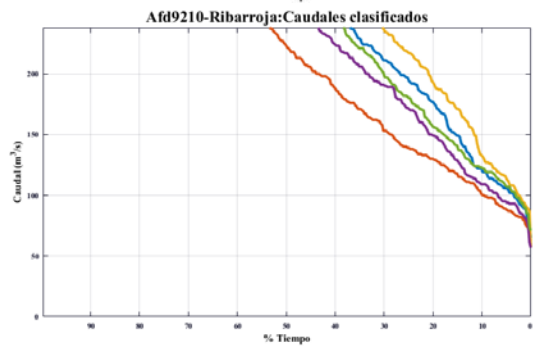
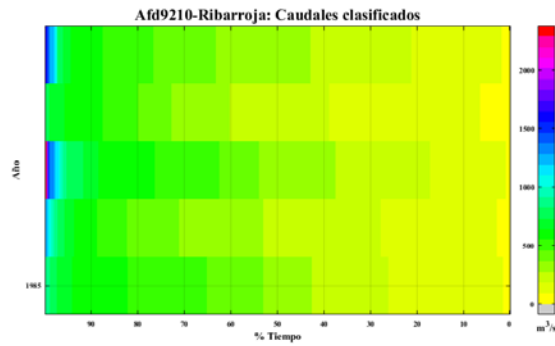
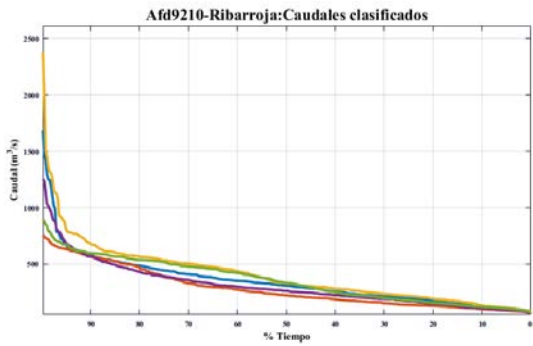


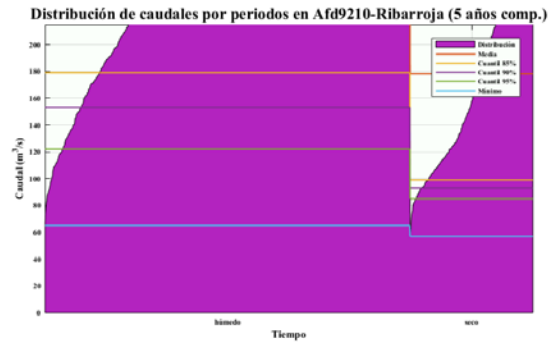
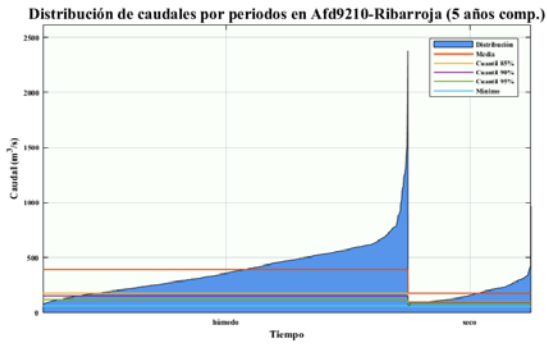
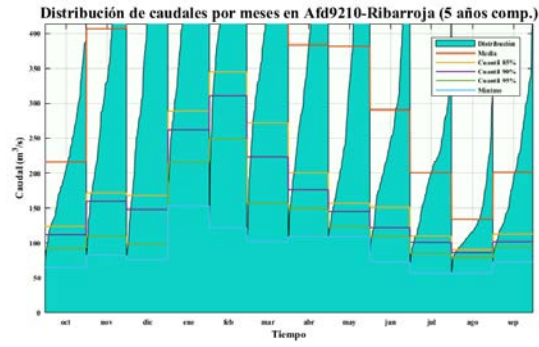
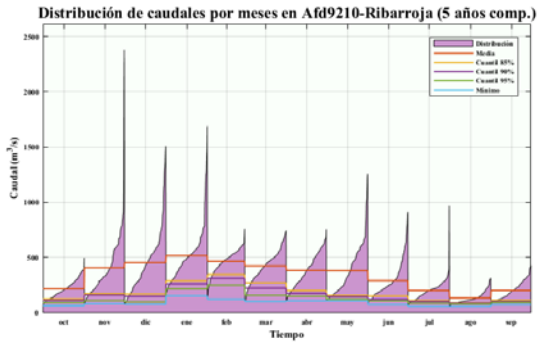




**Aforo en Ribarroja EA 9210**

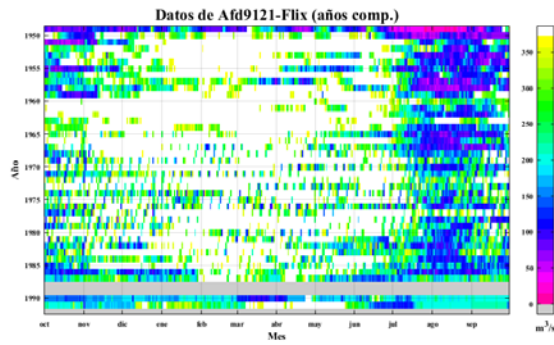
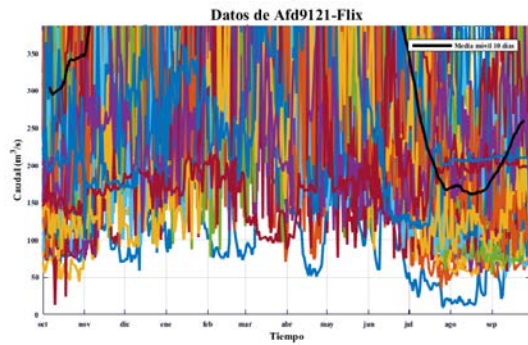
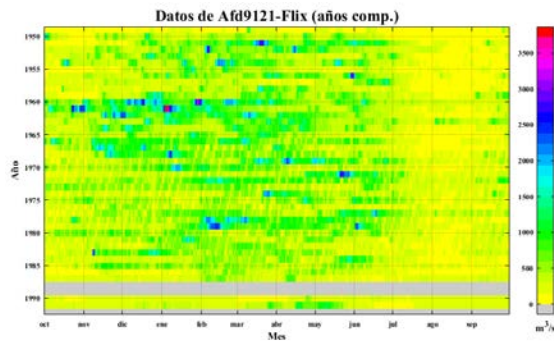
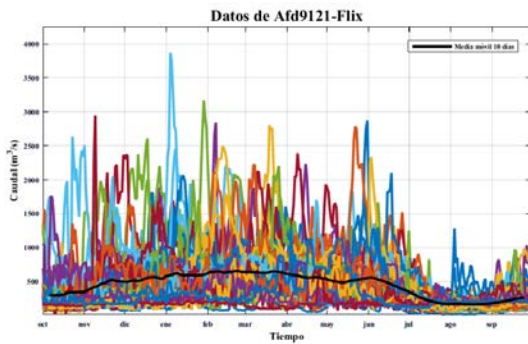
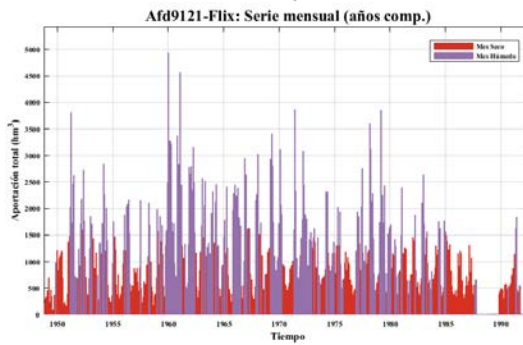
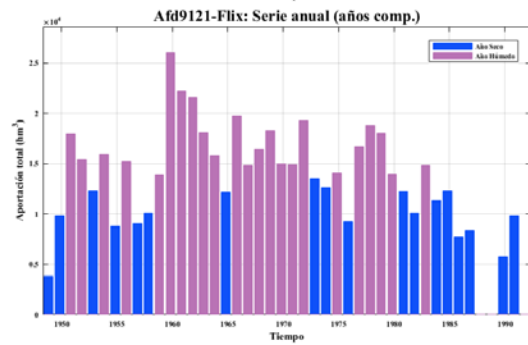
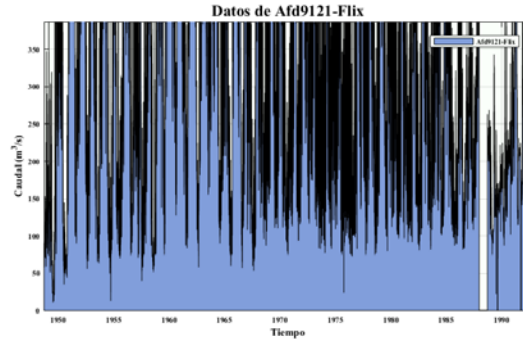
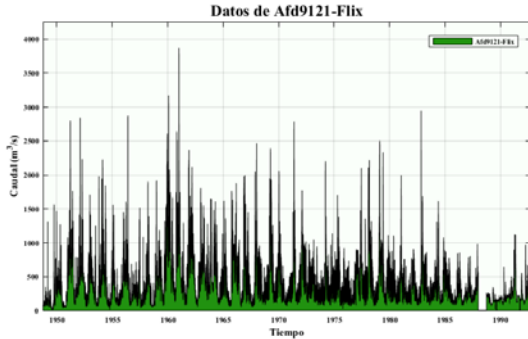


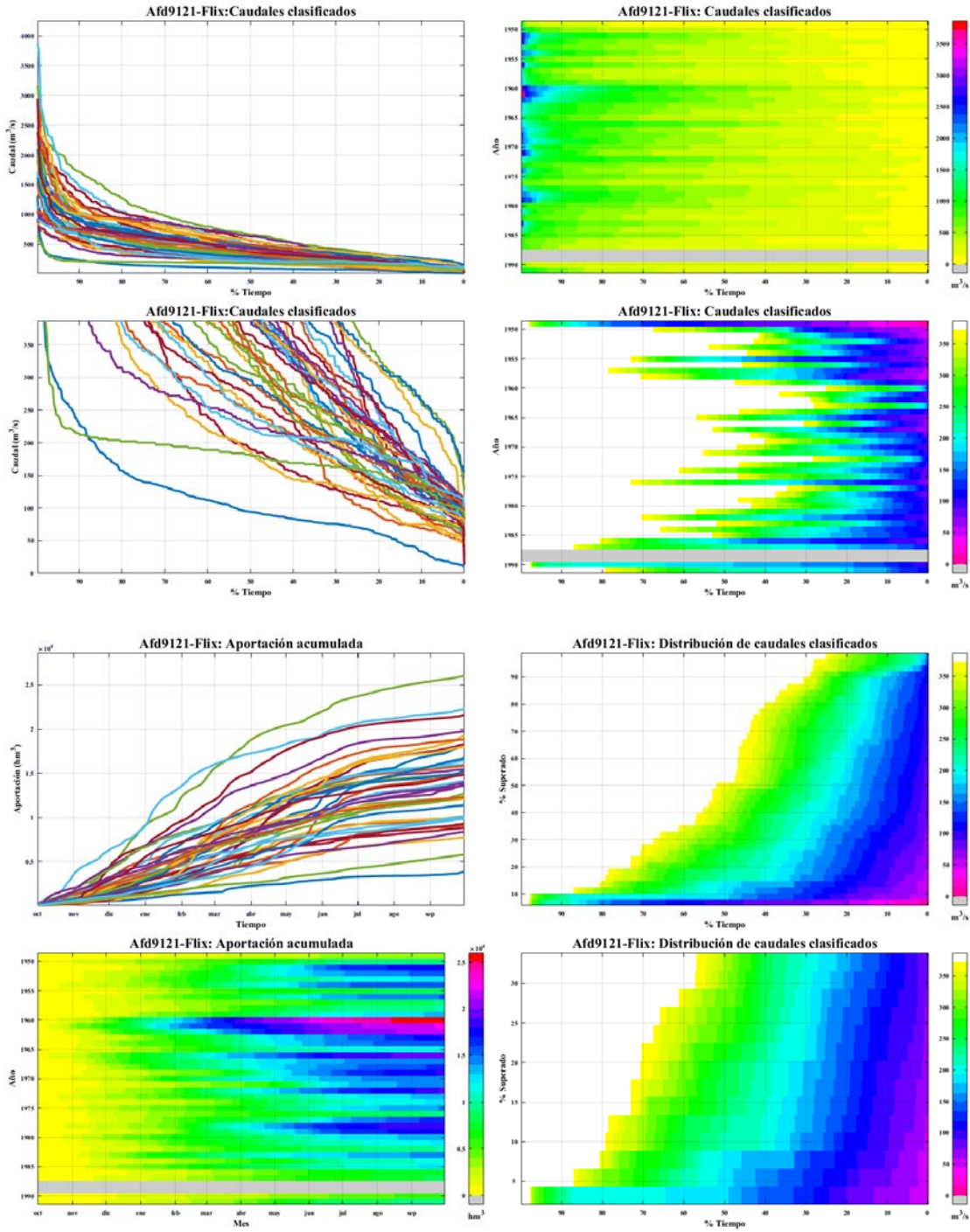


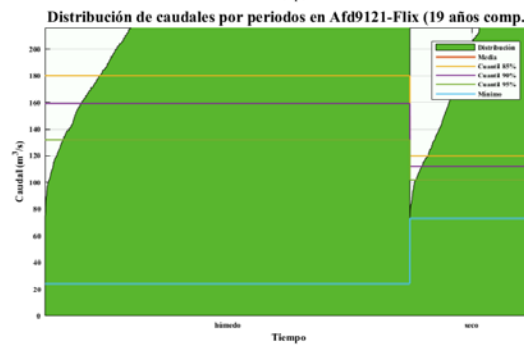
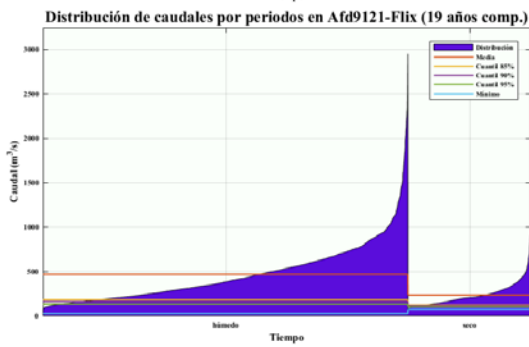
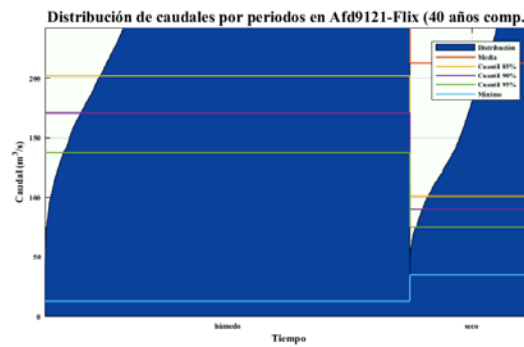
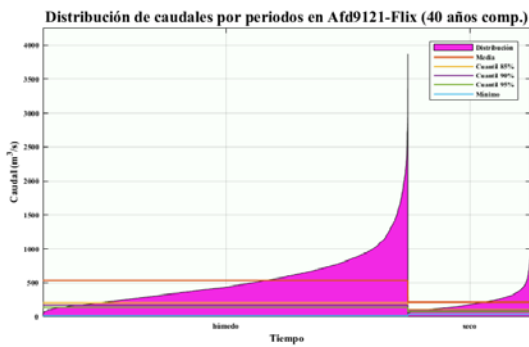
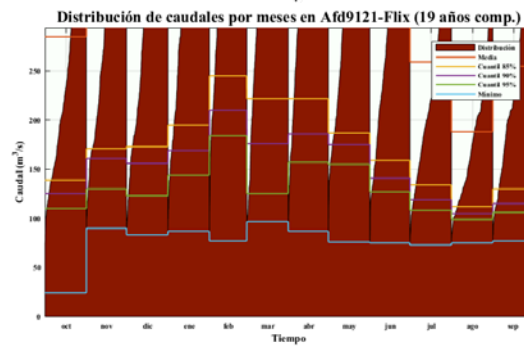
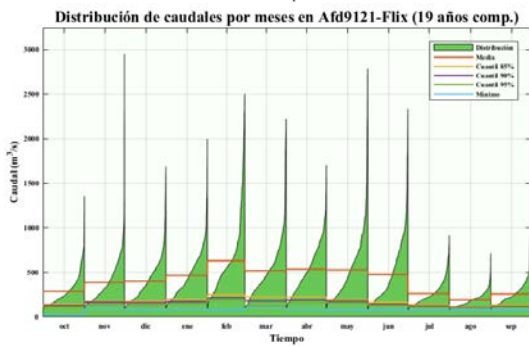
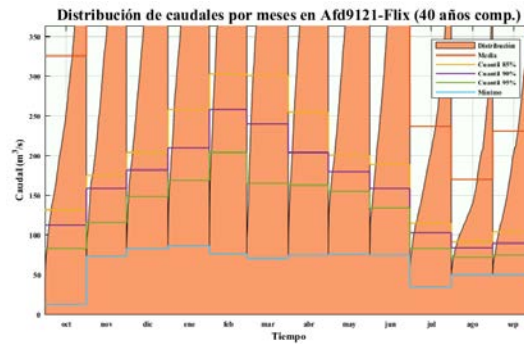
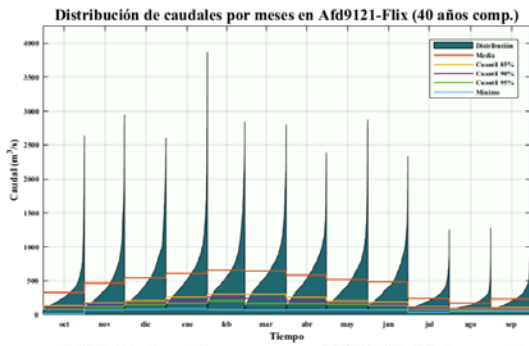




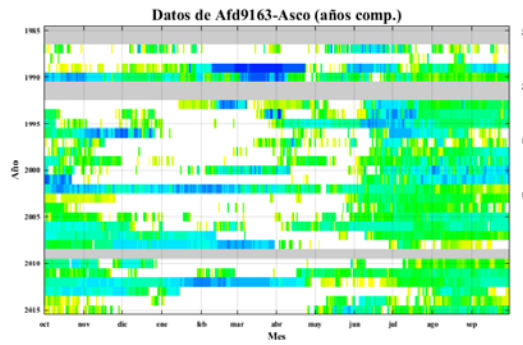
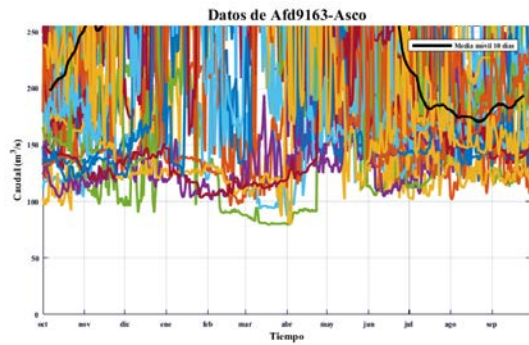
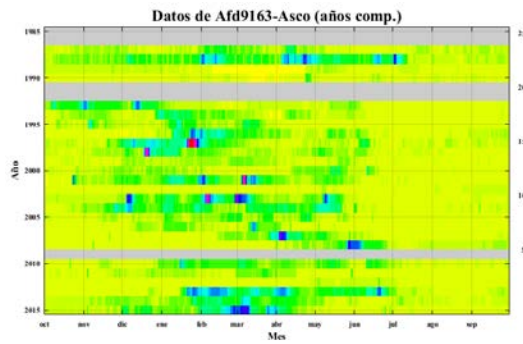
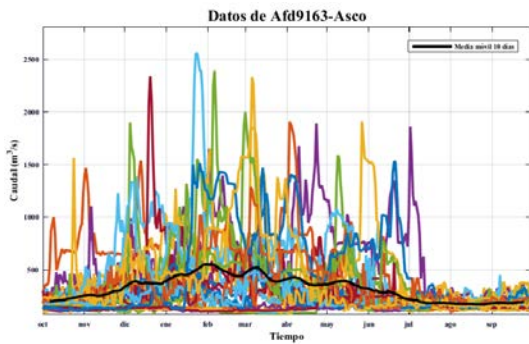
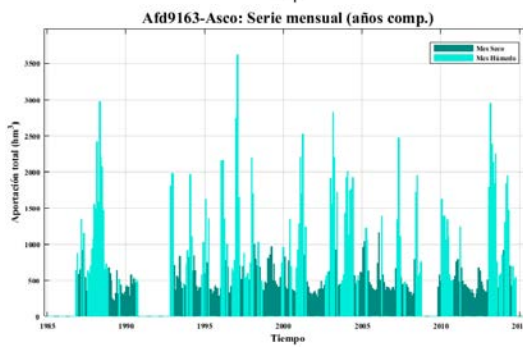
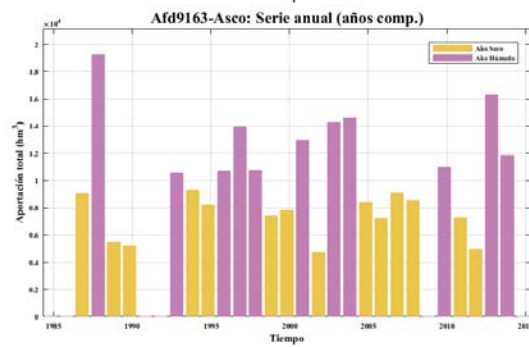
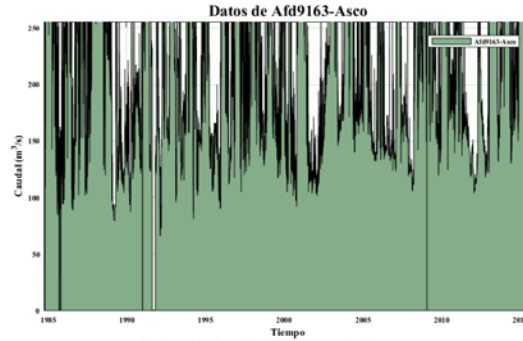
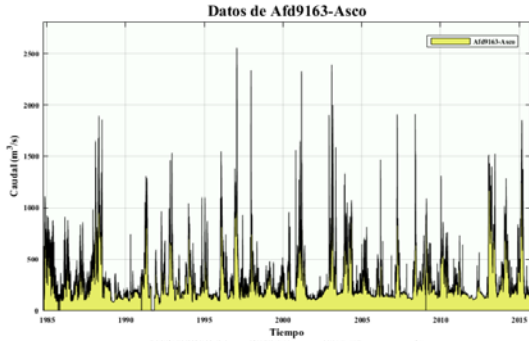
*Aforo en Flix EA 9121*

