

Aplicabilidad de CE-QUAL-W2 para la simulación 2D (longitudinal y vertical) de la evolución de la temperatura en embalses. Casos de Sau (río Ter) y Ribarroja (río Ebro).

Marina Arbat Bofill¹

Ingeniera Geóloga. Estudiante de doctorado.

marina.arbat@upc.edu

Martí Sánchez Juny¹

Doctor Ingeniero de Caminos. Profesor Titular.

marti.sanchez@upc.edu

Ernest Bladé Castellet¹

Doctor Ingeniero de Caminos. Profesor Colaborador

ernest.blade@upc.edu

Josep Dolz Ripollés¹

Doctor Ingeniero de Caminos. Catedrático de Universidad

j.dolz@upc.edu

¹Instituto mixto FLUMEN UPC. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 1-3 D-1, 08034, Barcelona.

1. Resumen

En esta comunicación se presenta el modelo bidimensional CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) desarrollado por los profesores Tom Cole y Scott Wells del *Water Research Group* de la *Portland State University* (<http://www.cee.pdx.edu/w2/>), sus capacidades y aplicaciones así como una breve descripción de sus aplicaciones.

Los modelos de hidrodinámica de embalses son una buena herramienta para conocer el funcionamiento y la respuesta de un determinado embalse en función de las características morfológicas, el régimen de entradas y salidas de caudal o frente a las condiciones meteorológicas (radiación solar, lluvia, viento,...). Cuando se conoce bien la hidrodinámica y la evolución térmica de cierto embalse se pueden estudiar (y también modelar) los procesos químicos y biológicos que tienen lugar en el mismo.

Con tal de poner de manifiesto las capacidades en modelación de temperatura (a lo largo de la longitud y la profundidad) que ofrece el modelo CE-QUAL-W2, pero también mostrar algunas de sus debilidades se presentan dos casos de estudio: el embalse de Sau (río Ter) y el embalse de Ribarroja (río Ebro). Los dos ejemplos se centran en la evolución del perfil vertical de la temperatura a lo largo del tiempo y a lo largo de la longitud del embalse. Flumen lleva estudiando los dos embalses citados desde hace más de 20 años; por lo que se dispone de una serie de datos extensa y de gran calidad.

Se presentan dos casos de estudio, los embalses de Sau (río Ter) y Ribarroja (río Ebro) para los que se han realizado simulaciones numéricas mediante el modelo CE-QUAL-W2 con tal de estudiar la evolución térmica a lo largo del tiempo, centradas principalmente en el proceso de estratificación gradual (desde principios de primavera), llegando a la estratificación más estable (verano) hasta la rotura de la termoclina (en otoño).

2. Introducción

Los modelos numéricos centrados en la hidrodinámica de embalses son una herramienta útil tanto para el estudio del comportamiento de los embalses como para las predicciones y la gestión sostenible de los mismos. Predecir el comportamiento de un embalse en base a distintos escenarios vendrá condicionado por la calidad de los datos disponibles y la precisión del esquema numérico.

La hidrodinámica de una masa de agua estratificada (velocidad, temperatura y densidad) es un factor determinante en su comportamiento posterior como ecosistema. Los modelos utilizados en el campo de estudio hidrodinámico de los flujos estratificados pueden ser: de una sola dimensión (la predicción de la distribución de la temperatura, la salinidad y la densidad en un perfil vertical), los modelos en dos dimensiones (principalmente las dimensiones longitudinal y vertical para embalses) o modelos en tres dimensiones (aunque aumenta considerablemente el tiempo de cálculo y la cantidad de información necesaria para conseguir resultados realistas).

2.1. Antecedentes

Esta comunicación y la presentación asociada muestra algunos de los resultados obtenidos en la modelización de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja mediante el modelo bidimensional CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008).

El Instituto de investigación Flumen lleva estudiando diferentes embalses españoles desde hace unos veinte años, centrándose en los procesos físico-químicos que tienen lugar en los mismos (en especial la evolución de caudales y temperatura). Se han llevado a cabo gran cantidad de informes y estudios de calidad del agua (J. Armengol et al., 2005, 1999; L. Armengol, 2003; Prats-Rodríguez, J. Armengol, Rafael Marcé, Sánchez-Juny, & Dolz, 2011); también se han realizado (y se están realizando) varias tesis doctorales relacionadas con la hidrodinámica de embalses (Val, 2003).

