

# ***Optimización de parámetros del modelo DYRESM mediante la metodología GLUE. Aplicación al embalse de Riba-roja.***

*Jordi Prats*

*Instituto Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña*

[jordi.prats-rodriguez@upc.edu](mailto:jordi.prats-rodriguez@upc.edu)

*Ariadna Salgado*

*Alpine Bau GmbH*

[ariadna.salgado@alpine.at](mailto:ariadna.salgado@alpine.at)

*Martí Sánchez-Juny*

*Instituto Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña*

[marti.sanchez@upc.edu](mailto:marti.sanchez@upc.edu)

*Joan Armengol*

*Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona*

[jarmengol@ub.edu](mailto:jarmengol@ub.edu)

*Josep Dolz*

*Instituto Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña*

[j.dolz@upc.edu](mailto:j.dolz@upc.edu)

## **1 Introducción**

Para una gestión adecuada de la calidad del agua en embalses se precisa un buen conocimiento de su comportamiento hidrodinámico. En este sentido, los modelos numéricos pueden ser de gran utilidad, ya sea como herramientas de gestión (Kerachian & Karamouz, 2006), para el diseño de presas y embalses (Marcé *et al.*, 2010), para analizar sus efectos ambientales o para estudiar los posibles efectos del cambio climático.

Se aplicó el modelo DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model) al estudio de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja en el río Ebro. En un estudio anterior (González, 2007) se calibró el modelo variando uno a uno el valor de algunos parámetros del modelo escogidos por su interés. Se observó que el modelo era sensible sobre todo al coeficiente de extinción de la luz. En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad y una calibración más completos y detallados, basándonos en los métodos de Hornberger-Spear-Young y GLUE (Beven & Freer, 2001; Beven, 2001, 2006). Esta parte del estudio constituye la tesina de fin de carrera de Salgado (2008).

Los resultados del estudio son de aplicación directa a la gestión de la plaga de mejillón cebra (*Dreissena polymorpha*) observada en el embalse desde el año 2001 (Grup de Natura Freixe, 2003), al análisis de los efectos del embalse sobre la temperatura del agua en el río Ebro y para obtener un mejor conocimiento del particular comportamiento hidrodinámico del embalse causada por la entrada de diversos afluentes con características diferentes.

## 2 Material y métodos

### 2.1 Área de estudio

En este trabajo se estudió el embalse de Ribarroja, situado en el curso inferior del río Ebro, entre los embalses de Mequinenza y Flix. Se trata de un embalse alargado y sinuoso, de 30 km de longitud, 34 m de profundidad máxima y 210 hm<sup>3</sup> de volumen. La cota máxima del embalse es de 70 msnm y la cota mínima es de 40 msnm. La toma hidroeléctrica se encuentra en el fondo del embalse, a la cota 41,4 msnm. El embalse se alimenta gracias al caudal del Ebro liberado por el embalse de Mequinenza y del río Segre. El tiempo de residencia es corto, de tan sólo una semana. Los usos del embalse incluyen la producción hidroeléctrica (263 MW), la pesca recreativa, la navegación y el abastecimiento de agua a poblaciones próximas.

### 2.2 Datos utilizados

Los datos de campo necesarios para la modelización se obtuvieron por medición directa en campo o fueron proporcionados por agencias autonómicas o estatales para los años 2003 a 2005. Los perfiles verticales de temperatura del agua en el embalse se midieron mediante una sonda Aanderaa TR7. La sonda medía la temperatura con un intervalo horario cada dos metros entre la superficie y los 18 metros de profundidad. El caudal liberado por el embalse de Mequinenza (caudal del Ebro a la entrada del embalse) y el caudal liberado por el embalse de Riba-roja fueron proporcionados por ENDESA. El nivel del embalse de Riba-roja fue proporcionado por la CHE. El caudal entrante del Segre fue estimado por balance de masas. La temperatura del Segre fue proporcionada por la Agencia Catalana del Agua y la del Ebro fue estimada a partir de medidas realizadas en los años 1998-1999 (González, 2007). Los datos meteorológicos se tomaron de la estación meteorológica de la Red Agrometeorológica de Cataluña instalada sobre la presa de Riba-roja.