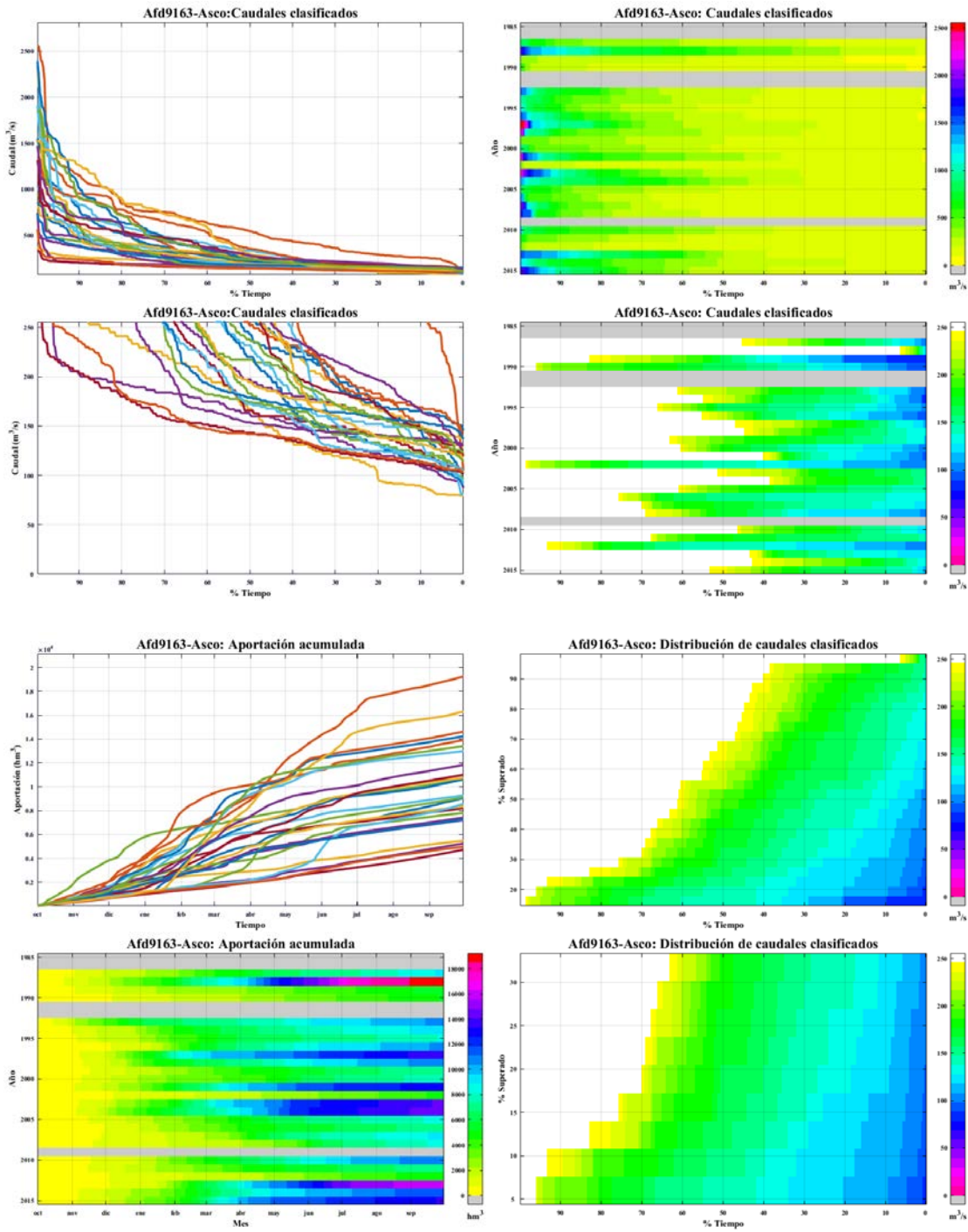


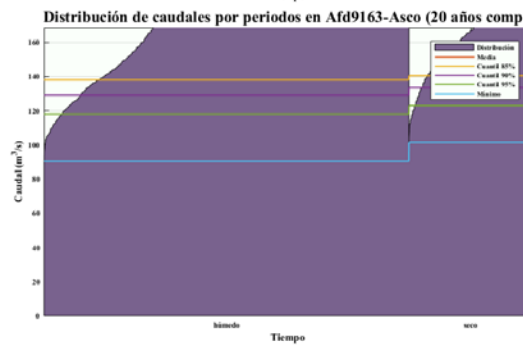
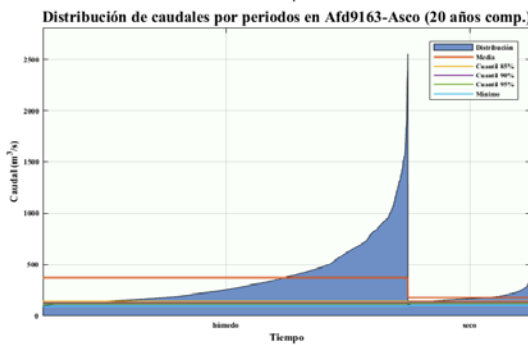
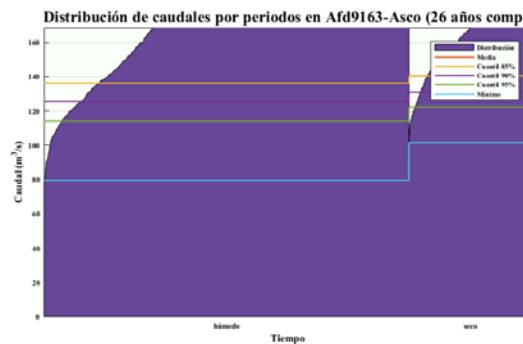
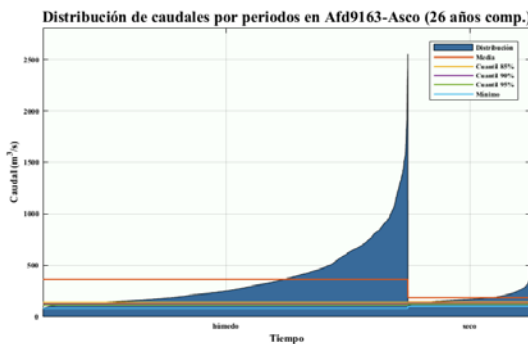
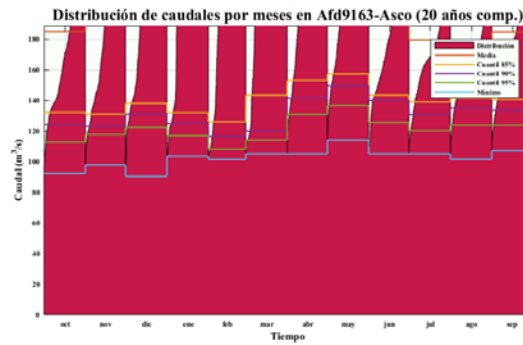
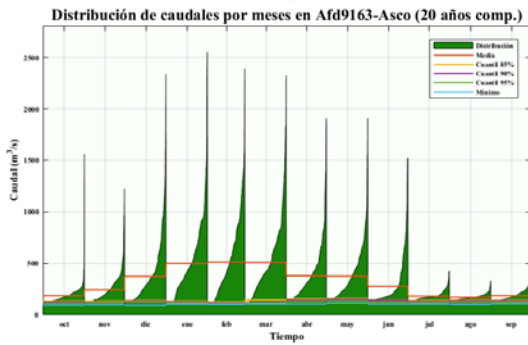
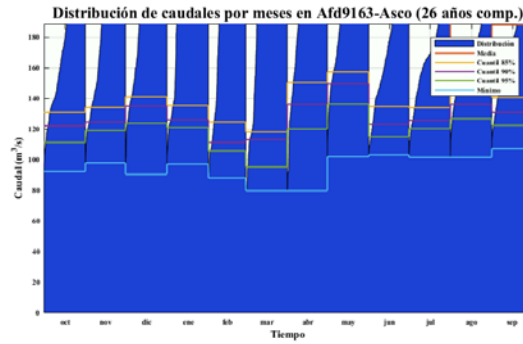
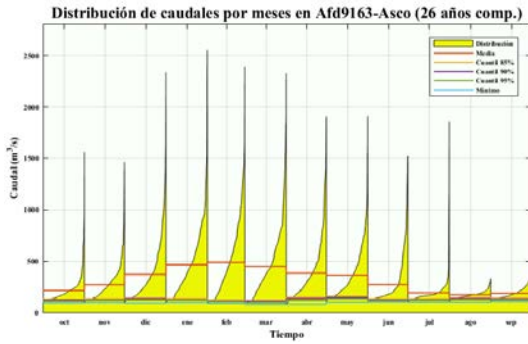




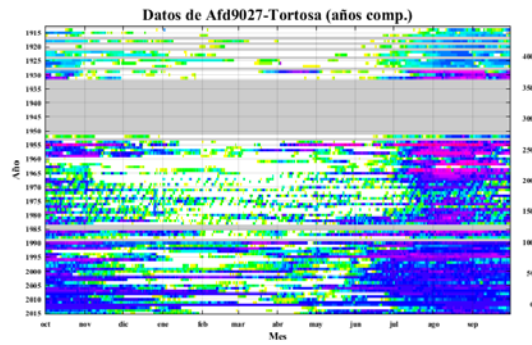
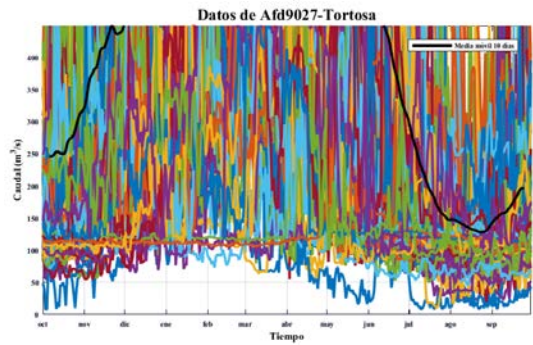
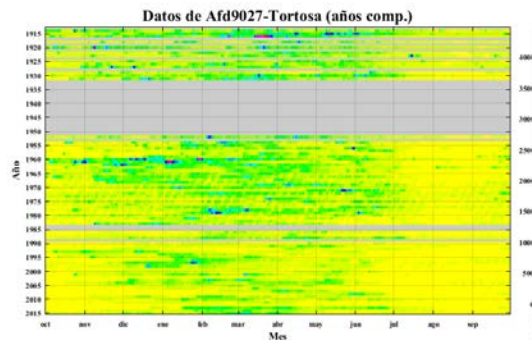
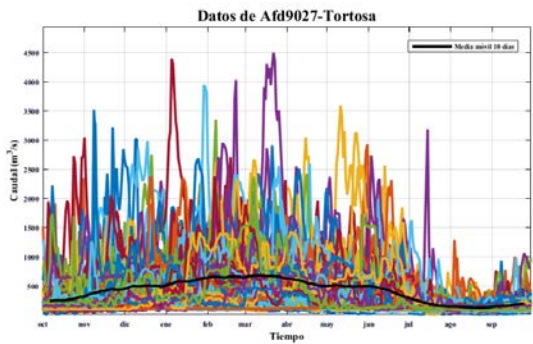
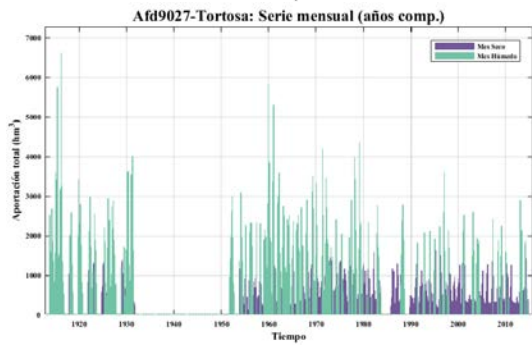
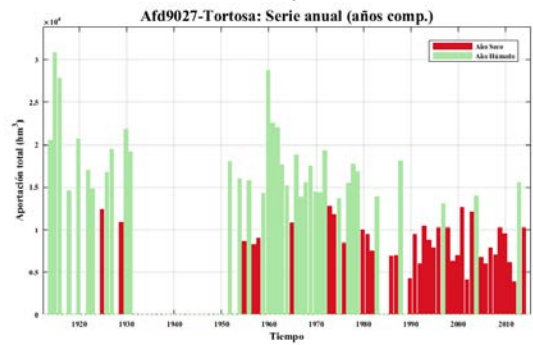
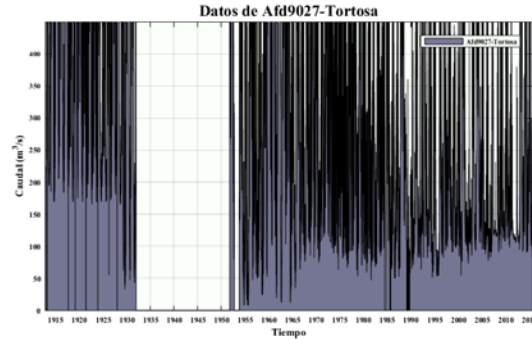
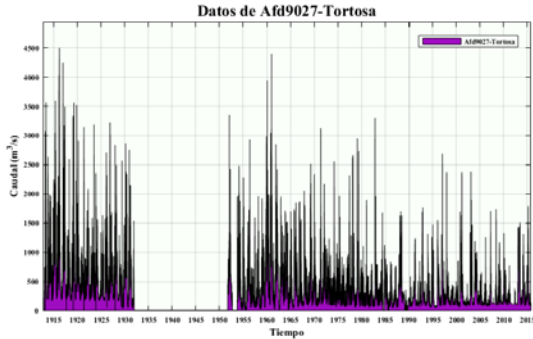
*Aforo en Ascó EA 9163*

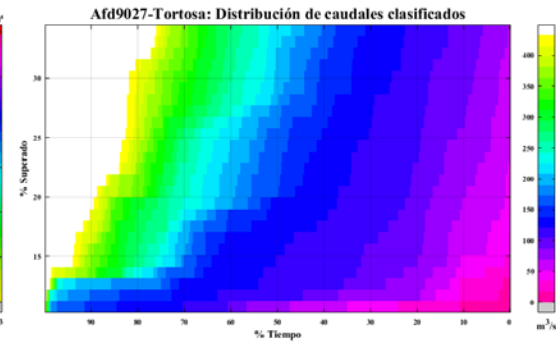
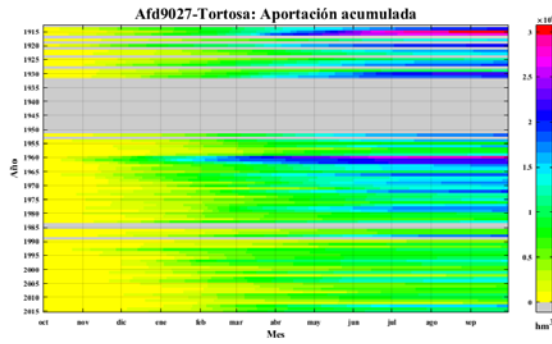
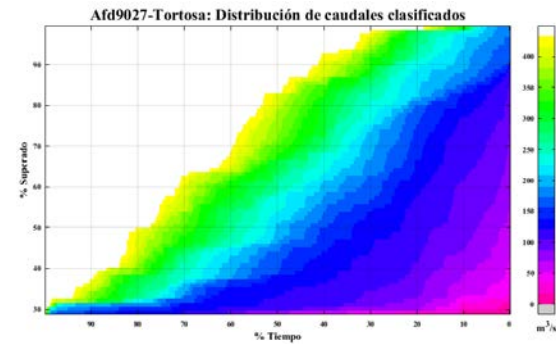
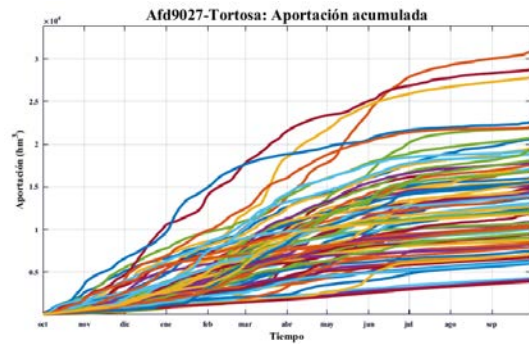
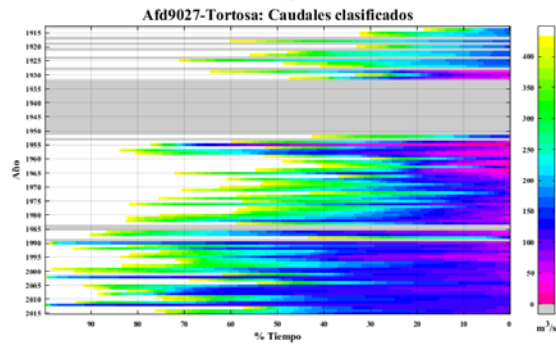
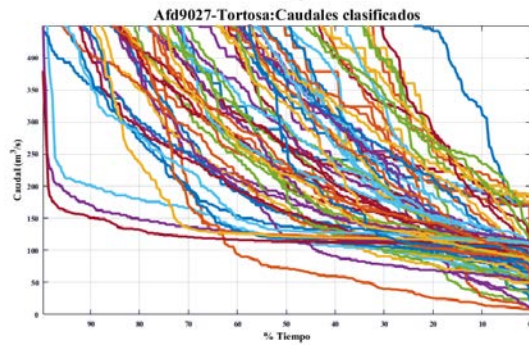
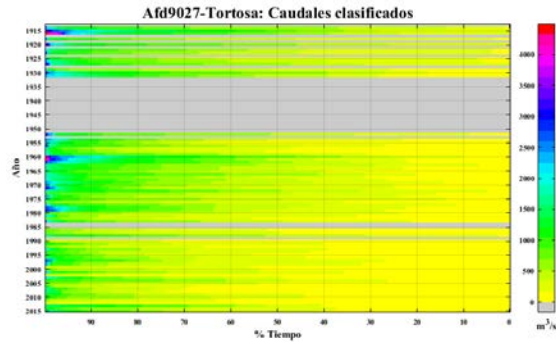
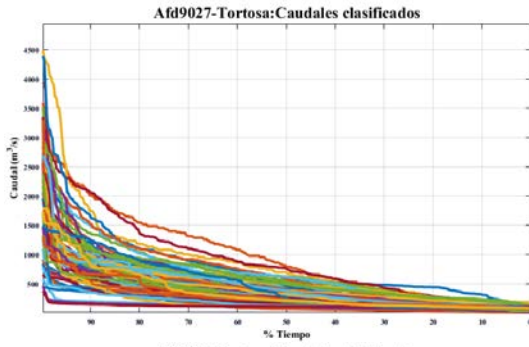