Más más recientemente se han empezado a simular los procesos que tienen lugar en los mismos, centrados básicamente en la evolución térmica (basada en datos de campo y estaciones meteorológicas) de los embalses. Los estudios realizados se han realizado mayormente para los embalses del tramo final del río Ebro (Prats-Rodríguez, Val Segura, J. Armengol, & Dolz Ripollés, 2003; Prats-Rodríguez, Val, J. Armengol, & Dolz, 2010) y el embalse de Sau (Arbat, Sánchez-Juny, & Dolz Ripollés, 2011).

En respecto a la evolución térmica de embalses mediante modelos numéricos, el Instituto de Investigación Flumen realizó los primeros estudios mediante el modelo unidimensional DYRESM (Antenucci & Imerito, 2003). Se realizó un estudio numérico-experimental del embalse de Ribarroja de Ebro ero se obtuvieron errores de hasta 4° en la superficie del agua cosa que llevó a proponer un análisis de sensibilidad exhaustivo para buscar la causa del error (Salgado, 2008). Se pudo observar que el error era básicamente debido a varios factores pero que el embalse de Ribarroja era demasiado variable en su longitud para ser estudiado unidimensionalmente (Arbat, González, et al., 2009). El año siguiente se propuso llevar a cabo simulaciones mediante el reconocido modelo CE-QUAL-W2, llegando a obtener perfiles longitudinales de la evolución térmica del agua (Arbat, 2008a; Arbat, Sánchez-Juny, Bladé, & Dolz, 2009).

Cabe destacar que también se han realizado estudios de la evolución batimétrica (Arbat, K. De Pourcq, & Dolz, 2009; K. De Pourcq, Arbat, & Dolz, 2007) y sedimentaria de los embalses, tanto trabado de campo como simulaciones numéricas (Arbat, Bladé, & Dolz, 2010; Arbat, Bladé, Sánchez-Juny, & Dolz, 2010; Arbat, Bladé, Sánchez-Juny, Polanco, & Dolz, 2008). Cosa que permite conocer la batimetría y su evolución con gran detalle y resolución (Arbat et al., 2010).

2.2. Objetivos

Los principales objetivos planteados en el presente estudio son:

- Elaboración de los datos de entrada, ficheros de batimetría y control.
- Aplicar el modelo CE-QUAL-W2 a los casos particulares de Ribarroja (río Ebro) y Sau (río Ter) para simular su hidrodinámica, especialmente en el periodo de estratificación (verano) puesto que es cuando hay más variabilidad de calidad del agua.
- Analizar la influencia de la calidad de los datos mediante un análisis de sensibilidad y ajuste de parámetros.
- Estudiar y comprobar las aptitudes y las limitaciones del modelo CE-QUAL-W2 para los casos de estudio citados (así como para embalses de características similares).

3. Metodología

3.1. Datos de entrada

Los datos obtenidos de las campañas de campo suelen ser aceptablemente buenos aunque la mayoría de veces deben ser tratados y repasados; se dispone de varias herramientas para depurar errores (ya sean de medida, del sensor, o debidos al propio ruido de la instrumentación). En algunos casos de vacío (por fallo de la instrumentación, periodos de no adquisición,...), series con errores de medida, o ruido se han realizado estimaciones o promediado de los mismos. Las series finales (depuradas) se representan gráficamente. Finalmente, se almacenan en una base de datos.

El análisis y tratamiento de datos es una tarea exhaustiva y que requiere bastante dedicación y suele ser una tarea también costosa de tiempo. Es necesario no perder de vista la gran importancia de esta información experimental y de campo (obtenida *in situ*); por lo que estos datos tienen un gran valor.

A lo largo de la vida del Instituto Flumen se han desarrollado varias herramientas y métodos para el almacenamiento correcto y ordenado de los datos; puesto que se trabaja y se almacena gran cantidad de datos.

Estos datos han sido de gran utilidad para conocer el comportamiento del embalse de Ribarroja de Ebro y de Sau, sus periodos concretos de estratificación y rotura de termoclina; sus patrones de circulación, las dinámicas sedimentarias y erosivas,... En un futuro se pretende que todos estos procesos se simulen mediante modelos numéricos y se dispondrá de gran cantidad de datos reales (de alta precisión y gran detalle). Estos datos podrán ser utilizados tanto como inputs (entradas de datos) del propio programa, o bien, para comparaciones entre datos reales y los obtenidos mediante el modelo numérico en cuestión.