### 2.3 Pretratamiento de los datos

Se suavizaron los datos de temperatura del agua del embalse mediante una media móvil centrada ponderada triangular de siete días (Salgado, 2008)

$$\tilde{x}_i = \frac{1}{16} x_{i-3} + \frac{2}{16} x_{i-2} + \frac{3}{16} x_{i-1} + \frac{4}{16} x_i + \frac{3}{16} x_{i+1} + \frac{2}{16} x_{i+2} + \frac{1}{16} x_{i+3},$$

donde  $x_i$  corresponde a la  $i$ -ésima muestra de temperatura y  $\tilde{x}_i$  es el valor del dato suavizado.

### 2.4 El modelo DYRESM

El modelo DYRESM es un modelo desarrollado por el Centre for Water Research de la University of Western Australia para simular el comportamiento hidrodinámico de lagos y embalses en la dimensión vertical. El modelo calcula la distribución vertical de temperatura, densidad y salinidad a partir de la modelización de los procesos verticales de mezcla e intercambio de calor. Según el manual del programa, el modelo proporciona predicciones fiables aún sin calibrarlo, ya que las parametrizaciones utilizadas se derivan de estudios detallados de los procesos simulados (Antenucci & Imerito, 2000). Sin embargo, algunos estudios (Hornung, 2002; Rigosi, 2006; González, 2007) han puesto de manifiesto que el modelo calibrado proporciona mejores resultados. De hecho, el modelo incluye algunos parámetros que varían a lo largo del tiempo o que tienen carácter local (albedo, coeficiente de extinción de la luz). También es cierto que algunos parámetros no se conocen con precisión en el sistema estudiado (albedo, coeficiente de extinción de la luz, coeficientes de arrastre y pendientes de los afluentes, etc.).

## 2.5 Análisis de sensibilidad

### 2.5.1 Análisis de sensibilidad parámetro por parámetro

Se realizó un análisis de sensibilidad de todos los parámetros utilizados (Tabla 1) por separado para determinar la respuesta del modelo a cada uno de ellos. Para ello, se varió el valor de los parámetros entre los rangos indicados en la Tabla 1 y se calculó el error cuadrático medio para cada valor del parámetro.

Tabla 1 Parámetros y rangos de los parámetros utilizados en el análisis de sensibilidad y en la calibración

Parámetro	Rangos del análisis de sensibilidad		Rangos de la calibración		Unidades
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	
Albedo	0,04	0,12	0,02	0,10	[-]
Grosor de la capa límite bentónica	0	1	0	1	[m]
Velocidad crítica del viento	0	4	-	-	[m/s]
Coefficiente de arrastre (río Segre)	0,005	0,035	-	-	[-]
Coefficiente de arrastre (río Ebro)	0,005	0,035	-	-	[-]
Coefficiente de extinción de la luz	0	2	0,2	2,0	[m <sup>-1</sup> ]
Grosor de capa máximo	2,5	6,0	2/h <sub>min</sub>	6,0	[m]
Grosor de capa mínimo (h <sub>min</sub> )	0,5	2,0	0,5	2,0	[m]
Pendiente (Segre)	0,086164	0,095233	-	-	[°]
Pendiente (Ebro)	0,00112936	0,00124824	-	-	[°]
Eficiencia de la mezcla por energía potencial	0	1	-	-	[-]
Semiángulo (Segre)	83,258	90,000	-	-	[°]
Semiángulo (Ebro)	79,1255	87,4545	79,1255	87,4545	[°]
Eficiencia de la mezcla por cizallamiento	0	1	-	-	[-]
Emisividad del agua	0,94	0,98	0,94	0,98	[-]
Eficiencia de la agitación por el viento	0	1	0	1	[-]

### 2.5.2 Análisis de sensibilidad generalizado

Acto seguido, se tuvieron en cuenta las interacciones entre los diferentes parámetros mediante un análisis de sensibilidad generalizado o de Hornberger-Spear-Young (Beven & Freer, 2001; Beven, 2006). Este método está basado en simulaciones de Montecarlo. En cada simulación, se obtiene un valor aleatorio de los parámetros suponiendo que éstos tienen una distribución uniforme en el rango estudiado (Tabla 1). De esta forma se cubre todo el espacio de posibilidades optimizando el coste computacional del análisis. Se realizaron 500 simulaciones, cada una de las cuales se clasificó como aceptable o inaceptable en función de un criterio de aceptabilidad previamente definido. En este caso el criterio de aceptabilidad utilizado fue que el error cuadrático medio fuera menor a 1 °C<sup>2</sup>. La comparación de las funciones de distribución acumuladas de las simulaciones aceptables e inaceptables en función del valor del parámetro nos permite distinguir entre parámetros a los que el modelo es sensible o insensible (Figura 1). Si las distribuciones son iguales el modelo no es sensible, si son diferentes el modelo es sensible. Para establecer la igualdad/desigualdad de las distribuciones se utilizó el test de Kolmogórov-Smirnov.