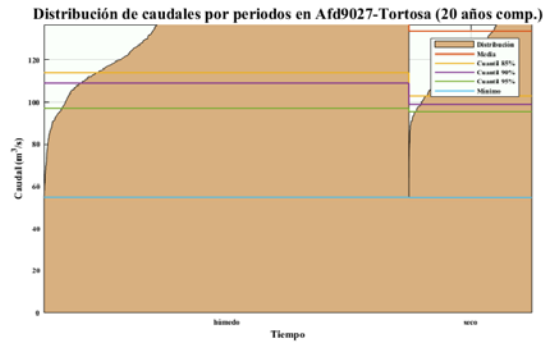
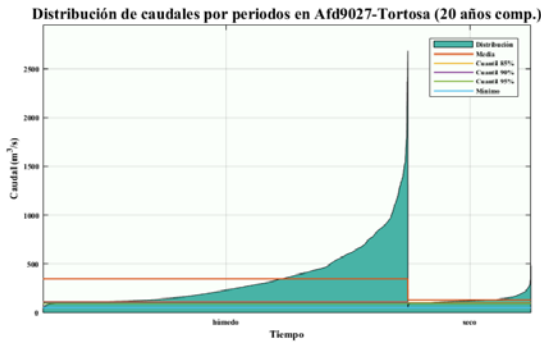
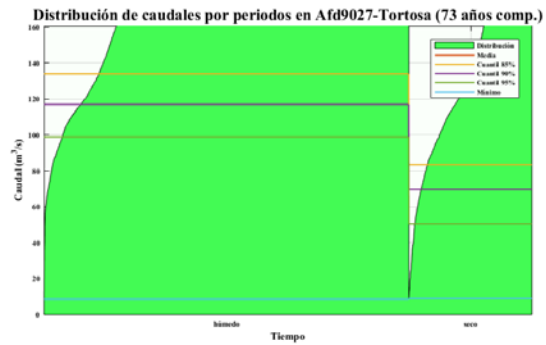
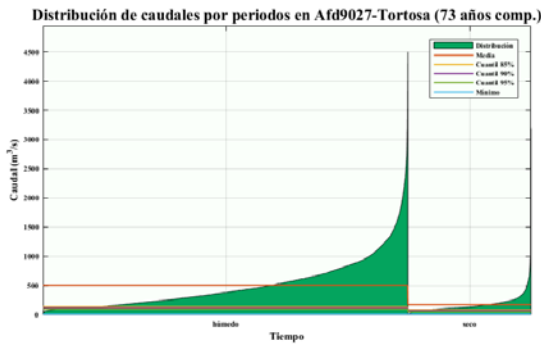
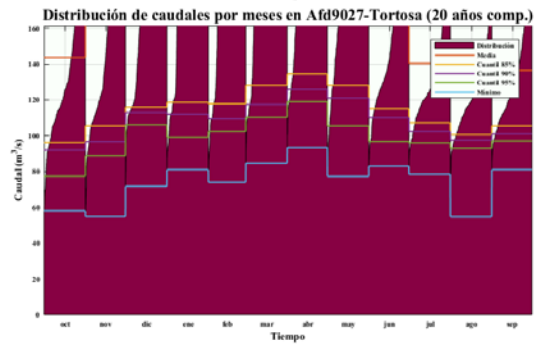
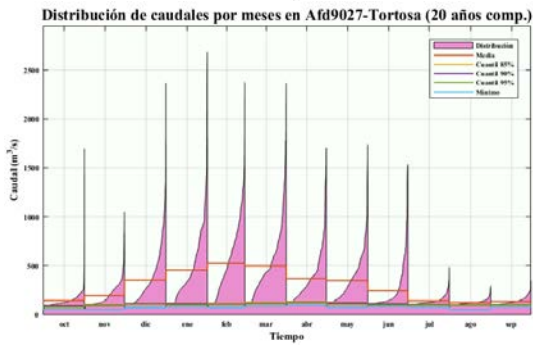
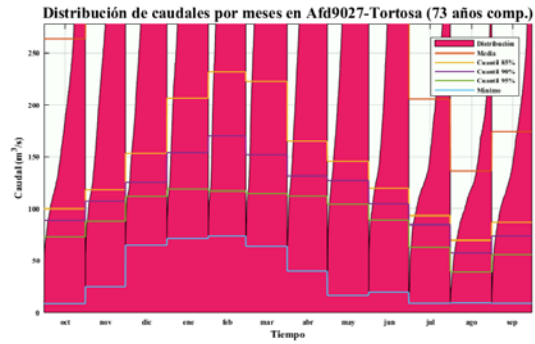
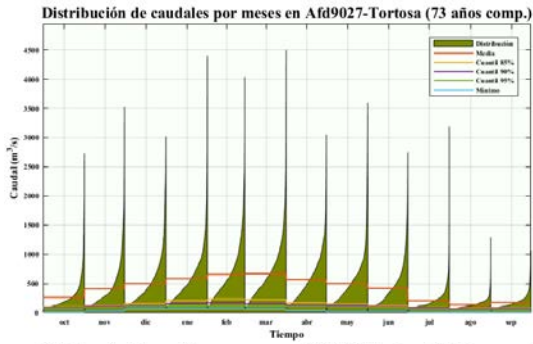


*Aforo en Tortosa EA 9027*

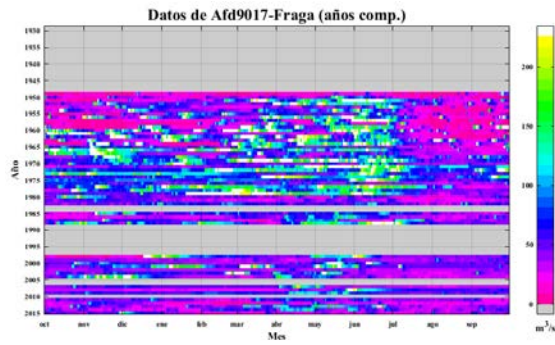
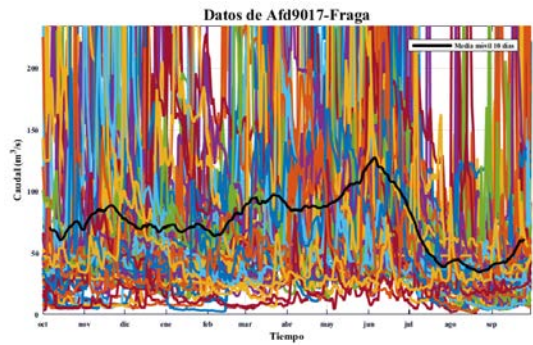
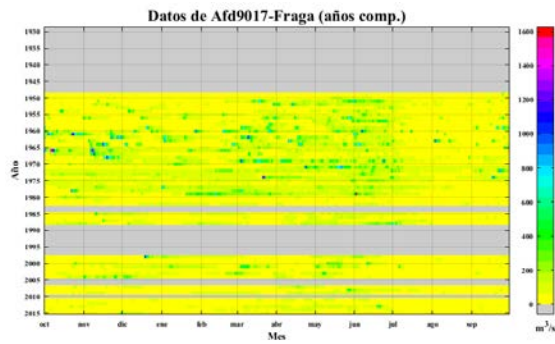
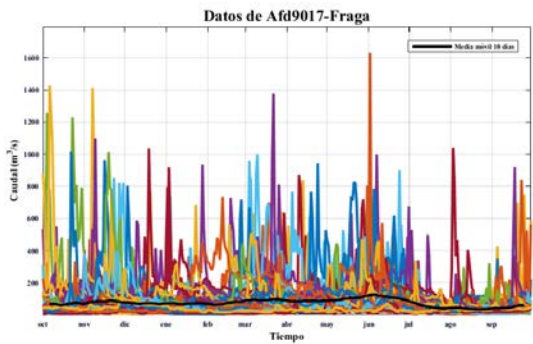
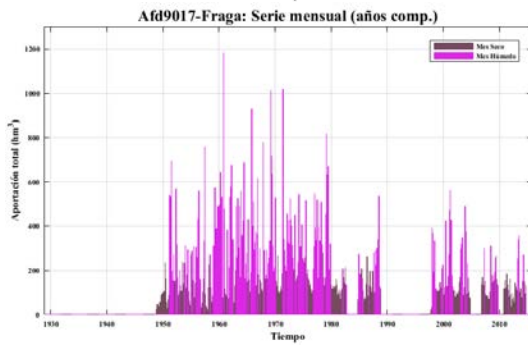
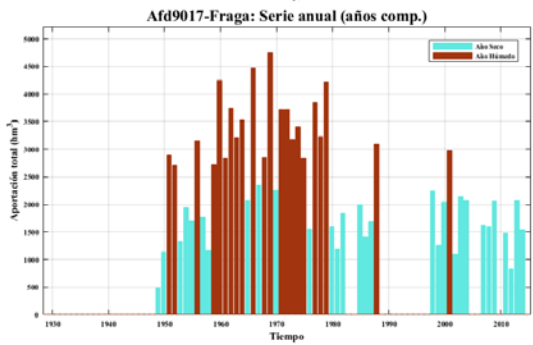
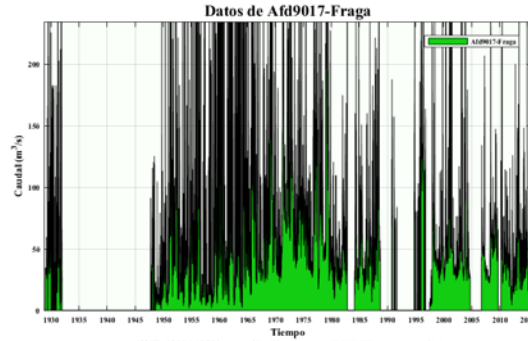
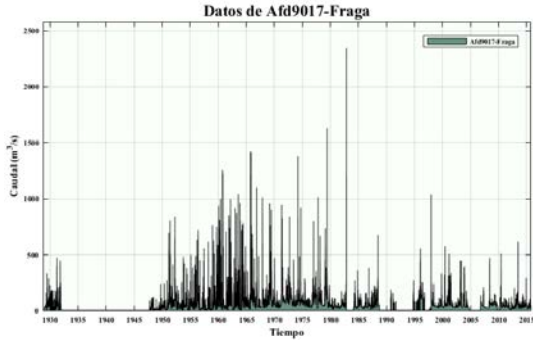


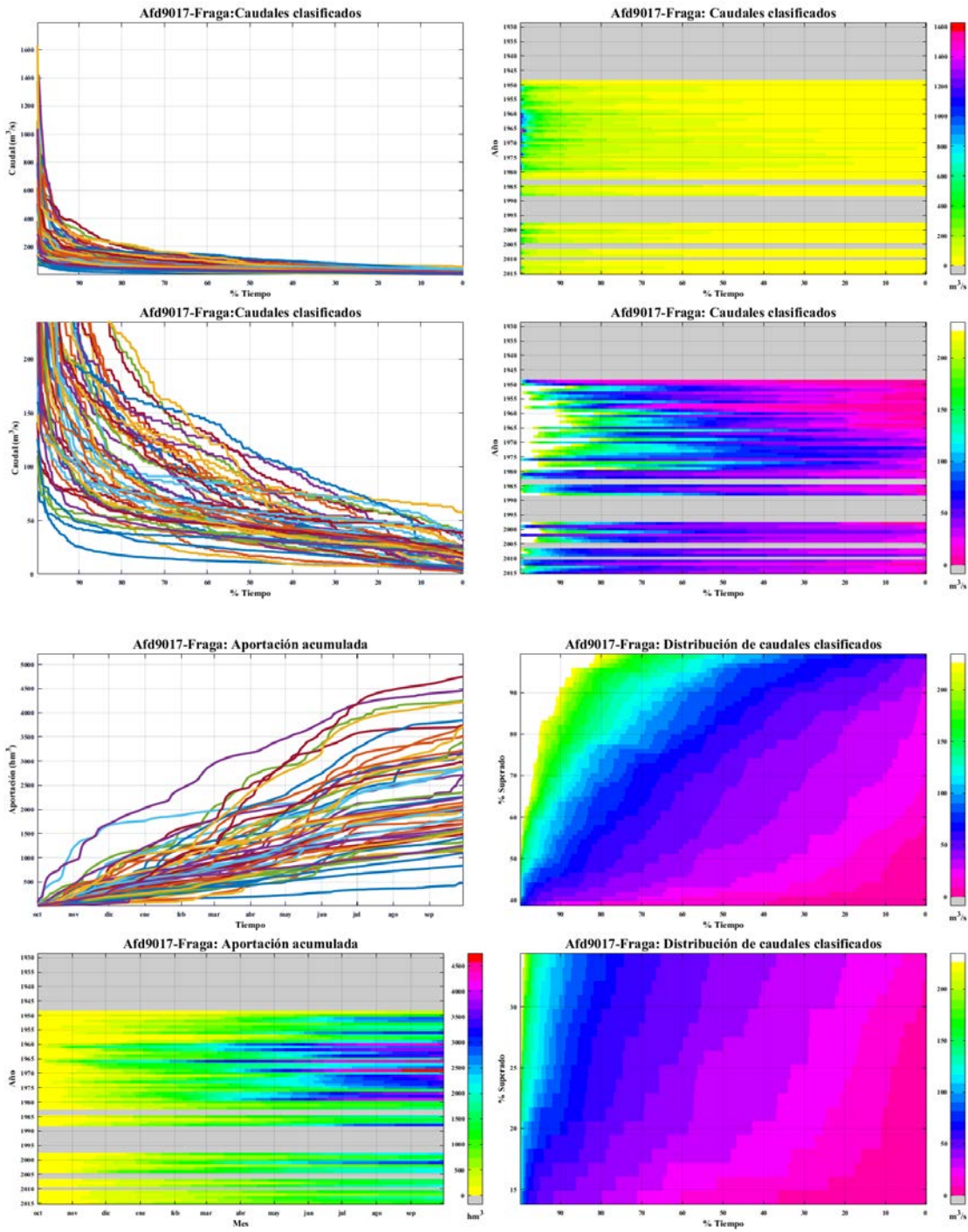


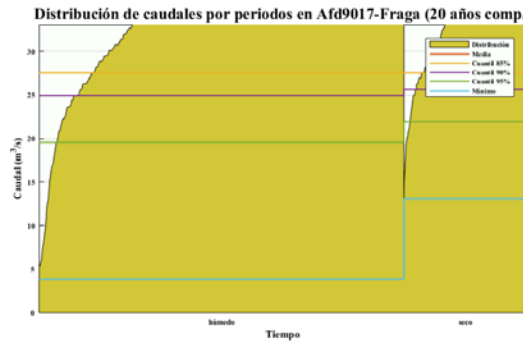
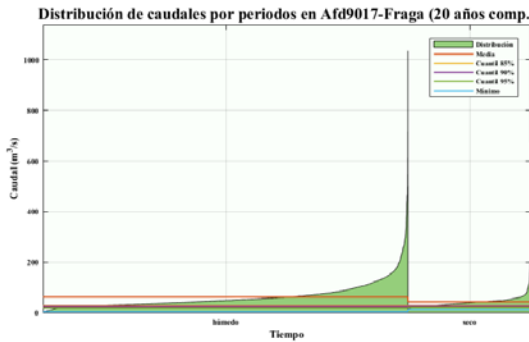
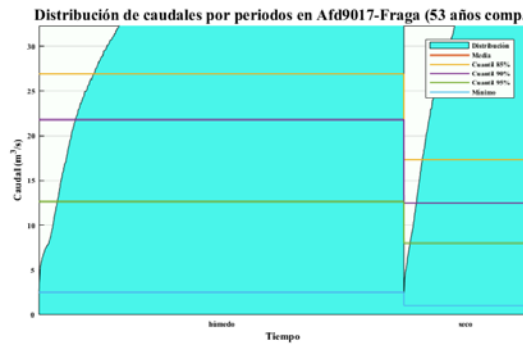
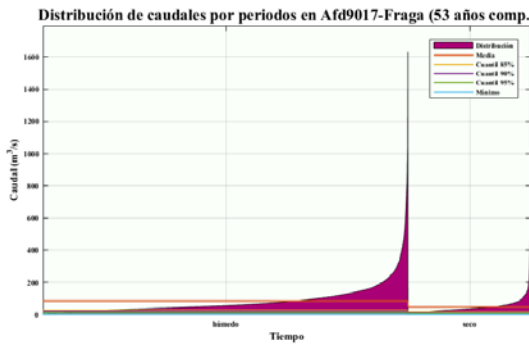
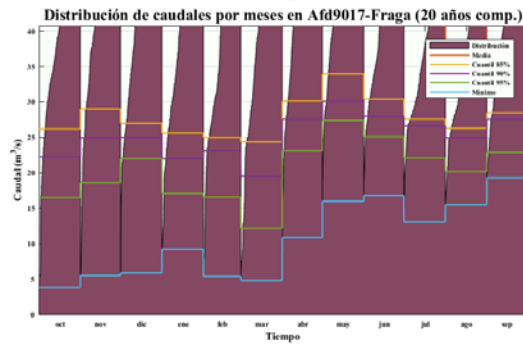
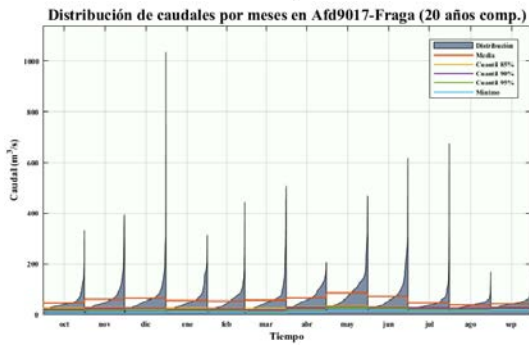
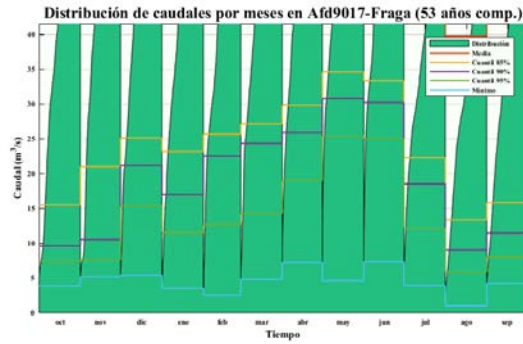
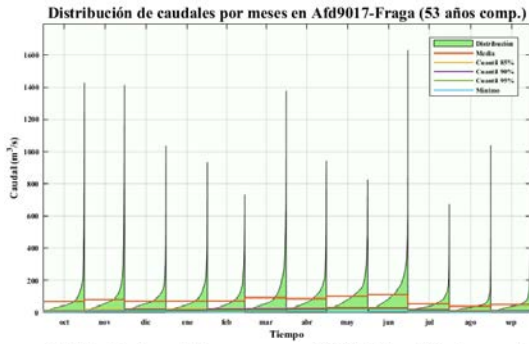




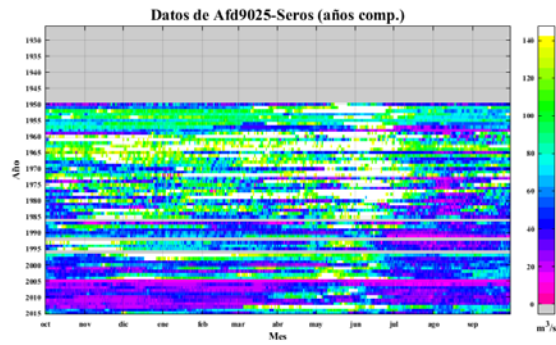
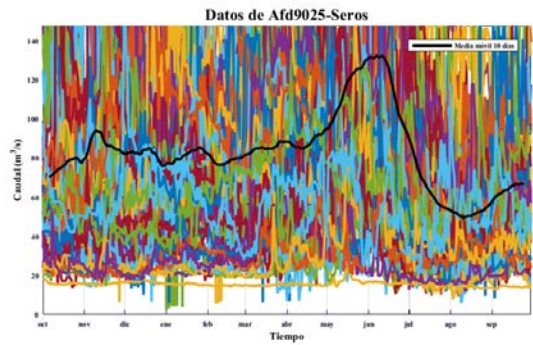
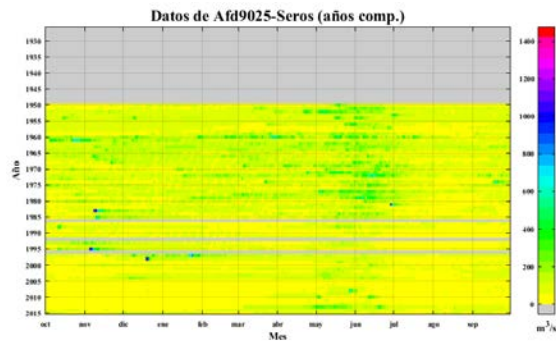
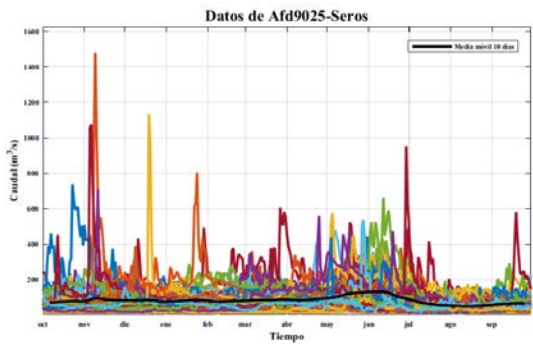
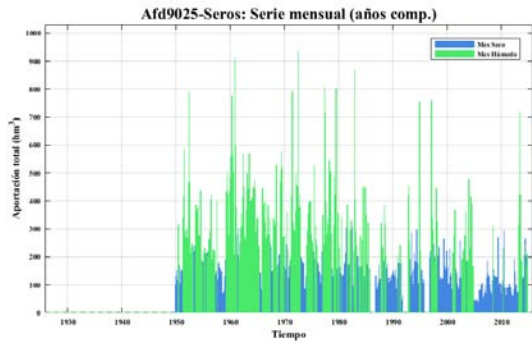
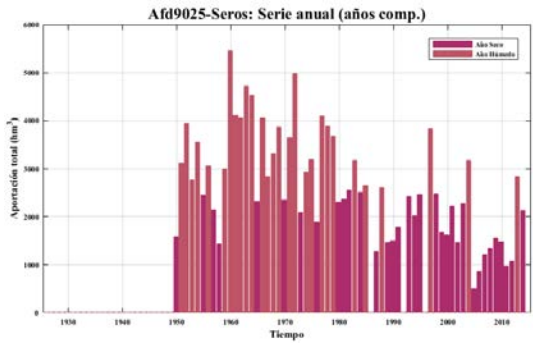
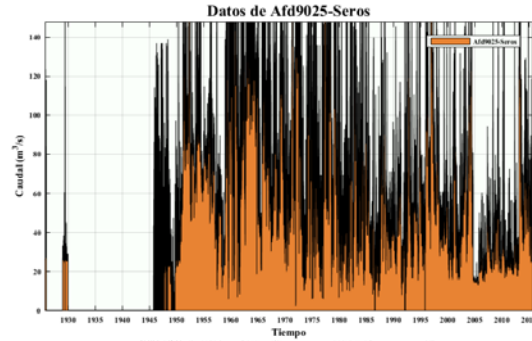
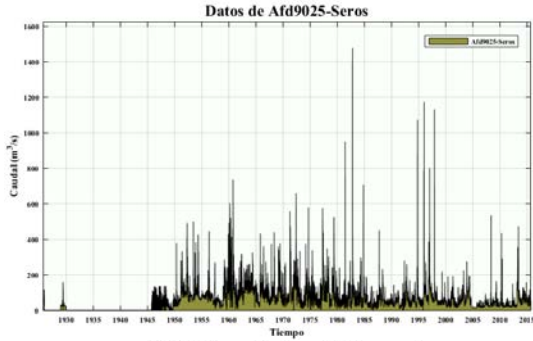
**Aforo en Fraga EA 9017**