3.2. El modelo CE-QUAL-W2

CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) es un modelo de calidad del agua en dos dimensiones (longitudinal y vertical) que simula la evolución hidrodinámica. Debido a que el modelo supone homogeneidad lateral, es adecuado para masas de agua relativamente largas y estrechas que tienen gradientes verticales y longitudinales de la calidad del agua.

El modelo se ha aplicado a los ríos, lagos, embalses, estuarios, y combinaciones de ellos. Además de la hidrodinámica básica (velocidad, densidad y temperatura) también permite simular más de 60 parámetros bioquímicos de calidad del agua (si se dispone de los datos de entrada correspondientes) como por ejemplo: oxígeno disuelto, salinidad, concentraciones de elementos traza, *blooms* de algas, macrófitos,...

El modelo permite realizar simulaciones con pequeños incrementos de tiempo hasta a largo plazo (en función de los datos de entrada y de lo que se quiera estudiar). El esquema numérico se basa en la discretización mediante elementos finitos; la lámina libre se resuelve de forma implícita. Las ecuaciones que resuelve el modelo CE-QUAL-W2 se resumen en la Figura 1.

| Equation | Governing equation assuming no channel slope and no momentum conservation at branch intersections | Governing equation assuming an arbitrary channel slope and conservation of momentum at branch intersections |
|--------------|--|---|
| x-momentum | $\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} =$ $gB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z}$ | $\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha$ $+ g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz +$ $\frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x$ |
| z-momentum | $0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$ | $0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$ |
| continuity | $\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$ | $\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$ |
| state | $\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ss})$ | $\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ss})$ |
| free surface | $B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$ | $B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$ |
| | U = horizontal velocity, $m s^{-1}$ τ_x = x-direction lateral average shear stress W = vertical velocity, $m s^{-1}$ τ_y = y-direction lateral average shear stress B = channel width ρ = density P = pressure η = water surface | |

Figura 1. Ecuaciones de gobierno utilizadas para el modelo CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008).

El modelo ofrece tres esquemas numéricos diferentes para la diferenciación y la resolución tanto del transporte de calor como de las variables. El algoritmo más utilizado y que suele proporcionar mejores resultados es el “QUICKEST”, que reduce la difusión numérica, pero en zonas de altos gradientes genera “undershoots” que pueden producir pequeñas concentraciones negativas, cosa que se debe tener en cuenta.

La disponibilidad de datos de entrada no es una limitación del modelo pero sin embargo suele ser el factor limitante en la aplicación del modelo a casos reales.

3.3. Modelación mediante CE-QUAL-W2

Para la modelización hidrodinámica de un embalse se requiere una gran cantidad de datos meteorológicos, caudales y de temperaturas para el periodo de estudio. En estos casos, debido a la calidad y cantidad de las frecuencias de las series temporales promediado diariamente (aunque sería mucho mejor tener datos horarios).

Para determinar el comportamiento térmico del embalse es necesaria información del sistema al completo, las series de datos resultaron incompletas en algunos periodos. Para completar las series se aplicaron modelos estocásticos, obteniendo series completas.

Para una correcta simulación bidimensional fue importante tener una buena batimetría detallada de la morfología del vaso (Dolz et al., 2009).

También fue necesario especificar las condiciones iniciales para los ficheros de batimetría y control, los caudales y temperaturas de entrada y salida, las condiciones meteorológicas para el periodo de estudio además de algunos parámetros y constantes referentes al modelo (Arbat, 2008b; Arbat et al., 2011; Arbat, Sánchez-Juny, et al., 2009).

3.4. Calibración

Se realizó un proceso iterativo para ajustar los valores obtenidos mediante CE-QUAL-W2 con los datos medidos en campo.

En cuanto a la calibración de la variable de estudio (la temperatura), se realizó un estudio de sensibilidad de los parámetros que podían influir en la predicción de la temperatura: fricción del fondo, coeficiente de protección del viento, la temperatura del sedimento del fondo, el coeficiente de intercambio de calor entre el sedimento del fondo y el agua i el coeficiente de extinción de la luz. Para lo sparámetros de lo squ eno se disponían datos de

campo o valores se decidió utilizar una estimación inicial (seguida de un análisis de sensibilidad), en otros casos, se tomaron los valores que aconseja el manual del modelo CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008) por defecto.

4. Casos de Estudio

Este documento muestra algunos de los resultados obtenidos en la modelización de la hidrodinámica de los embalses de Ribarroja (río Ebro) y Sau (río Ter) mediante el modelo bidimensional CE-QUAL-W2 (Cole & Wells, 2008).