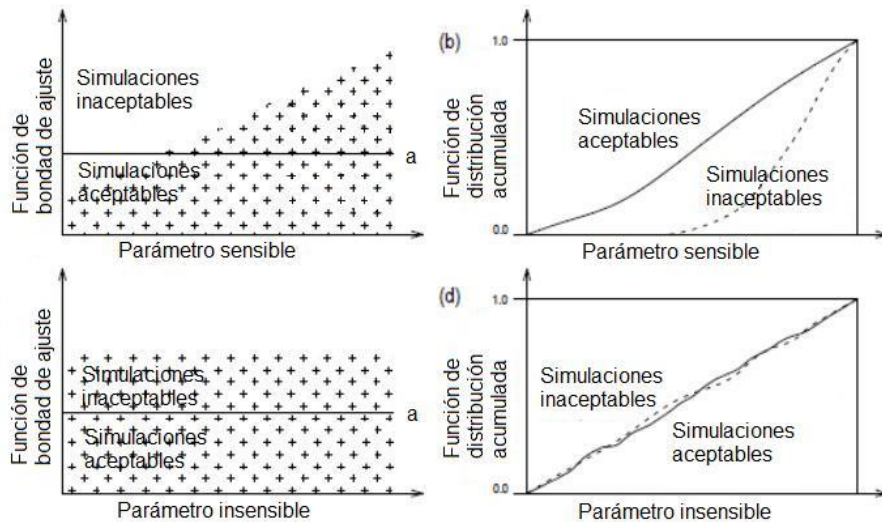


Figura 1 Distinción de simulaciones aceptables e inaceptables, en función del criterio de aceptabilidad  $a$ . En la parte superior (inferior) se muestra la situación cuando el modelo es sensible (insensible) al parámetro.

## 2.6 Calibración

Los parámetros a calibrar se determinaron a partir del análisis de sensibilidad, sólo se tuvieron en cuenta los parámetros a los cuales era sensible el modelo. El rango de los parámetros considerado se ajustó de acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad (Tabla 1). Se utilizó la metodología de calibración GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation). Esta metodología está basada en el análisis de sensibilidad generalizado y en el concepto de equifinalidad (Beven, 2001, 2006), según el cual puede haber más de un conjunto óptimo de valores de los parámetros. La primera parte del proceso es paralela al análisis de sensibilidad generalizado: se realizaron simulaciones de Montecarlo (15000 en este caso) tomando valores aleatorios de los parámetros a calibrar dentro del rango definido. A continuación se utilizó una medida de bondad de ajuste para valorar la aceptabilidad de cada conjunto de valores. Los requerimientos impuestos por la metodología sobre la medida de bondad de ajuste son que crezca monótonamente con el aumento de la bondad de ajuste y que las simulaciones inaceptables tengan un peso de cero. En este caso, se utilizó la siguiente variante de la eficiencia de Nash y Sutcliffe:

$$L = 1 - \sigma_{\varepsilon}^2 / \alpha^2 \quad \text{si } \sigma_{\varepsilon}^2 > \alpha^2$$

$$L = 0 \quad \text{si } \sigma_{\varepsilon}^2 \leq \alpha^2$$

donde  $\sigma_{\varepsilon}^2$  es el error cuadrático medio. Se eligió un valor de  $\alpha = 1^\circ\text{C}$  para utilizar el mismo criterio de aceptabilidad que en el análisis de sensibilidad.

## 2.7 Estudio de los procesos de circulación y mezcla

El modelo calibrado se aplicó al estudio de la dinámica del embalse durante el año 2005. Para analizar los procesos de circulación y mezcla del agua proveniente de los dos principales afluentes, se supuso que la salinidad del Ebro era de 0 psu y la del Segre 0,1 psu, cosa que es equivalente a utilizar un trazador (Rueda *et al.*, 2006). Se comprobó que esta hipótesis no afecta de forma significativa a los resultados del modelo.