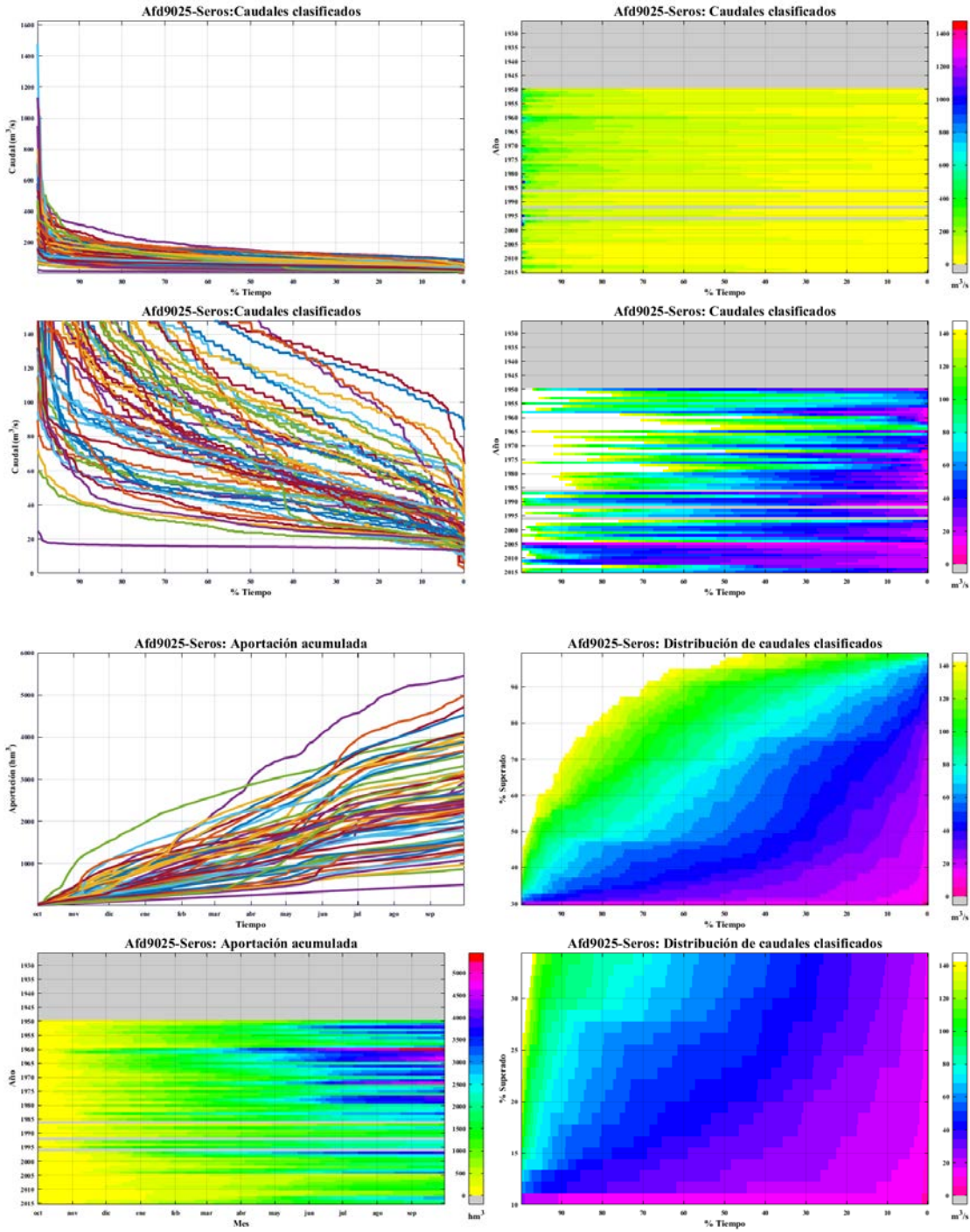


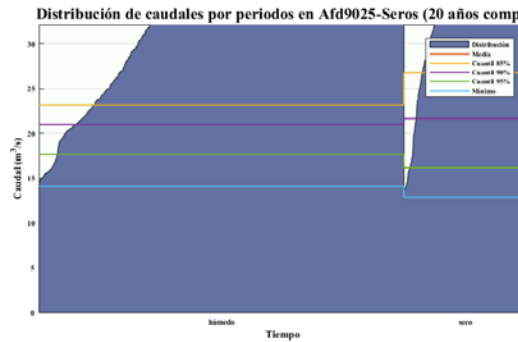
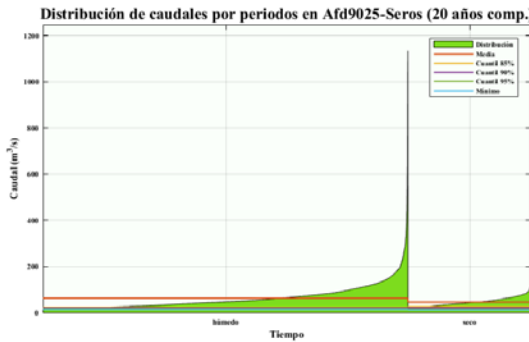
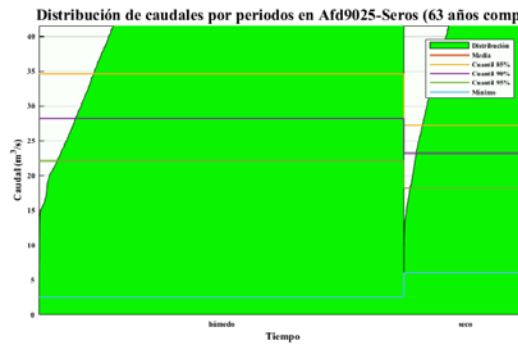
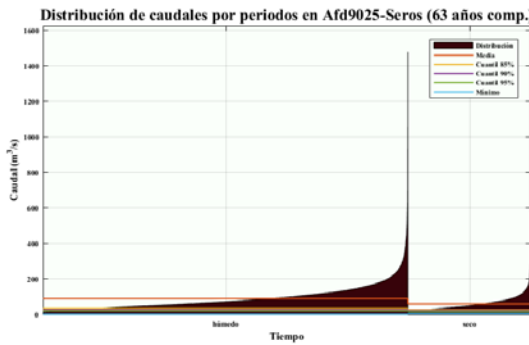
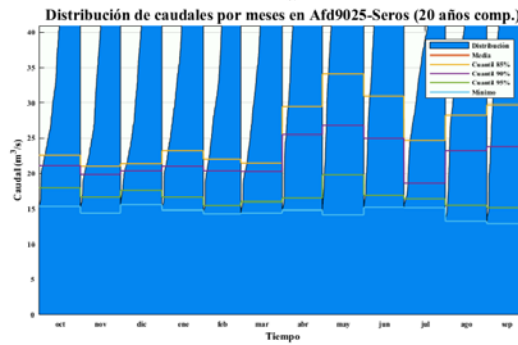
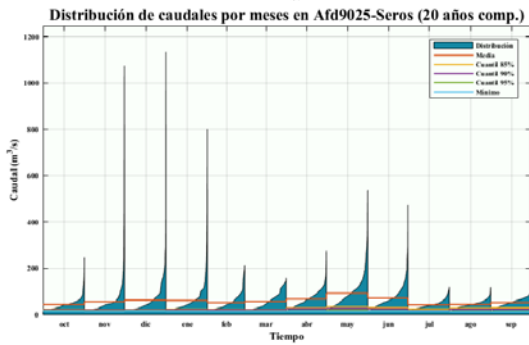
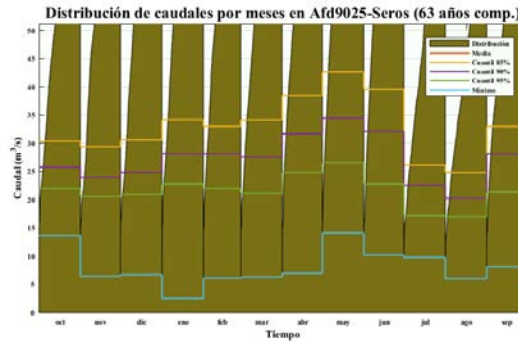
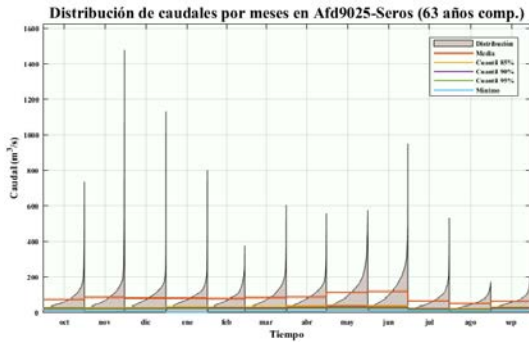




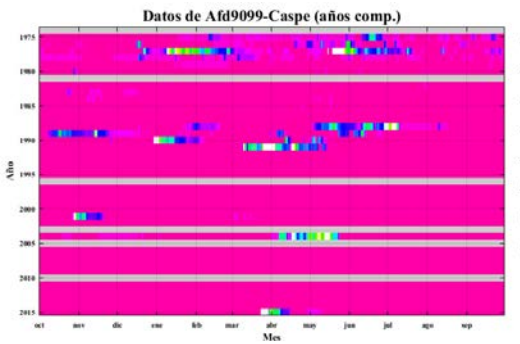
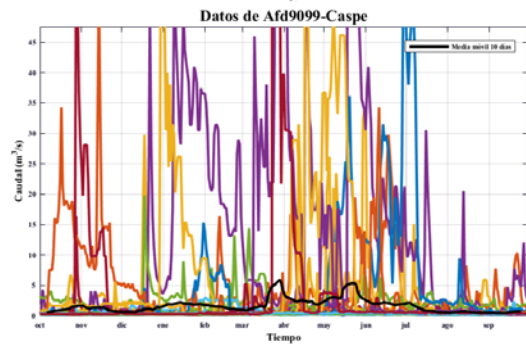
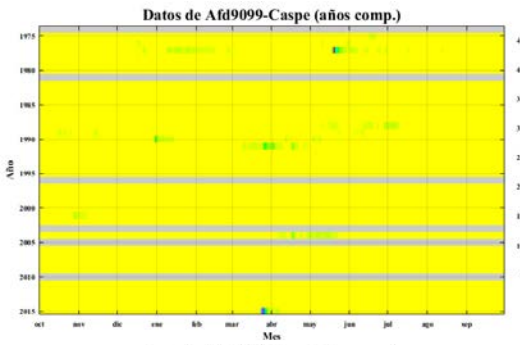
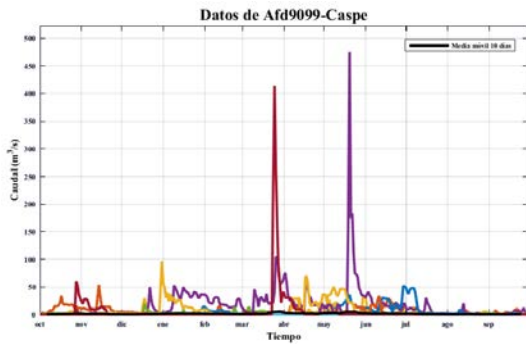
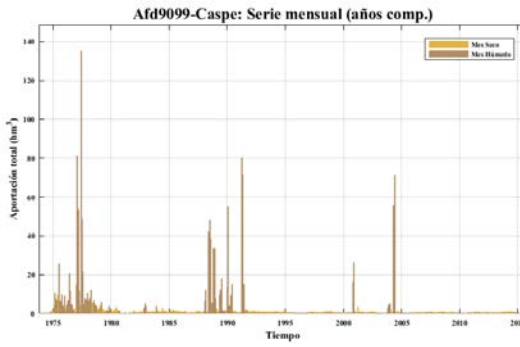
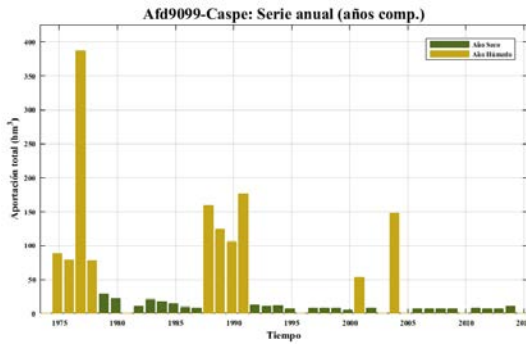
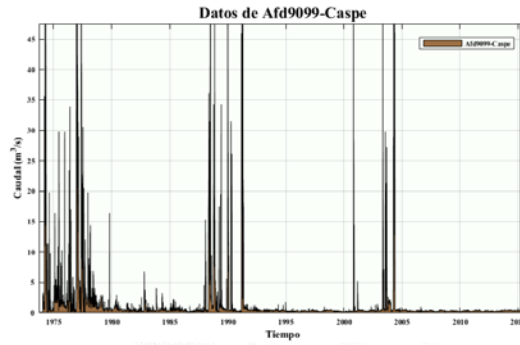
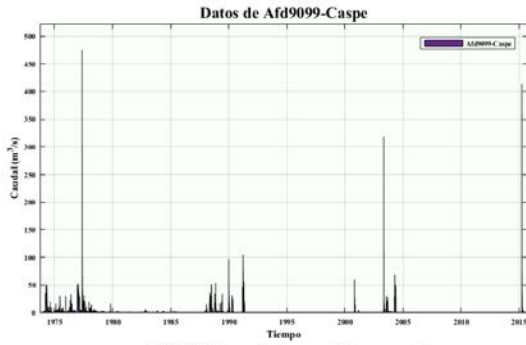
*Aforo en Serós EA 9025*



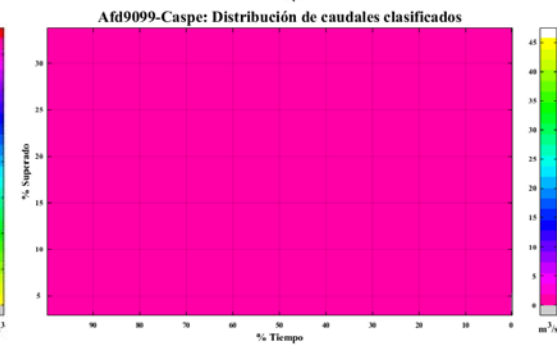
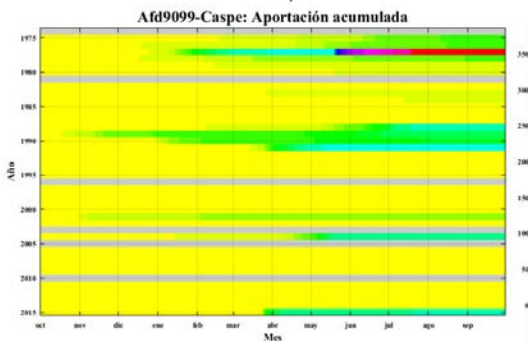
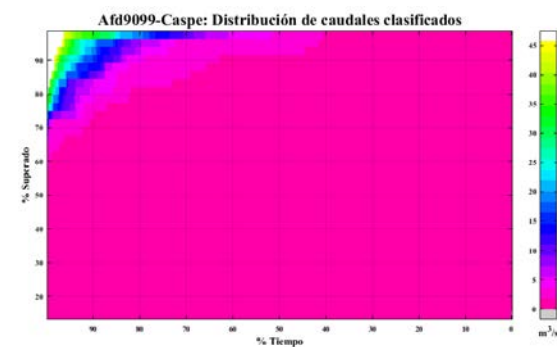
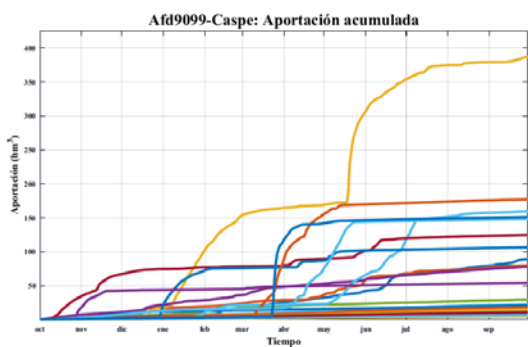
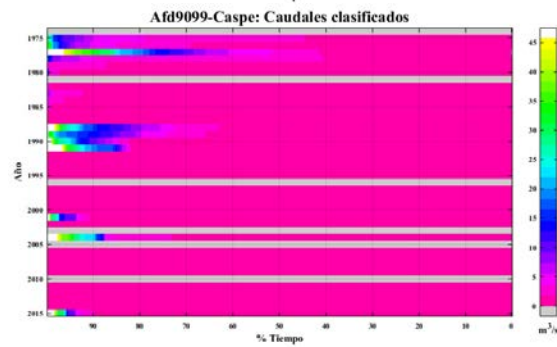
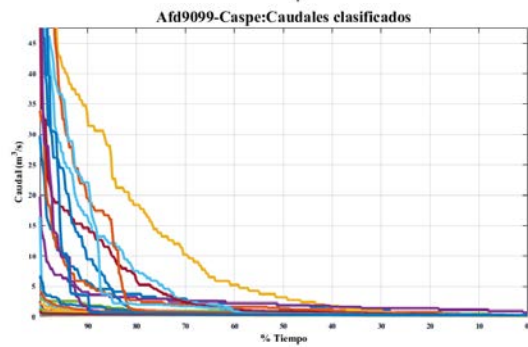
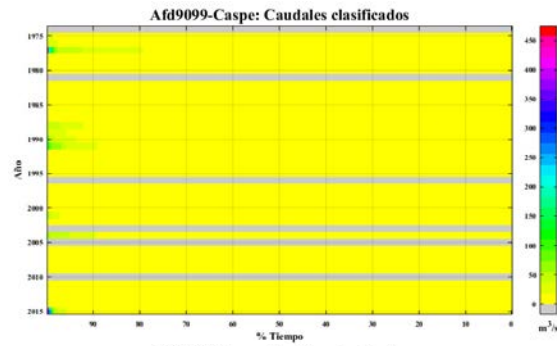
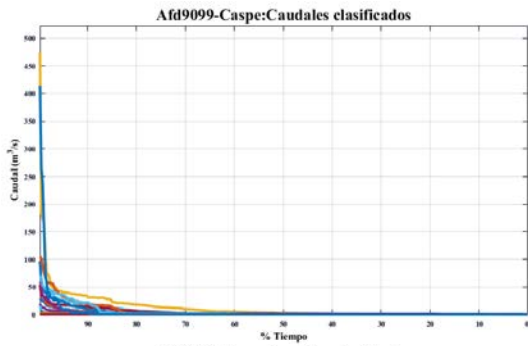


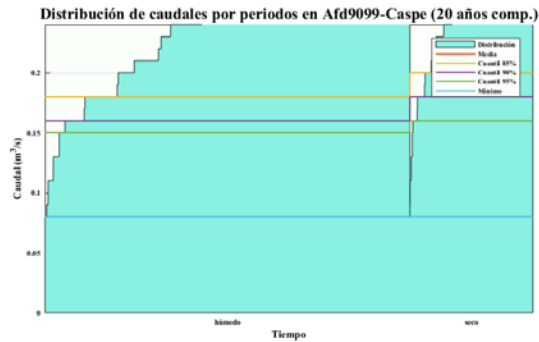
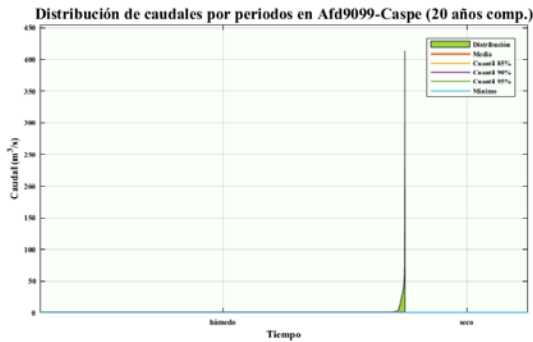
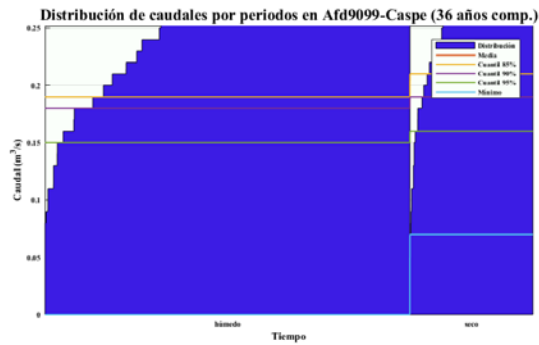
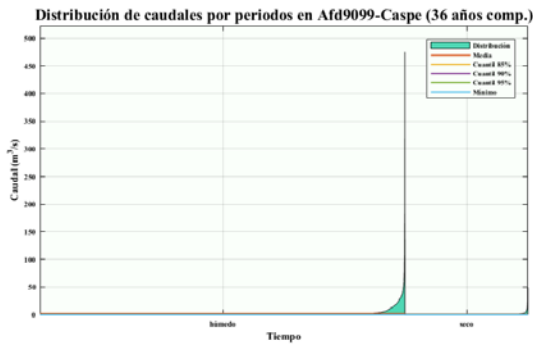
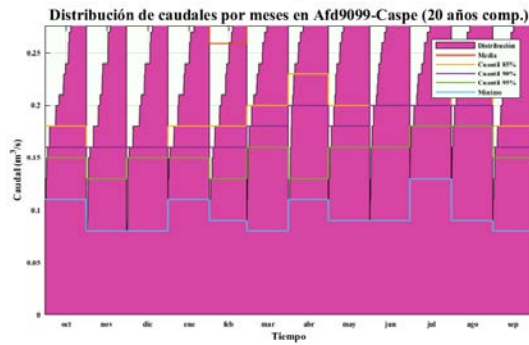
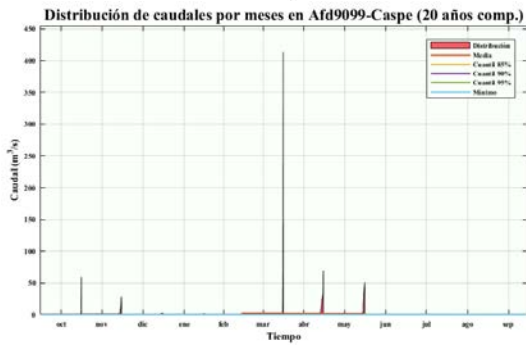
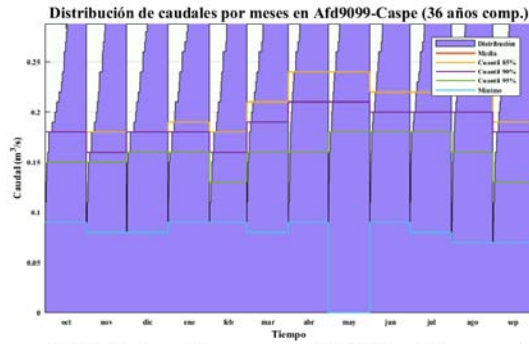
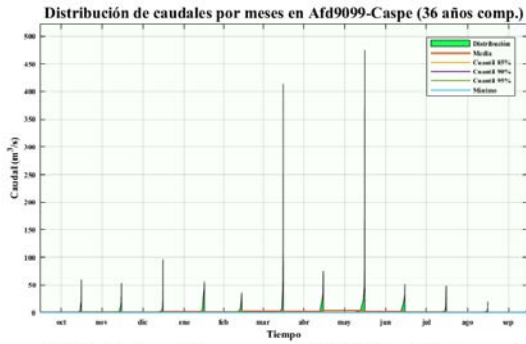