4.1. Caso de estudio 1: Embalse de Sau (río Ter)

El embalse de Sau, en el término municipal de Vilanova de Sau, al pie del macizo de las Guillerries, perteneciente a la cuenca del río Ter, forma parte de un sistema de tres pantanos (junto a los de Susqueda y Pasteral) que une las comarcas de Osona y de la Selva (Cataluña, España).

Los miembros de Flumen tienen experiencia en estudio del entorno del embalse de Sau. Los primeros estudios que miembros de Flumen llevaron a cabo en este embalse se remontan al año 1964 y han continuado hasta la actualidad. Se disponen, de esta manera de una cantidad importante de series históricas, tanto hidráulicas, como meteorológicas, como de calidad del agua, imprescindibles para abordar la modelización numérica del comportamiento hidrodinámico del embalse. El embalse de Sau también ha sido objeto de gran cantidad de estudios, informes y publicaciones en las que los miembros de Flumen han participado activamente (J. Armengol et al., 2003, 1999; L. Armengol, 2003).

4.2. Caso de estudio 2: Embalse de Ribarroja (río Ebro)

El embalse de Ribarroja se encuentra en el río Ebro, en la provincia de Tarragona (Cataluña, España). Además de los caudales del río Ebro recibe la aportación de dos afluentes importantes: el Segre y el Cinca, que confluyen antes de entrar al embalse. Inmediatamente aguas arriba se encuentra el embalse de Mequinenza y aguas abajo el embalse de Flix.

Se utilizaron los datos de entrada y los resultados obtenidos que muestran el comportamiento del embalse de Ribarroja recopilados por miembros de Flumen. Se ha simulado el periodo de estudio correspondiente a los años 1998 y 1999 (recopilados, muestreados y tratados por Rafael Val en su tesis doctoral (Val, 2003; Val, Niñerola, J. Armengol, & Dolz, 2003) y siguiendo la misma metodología utilizada en el estudio del periodo de estratificación 2004 para el mismo embalse (Arbat, 2008b; Arbat, Sánchez-Juny, et al., 2009).

5. Resultados

5.1. Caso de estudio 1: Embalse de Sau (río Ter)

En el ejemplo presentado se muestran resultados con los datos obtenidos a partir del régimen de caudales y condiciones meteorológicas del año 2009 (un año poco problemático en cuanto a situaciones extremas).

Debido a la calidad de los datos y los periodos de adquisición disponibles se trabajó a escala diaria, por lo tanto, las posibles variaciones horarias (especialmente día/noche) que se producen en cualquier masa de agua, en función de la incidencia solar, no se analizan en detalle (aunque el modelo CE-QUAL-W2 sí los tiene en cuenta en la simulación).

Inicialmente se analizó un escenario con los datos experimentales citados en el apartado anterior. A continuación, teniendo en cuenta la incertidumbre en la determinación de algunos parámetros de ajuste, se

decidió dejar los valores desconocidos o no medidos según los valores que recomendaba el manual del programa.

En simulaciones posteriores se han ido realizando variaciones de estos parámetros para ver el efecto que tenía cada uno de estos parámetros en la simulación (análisis de sensibilidad). Se ha hecho un análisis de sensibilidad del modelo a ciertos parámetros: coeficiente de sombra, coeficiente de protección del viento, coeficiente de Manning, temperatura del sedimento del fondo,...

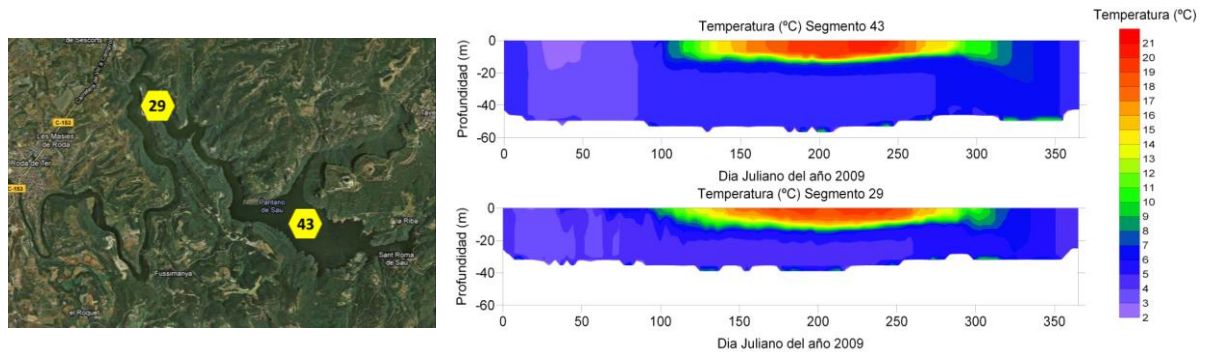


Figura 2. Situación y evolución anual de los perfiles verticales de temperatura en dos puntos del embalse de Sau (río Ter).