### 3 Resultados y conclusiones

#### 3.1 Resultados del análisis de sensibilidad

##### 3.1.1 Resultados del análisis de sensibilidad parámetro por parámetro

Según este análisis, el modelo resultó ser sensible al coeficiente de extinción de la luz, al albedo del agua, al grosor de la capa límite bentónica, al grosor de capa y a la emisividad del agua. En la Figura 2 se muestran algunos de ejemplos de parámetros a los que el embalse es sensible (coeficiente de extinción de la luz), insensible (velocidad crítica del viento) y medianamente sensible (albedo medio y emisividad del agua). Un aspecto sorprendente del análisis es que el modelo es absolutamente indiferente al valor de algunos de los parámetros de mezcla como son las eficiencias de mezcla por cizallamiento y por energía potencial. Es de esperar, pues, que estos procesos no sean importantes en el embalse de Riba-roja.

En el caso del coeficiente de extinción de la luz hay que destacar que para valores entre 0 y 1 del mismo el modelo es muy sensible al valor del parámetro, mientras que para valores superiores a 1 es poco sensible. Esto se explica porque para valores altos del coeficiente de extinción de la luz la mayor parte de la radiación se absorbe dentro del epilimnion. Siempre que la mayor parte de la radiación se absorba dentro de esta capa, la distribución vertical de la radiación tiene poca influencia en el modelo, ya que la mezcla que se produce en el epilimnion tiende a homogeneizar el calentamiento del agua en esta capa y el resultado cambia poco. Por otro lado, si el agua es clara y el coeficiente de extinción de la luz es bajo, una fracción importante de la radiación solar puede llegar al hipolimnion y producir un incremento del grosor del epilimnion. En este caso, la profundidad hasta la que llega la radiación sí que afecta a la distribución vertical de densidades.

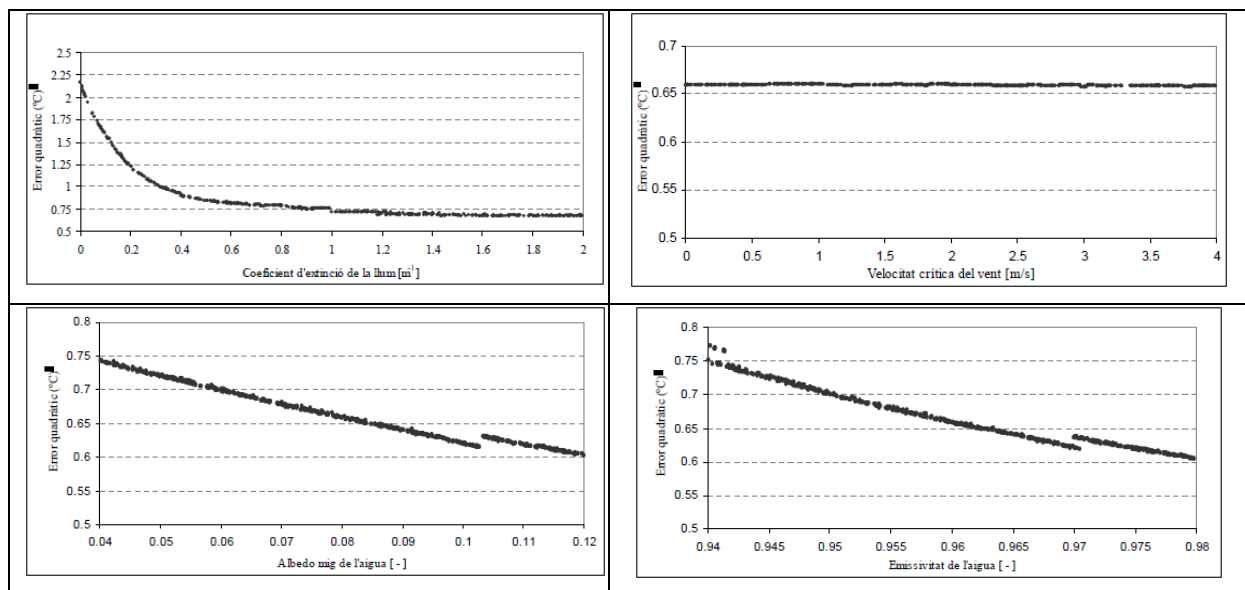


Figura 2 Error cuadrático medio de algunos parámetros del modelo. Ejemplos de parámetros a los que el modelo es sensible (A), insensible (B), y relativamente sensible (C y D).