**Aforo en Caspe EA 9099**

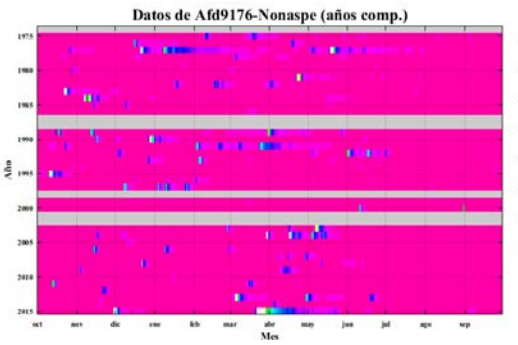
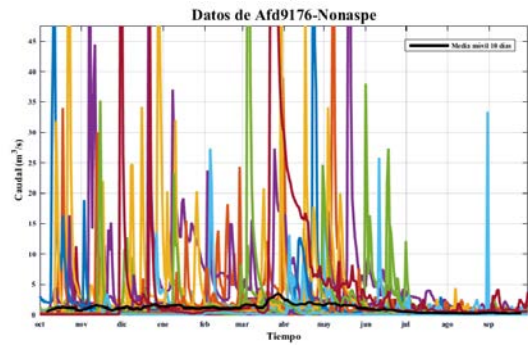
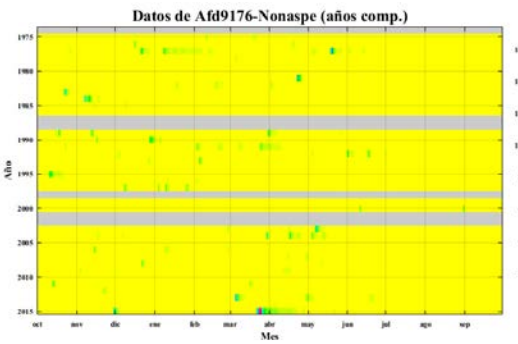
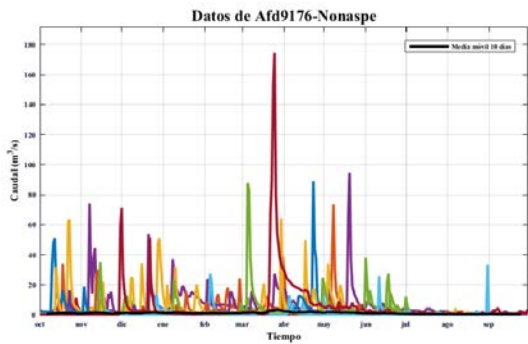
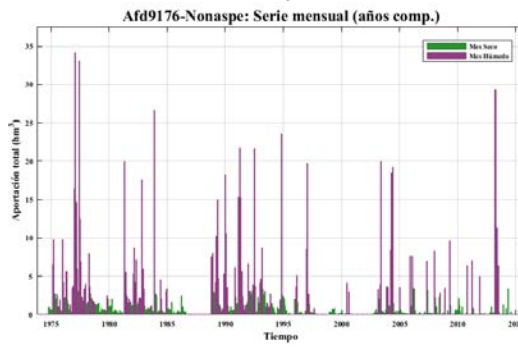
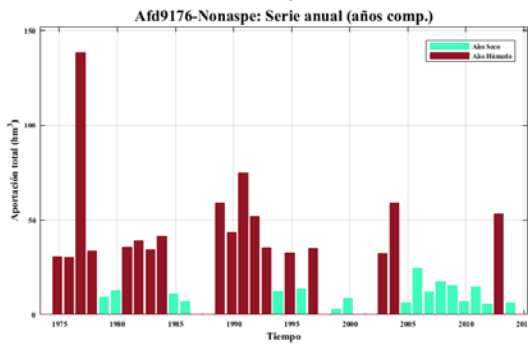
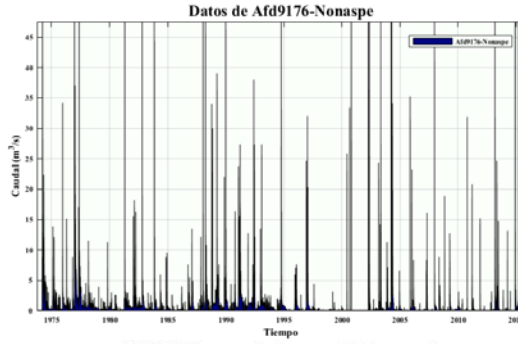
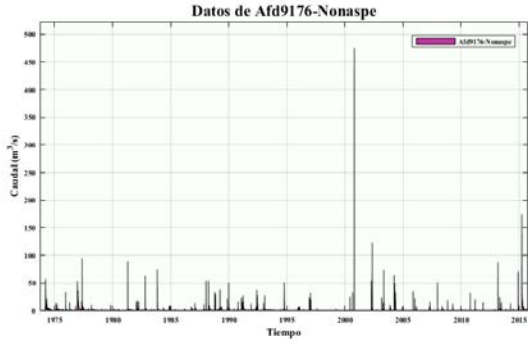


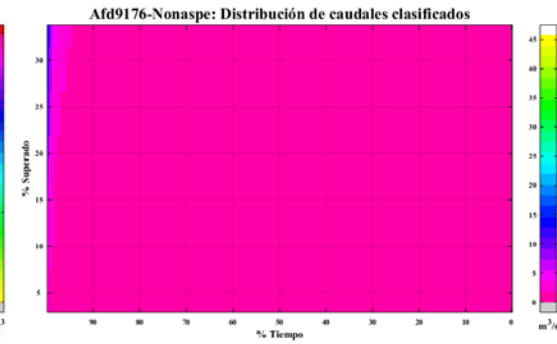
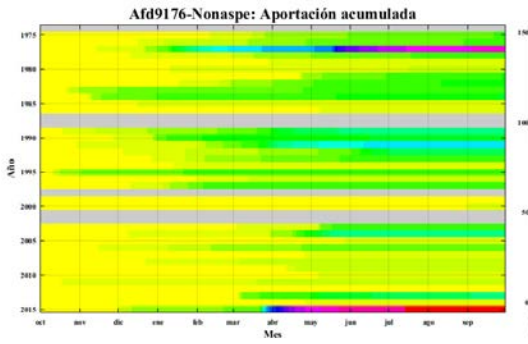
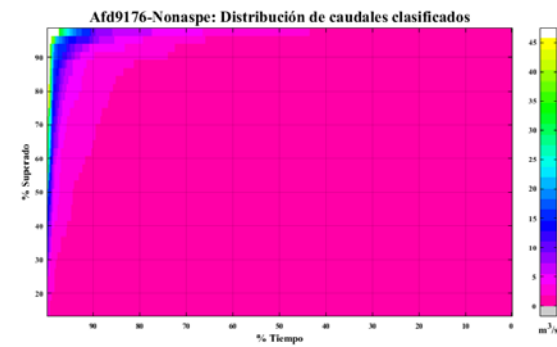
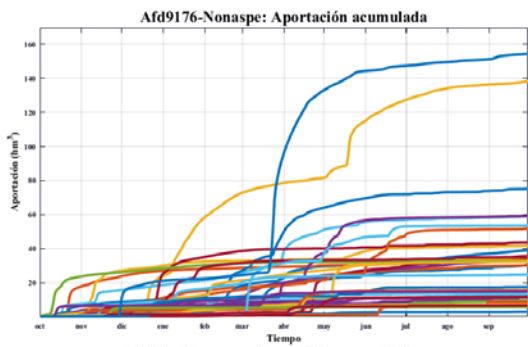
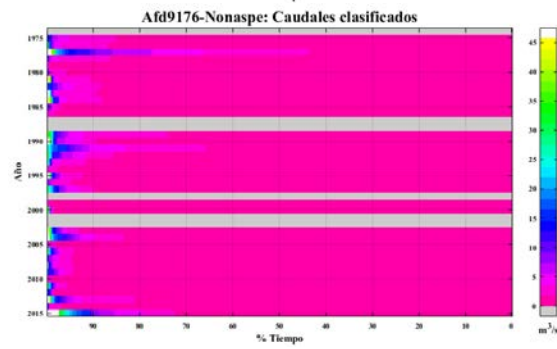
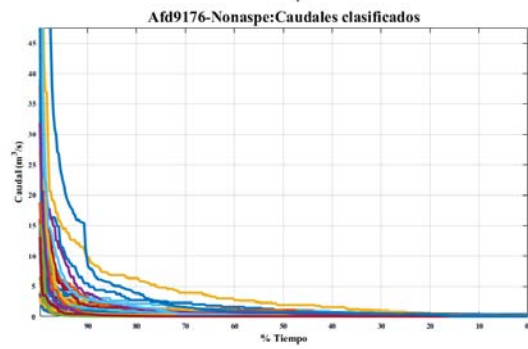
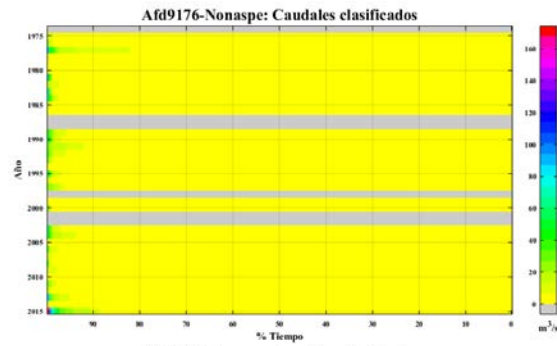
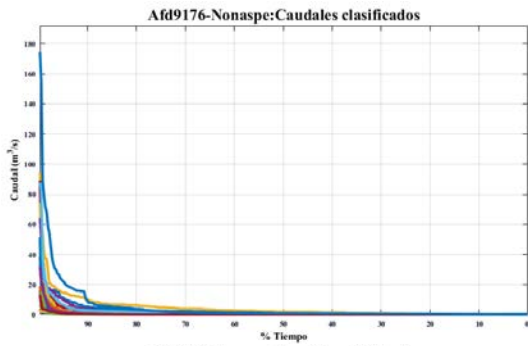


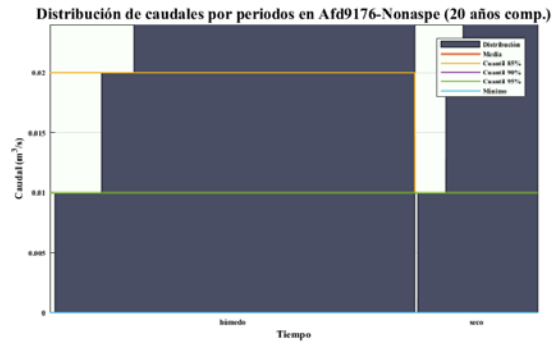
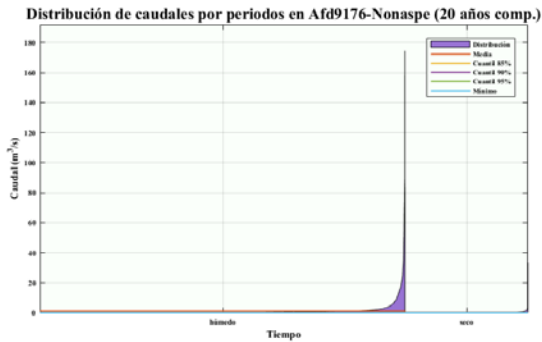
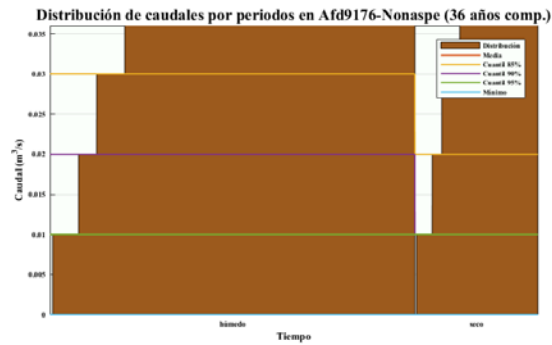
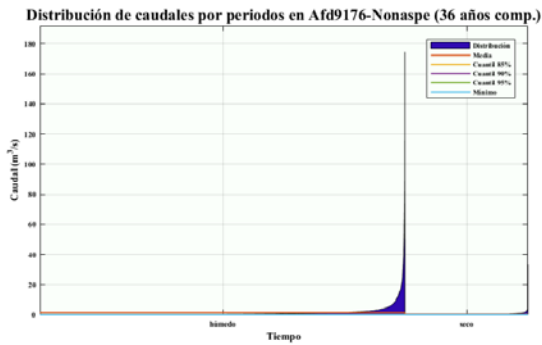
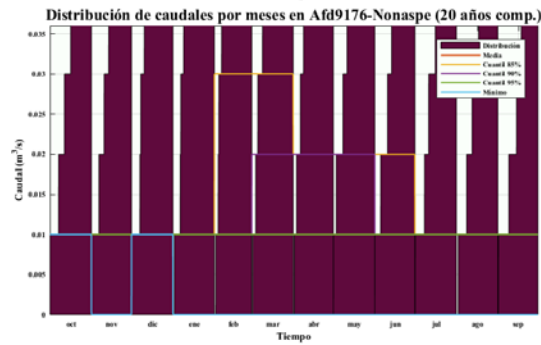
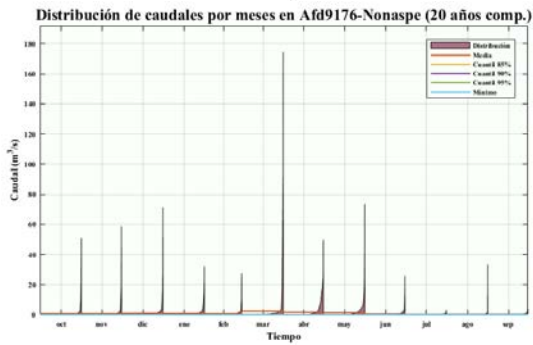
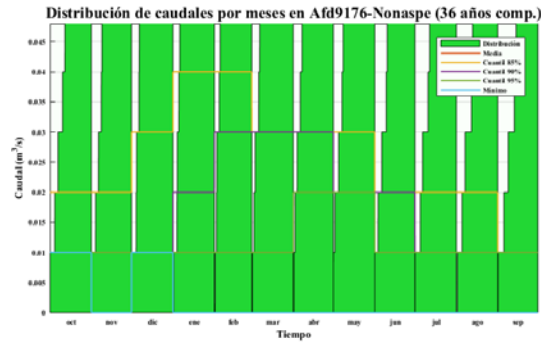
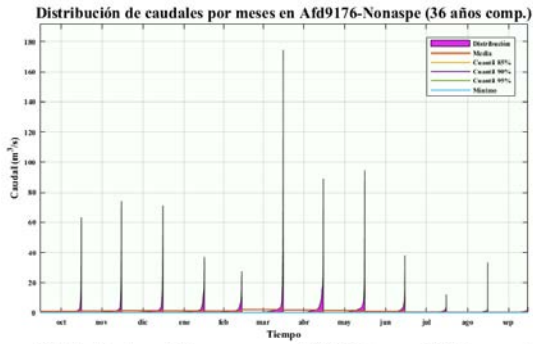




*Aforo en Nonaspe EA 9176*



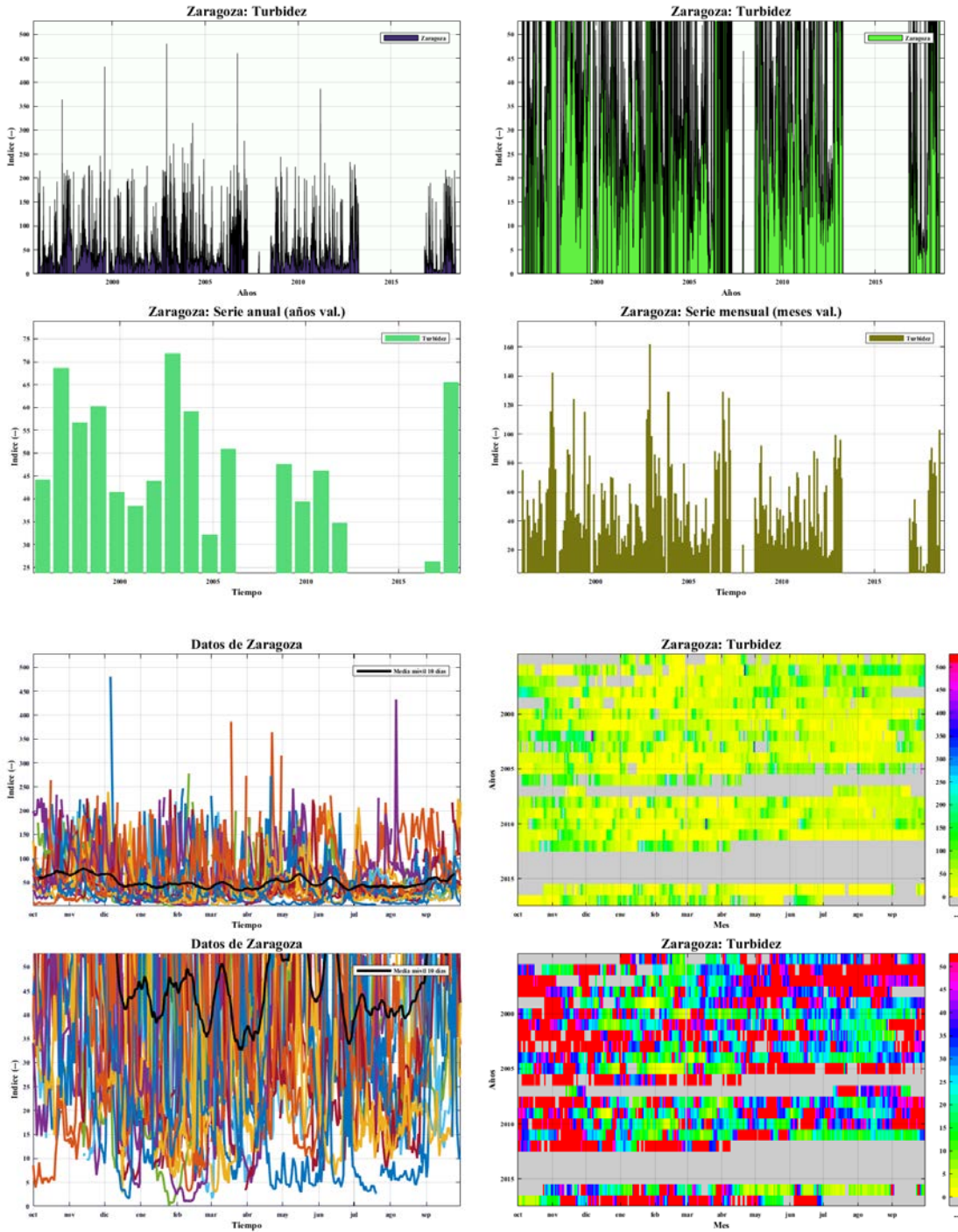


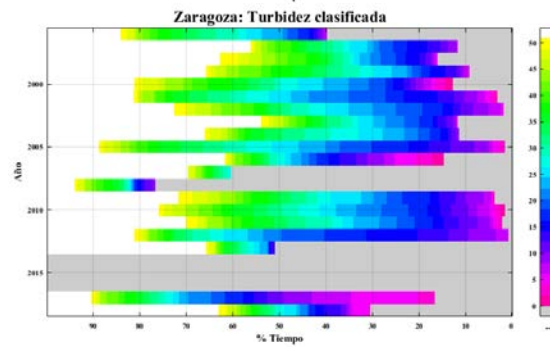
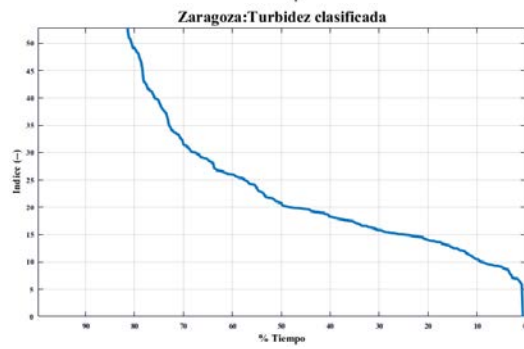
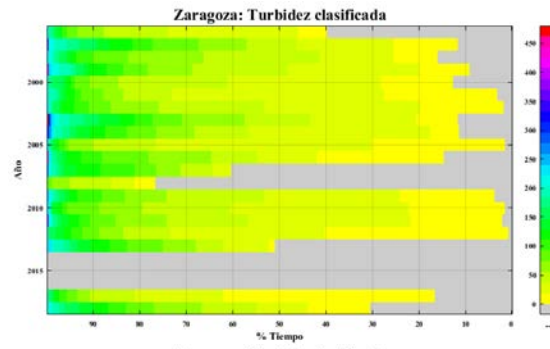
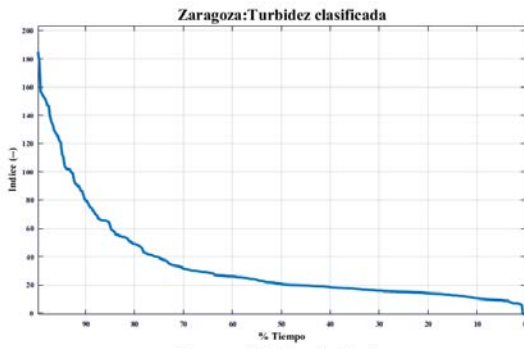