5.2. Caso de estudio 2: Embalse de Ribarroja (río Ebro)

Para el caso del embalse de Ribarroja (periodo de estudio es de los años 1998 y 1999) el modelo CE-QUAL-W2 representa correctamente las tendencias generales de los perfiles; así como la evolución de la termoclina y su rotura en otoño pero hay algunas diferencias y problemas con la simulación del tramo de cola del embalse.

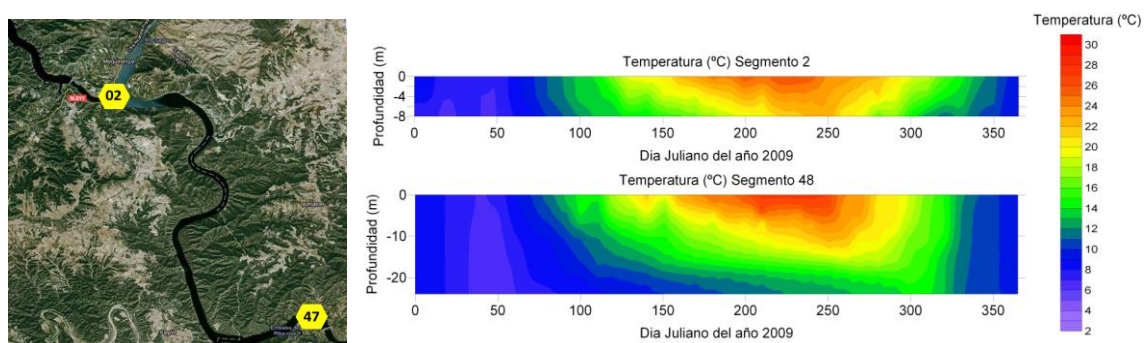


Figura 3. Localización y evolución anual de dos perfiles verticales de temperatura en el embalse de Ribarroja (río Ebro).

Se observó que inicialmente las predicciones tenían una tendencia parecida a la realidad, pero era necesario un ajuste de los parámetros de calibración citados, aunque finalmente los perfiles no se ajustan del todo bien en toda la columna de agua.

El viento siempre es el mayor factor gobernante en la simulación hidrodinámica (especialmente afectando a las capas más superficiales), tanto en módulo velocidad como en dirección, en este caso es importante tener en cuenta si el promedio diario se asimila a los datos horarios, puesto que en un mismo día puede variar mucho la dirección del viento en la zona del bajo Ebro.

La radiación solar controla directamente el calentamiento de toda la columna de agua, todos los cálculos realizados con CE-QUAL-W2 en este trabajo utilizan ecuaciones con agua limpia, sin constituyentes, cosa que puede influir notablemente la distribución de temperatura de todo el perfil. Además de la evolución de la temperatura también se obtuvieron resultados de variaciones de densidad, de velocidad vertical i longitudinal a lo largo del embalse.

A mediados de junio el embalse ya se encuentra estratificado; en la modelación presentada viene dado por las condiciones iniciales. Las mínimas temperaturas son del orden de 15 a 16°C, mientras que las máximas en superficie son del orden de los 23°C. En los primeros segmentos la estratificación es más marcada, debido a las entradas de caudal aguas arriba. Las mínimas temperaturas son del orden de los 16°C y las máximas, localizadas en la superficie, varía entre 24.5 y 25°C.

A mediados de julio se ha calentado todo el embalse en general aunque comparando con el 30 de junio parece ser que en superficie hay menos temperatura, esto puede ser debido a la meteorología impuesta para el día de cálculo o los días previos.

A finales de julio la estratificación es notable, la temperatura mínima es de 19.5°C aproximadamente; mientras que la máxima, capa superficial, es de 29°C. Se puede destacar que la zona de los primeros segmentos es la que tiene el epilímnion menos profundo. También cabe comentar que la estratificación es más marcada en los segmentos centrales y en cambio, cerca de la presa la variación es más gradual.