##### 3.1.2 Resultados del análisis de sensibilidad generalizado

El análisis de sensibilidad generalizado dio resultados parecidos al análisis de sensibilidad del apartado 3.1.1. Se obtuvo que los parámetros a los que el modelo es más sensible son el grosor de capa máximo y mínimo utilizado en el cómputo, el coeficiente de extinción de la luz, la inclinación del lecho fluvial en dirección perpendicular al flujo del Ebro, el albedo medio del agua y la emisividad del agua ( Figura 3 ). El modelo también es medianamente sensible al grosor de la capa bentónica límite y a la eficiencia de la mezcla debida al viento.

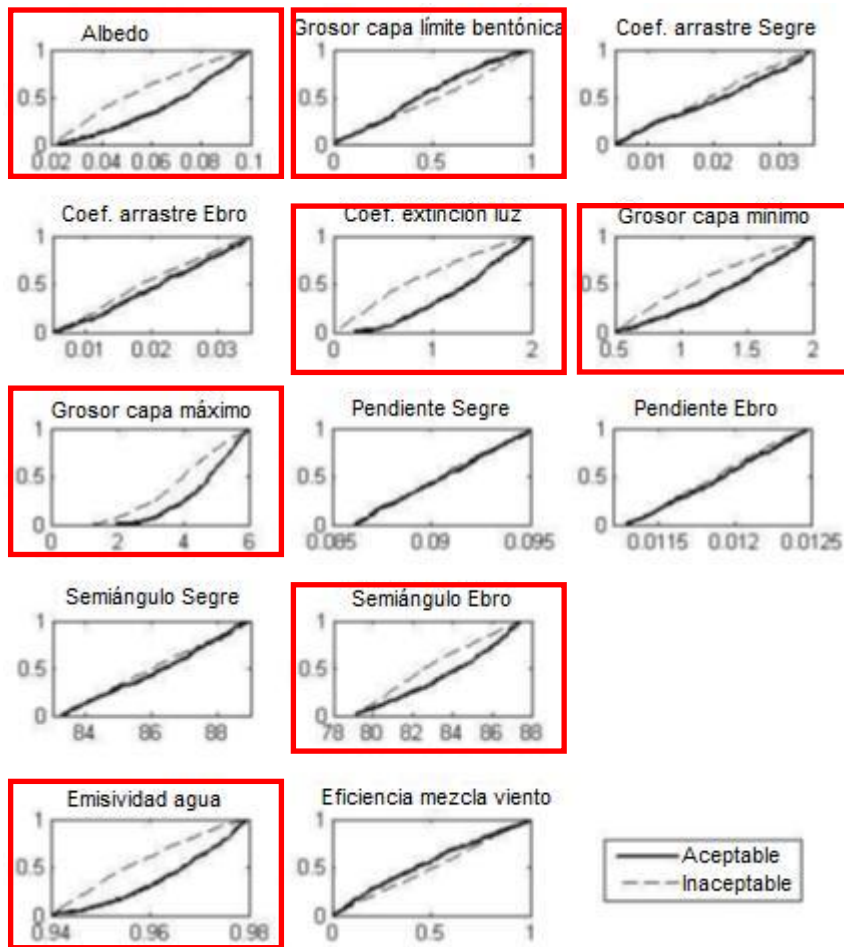


Figura 3 Funciones de distribución acumulada para las simulaciones aceptables e inaceptables, para cada parámetro. Los parámetros a los que el modelo es sensible se indican con rectángulos rojos.

### 3.1.3 Resultados de la calibración

De todas las simulaciones de Montecarlo realizadas variando el valor de los parámetros a los que el modelo es sensible, se escogieron las veinte con una mejor bondad de ajuste. En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros para la mejor simulación y el rango en que se encuentran los valores de los parámetros para las veinte mejores simulaciones.