Datos de estaciones de calidad de agua

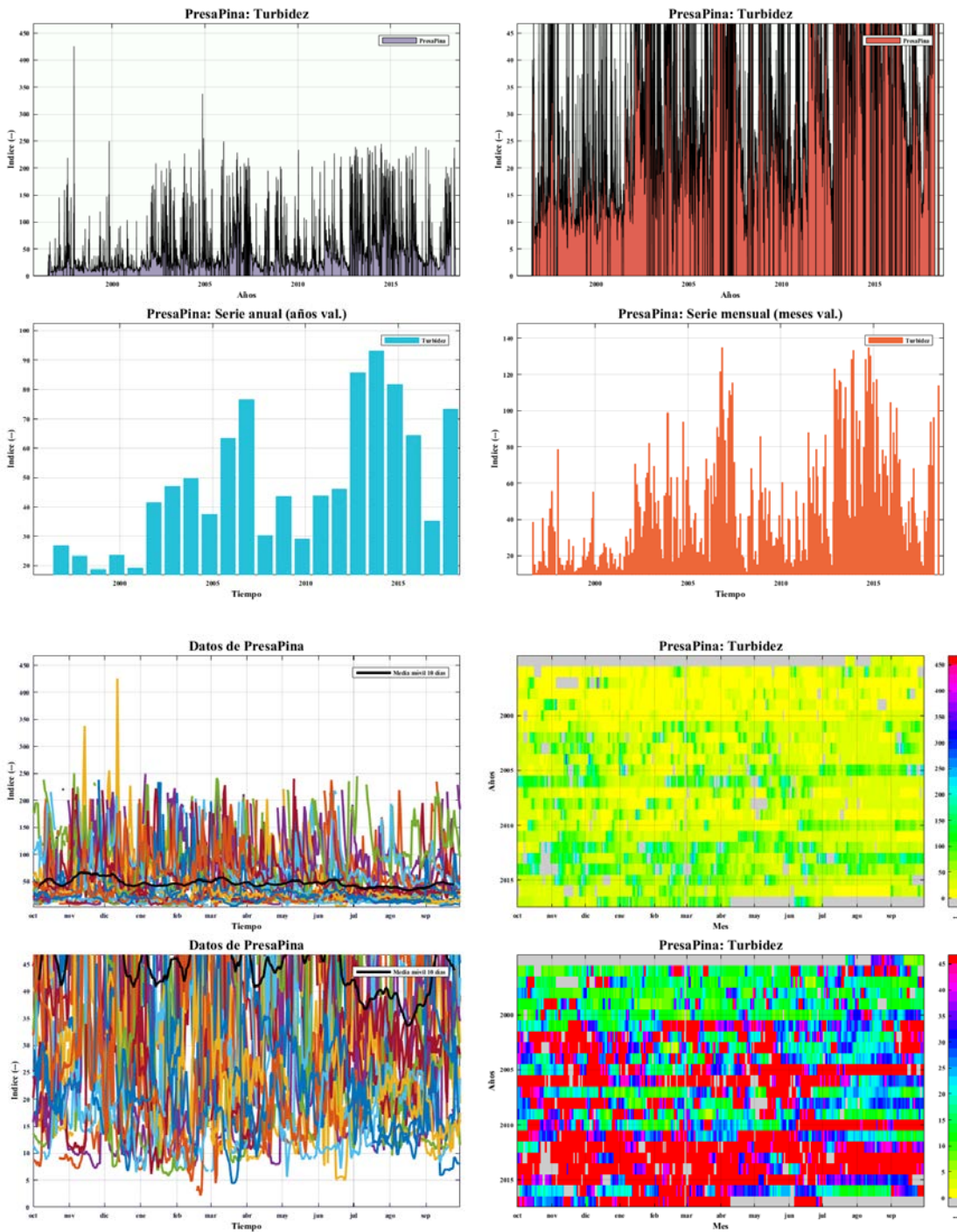
Estación de Zaragoza 909

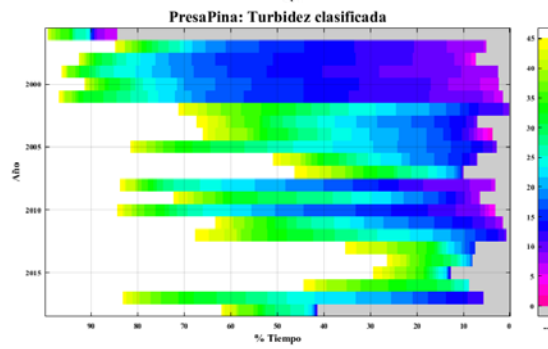
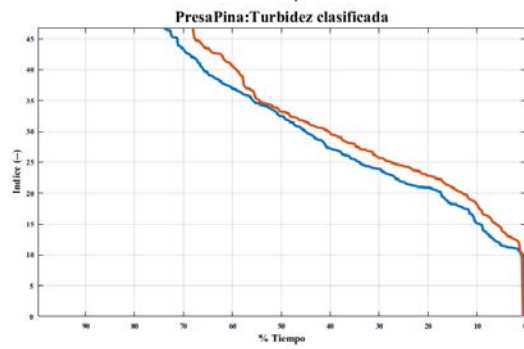
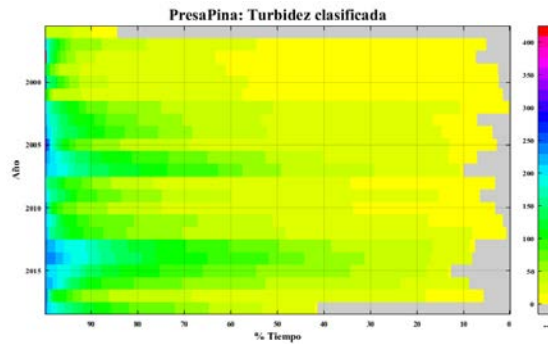
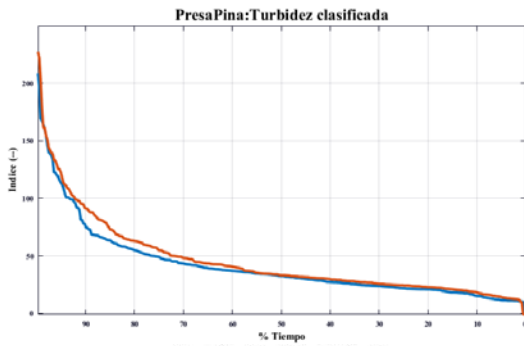




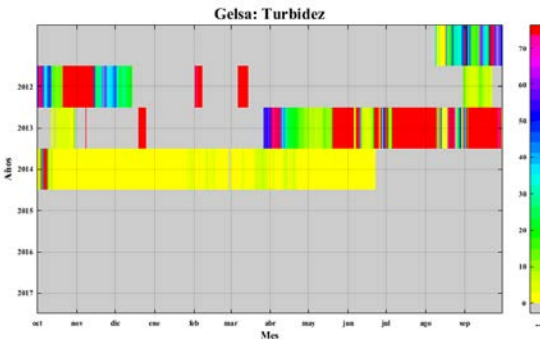
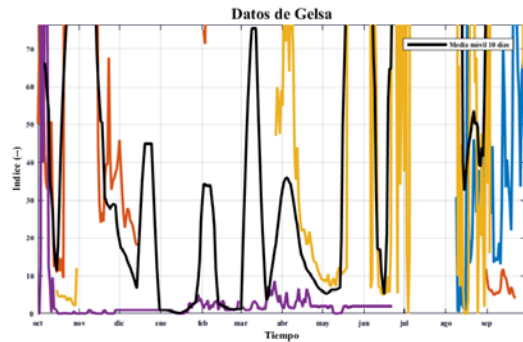
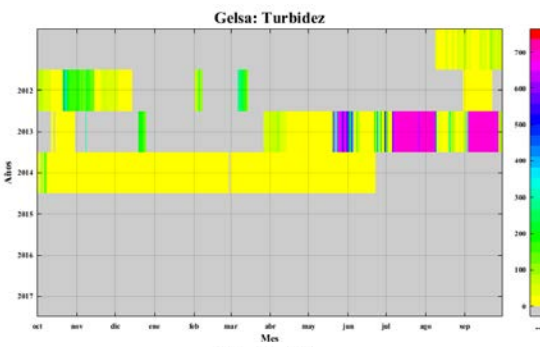
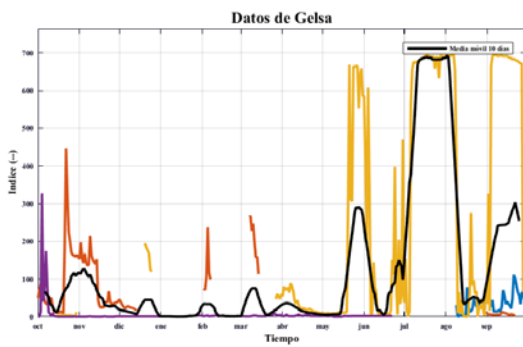
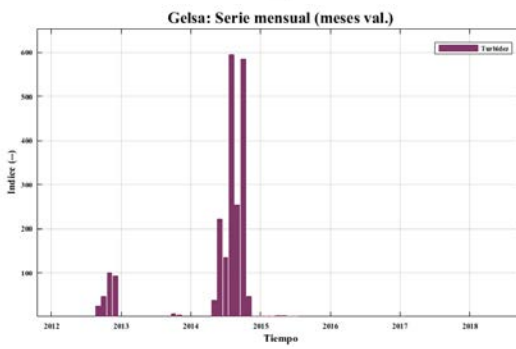
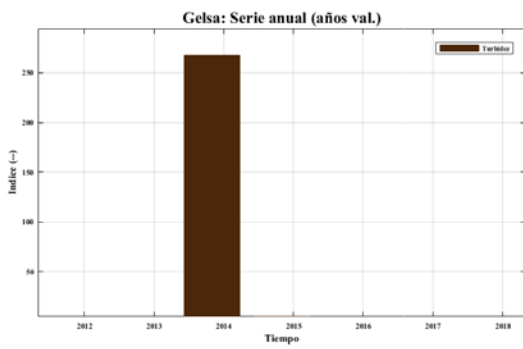
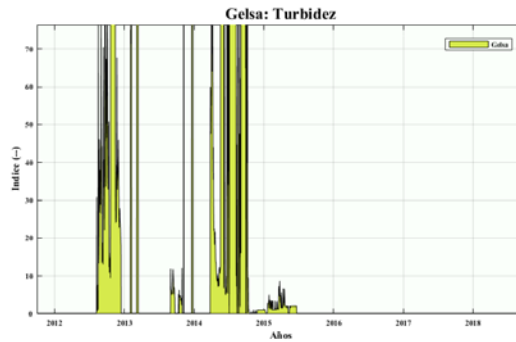
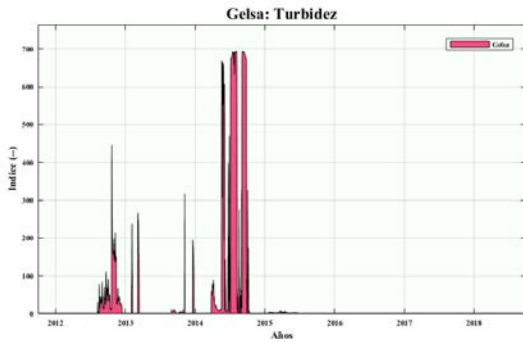


### Estación de Presa Pina 905

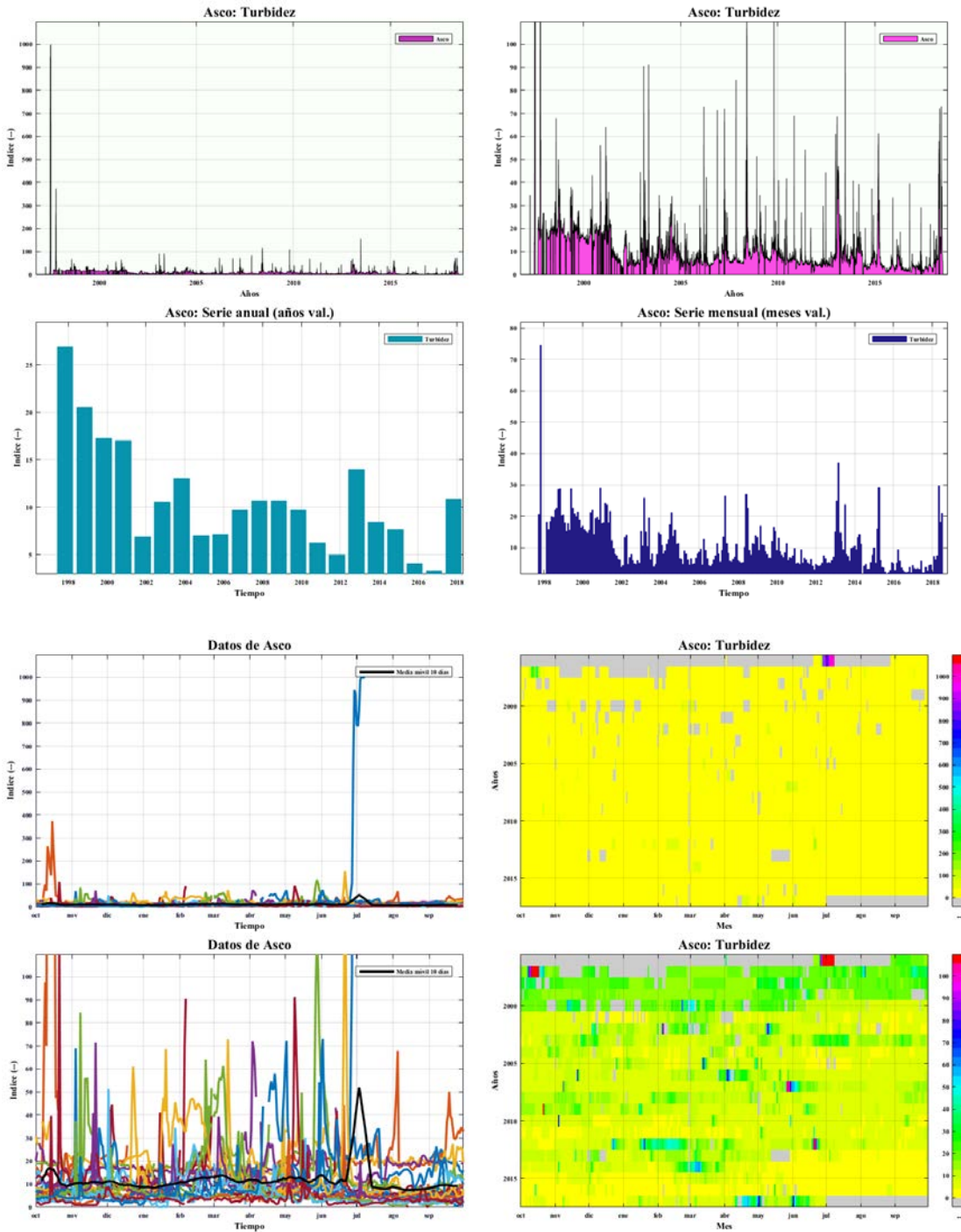


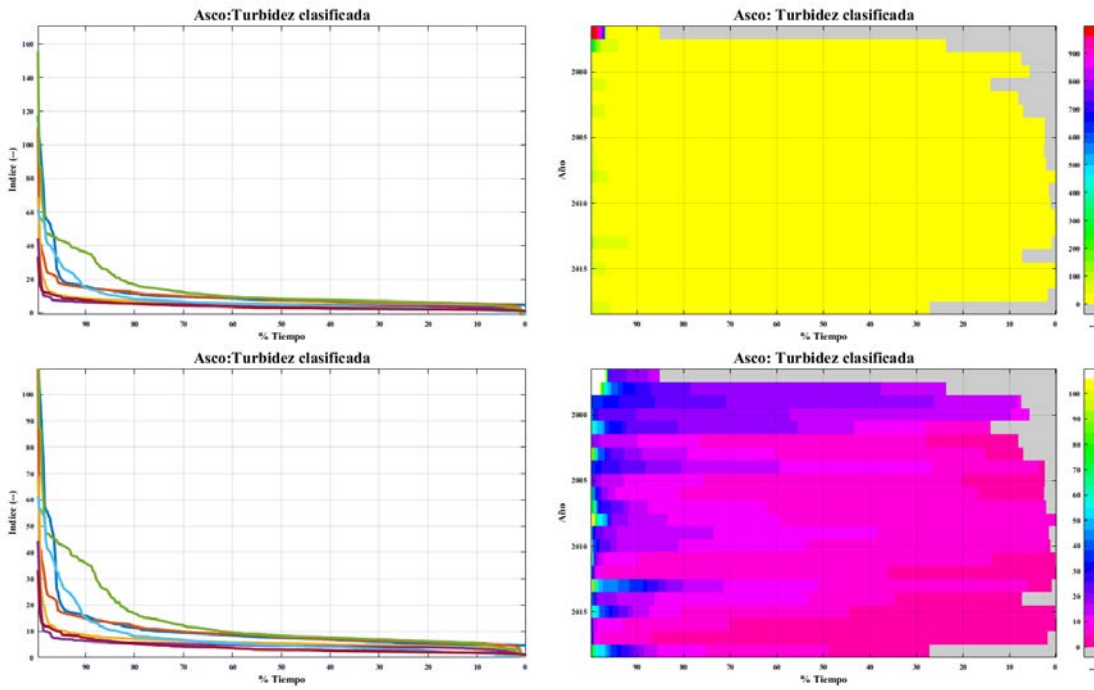


**Estación de Gelsa 969**

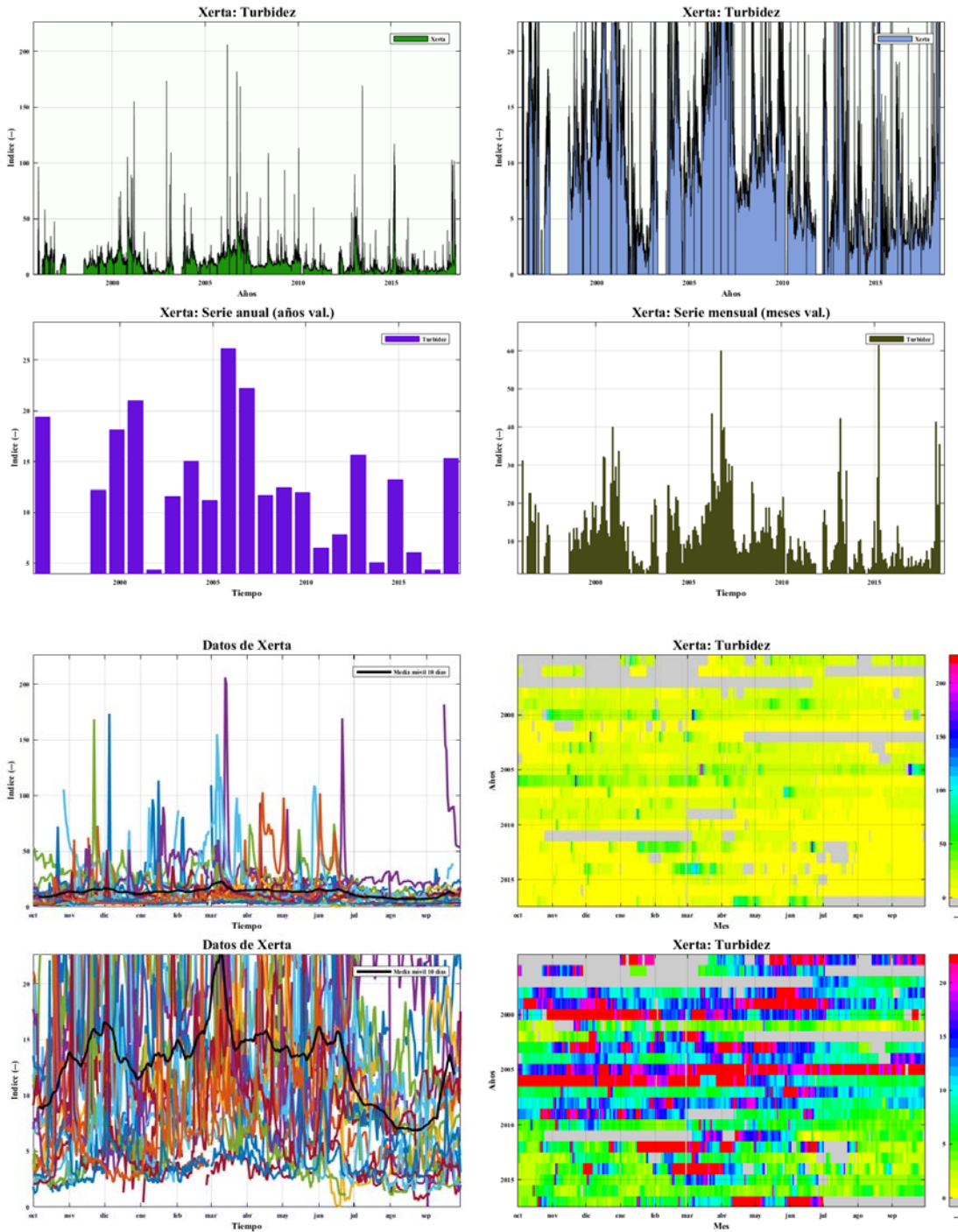


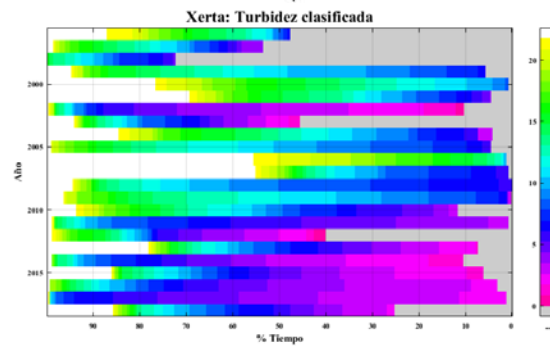
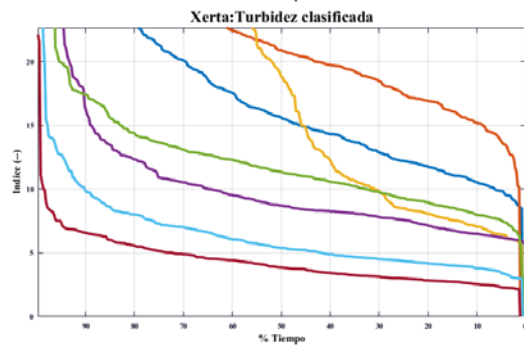
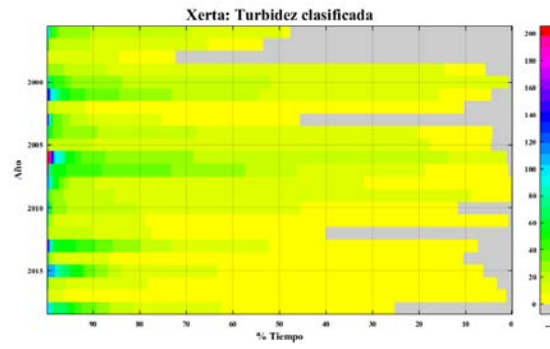
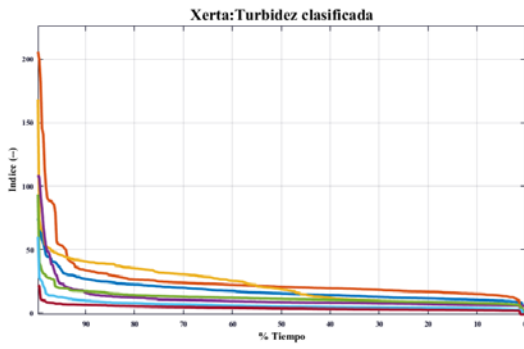
**Estación de Ascó 906**