En agosto las temperaturas máximas, en superficie, son del orden de los 27-28°C, mientras que las mínimas son de unos 23°C, y se sitúan en las partes inferiores de los primeros segmentos. Parece ser que las aguas más frías se mueven alrededor de los 10 metros más profundos de cada segmento; el epilímnion tiene cierta inclinación y su máxima potencia cerca de la presa. La termoclina también está inclinada y es más clara en los segmentos intermedios mientras que el cambio cerca de la presa es más gradual.

A principios de septiembre la diferencia de temperaturas entre aguas frías y calientes es menor. La entrada del Segre junto con el Cinca sigue siendo un poco más fría que las entradas aguas arriba. A mediados de septiembre se empieza a notar el enfriamiento de las aguas de entrada.

A finales de septiembre se ha roto la estratificación del embalse, analizando la situación completa se rompe aproximadamente hacia el 20 de Septiembre. Aun así, la parte inferior del embalse aún conserva cierta corriente un poco más fría que la de aguas superiores. En Octubre se puede observar como el embalse se encuentra totalmente mezclado y la temperatura va disminuyendo gradualmente hasta el final de la simulación, hasta llegar a los 7-8°C en Diciembre.

Cabe destacar que la simulación bidimensional (en la longitud y la vertical) se ve limitada claramente en la zona de la confluencia Ebro-Segre, en la cola del embalse. Esto se debe a la clara tridimensionalidad de la circulación la zona y a la marcada diferencia de propiedades (de temperatura, de régimen de caudales y de concentración de sedimento en suspensión) de los dos flujos de agua.

6. Conclusiones

6.1. Caso de estudio 1: Embalse de Sau (río Ter)

Los parámetros más influyentes son el hecho de tener en cuenta o no la interpolación lineal entre los datos de entrada y el valor que se da a los coeficientes de sombra y de protección del viento, en cambio variaciones de los parámetros como tener en cuenta el balance de masa, la evaporación o considerar diferentes números de Manning por la fricción del fondo parece ser que no afectan demasiado a los resultados.

Aunque el modelo requiere cierta calibración de algunos parámetros difíciles de medir en campo (especialmente de los coeficientes de protección del viento y de sombra) simula razonablemente bien la evolución térmica de los distintos puntos del embalse de Sau. Para la geometría y las características del embalse Sau la simulación bidimensional mediante CE-QUAL-W2 parece ser suficientemente correcta y aplicable.

6.2. Caso de estudio 2: Embalse de Ribarroja (río Ebro)

Así pues, un modelo en dos dimensiones como el CE-QUAL-W2, aunque proporciona buenos resultados a nivel general, quizá no es el más adecuado para simular la hidrodinámica de la confluencia que tiene lugar la cola del embalse. Finalmente cabe destacar que el embalse de Ribarroja de Ebro es un caso muy particular, ya que la estratificación que presenta viene determinada por la marcada diferencia de temperaturas entre los dos flujos de entrada (Ebro saliendo del embalse Mequinenza y río Segre unido aguas arriba con el Cinca).

Los promedios diarios simulaban aceptablemente la tendencia hidrodinámica del embalse comparando los perfiles obtenidos de la simulación mediante CE-QUAL-W2 con los medidos en campañas de campo. Aun así, se tendría que estudiar un periodo del que se conociera la evolución continua en distintos puntos del embalse y

no sólo los datos en un perfil vertical puntual (por este motivo se propuso hacer una campaña de campo mucho más exhaustiva para campañas posteriores).

Se puede observar claramente la diferencia evolutiva a lo largo de la longitud del embalse debida a la complicada geometría del mismo. Es importante destacar las variaciones del tramo superior, muy dependientes de la diferencia entre los caudales y las temperaturas de los flujos de entrada del Segre y el Ebro.

Los segmentos tienen una longitud del orden de 100 a 200 metros mientras que las capas se discretizaron verticalmente en capas de un metro, se puede comprobar que hay mucha más variación vertical que longitudinal, por lo que se cree que esta discretización del embalse en 28 segmentos es suficiente para una buena modelación de la hidrodinámica.

6.3. Comentarios finales

Históricamente (y también en la actualidad) la mayoría de modelos de hidrodinámica de embalses utilizan modelos bidimensionales para el cálculo de la evolución hidrodinámica y térmica de los mismos. Modelos en los que las ecuaciones (que rigen en 3D en la naturaleza) se promedian en la dimensión vertical (para estudios de lagos someros, puesto que las variaciones verticales suelen ser importantes) o, más típicamente, o de la dimensión lateral (más típico para embalses largos y estrechos con variaciones hidrodinámicas y térmicas importantes en la vertical).