Tabla 2 Valor de los parámetros para la mejor simulación y rango de valores de los parámetros para las 20 mejores simulaciones

Parámetro	Valores de los parámetros para la mejor simulación	Rango de los valores de los parámetros en las 20 mejores simulaciones		Unidades
		Límite inferior	Límite superior	
Albedo	0,0945	0,0759	0,0996	[-]
Grosor de la capa límite bentónica	0,1619	0,0089	0,6446	[m]
Coeficiente de extinción de la luz	0,6860	0,4993	1,5633	[m <sup>-1</sup> ]
Grosor de capa máximo	5,7214	3,5075	5,9661	[m]
Grosor de capa mínimo	1,8062	0,8335	1,9937	[m]
Semiángulo (Ebro)	87,0707	84,4713	87,4331	[°]
Emisividad del agua	0,9781	0,9654	0,9799	[-]
Eficiencia de la agitación por el viento	0,3097	0,0638	0,9723	[-]

Se utilizaron los valores de los parámetros de la mejor simulación como parámetros calibrados. Los resultados de esta simulación se comparó con la simulación realizada utilizando los valores calibrados por González (2007) (Figura 4). La nueva calibración proporciona unos resultados de mejor calidad, reduciéndose de forma importante las diferencias entre los valores medidos y simulados. Tal como muestra la Figura 4, en la simulación hecha utilizando la anterior calibración el calor absorbido por el agua era demasiado elevado, sobre todo en las capas superiores. En la nueva calibración, el albedo y la emisividad del agua reciben valores mayores, cosa que hace que no se absorba tanto calor y que los valores de temperatura del agua simulados sean más acordes con la realidad.