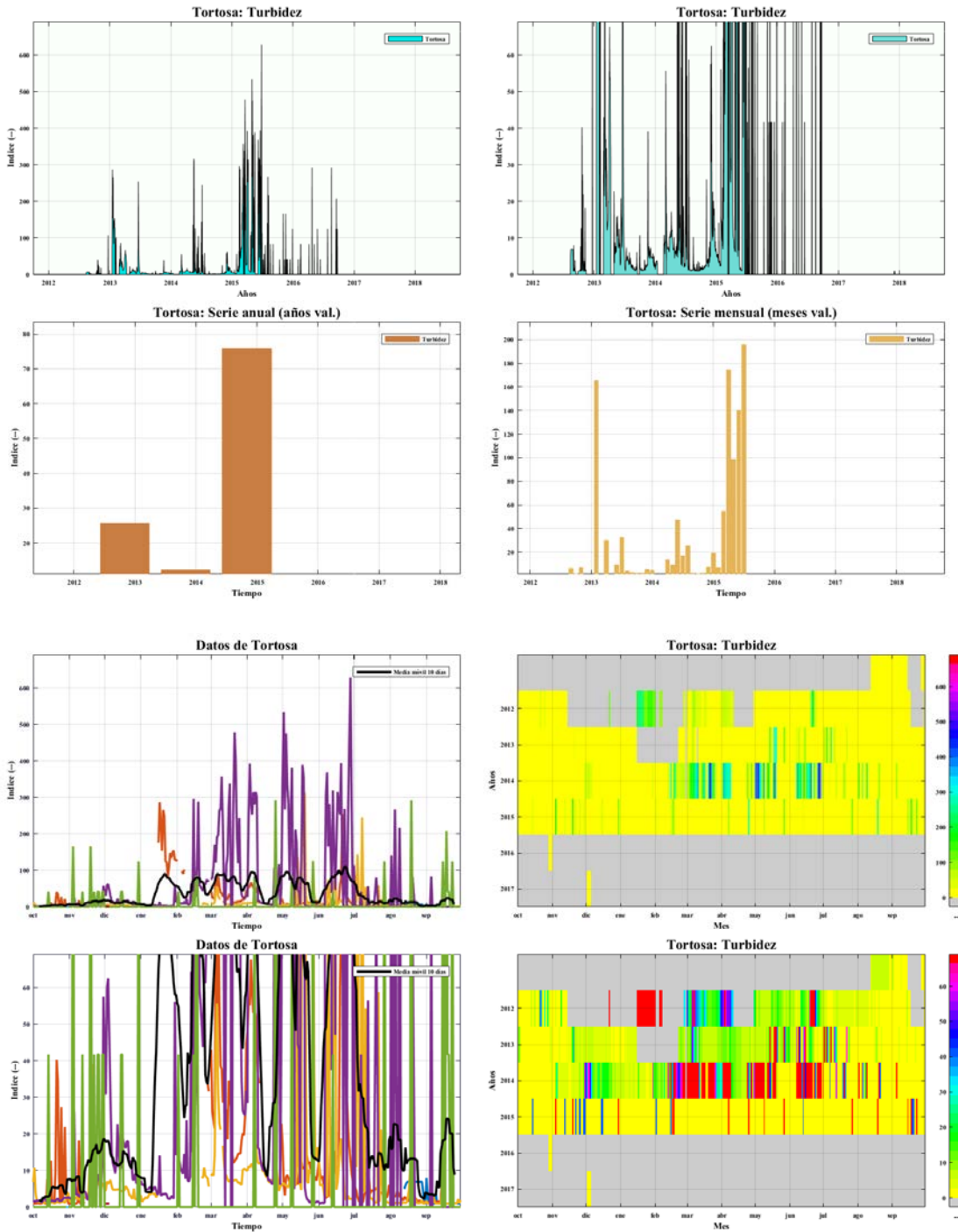


### Estación de Xerta 910



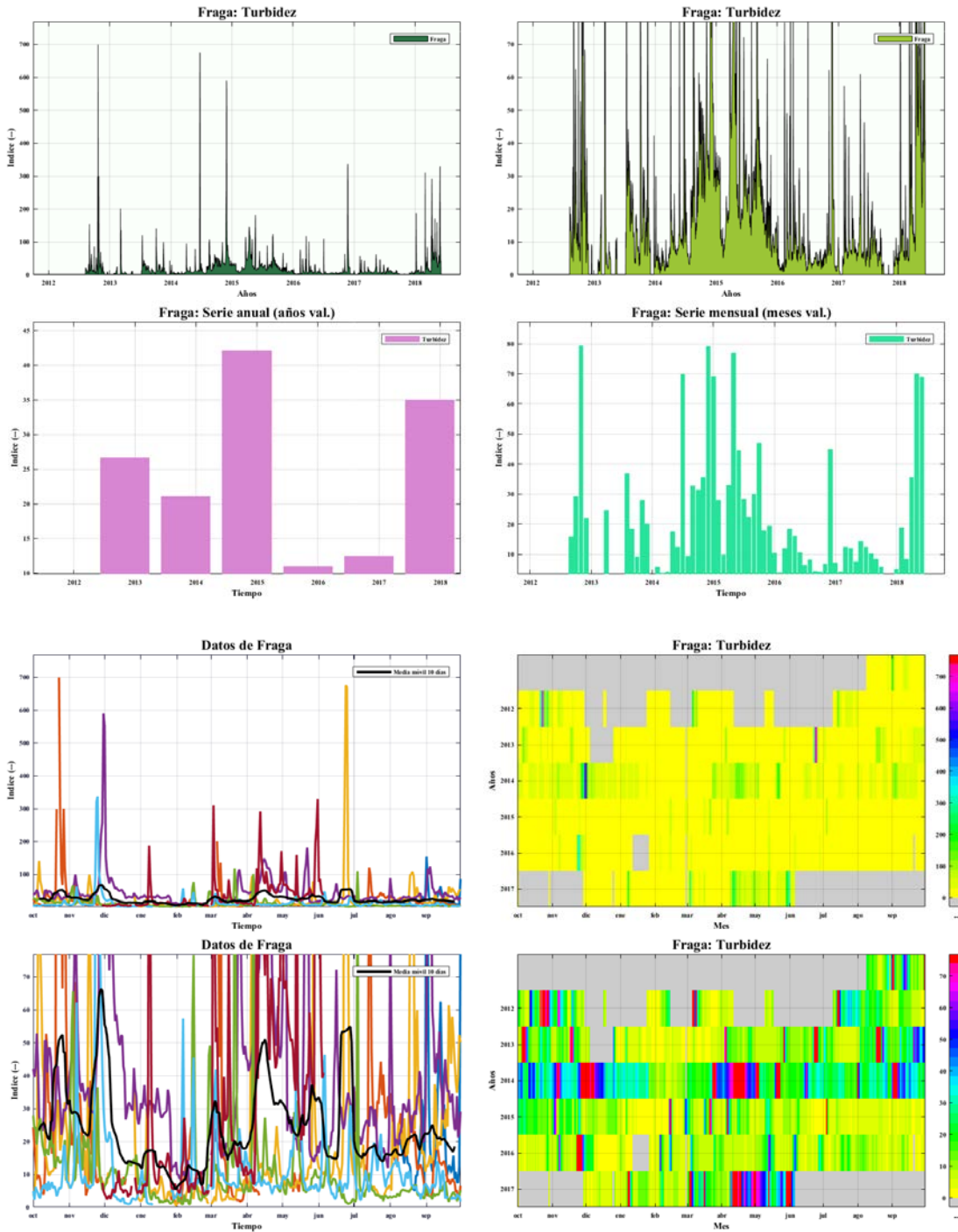


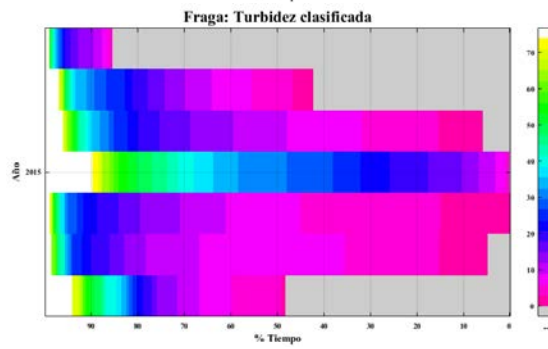
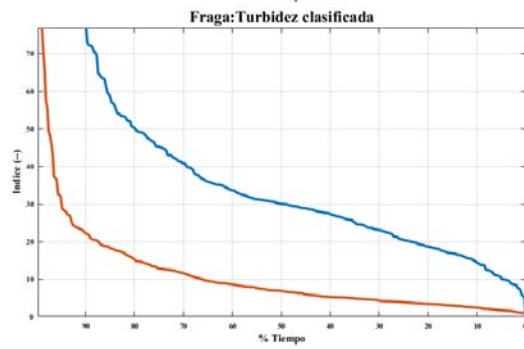
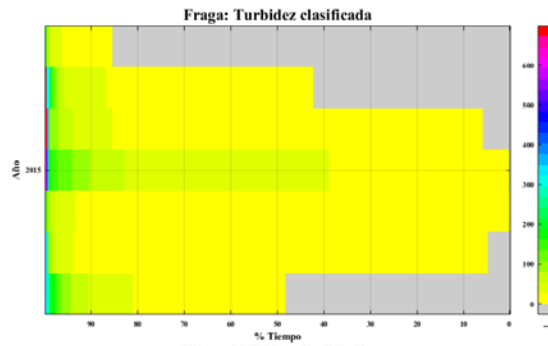
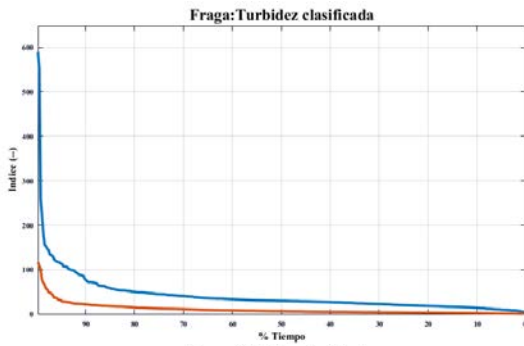
**Estación de Tortosa 970**





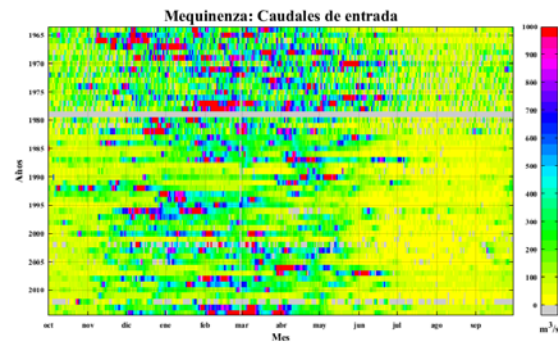
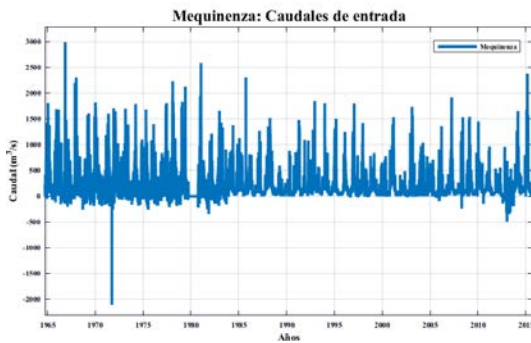
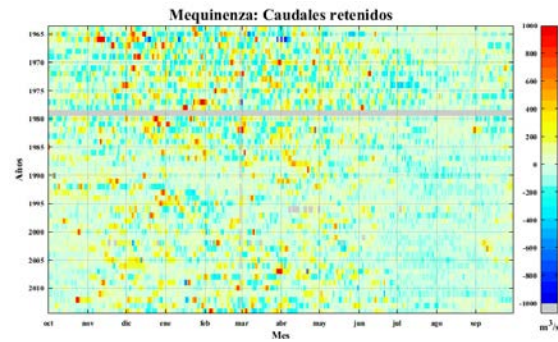
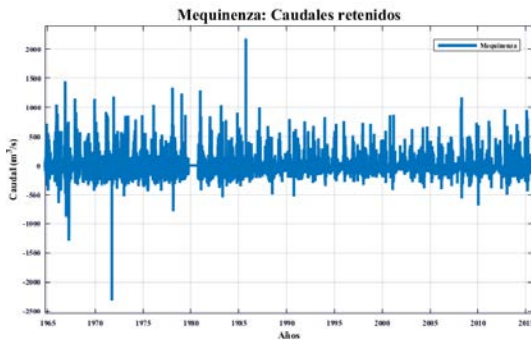
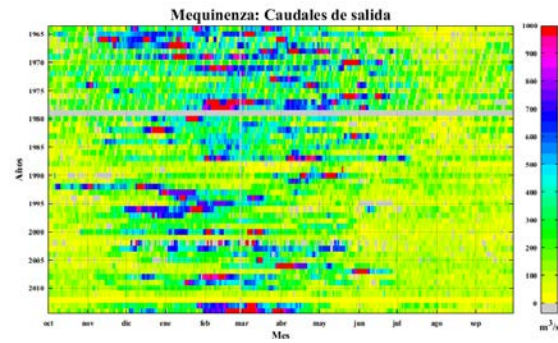
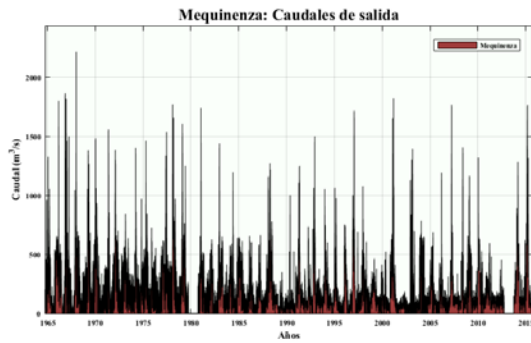
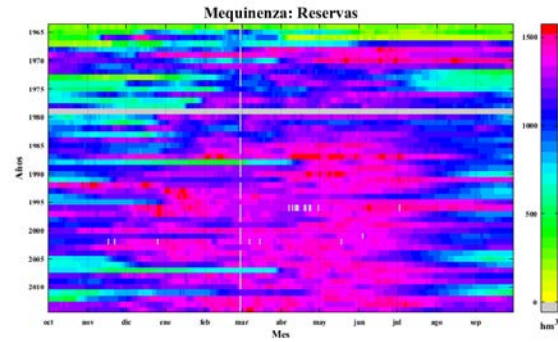
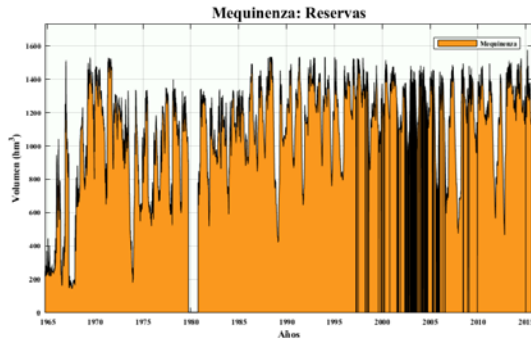
### Estación de Fraga 968