Los modelos 2D suelen ser más rápidos de programar, no se necesita tanta información (especialmente batimétrica) y suelen funcionar más rápidamente en cuanto a tiempo de cálculo. Los estudios que utilizan los modelos 2D también suelen ser más rápidos que los 3D debido a que se evita la necesidad de parametrizar y calibrar bien los procesos de mezcla vertical/horizontal. La parametrización de la mezcla/difusión vertical, en particular, es uno de los problemas más difíciles en la aplicación de modelos en 3D a las corrientes de densidad estratificada.

Aunque los modelos 2-D son útiles para muchas aplicaciones, por lo general requieren limitaciones bastante restrictivas: por ejemplo si se promedia en la vertical se pueden calcular gradientes de densidad/temperatura en el plano pero se desestima el perfil de densidad del embalse/lago... cosa que ya no tiene sentido en masas de agua estratificadas como las del presente estudio. Las simplificaciones que se realizan para pasar un modelo a 2D se deben tener en cuenta puesto que pueden causar errores significativos en las predicciones del modelo (a veces difíciles de detectar). Por este motivo, los modelos promediados en la vertical se deben evitar para el estudio de la evolución térmica de un embalse (aunque se trate de masas poco estratificadas o de poca profundidad). Un modelo promediado en el ancho (considerando homogeneidad en toda la sección transversal) tiene sentido en lagos/embalses que tengan las longitudes transversales mucho superiores al ancho (pero no funcionaría bien para lagos con gradientes importantes de hidrodinámica, temperatura o densidad en la longitud y el ancho). El efecto de la topografía circundante también puede influir de manera significativa en los cálculos direccionales; en muchos casos la dimensión longitudinal se considera en la dirección del flujo del embalse (por lo que si el embalse de estudio cambia de dirección no se contempla en el modelo). Esto puede afectar claramente a los resultados (dependiendo de la sombra o la dirección del viento por ejemplo) que influye a todos los tramos de cálculo por igual. Además, para modelos numéricos de embalses como los que se presentan en este trabajo es altamente importante tener en cuenta la fuerza de fricción del viento (afectando claramente a la circulación de la masa superficial de agua), por lo que es altamente importante conocer la velocidad y las direcciones que puede tomar el mismo.

Con todo lo mencionado y debido a las variaciones significativas tanto en la hidrodinámica como en la temperatura se producen en las tres dimensiones espaciales en la mayoría de los lagos/embalses, los modelos en 3D son necesarios para modelar la evolución de los mismos correctamente.

6.4. Futuros trabajos

Analizar si realmente se puede mejorar la solución obtenida mediante análisis de sensibilidad de los parámetros es un trabajo arduo que necesita tiempo y paciencia. En modelos numéricos como el CE-QUAL-W2 es altamente importante conocer la importancia de cada parámetro en la solución y el rango de influencia que puede tener en los resultados o la afectación a otros parámetros. Es difícil controlar todos los parámetros y buscar una solución óptima.

Se podría proponer, por ejemplo, hacer un gran número de casos de estudio de las variables que puedan tener más influencia, seleccionar un número acotado de parámetros y un rango de valores, y analizar-los mediante simulaciones de Montecarlo como en el caso del análisis de DYRESM (Arbat, González, et al., 2009; Salgado, 2008). Aun así también se debe sopesar el costo tanto de tiempo como de preparación de datos y de cálculo; y decidir si realmente vale la pena o los resultados obtenidos se pueden considerar suficientemente buenos para los casos de estudio realizados.

También se propone realizar simulaciones mediante modelos numéricos en 3 dimensiones, que aunque requieren más datos de entrada (batimetría completa, 3 dimensiones en las variables vectoriales,...) y más coste computacional, con tal de simular los procesos que tienen lugar en 3D sin necesidad de simplificaciones.

7. Agradecimientos

Agradecimientos a los compañeros del Instituto Flumen, a ENDESA, a Aigües Ter-Llobregat (ATLL), Agència Catalana de l'Aigua (ACA) y a la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Mencionar que parte del trabajo realizado se ha financiado con la beca AGAUR FI-B de la Generalitat de Catalunya.