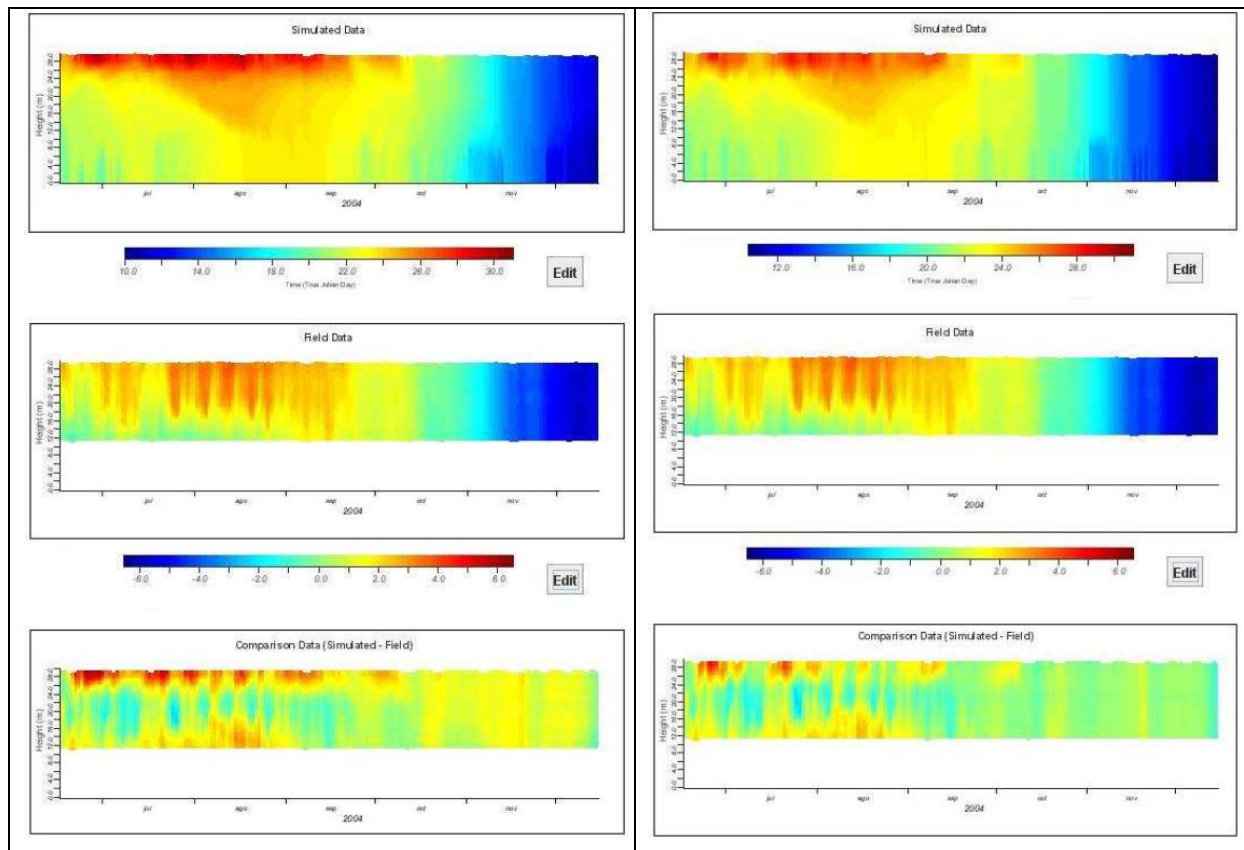


Figura 4 Comparación entre los resultados de la simulación realizada utilizando los valores calibrados por González (2007) (izquierda) y los valores calibrados en este estudio (derecha). En la parte superior de la figura se muestra la temperatura simulada, al centro la temperatura medida y en la parte inferior la diferencia entre valores medidos y simulados.

### 3.1.4 Resultados de la modelización

El modelo con la nueva calibración se utilizó para estudiar la circulación del agua en el embalse de Riba-roja durante el año 2005. En concordancia con los datos de campo, los resultados de la modelización muestran un comportamiento hidrodinámico complejo del embalse que depende de forma muy importante de las diferentes temperaturas de los dos principales afluentes del embalse: el Ebro y el Segre. Por lo general, el agua del afluente de mayor temperatura, y por tanto menor densidad, circula por la superficie: desde abril hasta septiembre el Segre circula por la superficie, mientras que desde septiembre hasta diciembre es el Ebro el que circula por la superficie. La excepción se da en invierno, en que el embalse está mezclado a causa de las bajas temperaturas, de los altos caudales y del caudal del Ebro, mucho mayor que el del Segre.



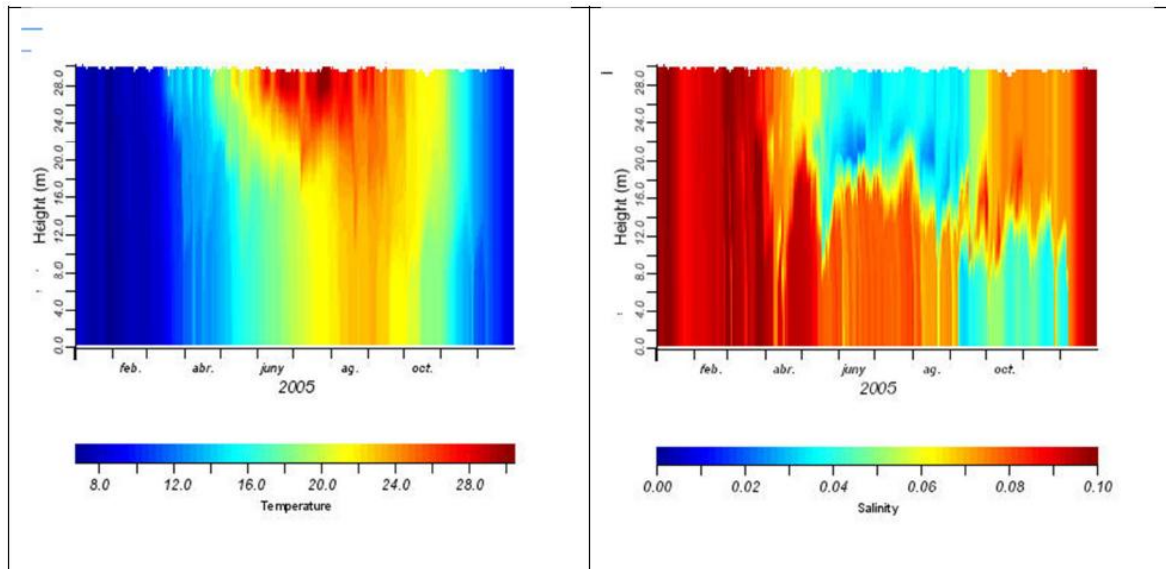


Figura 5 Resultados de la simulación con los valores de los parámetros calibrados en este estudio para el año 2005 (izquierda) y circulación del agua en el embalse (derecha). En la figura de la derecha, el agua del Ebro corresponde al color rojo (0.1 psu) y el agua del Segre al color azul (0.0 psu).