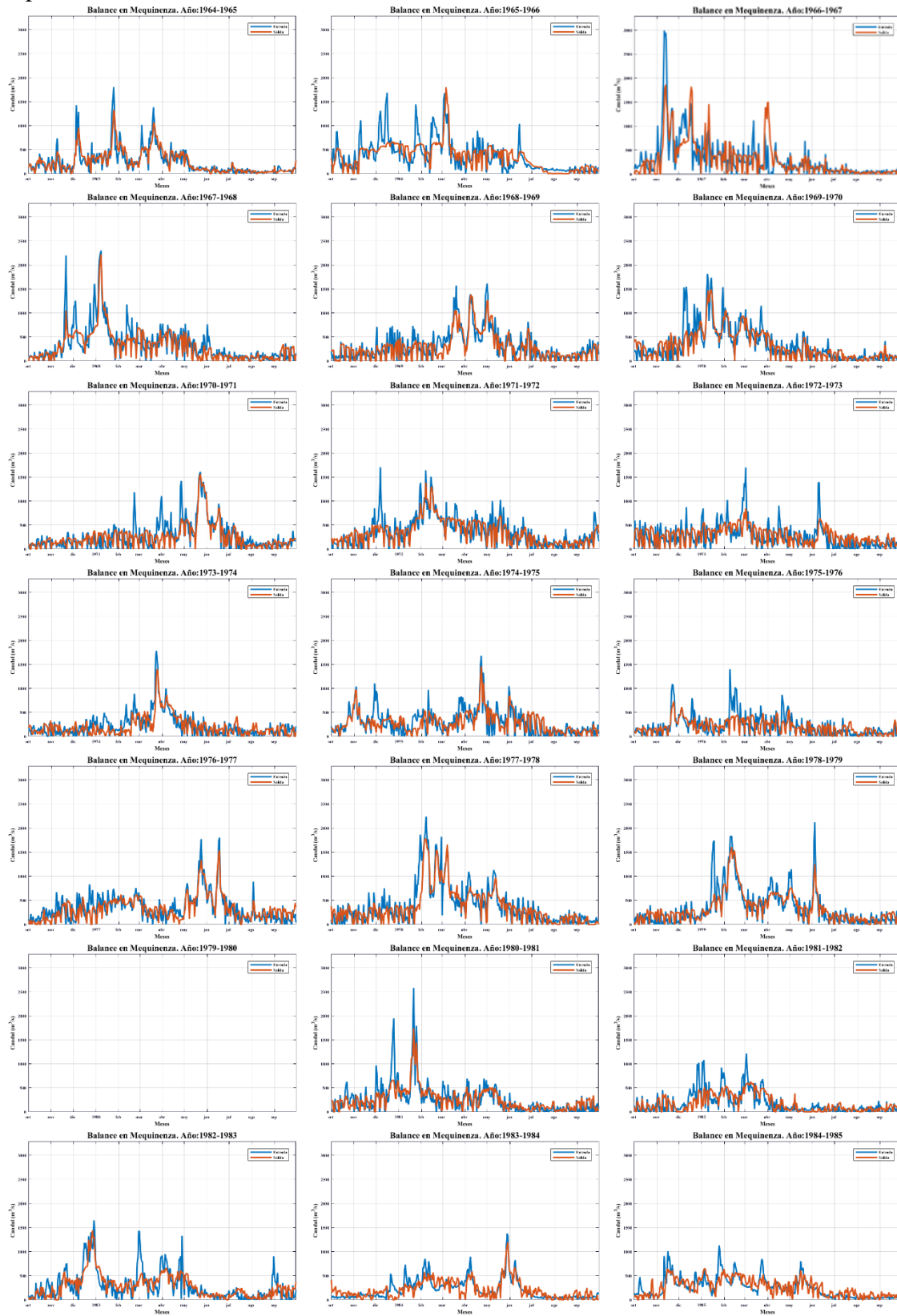


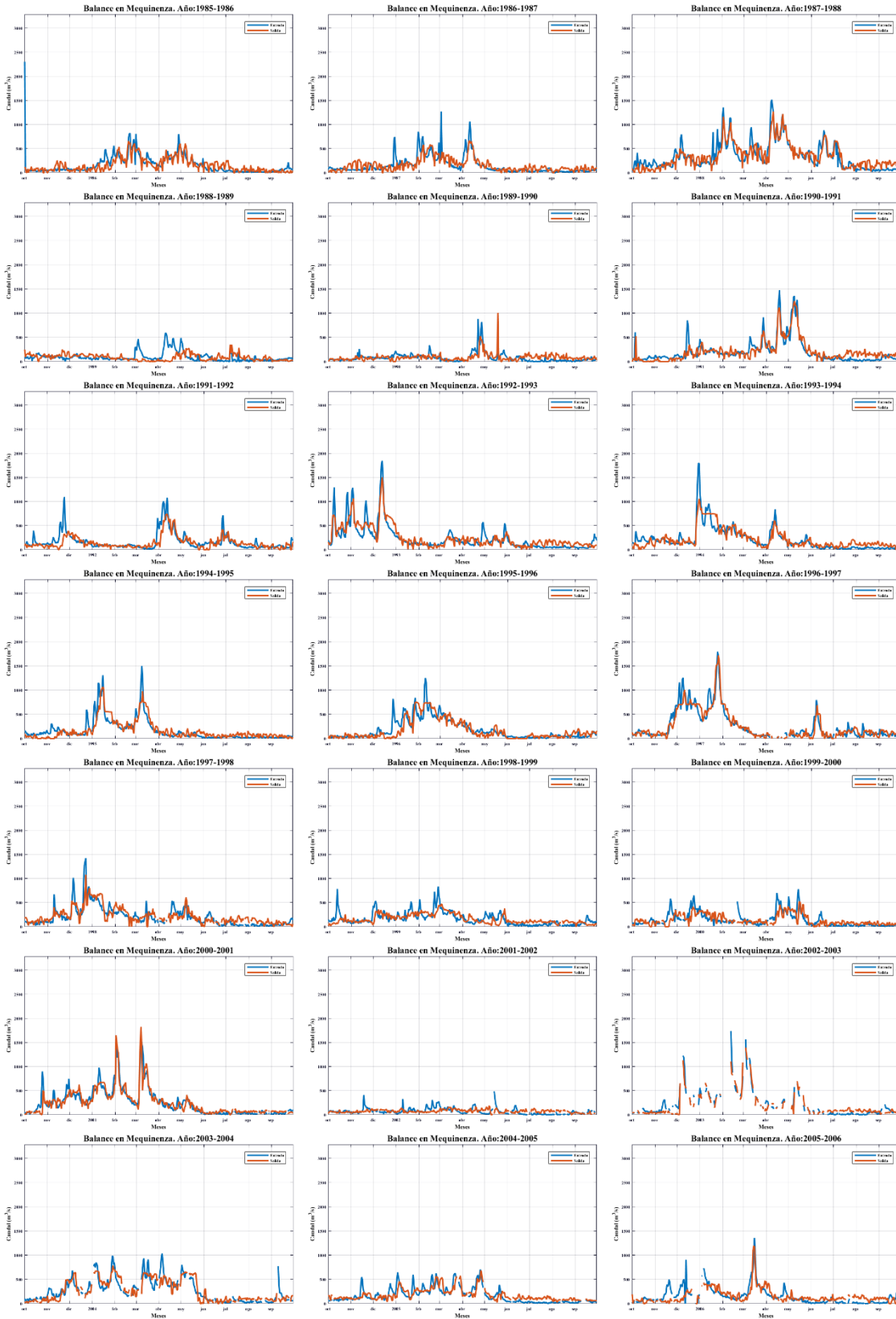
### Datos de embalses

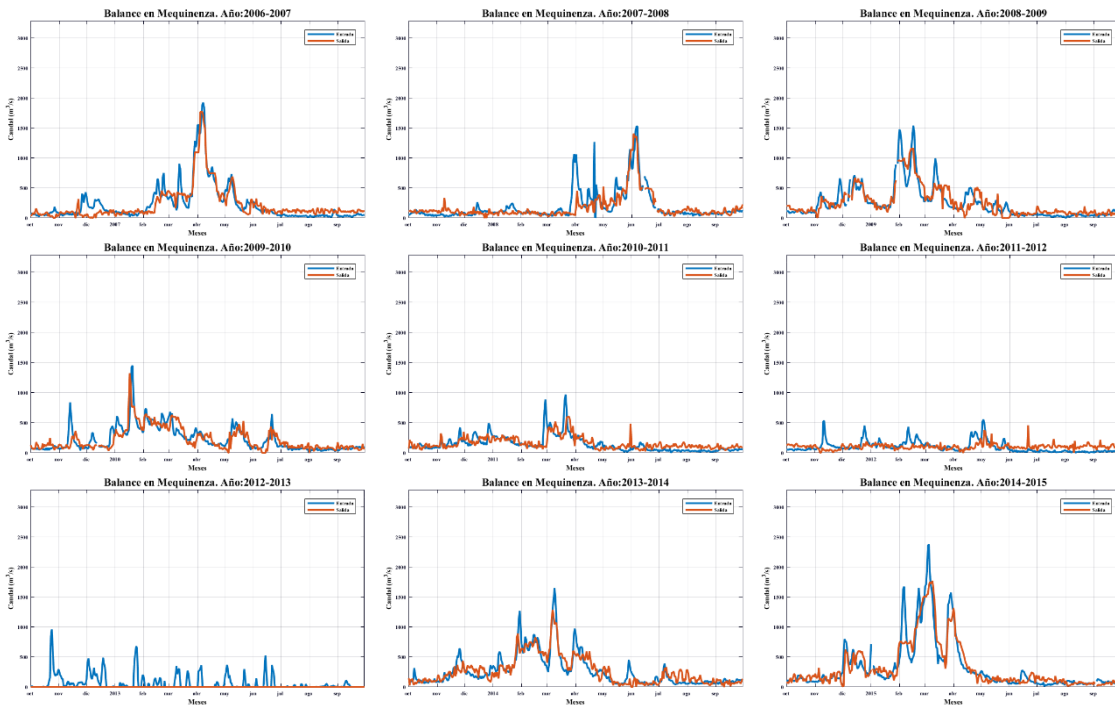
#### Embalse de Mequinenza 9803



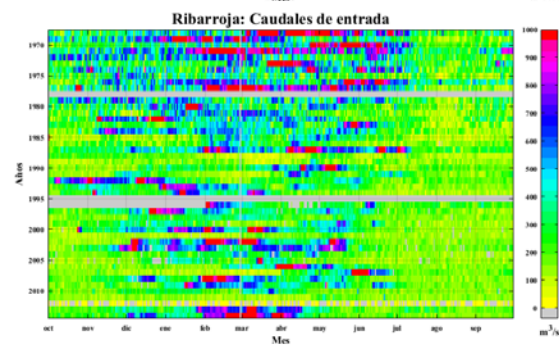
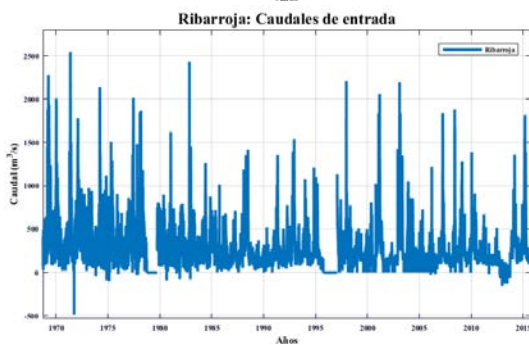
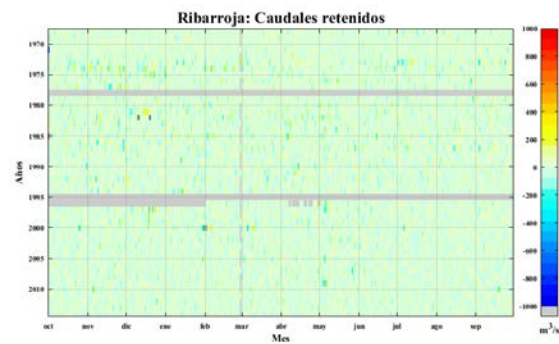
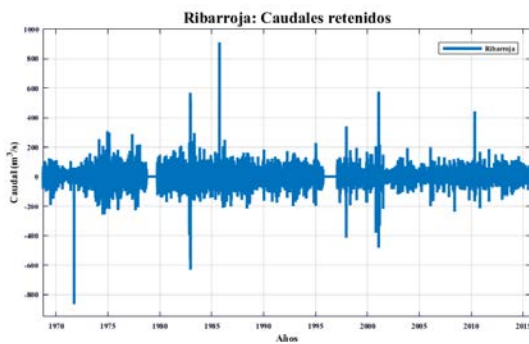
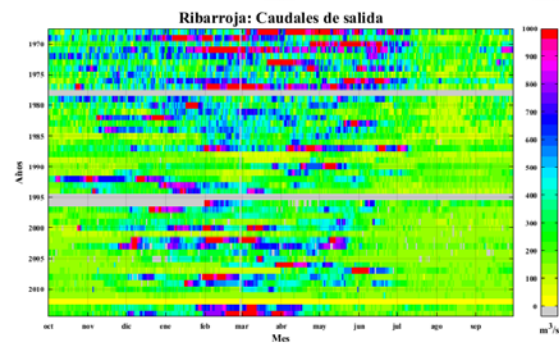
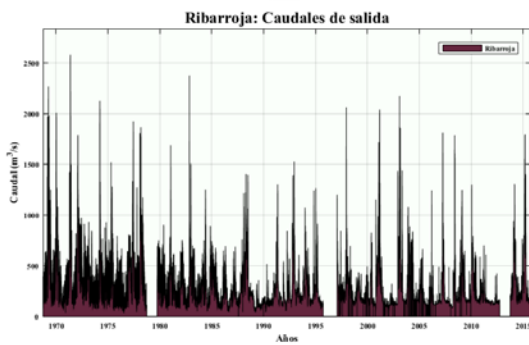
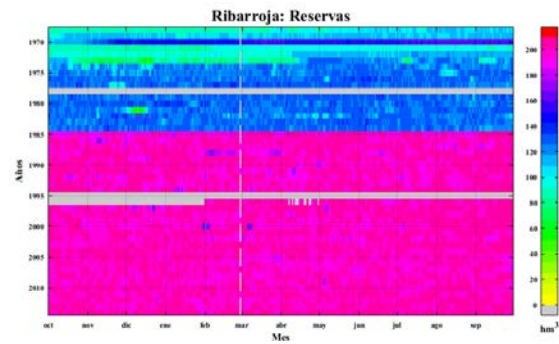
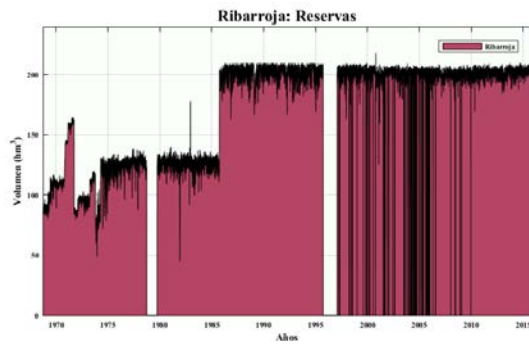
### Operación del embalse



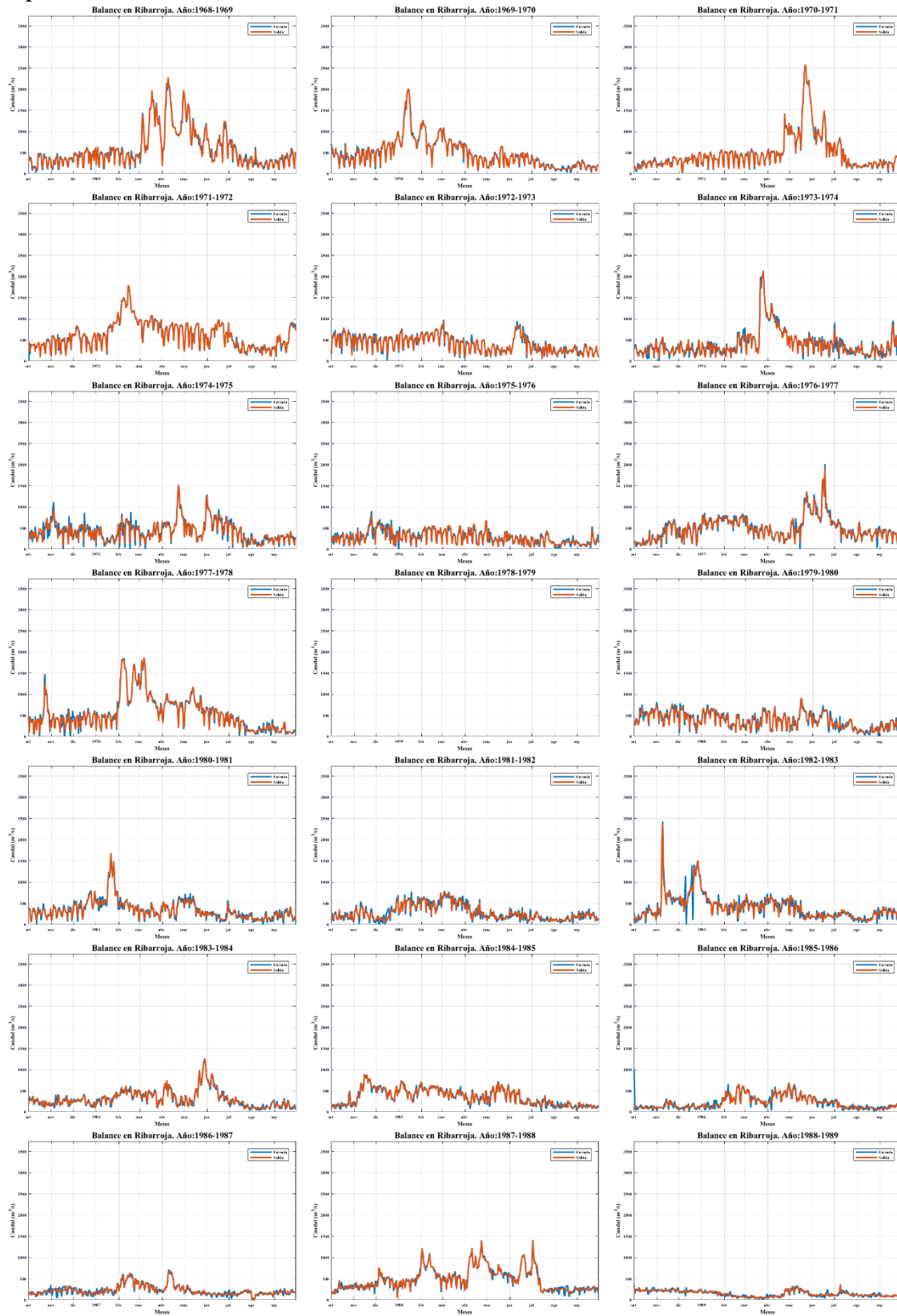




### Embalse de Ribarroja 9804

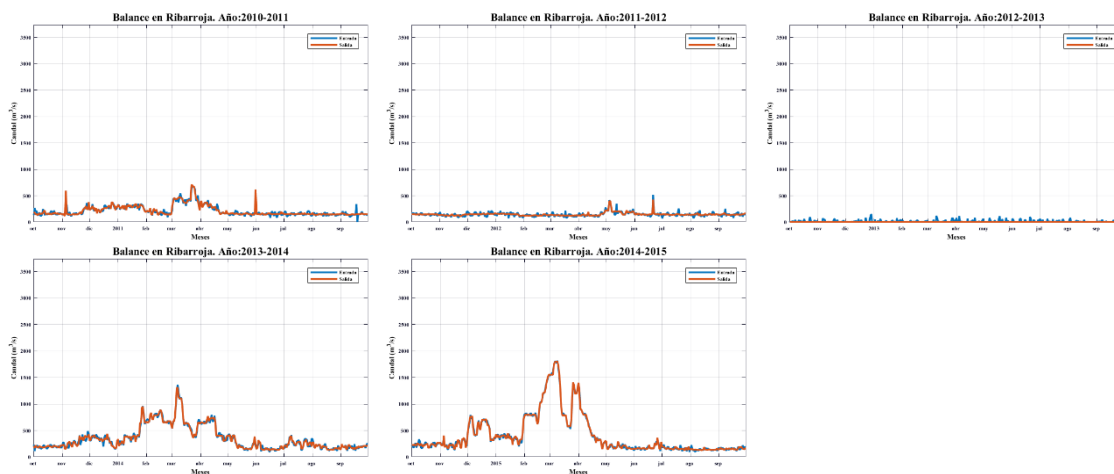


### Operación del embalse

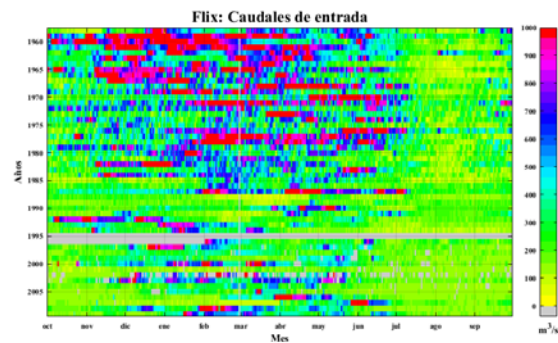
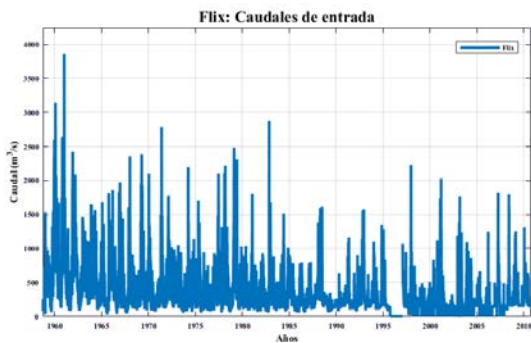
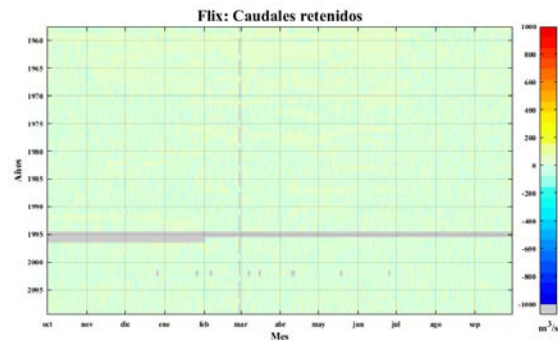
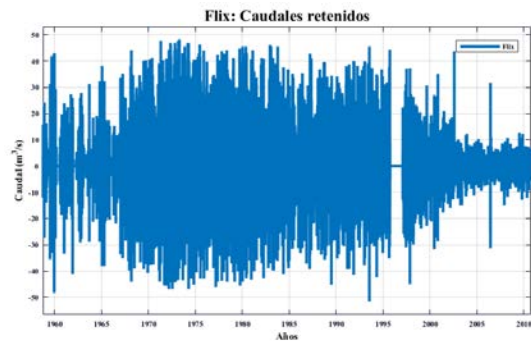
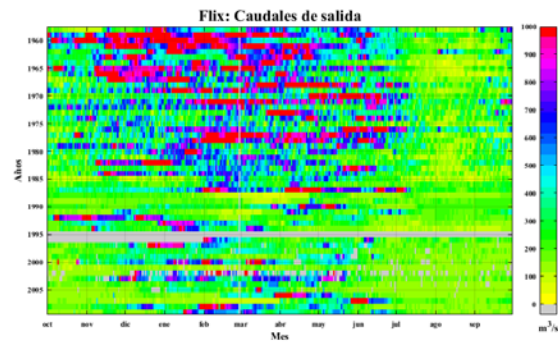
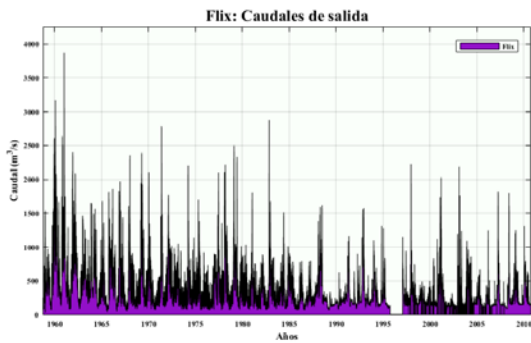
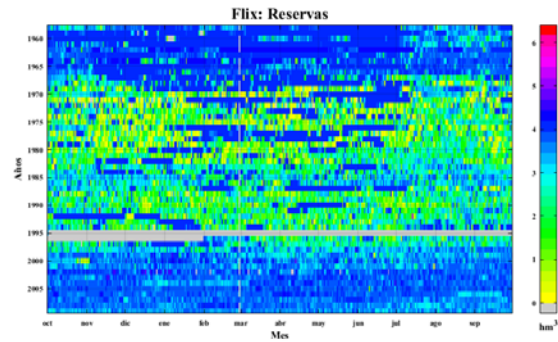
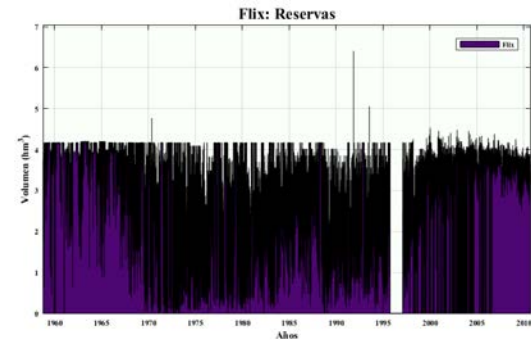








*Embalse de Flix 9802*



### Operación del embalse