Referencias bibliográficas

- Antenucci, J. P., & Imerito, A. (2003). *The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM User Manual DYRESM User Manual Contents*. Water Research. Perth.
- Arbat, M. (2008a). Datos y Resultados de la modelización bidimensional de Riba-roja con CE-QUAL-W2. Barcelona.
- Arbat, M. (2008b). *Modelación bidimensional del embalse de Ribarroja con CE-QUAL-W2* (p. 65). Barcelona.
- Arbat, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2010). Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro. *II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation*.
- Arbat, M., Bladé, E., Pourcq, K. D., Dolz, J., López, P., Armengol, J., & Jaime, F. (2010). Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro). *II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation*.
- Arbat, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2010). Módulo de transporte de sedimentos en suspensión en el modelo IBER: Calibración y aplicación para el tercio superior del embalse de Ribarroja de Ebro y la confluencia con el río Segre en el entorno de Mequinenza. In F. J. Vallés & I. Andrés (Eds.), *Actividad experimental de I+D+i en ingeniería hidráulica en España. Seminario 2010* (1st ed., p. 50). Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
- Arbat, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Polanco, L., & Dolz, J. (2008). *Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro* (Vol. 1, pp. 2-2).
- Arbat, M., González, Ò., Salgado, A., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2009). Modelación unidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con DYRESM. *Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid*.
- Arbat, M., De Pourcq, K., & Dolz, J. (2009). *Batimetría 2008. Documento interno Flumen*. (p. 32). Barcelona.
- Arbat, M., Sánchez-Juny, M., & Dolz Ripollés, J. (2011). *Estudi en model numèric de la hidrodinàmica de Sau*. Barcelona.

- Arbat, M., Sánchez-Juny, M., Bladé, E., & Dolz, J. (2009). Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2. *Jornadas de Ingeniería del Agua, Madrid, 1, 9*.
- Armengol, J., Caputo, L., Comerma, M., Feijoó, C., García, J. C., Marcé, R., Navarro, E., et al. (2003). Sau reservoir's light climate: relationships between Secchi depth and light extinction coefficient. *Limnetica*, 22(1-2), 195-210.
- Armengol, J., Comerma, M., García, J. C., Romero, María, Rodríguez, J. J., Valero, F., & Vidal, Antoni. (2005). *Quaderns ATLL - Contribució al coneixement de l'ecologia aquàtica de l'embassament de Sau (evolució de l'embassament al 1999)* (p. 98).
- Armengol, J., García, J. C., Comerma, M., Romero, M., Dolz, J., Roura, M., Han, B. H., et al. (1999). Longitudinal processes in canyon type reservoirs: The case of Sau (N.E. Spain). *Theoretical Reservoir Ecology and its Applications*, 313-345.
- Armengol, L. (2003). *Balanç tèrmic de l'embassament de Sau: Una aproximació basada en dades meteorològiques rutinàries*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Cole, T., & Wells, S. A. (2008). *CE-QUAL-W2 : A Two-Dimensional , Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6 User Manual*.
- Dolz, J., Armengol, J., Roura, M., De Pourcq, K., Arbat, M., & López, P. (2009). *Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja*. Barcelona.
- De Pourcq, K., Arbat, M., & Dolz, J. (2007). *Batimetría 2007. Documento interno Flumen*. Barcelona.
- Prats-Rodríguez, J., Armengol, J., Marcé, Rafael, Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2011). Dams and Reservoirs in the Lower Ebro River and Its Effects on the River Thermal Cycle. doi:10.1007/698
- Prats-Rodríguez, J., Val Segura, R., Armengol, J., & Dolz Ripollés, J. (2003). Alteracions produïdes pels embassaments sobre el cicle diari de temperatures del curs baix del riu Ebre.
- Prats-Rodríguez, J., Val, R., Armengol, J., & Dolz, J. (2010). Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors. *Journal of Hydrology*, 387(1-2), 105-118. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.002
- Salgado, A. (2008). *Optimizació de paràmetres del model hidrodinàmic del embalse de Ribarroja en el embalse de Ribarroja en el riu Ebro*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Val, R. (2003). *Incidenca de los embalses en el comportamiento térmico del río. Caso del sistema de embalses Mequinenza - Ribarroja - Flix en el río Ebro*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Val, R., Niñerola, D., Armengol, J., & Dolz, J. (2003). Incidenca de los embalses en el régimen térmico del río . El caso del tramo final del río Ebro. *Limnetica*, 22(1-2), 85-92.