Una de las críticas que se pueden hacer a este trabajo es que en la simulación no se tiene en cuenta la influencia de los sólidos en suspensión, que hacen aumentar la densidad del agua, en el comportamiento hidrodinámico del embalse. Hay que decir, sin embargo, que durante una gran parte del año la concentración de sólidos en suspensión es demasiado baja para tener un efecto notable en la densidad del agua. De hecho, estos son sólo importantes en períodos de caudales elevados, cuando la turbulencia generada por los altos caudales es suficiente para mezclar toda la columna de agua. Por estas razones creemos que la concentración de sólidos en suspensión no afecta suficientemente al comportamiento hidrodinámico del embalse como para poner en duda los resultados obtenidos.

### 3.2 Conclusiones

El análisis de sensibilidad generalizado y la metodología GLUE de calibración, derivada del mismo, permiten determinar cuáles son los parámetros a los que el modelo es (más) sensible y calibrarlos de forma eficiente en modelos con un gran número de parámetros, como el modelo DYRESM. Al aplicarlo al embalse de Riba-roja este modelo es sensible al intercambio de calor entre el agua y la atmósfera a través del albedo y emisividad del agua, a parámetros relacionados con los procesos de mezcla (eficiencia de la agitación por el viento) y de distribución del calor en la columna de agua (coeficiente de extinción de la luz), a parámetros del modelo numérico (grosor de capa máximo y mínimo) y a algún aspecto de la morfología del embalse (semiángulo del Ebro). El modelo calibrado mediante la metodología GLUE mejora de forma importante los resultados de la modelación.

Los resultados de la modelación del año 2005 muestran un comportamiento complejo del embalse que depende principalmente de las características del agua de los afluentes del embalse, con un ciclo anual dividido en tres períodos: un período de mezcla entre diciembre y marzo, otro período en que el agua del Segre circula por la superficie entre abril y septiembre, y otro período en que el agua del Ebro circula por la superficie entre septiembre y noviembre.

## 4 Referencias

ANTENUCCI, J., IMERITO, A. (2000) *Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM. Science Manual*. Centre for Water Research, The University of Western Australia.



- BEVEN, K., FREER, J. (2001) Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249, 11-29.
- BEVEN, K. (2006) A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320, 18-36.
- GONZÁLEZ, O. (2007) *Modelització de la hidrodinàmica d'un embassament. Aplicació al cas de l'embassament de Riba-roja al riu Ebre*. Tesina de especialidad ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 82 p.
- GRUP DE NATURA FREIXE (2003) *Localització i avaluació de l'extensió de la invasió biològica per musclo zebra (Dreysena polymorpha) a l'Ebre l'any 2002*. Direcció General de Boscos i Biodiversitat. 56 p.
- HORNUNG, R. (2002) *Numerical modelling of stratification in Lake Constance with the 1-D hydrodynamic model DYRESM*. Tesis de Máster, Universität Stuttgart, Stuttgart. 101 p.
- KERACHIAN, R., KARAMOUZ, M. (2006) Optimal reservoir operation considering the water quality issues: A stochastic conflict resolution approach. *Water Resources Research*, 42, W12401.
- MARCÉ, R., MORENO-OSTOS, E., GARCÍA-BARCINA, J. M., ARMENGOL, J. (2010) Tailoring dam structures to water quality predictions in new reservoir projects: Assisting decision-making using numerical modeling. *Journal of Environmental Management*, 91 (6), 1255-1267.
- RIGOSI, A. (2006) *A physical-ecological model of Lake Beznar ecosystem. Propagation of uncertainty from physical to population dynamic predictions*. Memoria del DEA, Universidad de Granada, Granada. 89 p.
- RUEDA, F., MORENO-OSTOS, E., ARMENGOL, J. (2006) The residence time of river water in reservoirs. *Ecological Modelling*, 191, 260-274.
- SALGADO, A. (2008) *Optimització de paràmetres del model hidrodinàmic de l'embassament de Riba-roja al riu Ebre*. Tesina de especialidad ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya. 111 p.